

文章编号: 1000-0550(2020)01-0001-29

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.116

非常规油气沉积学: 内涵与展望

邱振^{1,2}, 邹才能^{1,2,3}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007

3. 国家能源致密油气研发中心, 北京 100083

摘要 随着非常规油气资源工业化勘探开发的快速发展, 非常规油气地质学理论体系逐步建立, 迫切需要创新构建非常规油气沉积学理论。通过简要概述非常规油气沉积学的基本内涵, 提出“非常规油气沉积学”的概念, 综述我国四川盆地页岩气、鄂尔多斯盆地致密油与页岩油等典型非常规油气层系沉积学研究进展, 并展望非常规油气沉积学研究所面临的关键科学问题与挑战。研究指出非常规油气资源沉积富集与重大地质环境突变密切相关, 是全球性或区域性构造与海(湖)平面升降、火山活动、气候突变、水体缺氧、生物灭绝与辐射、重力流等多种地质事件沉积耦合的结果。未来需要从地球系统科学出发, 采用“非常规思想”, 以地质事件分析思维深入开展非常规油气沉积学研究, 为寻找非常规油气资源发挥重要作用。

关键词 沉积耦合; 事件沉积; 地质事件; 页岩油气; 致密油气; 甜点区(段)

第一作者简介 邱振, 男, 1984年出生, 高级工程师, 非常规油气沉积学, E-mail: qiuuzhen316@163.com

通信作者 邹才能, 男, 1963年出生, 中国科学院院士, 非常规油气地质学、常规油气地质理论与实践、新能源发展战略等,

E-mail: zcn@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

沉积学发展与油气勘探开发关系十分密切, 其在油气地质学研究中一直处于十分重要的地位^[1-10]。常规油气藏勘探中的生、储、盖、圈、运、保等核心要素均受到沉积作用的控制, 通过沉积学研究可以从成因上预测油气储层分布特征, 这为常规油气勘探开发提供了重要的理论和技术支撑^[3,7,10-12], 并形成油气沉积学。二十一世纪以来, 随着以页岩气为代表的非常规油气勘探开发的快速发展, 世界油气工业从常规油气延伸至非常规油气领域, 并逐步实现了常规油气地质学向非常规油气地质学的一次理论跨越^[13-15]。中国致密油气、页岩油气、煤层气等非常规油气资源丰富且分布广泛^[15-16](图1), 勘探开发成果显著。2017年全国非常规油气产量 $6\ 600 \times 10^4$ t油当量, 占全国油气总产量的20%。2018年我国非常规天然气产量达到 507×10^8 m³, 占全国天然气总产量

($1\ 603 \times 10^8$ m³)的三分之一。我国学者基于非常规油气地质特征的研究, 逐步建立了非常规油气地质学理论体系框架^[8-9,17-19], 有效推进了中国非常规油气资源的工业化勘探开发。随着非常规油气地质学逐步建立, 迫切需要创新构建非常规油气沉积学理论, 以此丰富、完善油气沉积学及非常规油气地质学, 促进非常规油气的勘探开发。

连续或准连续分布甜点区(段)是非常规油气地质学研究的核心, 地质事件相关的沉积是不同于常规沉积的“非常规”沉积, 与非常规油气甜点区(段)形成密切相关。笔者于2019年提出非常规油气甜点区(段)形成是全球性或区域性多种地质事件沉积耦合的结果^[20], 并对非常规油气沉积学的基本内涵(概念与研究内容、方法、意义等)进行了初步探讨。在此基础上, 本文着重从地质事件研究思路出发, 对四川盆地海相页岩气、鄂尔多斯盆地陆相致密油、页岩油等沉积富集过程中相关的各类地质事件开展精细

收稿日期: 2019-12-13; **收修改稿日期:** 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602119); 国家“十三五”重大专项(2017ZX05035); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239000); 中国石油科学研究与技术开发项目(2016B-0302-01, YJXK2019-16) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 41602119; National Key Basic Research Program of China, No. 2017ZX05035; National Key Basic Research Special Foundation of China, No. 2014CB239000; PetroChina Research Program, No.2016B-0302-01, YJXK2019-16]

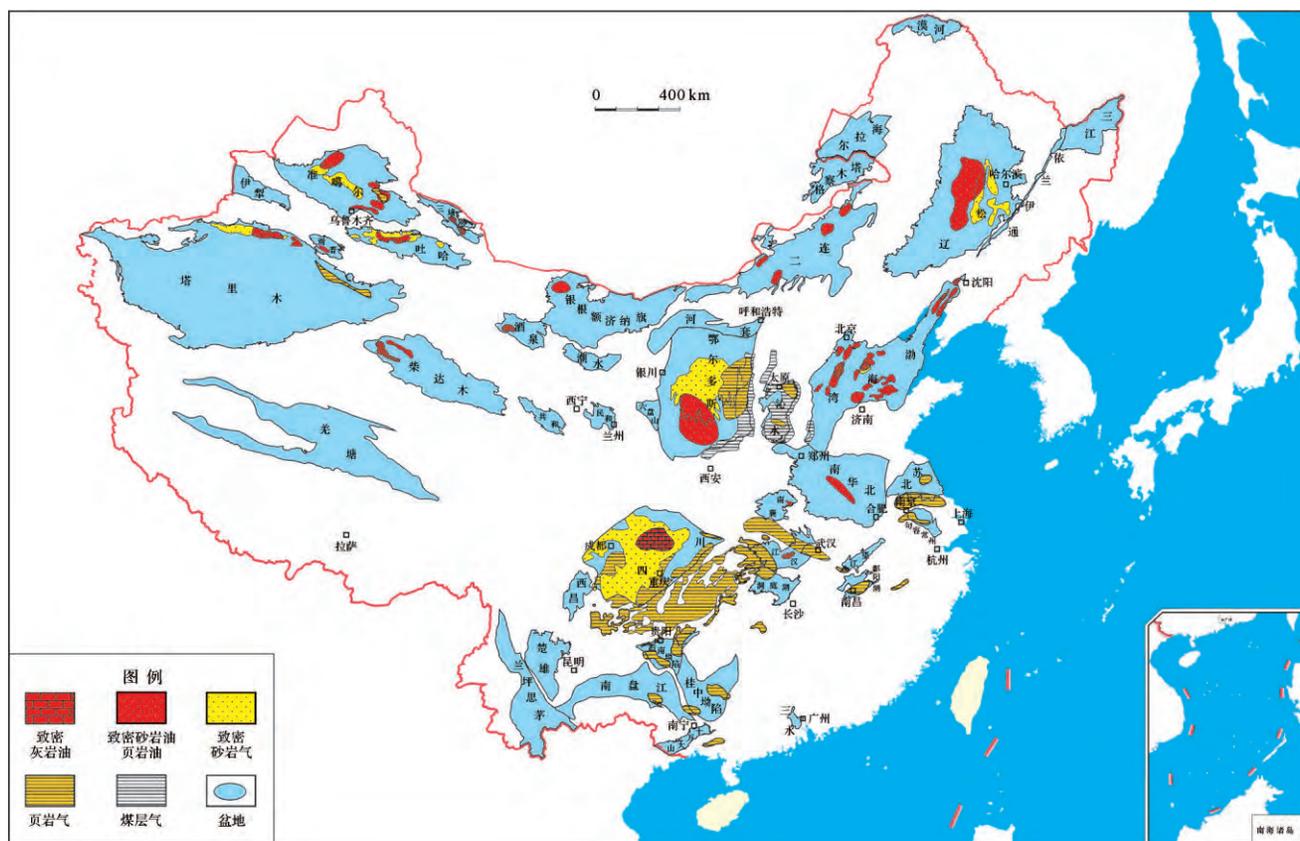


图1 中国主要非常规油气资源分布(修改自文献[15])

Fig.1 Distribution of unconventional petroleum resources on land in China (modified from reference [15])

解剖,进一步明确非常规油气沉积学的理论内涵——非常规油气资源沉积富集是全球性或区域性多种地质事件沉积耦合的结果,并初步展望了非常规油气沉积学所面临的科学问题与挑战,以期助力非常规油气沉积学快速发展,为寻找非常规油气资源发挥重要作用。

1 研究背景

1.1 非常规油气沉积研究简述

近十几年来,随着页岩气、致密油气等非常规油气资源勘探开发的快速发展,非常规油气沉积学研究已取得了诸多重要进展,主要包括细粒沉积岩分类、陆相深水砂质碎屑流等重力流沉积模式、海陆相富有机质页岩沉积模式、细粒沉积岩微纳米级孔隙表征等,并在我国非常规油气勘探开发中发挥了重要作用。例如,细粒沉积岩(相)详细分类已广泛应用于中国东部湖相页岩油^[21-23]与南方海相页岩气^[24-26]的源岩与储层评价及工程脆性评价之中,为页岩油气有利勘探区带评价预测提供重要指导;鄂尔多斯

盆地中部厚砂岩的砂质碎屑流成因机制^[27]、长7油层组富有机质页岩“湖侵—水体分层”沉积模式^[28]等重要认识,为该盆地的致密油、页岩油有利勘探区带评价预测提供重要理论支撑。

1.2 地质事件研究历程简述

十九世纪以前,与神学论相结合的灾变论是人们普遍接受的自然观念。随着莱伊尔的《地质学原理》(1831年)和达尔文的《生物进化论》(1859年)两部著作的问世,以进化、连续等为特征的“渐变论”逐渐在地学界乃至自然科学界占据统治地位^[29]。到二十世纪下半叶,地球科学领域中诞生了两件革命性的研究成果。一件是六十年代板块构造学说的提出^[30-32],科学地解释了大陆漂移和海底扩张,成为了地球科学领域的标准模型;另一件是八十年代“灾变论”的复活,其标志性事件之一,是 Alvarez *et al.*^[33]提出“天外来客”撞击地球引发了白垩纪—第三纪之交生物大灭绝,引发了整个地球科学界大讨论。随后显生宙以来五次海洋生物大灭绝事件的提出^[34-35],使得大灭绝事件等相关“灾变论”成为全球自然科学界中最活跃、讨论最热烈的研究主题之一^[36]。近五、六十年

来,地球科学家们逐渐开展了各类地质事件的研究,并已成为当前地球科学中诸多领域的研究热点,如板块构造学的超大陆聚合与裂解^[37-40]、古生物学的“五大灭绝”^[35-36,41-42]、沉积学的事件沉积^[43-49]等。

地质事件沉积是指各类地质事件相关的沉积记录,具有时间上瞬时性与空间上非常性的特征。由于其对应于以突变、不连续等为特征的“灾变论”,故又称为灾变事件沉积,属于“非常规”沉积。事件沉积的研究相对较早,起始于二十世纪五、六十年代浊流沉积作用研究^[43,50-52],提出鲍马沉积序列代表一次事件沉积^[52]。它随着二十世纪八十年代新“灾变论”的复兴迅速成为引人注目的研究热点。如 Einsele 和 Seilacher 于 1982 年主编文集 *Cyclic and event stratification*, 相对系统地介绍了事件沉积特征^[53]; Hsü^[54] 于 1983 年指出大规模灾变事件必然会留下沉积记录,并强烈倡议“沉积学家应该将灾变论作为研究哲学”。地质事件沉积研究早期主要针对以小时或天等为单位的瞬时性地质事件的沉积记录,如行星/彗星撞击事件^[33,55]、海啸风暴事件^[44,56-57]、重力流事件^[52,58-59]等;随后逐渐扩大到以千年或百万年为单位的“相对瞬时”地质事件相关沉积记录的研究,如气候突变事件(冰川/雪球)^[47,60-62]、构造巨变事件(大陆聚合/裂解)^[40,63]、地幔柱或大规模火山喷发事件^[38,64]、生物事件(灭绝/辐射)^[65-67]、海平面突变事件(上升/下降)^[68-70]、海水缺氧/富氧事件^[71-75]等。

当前随着理论、技术和方法的发展与创新,地质事件沉积的研究程度越来越深。同时,越来越多研究表明,大陆裂解与聚合^[76]、火山喷发^[77]、重力流沉积^[27,78]、海水缺氧^[75,79]、甚至深部热源活动^[80]等诸多地质事件对优质烃源岩或优质储层发育具有重要控制作用,与页岩油气、致密油等非常规油气资源的沉积富集关系密切。

2 非常规油气沉积学基本内涵

非常规油气沉积学(Unconventional Petroleum Sedimentology)概念:它是研究与非常规油气资源密切相关的沉积(物)岩及其沉积过程、沉积环境与沉积模式,以及非常规油气甜点区(段)、富集规律、资源潜力等的学科,属于沉积学、非常规油气地质学、构造地质学等交叉的学科。

非常规油气沉积学理论内涵:非常规油气资源沉积聚集是全球性或区域性多种地质事件沉积耦合

的结果。这是因为非常规油气资源沉积富集最终体现在发育连续或准连续分布的甜点区(段),即油气富集区(段)。非常规油气甜点区(段)形成不仅需要大面积连续优质烃源岩,也需要与烃源岩密切匹配的大规模优质储层。对于非常规天然气(致密气、页岩气、煤层气等),还需要发育封闭的顶、底板。这些甜点区(段)关键要素的沉积过程与全球性或区域性多种地质事件密切相关,是它们沉积耦合的结果^[20]。可以说,地质事件相关的沉积是不同于常规沉积的“非常规”沉积,它们控制着非常规油气甜点区(段)形成与分布。

2.1 研究内容

不同于以粗粒沉积(物)岩为主要研究对象的常规油气沉积学,非常规油气沉积学主要针对相对细粒的沉积(物)岩所开展相关研究,这些沉积(物)岩不仅为泥页岩、粉砂岩、细砂岩等碎屑岩,也包括碳酸盐岩、火山碎屑岩等,以及不同组分形成的混积岩。主要研究内容为以下几个方面:

(1) 相对细粒沉积(物)岩的物质组分、岩石类型、沉积构造(纹层等)、岩相等特征研究及成因分析,为源岩、储集岩等特征分析及相关地质事件追溯提供基础信息;

(2) 富有机质泥页岩沉积特征、地质事件沉积响应特征、沉积过程与模式等研究,阐明有机质富集机理,为优质烃源岩层空间分布预测提供理论指导;

(3) 储集岩沉积特征、地质事件沉积响应特征、成岩作用及储集空间表征等研究,明确优质储层发育机制,为有利储层、非常规油气甜点区(段)与资源分布预测提供依据;

(4) 特定区域(盆地或凹陷)相关地质事件剖析,查明地质事件发生强度及相关沉积响应范围,以及它们相互作用机制,指导优质源岩层、有利储层、以及顶、底板等分布预测,从而为非常规油气甜点区(段)与资源分布预测提供依据。

2.2 研究方法

开展非常规油气沉积学研究,需从地质事件分析的角度,在特定区域(盆地或凹陷)内以相对细粒沉积(物)岩为研究对象,聚焦于各类地质事件的沉积物及沉积过程等,及它们与非常规油气甜点区(段)形成的关系分析。所涉及到研究方法包括岩石矿物学、地层学、古生物学、地球化学、地球物理学(测井、地震等)、构造—热年代学等相关的各类实验

分析及技术体系,及沉积物理模拟、计算机模拟等为代表的物理与数字模拟技术。

2.3 研究意义

非常规油气沉积学研究的意义在于要用地质事件分析思维,开展与非常规油气资源密切相关的沉积(物)岩及其沉积过程等相关研究,查明非常规油气资源沉积富集规律,为非常规油气勘探开发提供理论基础与技术支撑。

3 典型非常规油气层系沉积学研究

3.1 页岩气:四川盆地奥陶系—志留系五峰组—龙马溪组

奥陶纪—志留纪转折时期,华南地区四川盆地受扬子板块与华夏板块两板块汇聚拼合作用的影响,其沉积环境由早中奥陶世的浅水碳酸盐岩台地逐渐演化为晚奥陶世—早志留世碎屑陆棚环境,在四川盆地及其周缘广泛沉积了一套富有机质页岩层系即五峰组—龙马溪组页岩层系。自2010年在川南地区五峰组—龙马溪组首次发现工业页岩气流后,我国相继在四川盆地及周缘取得页岩气勘探开发突破,逐步形成了威远、长宁、涪陵、昭通四大页岩气商业化示范区及泸州、东溪—丁山、叙永、巫溪等诸多勘探潜力区^[18,81-86]。我国南方五峰组—龙马溪组页岩气资源丰富,技术可采资源量约 $4.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截止2018年底,探明地质储量超 $1.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$,年产量约 $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2019年中石油在长宁—威远和太阳区块新增探明地质储量 $7\,409.71 \times 10^8 \text{ m}^3$,在川南地区已累计探明约 $1.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$,形成了一个万亿方页岩气大气区。截止2019年底,南方五峰组—龙马溪组页岩气探明地质储量超 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,年产量将超 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$,在我国未来天然气产量增长中将发挥着重要作用。

页岩气作为富有机质页岩层段中自生自储的天然气,它在页岩中形成与富集受到早期有机质沉积及后期构造活动等因素的共同控制。我国五峰组—龙马溪组页岩气近十年的勘探开发实践表明,五峰组—龙马溪组富有机质沉积是页岩气富集的基础,后期有效保存条件是高产的关键^[18,82,87-89],两者都明显受控于其沉积背景^[20]。针对该套页岩层系沉积学特征,国内外学者发表了大量的研究论文,其中2010年以来的论文数量近5 000篇,这在一定程度上说明沉积学研究对页岩气勘探开发的重要性。另外,在

奥陶纪—志留纪转折时期,发生了一系列全球性重要地质事件,如海平面升/降^[90-91]、气候变冷(冈瓦纳冰期)^[92-94]、火山喷发^[95-96]、海水缺氧^[75,97-100]、生物大灭绝^[36,101]等。同时,在华南扬子地区周缘发生一些区域性构造抬升、火山喷发等^[102-111]事件。这些地质事件对五峰组—龙马溪组页岩沉积产生了重要影响(图2,3),它们耦合沉积控制着页岩气甜点段(区)形成与分布。

3.1.1 构造与海平面升/降事件

五峰组—龙马溪组沉积时期为奥陶纪—志留纪转折期,是全球重大地质转折期之一,它是罗迪尼亚超大陆裂解晚期与潘基亚超大陆聚合早期的过渡阶段^[112-113](图2)。奥陶纪为罗迪尼亚超大陆裂解晚期,全球海平面逐渐上升,在晚奥陶世初期即凯迪阶早期达到古生代最高点,高于现代海平面大约225 m;但在凯迪阶晚期和赫南特阶,全球海平面快速下降,随后在早志留世海平面逐渐上升,至中志留世后又逐渐下降^[70]。在潘基亚超大陆聚合早期,是以志留纪劳伦古陆与波罗的海古陆碰撞为标志^[112-113],全球海平面整体上表现为逐渐下降,并在二叠纪末下降至显生宙以来最低点,并低于现代海平面^[70,112]。因此,奥陶纪—志留纪转折期全球海平面总体上受控于超大陆的演化,即超大陆聚合时期的海平面相对降低,而裂解时期海平面相对升高。

奥陶纪—志留纪转折期,华南地区位于冈瓦纳大陆东部北缘^[114],可能受原太平洋板块向东冈瓦纳俯冲作用影响,在460~400 Ma期间经历了陆内造山作用,即武夷—云开陆内造山带,表现为由南向北的构造抬升,又称广西运动^[106,108]。这一构造运动在华南地区具有明显的阶段性,且在华夏板块与扬子板块具有明显的差异性^[106,115]。晚奥陶世,华夏板块受原太平洋板块俯冲作用影响,发生构造抬升及变形作用并向西北迁移;在凯迪阶晚期即五峰组沉积时期,遇到稳定扬子板块阻挡,造成扬子板块东南缘发生快速沉降,形成湘鄂西—黔北前陆盆地^[116]。而在早志留世,构造抬升作用才逐渐扩展到扬子板块东南缘(如桐梓上升)及内部(如湘鄂水下高地),并在特列奇阶末期达到最大抬升限度^[104-106]。依据扬子地区宝塔组/临湘组、五峰组、龙马溪组等沉积特征,五峰组和龙马溪组分别识别出两个海侵、海退旋回,其中五峰组两个旋回持续约4 Myr,龙马溪组的两个旋回持续约5 Myr(图2)。扬子地区相对海平面在宝塔

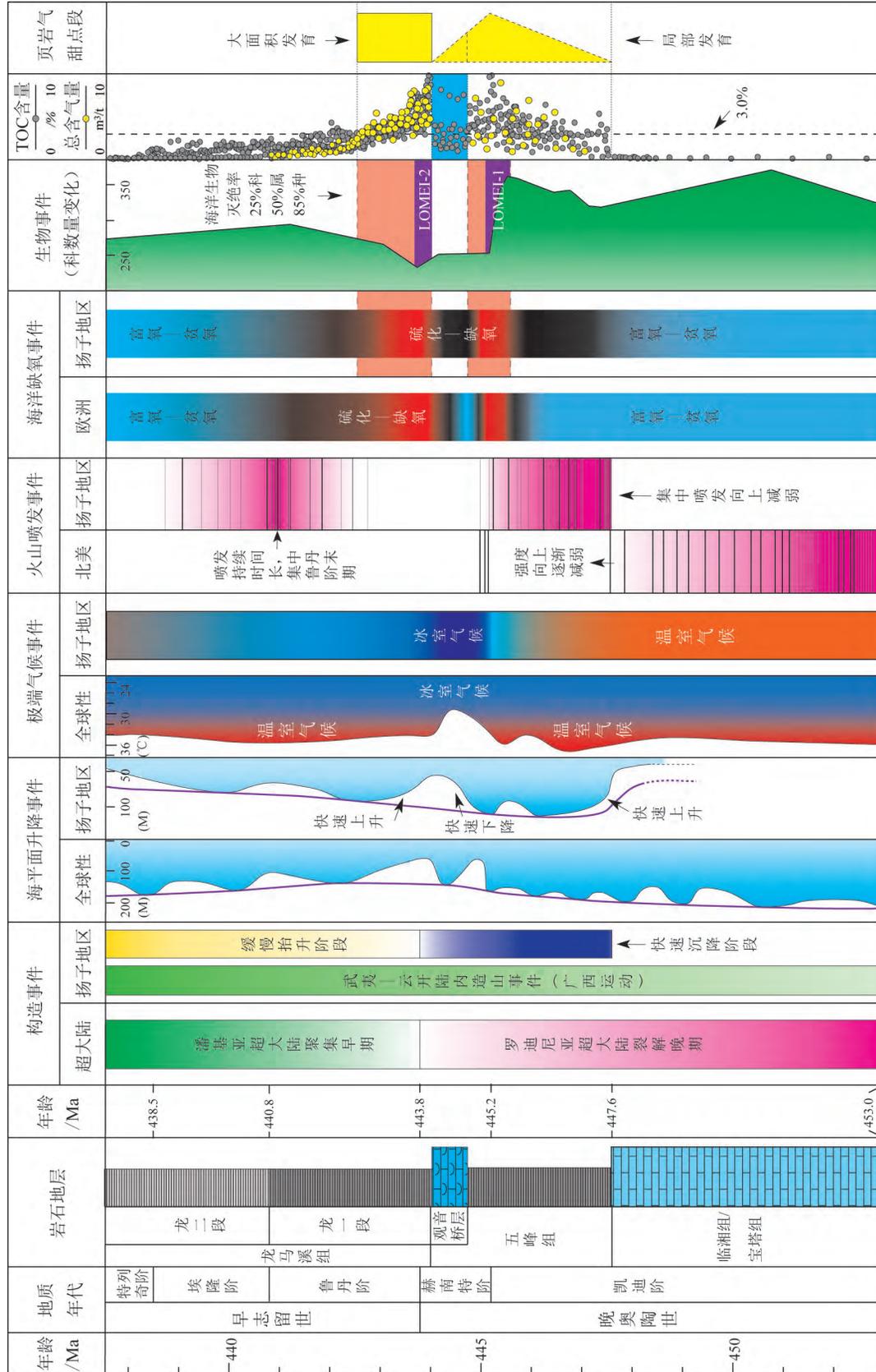


图2 华南扬子地区奥陶纪—志留纪转折期地质事件及五峰组—龙马溪组页岩气甜点段分布特征

地质年代、岩性地层等据国际地层年代表(2019版)及文献[104,109];超大陆构造事件据文献[112-113];华南扬子地区构造事件据文献[104,106,108];全球海平面变化曲线(待发表),其水深据文献[75,105];北美地区火山灰层分布特征据文献[95];扬子地区火山灰层分布特征据文献[110-111];全球气候变化据文献[94];扬子地区据为[75];欧洲等地区沉积水体缺氧程度据文献[97,99];扬子地区据为文献[75];生物科数量变化曲线据文献[101];其中属、种灭绝数量据文献[36];五峰组—龙马溪组TOC和含气量数据部分引自文献[75,82,87,100,110]

Fig.2 Major geological events during the Ordovician and Silurian transition and characteristics of shale gas sweet-spot intervals of Wufeng-Longmaxi shale in Yangtze area, South China

组/临湘组沉积时期(凯迪阶早中期)相对较低(水深小于50 m),随后受武夷—云开陆内造山事件(广西运动)影响,扬子板块内部快速沉降,五峰组沉积时期相对海平面快速升高(水深50~200 m)^[75,105];基于腕足类生态学研究的最新成果表明^[105],凯迪阶末期即笔石带 *P. pacificus* 中晚期,扬子地区总体水深约100~200 m;而在赫南特阶早、中期,受全球海平面下降影响,相对海平面快速降低(水深约60 m)^[75,105],其海平面下降幅度与高纬度地区的较为一致(下降幅度为70~150 m)^[117-118]。在赫南特阶晚期及志留纪鲁丹阶早期,扬子地区受全球海泛事件影响,相对海平面快速上升,并随着广西运动上升作用逐步加强,相对海平面呈总体下降趋势(图2)。

3.1.2 气候变冷事件

晚奥陶世末期,冈瓦纳大陆南部发育一定规模冰川作用^[14]。关于冰川作用持续时间,一直存在着较大争议,从大约35 Myr^[119],到数个百万年^[92],甚至不到1 Myr^[120]。但诸多研究证实,这一时期冰川对全球气候影响主要发生在赫南特阶时期^[92,94],常称之为赫南特冰川事件。它是显生宙第一次发生冰川事件,与其他冰期相比,Hirnantian冰期不寻常之处有二:一是在冰期时仍具有较高的大气CO₂分压($p\text{CO}_2$),是现今 $p\text{CO}_2$ 的5倍以上^[93],甚至更高(8~16倍)^[121];二是唯一一个与海洋生物大灭绝时间具有耦合的冰期^[36,94]。

基于碳酸盐多元同位素古温度估算方法,已较为准确地恢复了晚奥陶世—早志留世赤道附近海水表层温度(SST)^[94]。在晚奥陶世—早志留世时期(455~435 Ma),SST总体上变化相对较小,为32℃~37℃;而在Hirnantian时期,SST发生快速下降,一般为28℃~31℃,下降幅度平均~5℃^[94](图2)。同时,也有研究表明,中晚奥陶世时期,SST整体处在现代赤道范围(27℃~32℃),而在Hirnantian冰期,快速下降到23℃左右^[92]。

关于Hirnantian冰期发生次数,基于来自低、高纬度两个连续沉积剖面的高分辨率层序地层认识,有学者提出它存在三个冰期—间冰期旋回,冰期分别为凯迪阶晚期、赫南特阶早中期、赫南特阶中晚期^[122]。然而,由于这两个剖面缺少高分辨率古生物地层约束,三次冰期时间可信度不高。我国学者通过对我国华南扬子地区生物生态分析,并结合全球冰川沉积物报道,认为赫南特冰期主要发生在赫南特早

期,即对应于笔石带 *Metabolograptus extraordinarius*;而赫南特中晚期即间冰期内可能存在两次小规模冰期,对应于笔石带 *Metabolograptus persculptus* 中上部^[123]。

以气候快速变冷为标志的赫南特冰川作用,可以使得高纬度区域带来冷水团(富氧)大量涌向低纬度(温、热带)的扬子海域表层,从而对沉积环境及生物群落等均产生重要影响^[105]。相对高纬度地区常发育冰川有关沉积,同时受全球海平面下降影响,发育大规模浊流等重力流沉积,海相沉积甚至中断^[101,117];而在一些低纬度地区如我国扬子地区,几乎缺少冰川沉积物,对应的是以Hirnantian动物群为代表的介壳灰岩沉积,即观音桥层段(图2)。

3.1.3 火山喷发事件

奥陶纪—志留纪时期,北美、欧洲及我国华南等地区火山喷发活动广泛发育,大量火山灰层(蚀变为斑脱岩)被发现于页岩或碳酸盐岩地层之中^[95,102,107]。在北美地区,这一时期火山灰层主要发育在中、晚奥陶世碳酸盐地层之中,层数可达100层,单层厚度一般数个厘米,其中两个典型火山灰层(Millbrig层和Deicke层)厚度可达1~2 m^[95,124],被认为是显生宙最大规模火山灰沉积^[124](图2)。我国华南扬子地区五峰组—龙马溪组页岩层系中广泛分布火山灰层,其中上扬子地区的层数一般在20层以上^[102,110-111],而下扬子地区的火山灰层数可达100层以上^[125]。整个扬子地区,火山灰单层厚度一般低于5 cm,以毫米—厘米级为主。这些火山灰层在五峰组内分布最为集中且厚度相对偏厚(图2),如上扬子地区五峰组内火山灰层数超过20层,厚度一般1 cm以上^[111],最厚者可达10 cm以上;下扬子地区五峰组内层数超过60层,且厚度大于3 cm火山灰层均在五峰组内^[125]。而龙马溪组内火山灰层集中分布在龙一段上部(鲁丹阶与埃隆阶转折期),在四川盆地重庆石柱、巫溪等地区的层数均为10层以上,厚度可达5 cm以上^[110-111]。因此,奥陶纪—志留纪转折期,华南地区火山喷发主要集中在两个阶段:一个为晚凯迪阶五峰组沉积时期;一个为鲁丹阶与埃隆阶转折期。关于这些火山灰主要来源地,一直存在着争议,目前被认为主要来自两个地区,即扬子板块东南缘与华夏板块的汇聚拼合带和扬子板块北部商丹洋附近的秦岭岛弧带(图3)。

3.1.4 缺氧事件

奥陶纪—志留纪转折期存在两次明显硫化缺氧

事件(图2),一次为凯迪阶晚期至赫南特阶早期,主要对应笔石带 *Paraorthograptus Pacificus* 中上部;第二次为赫南特阶中晚期—早志留世早期,对应笔石带为 *Metabolograptus persculptus* - *Akidograptus ascensus* [75,97,99,126]。早期研究主要集中于第二次硫化缺氧事件,后越来越多研究证明了第一次硫化缺氧事件的存在[75,97-100,126]。这两次硫化缺氧事件具有全球性,不同古大陆之间趋势较为一致[75,97,99]。第一次硫化缺氧事件主要分布在陆棚的相对深水地区,与这一时期海平面上升等引发有机碳埋藏增加密切相关[75,127];第二次硫化缺氧事件分布更为广泛,包括陆棚的相对浅水地区,被认为与赫南特冰期消融过程中深部富硫化水体的上涌有关[68,128]。

值得注意的是,在较深水的地区,如大洋盆地,在整个赫南特时期广泛发育缺氧水体[97,129]。这种现象被解释为:海平面下降使得有机质沉降过程转移至水体较深的开阔大洋,造成有机质在水体沉降时间变长,从而使得有机质能够充分氧化分解及溶解的无机磷酸盐重新回到水体中;这一过程中能够消耗较多氧气,并增加营养物质输入促使初级生产力增加,进一步消耗水体中氧气,引发最小含氧带(OMZ)扩张,水体中形成广泛缺氧[97,99]。

3.1.5 生物大灭绝事件

奥陶纪末生物大灭绝是显生宙五次大灭绝中第一次,发生在445 Ma前左右,造成了海洋生物约25%科、50%属和85%种消亡[36,42,101](图2)。本次灭绝由两幕组成,第一幕发生在凯迪阶与赫南特阶过渡时期(笔石带 *Paraorthograptus Pacificus* 顶部至 *Metabolograptus extraordinarius* 底部);第二幕发生在赫南特阶中晚期(笔石带 *Metabolograptus persculptus* 底部)[65,101]。第一幕是本次生物灭绝主要时期,海洋底栖动物如四射珊瑚、横板珊瑚、腕足、三叶虫和苔藓类、游泳动物如牙形石类和笔石类及浮游藻类,均不同程度遭受到影响[65,101];第二幕主要影响第一幕所存活的生物,造成了凉水腕足类动物整体消亡[128],存活的笔石类和牙形石类相对单一[130]。虽然本次生物灭绝量位居显生宙五次大灭绝中第二,但其生态创伤度最低,明显低于二叠纪末,也不如白垩纪末、三叠纪末和晚泥盆世[36]。目前有新的生物数据报道,第二幕灭绝程度可能被高估,实际上它是在第一幕灭绝后复苏过程中的间断事件[123]。这一认识可能是该次生物灭绝生态创伤度低的重要原因之一。

关于奥陶纪末生物灭绝的引发因素很多,早期普遍认为与赫南特时期冈瓦纳冰盖形成与消融引发气候快速变冷—变暖有关[92-94,131],之后又提出海洋水体硫化缺氧[75,97-99]及火山活动[132-133]等假说。我国华南地区奥陶纪—志留纪转折期,位于冈瓦纳大陆东部北缘的赤道附近,海相地层连续沉积(图2、图3),生物种类丰富[65,123],且发育赫南特阶全球层型剖面,是研究本次生物灭绝事件的理想地区。

3.1.6 页岩气甜点区(段)形成与分布:多种地质事件沉积耦合的结果

页岩气甜点段是页岩层系中天然气富集层段。针对我国南方五峰组—龙马溪组页岩层系,通常把含气量 $\geq 3.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 和TOC含量 $\geq 3.0\%$ 为主的页岩层段作为页岩气甜点段。除了具有较高的含气量和TOC含量,它们也富含脆性矿物($> 60\%$),且发育相对较高的孔隙度($> 3.0\%$)及纹层理缝等微裂缝[18,20,83]。基于中国南方四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组页岩气近十年来的勘探开发实践与研究[18,82-84,87-89],关于页岩气富集高产模式及控制因素已逐步形成共识,即早期富有机质沉积是富集的基础、后期有效保存条件是高产的关键[79]。然而,页岩气作为自生自储天然气藏,“富集” \neq “高产”。这是因为影响页岩气单井产量高低因素较多且机理较为复杂,不仅包括含气量、地层压力、天然裂缝等地质条件,其工程、开发等技术也扮演着重要作用[134-136]。页岩气甜点段形成需具有四项基本地质条件[20,79]:1)缺氧陆棚环境发育富有机质沉积,有利于页岩气大量生成;2)有机质发育纳米孔喉系统,有利于页岩气大量储集;3)相对稳定陆棚环境发育封闭的顶板与底板,有利于页岩气有效保存;4)低沉积速率控制纹层发育与富硅质沉积,易于形成微裂缝,有利于页岩气有效开采。这些认识初步表明:有利的构造—沉积背景是甜点段形成的前提条件,控制着甜点段(区)发育程度与分布。

五峰组—龙马溪组页岩层系厚度一般可达300 m以上,但页岩气甜点段一般集中发育在该套页岩层系底部(图2),厚度一般10~40 m[20],仅为页岩层系总厚度的十分之一。这说明五峰组—龙马溪组页岩层系沉积过程中,其甜点段形成时期的沉积背景具有一定特殊性(图3)。如上所述及图2所示,页岩气甜点段沉积时期,全球与华南扬子地区及其周缘发生一系列重要地质事件:构造抬升与海平面升降、气候变冷(冈瓦纳冰期)、火山喷发、海水硫化缺氧、生物

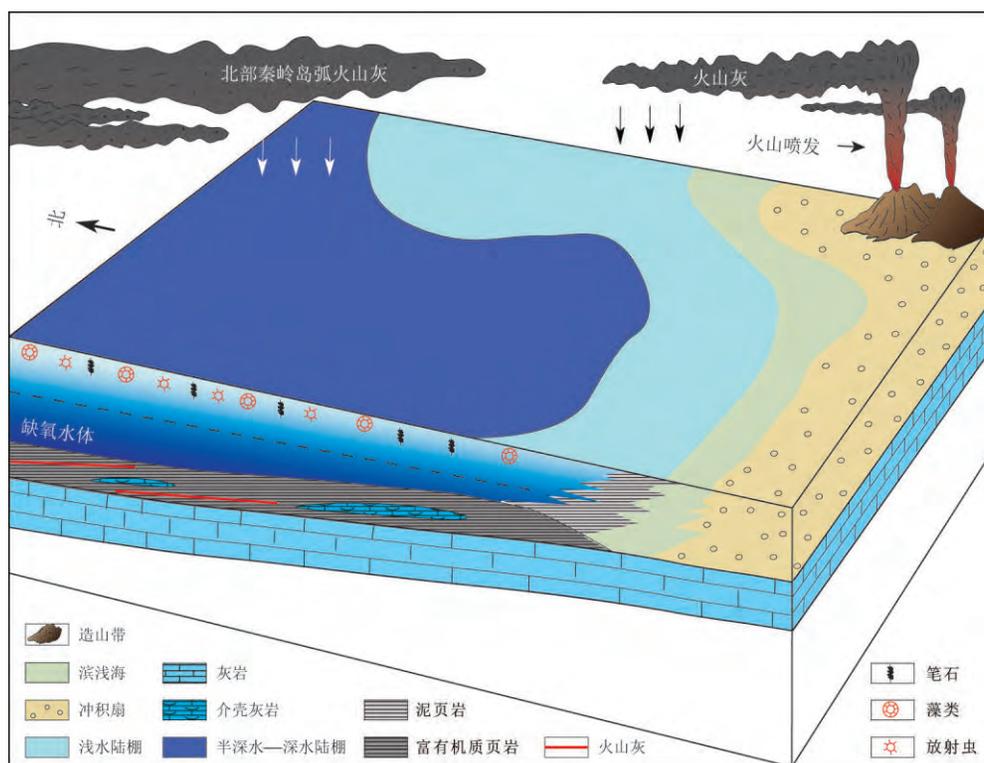


图3 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组页岩气甜点段沉积模式(修改自文献[20])

Fig.3 Depositional model of shale gas sweet-spot intervals of Wufeng-Longmaxi Shale in Sichuan Basin, China (modified from reference [20])

大灭绝等,它们对页岩气甜点段(区)形成与分布产生重要影响。奥陶纪—志留纪转折期是罗迪尼亚超大陆裂解晚期与潘基亚超大陆聚合早期的重要分界点,其所控制该时期二级海平面应该是逐渐下降的。但受到冈瓦纳冰川作用影响,在赫南特冰期全球海平面快速下降,幅度可达100 m以上^[106,117-118]。尽管赫南特冰川作用期次与时间还存在着一定争议,但它所引发的海平面下降造成了全球性陆棚富有机质沉积发生间断,如高纬度重力流沉积等、低纬度扬子地区的富介壳泥灰岩(观音桥层段)沉积。然而,值得庆幸的是,随着冰川消融,在赫南特晚期—早志留世鲁丹阶出现全球性海平面上升(海侵)(图2)。伴随着本次全球性海侵,硫化缺氧水体广泛分布于大陆边缘(对应于第二次硫化缺氧事件),在全球范围内(北美、欧洲、中国等)沉积一套富有机质页岩(国际上称为“hot shale”)(参见文献^[79,137]所述),成为全球古生代油气资源最重要的烃源岩层系之一。在我国华南扬子地区,其相对应沉积为龙马溪组底部黑色页岩。可以说,与赫南特冰川形成相关全球气候变冷事件,虽然冰期加剧了海平面下降幅度,不利于富有机质沉积,但随后消融引发全球性海侵,形成了广泛的

缺氧陆棚沉积环境,为甜点段的富有机质沉积创造有利条件。而在凯迪阶晚期(笔石带 *Paraorthograptus Pacificus* 中上部),尽管全球二级海平面在逐渐下降,而与三级海平面上升对应发生了全球范围的陆棚硫化缺氧事件(第一次硫化事件)(图2)。对应于该次事件,全球范围内也沉积了一套黑色页岩^[75,97,127]。其中美国 Nevada 州 Vinini Creek 黑色页岩厚约10m,其 TOC 含量最高可达20%^[127],而在我国华南扬子地区为五峰组沉积,最高 TOC 含量达16%^[75],为页岩气甜点段形成提供了有利条件。

五峰组—龙马溪组页岩气甜点段(区)形成与分布,也明显受到华南区域性地质事件影响(图2,3)。五峰组沉积(凯迪阶晚期)之前,华南扬子地区总体上为碳酸盐岩台地沉积^[104,116,138],宝塔组/临湘组碳酸盐岩广泛分布,有机质含量普遍低于1.0%(图2)。而在凯迪阶晚期,受广西运动影响,扬子板块东南缘及内部快速沉降,五峰组沉积时期相对海平面快速上升(水深50~200 m),可容纳沉积空间快速增大。虽然在早志留世鲁丹阶,构造抬升作用逐渐扩展到扬子地区,并在特列奇阶末期达到最大抬升限度^[104,106],但在赫南特晚期—鲁丹阶早期,受全球海平面快速

上升影响,大部分扬子地区的可容纳沉积空间也快速增加。故在凯迪阶晚期—鲁丹阶早期,扬子陆棚的可容纳沉积空间快速增加,但其陆源碎屑供应较少且古地形相对较缓,总体上处于低沉积速率的欠补偿状态,从而有利于甜点段内有机质富集(TOC 含量一般高于 3.0%)与纹层发育。由于华南地区该时期造山活动活跃,是火山集中喷发期,特别在五峰组内部沉积大量火山灰层(图 2)。这能够为海水提供大量硅质,促进硅质生物繁盛,使得甜点段内形成富硅质沉积,从而有利于甜点段水平井体积压裂,提高页岩气资源开采效率。而在随后的埃隆阶—特列奇阶时期,扬子地区的相对海平面下降,陆源碎屑注入逐步增强,沉积了厚层的灰色泥页岩、粉砂质泥页岩等。它们厚度一般大于 250 m,黏土含量相对偏高,且具有极低的渗透率,在一定埋深下具有很好的塑性和封闭能力^[139],是页岩气甜点段天然的顶板。而五峰组底部的临湘组等致密泥质灰岩,也具有较低的渗透率^[82],与甜点段上覆的泥页岩顶板以前为甜点段页岩气提供有效封闭作用,使其能够得到有效保存。

此外,基于我国南方威远、长宁、涪陵及巫溪等页岩气勘探开发区的典型钻井与露头剖面的 1 000 余件五峰组—龙马溪组页岩样品数据分析,研究表明甜点段关键评价参数,如厚度、含气量、TOC 含量等,在区域上存在着较大差异特征^[79]。其中比较典型特征是,龙马溪组甜点段基本为大面积连续分布,而五峰组的甜点段分布则相对局限(图 2),仅发育在长宁、涪陵等地区,威远地区的五峰组则无甜点段。这一特征与沉积时期硫化缺氧水体分布密切相关:1) 在赫南特晚期—鲁丹阶早期(龙马溪组底部沉积时期),硫化缺氧水体广泛分布于陆棚,且具有全球性,有利于甜点段富有机质沉积;2) 凯迪阶晚期与赫南特早期,硫化缺氧水体在长宁、涪陵等地区广泛分布^[75],而在威远、巫溪等地区主要为铁化缺氧沉积水体;3) 页岩气甜点段纵向上分布与区域上展布,与硫化缺氧的水体条件发育程度对应较好,具体为:涪陵地区甜点段厚度最大(30~50 m),硫化缺氧持续时间最长;其次为长宁地区(15~40 m),硫化缺氧持续时间较长;而威远地区的甜点段最薄(5~10 m),其硫化缺氧持续时间最短^[79]。故综合分析认为,硫化缺氧的水体条件是控制华南地区页岩气纵向上甜点段及区域上甜点区形成的关键因素(图 4)。对于华南地区硫化缺氧事件形成原因,受到全球及区域性构造/海

平面变化、气候变冷等事件的重要影响。关于陆棚硫化缺氧水体的成因,尽管目前仍存在着一定争议^[75,97-99,127,129],但一般认为第一次硫化缺氧事件与海平面上升等引发有机碳埋藏增加密切相关,而第二次硫化缺氧事件与赫南特阶冰期之后消融过程中海平面上升引发的深部富硫化水体的上涌有关。

然而,从有机质富集沉积角度,五峰组—龙马溪组页岩气甜点区(段)形成与分布,最为直接的两个因素分别为:1) 沉积时期海洋表层较高初级生产力,是有机质大量生成的重要前提条件;2) 海洋底部发育硫化缺氧水体,是有机质有效保存的关键条件。在奥陶纪末的凯迪阶晚期及赫南特中期,全球发生了显生宙第一次生物大灭绝事件,海洋底栖动物(如珊瑚、腕足、三叶虫等)、游泳动物(如牙形石类和笔石类)及浮游藻类等属、种遭受不同程度消亡。而得以存活海洋生物如笔石类型相对单一,可能因竞争者减少出现“勃发”现象,沉积后形成富笔石页岩^[137-138,140]。这些笔石生物不仅为页岩气形成提供一些有机质,它们本身富含有机质孔且能够形成笔石纹层,有利于页岩气储存及开发过程中页岩气流动^[141]。在生物大量灭绝之后,全球气候逐渐变暖,藻类等浮游生物因捕食者减少开始繁盛,海洋表层初级生产力大幅度提高,生成大量有机质;同时,海洋陆棚广泛发育硫化缺氧底部水体,能够将有机质有效保存下来,沉积后形成富有机质页岩(图 3),为甜点段页岩气大量生成及纳米级孔喉系统发育提供了物质基础。

综上所述,五峰组—龙马溪组页岩气甜点区(段)形成与分布,受到其沉积时期全球或区域性地质事件—构造与海平面升降、气候变冷、火山喷发、硫化缺氧及生物大灭绝不同程度的影响,是这些事件沉积耦合作用的结果。尽管这些重要事件相互作用的机理仍存在着一些争议,需进一步探讨,但它们之间的耦合沉积可在不同的区域形成不同的岩石类型及岩石组合。在特定区域,这些岩石或岩石组合富含有机质、发育纹层、富含脆性矿物等,为页岩气甜点段形成提供所需的基本地质条件,从而控制着甜点段形成与分布。需要说明的是,不同于页岩气甜点段,甜点区作为甜点段在区域上的延伸,它的形成需要在区域上具备甜点段发育的所有条件,而其最终规模与分布则受控于后期构造活动的改造强度^[20,79,142](图 4)。

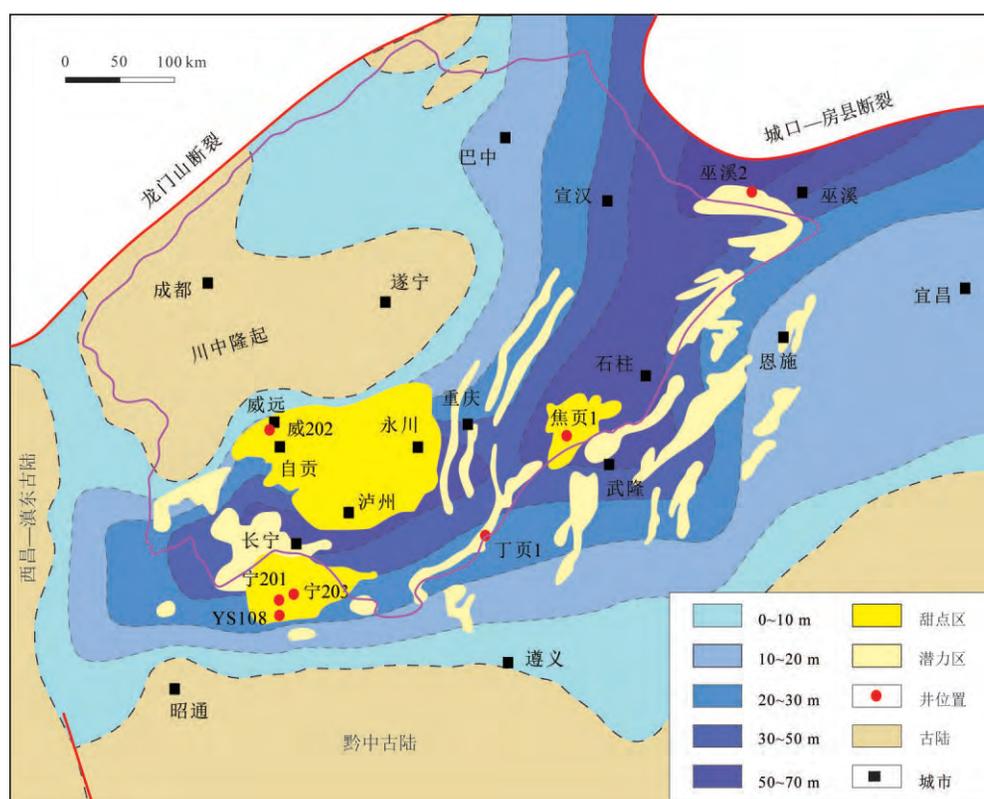


图4 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组富含有机质页岩厚度及页岩气甜点区分布(修改自文献[20,142])

Fig.4 Distribution of thickness of organic-rich intervals in Wufeng-Longmaxi Shale and sweet-spot areas of shale gas in Sichuan Basin, China (modified from references [20,142])

3.2 致密油与页岩油: 鄂尔多斯盆地三叠系延长组

中一晚三叠世,受华北板块与华南板块碰撞造山作用影响,华北地区海水最终退出,形成了鄂尔多斯内陆淡水湖盆,最终沉积了厚达千余米的延长组河湖相碎屑岩层系。延长组在鄂尔多斯盆地北部厚约100~600 m之间不等,南部厚1 000~1 300 m,边缘沉降拗陷带最大厚度3 200 m。它是该盆地的主力含油气层系之一,根据岩性组合、电性及含油性划为10个油层组(自底至上依次为长10—长1段)^[143-144]。其中长7段、长6段为现今鄂尔多斯盆地发现的主要致密油与页岩油富集层系,地质资源量约 $30 \times 10^8 \text{ t}$ ^[145]。以长6段为主力产油段的华庆大油田已提交致密油探明地质储量 $5.22 \times 10^8 \text{ t}$ 。2019年长庆油田公司在长7段内致密油与页岩油新增探明地质储量 $3.58 \times 10^8 \text{ t}$,发现了10亿吨级的庆城大油田。截止2018年底,鄂尔多斯盆地致密油与页岩油已建成产能约 $100 \times 10^4 \text{ t}$,其中长7段年产量约 $60 \times 10^4 \text{ t}$,在我国未来石油产量增长中将发挥重要作用。

致密油是一种储集在致密储层(覆压基质渗透

率 $\leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,空气渗透率 $< 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)中的非常规石油资源,源储互层或紧邻,单井无自然产能或自然产能低于商业石油产量下限,但在一定经济条件和技术措施下可获得商业石油产量^[9,146]。页岩油一般被认为是一种在成熟烃源岩中生成并滞留聚集于源岩层的非常规石油资源,具有源储一体特征^[9,147-148]。但也有观点认为,页岩油泛指在有机质页岩层系(包括粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩夹层)内非常规石油资源^[149-151],其中夹层单层厚度小于5 m,累计厚度占比小于30%^[151]。关于页岩油这两类不同概念,前者偏重于成因性分析,为狭义概念;后者偏重整体性分析,为广义概念^[150,152]。自2011年长庆油田公司在西233井区长7段致密油成功开发以来,近十年的勘探开发实践及研究证实,鄂尔多斯盆地长6、长7段致密油平面上位于湖盆的中部,主要为重力流沉积,以粉砂岩、细砂岩为主^[144,153-157]。长7段又可细分为三个亚段(自底至上依次为长7₃—长7₁),其中致密砂岩油主要发育在长7₁、长7₂两个亚段,而长7₃主要为富有机质页岩段,是页岩油的集中发育段^[150,158-159]。诸多研究表明,长6、长7段致密油、页岩

油形成与富集主要受控于两大要素,即大面积分布的优质有效烃源岩及其紧密接触且连续分布的有效致密储层^[145,150,159-160],但两者都明显受控于其沉积背景^[158,161-162]。在长7段、长6段沉积时期,鄂尔多斯盆地及其周缘发生了一系列区域地质事件,如区域性构造运动与湖平面升/降^[163-165]、火山活动^[166-170]、水体缺氧^[171-173]、重力流^[156-157,174]等。这些事件对长7段、长6段沉积产生了重要影响,它们耦合沉积控制着致密油、页岩油甜点区(段)形成与分布。

3.2.1 构造与湖平面升/降事件

中一晚三叠世,全球处于潘基亚超大陆形成时期,我国华北和华南板块自东向西发生拼合,形成秦岭—大别碰撞造山带^[163,165,175],其陆内造山作用主要发生在大约240~220 Ma。本次造山运动归属于印支运动范畴,可划分为两幕次,即I幕(中三叠世末)和II幕(三叠纪末)。受印支运动影响,华北板块海水彻底退出,在其东部表现为中、上三叠统间的不整合接触,而在华北板块西部的鄂尔多斯盆地发生快速沉降,表现为连续湖盆沉积^[144,176]。关于延长组的时代归属问题,一直存在着争议。基于鄂尔多斯盆地生物地层、同位素地层等资料和长7段底部火山灰层最新的锆石ID-TIMS年龄^[170],有学者提出将长7段和长6段之间界线作为中、上三叠统的界线^[177]。结合前人火山灰年龄、生物地层等成果资料^[163,165,170],以及秦岭—大别碰撞造山作用时限^[163,165,175],本文将长7段沉积时间进一步限定在240~237 Ma(中三叠世拉丁阶)(图5),对应于印支运动I幕次。

诸多研究表明,长8段沉积末—长7段初期是鄂尔多斯盆地重大环境转折期^[144,168,177]。长10—长8段沉积时期,盆地地势相对平坦,总体上处于河流、三角洲、滨浅湖及沼泽等沉积环境,以厚层中粗砂岩、细砂岩为主,夹粉砂质泥岩、泥岩等^[144]。这些砂岩岩石类型相似,主要为岩屑长石砂岩和长石砂岩,岩石成分成熟度偏低,长石平均含量约30%~40%,代表盆地形成初期沉积产物^[144,168]。而在长7段沉积初期(长7₃),盆地西南缘受到印支造山运动影响发生抬升,并在盆地南部发生快速沉降,形成大规模拗陷,相对湖平面快速升高(图5),整个盆地沉积格局发生重大转变^[144,167,177]。长7—长6段主要为一套泥页岩层系,夹薄—中层粉砂岩、细砂岩等^[153-157](图5)。与长10—长8段相比,这些砂岩石英含量偏高,长石含量较低(平均低于20%)^[144,168],主要为深水重力流

沉积^[156-157]。该时期为盆地强烈扩张期,其中长7₃沉积时期为湖盆的最大湖泛期,半深湖—深湖区范围可达 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上^[144,150]。在长7₂—长6₃沉积时期,随着物源输入逐渐增强,相对湖平面缓慢下降^[156,164]。

3.2.2 火山喷发事件

鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积较为广泛,在长10段至长1段岩层中均可见到火山灰沉积,多以浅灰黄色、浅灰色薄层或纹层凝灰岩为主^[166-167,169]。诸多研究证实,在该盆地长7段中火山灰沉积最为发育,在其厚100 m左右的页岩层系中火山灰层数可达150层以上^[166,170]。其中薄层火山灰层厚度一般0.5~1.0 cm,厚者可达1 m以上^[168,177],在长7段均有分布,但主要集中分布在长7₃亚段底部^[166](图5);纹层状火山灰层厚为毫米或厘米级,主要分布在长7₃和7₂亚段内^[166,170]。长7₃亚段底部火山灰层发育最为集中,且分布稳定,厚度由盆地西南向东北方向逐渐减薄至不发育,主要与盆地西南缘火山活动有关^[168-170,178](图6)。这些火山灰主要来源于中酸性岩浆^[166,179],它们在年龄、分布厚度、岩石组成和构造环境上,均与秦岭造山带的花岗质岩浆活动具有较好耦合性^[179]。

此外,基于长7页岩层系中发现的热源自生矿物(如重晶石、铁白云石纹层等)及热水沉积地球化学特征(碳硫同位素比值及微量元素Mn含量),一些学者^[180-182]提出鄂尔多斯盆地在长7沉积时期湖盆底部发育热水沉积。

3.2.3 缺氧事件

目前,鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩层系沉积水体缺氧条件存在着争议。由于该套页岩层系富含有机质,且U、V、Mo等微量元素富集^[172,183-184],常被认为形成于底部缺氧水体环境,缺氧程度自7₃亚段至7₁亚段逐渐减弱^[172]。但也有一些研究基于黄铁矿矿化度(DOP)、草莓状黄铁矿粒径等特征分析,认为长7段页岩层系主要沉积于贫氧—富氧底水条件,伴有局部缺氧环境^[173,185]。甚至有新的研究认为湖盆底部水体—沉积物界面以上为富氧条件,而该界面之下为缺氧条件^[171]。由于这一时期火山活动、重力流、洪水异重流等事件沉积频繁,它们会对湖盆沉积环境产生重要影响。这些事件相关沉积不仅会改变半深湖—深湖沉积物中元素富集程度及矿物组成,而且造成湖盆水体氧化还原状态发生一定变化。比如,泥页岩所夹火山灰沉积会使得其U元素相对富集^[183],同时相关热源活动携带的H₂S等气体能够促进

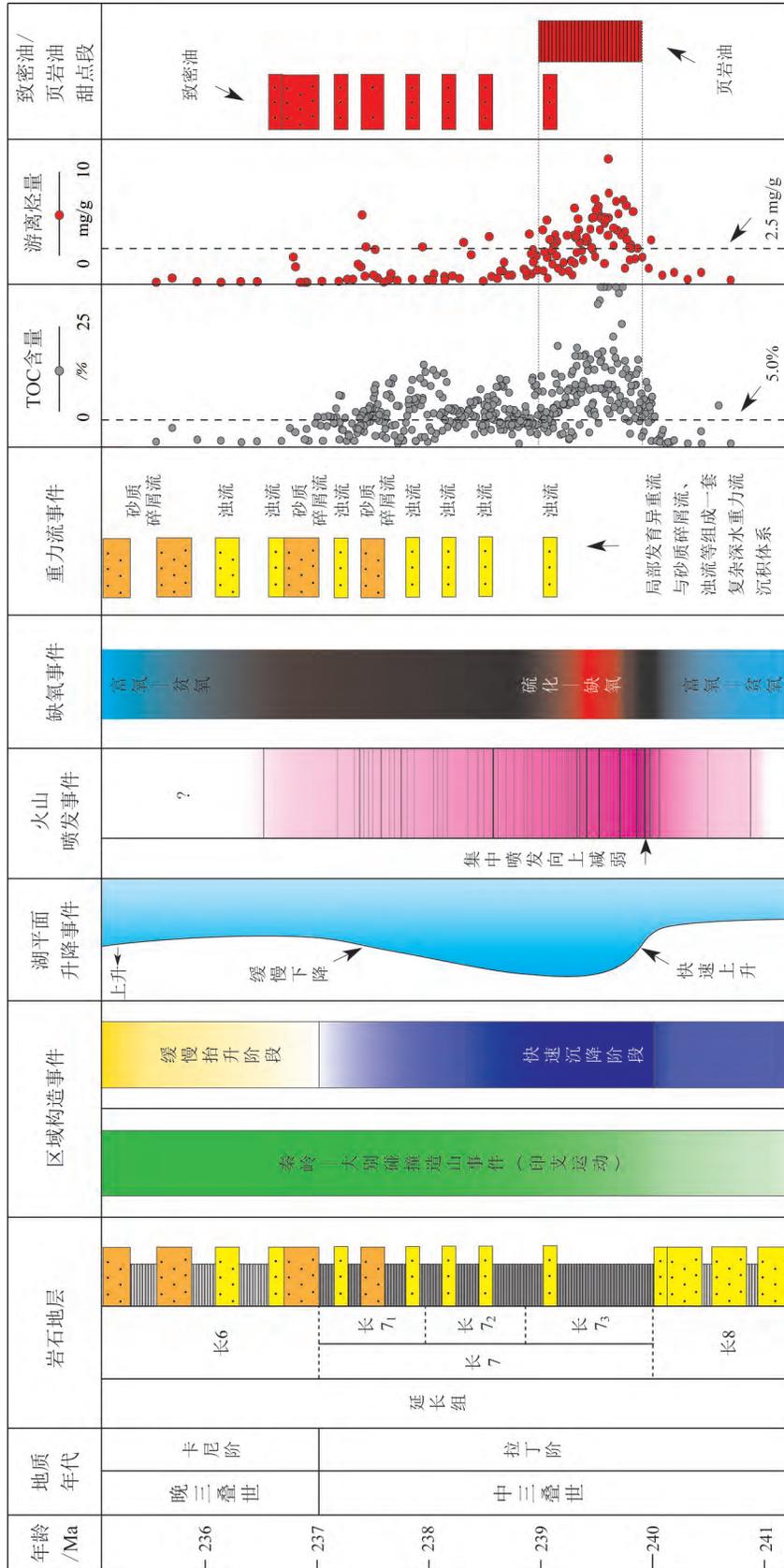


图5 鄂尔多斯盆地中、晚三叠世之交地质事件与延长组典型致密油、页岩油甜点段分布特征

地质年代、岩性地层等据国际地层年代表(2019版)及文献[177];综合岩石地层划分据文献[145,150,153,160];区域构造事件据文献[163,165];鄂尔多斯盆地湖平面变化据文献[156,164];火山灰层分布趋势据文献[166-167,170,174];沉积水体缺氧程度趋势分布据文献[171-173]推测;重力流发育特征据文献[27,155-157,174];TOC和游离烃含量趋势图中数据部分来自文献[28,156,158,162,171-172],其中虚线圆点代表样品TOC含量大于25%的样品

Fig.5 Major geological events during the Middle and Late Triassic and characteristics of sweet-spot intervals of light oil and shale oil from Yanchang Formation in Ordos Basin, Central China

湖盆水体形成缺氧环境^[181];砂质碎屑流、浊流等重力流能够将近岸处相对富氧沉积物搬运至湖盆深处,这一过程会增加湖盆底部水体氧气含量,形成局部富氧环境。诸多研究^[28,158,171-172]已证实,长7段页岩层系中富有机质纹层,发现大量藻类等生物化石,TOC平均含量一般高于5%。特别在长7₃中黑色页岩段,其TOC含量最高可达30%,平均含量约14%^[145,150]。大量有机质在沉积过程中必然会因分解作用而消耗水体中氧气,从而引发水体底部或沉积物中缺氧^[186-187]。长7段沉积时期湖水表层生产力繁盛,有机质供应充足,必然会引发湖底水体缺氧,缺氧程度自7₃亚段至7₁亚段可能逐渐减弱(图5)。另外,因热源活动能够携带H₂S等气体^[181],甚至在7₃黑色页岩段中具有较高黄铁矿矿化度(平均DOP值约0.76)^[173],故长7₃沉积时期可能局部发育硫化缺氧环境。

3.2.4 重力流事件

陆相湖盆深水区常发育浊流、砂质碎屑流、异重流等重力流沉积^[27,188]。浊流是一种具有湍流性质的重力流,正粒序层理是其沉积物(浊积岩)的关键标志;砂质碎屑流是一种具有层流性质、砂质颗粒含量高的沉积物重力流,其沉积物主要特征为厚层块状,砂岩内部可见泥页岩撕裂屑等^[27];异重流是一种由洪水期河流提供沉积物,以递变悬浮方式沿盆地底部流动的高密度流体,其沉积物(异重岩)典型特征为发育逆粒序—正粒序层理、富含陆源有机质等^[156,188]。鄂尔多斯盆地延长组重力流沉积早期被认为是湖底扇浊积岩^[189]或浊积扇沉积^[190-191],随后被认为是大规模砂质碎屑流沉积^[27,78,157]。随着鄂尔多斯盆地延长组长7、长6油层组致密油、页岩油勘探开发不断深入,对该盆地内重力流沉积识别及其分布特征的研究越来越精细。诸多研究表明,长6段主要发育砂质碎屑流沉积,并伴有少量浊积岩^[27,78,174];长7段中重力流沉积主要为浊积岩,发育少量的砂质碎屑流砂体^[78,155](图5、图6),并通过水槽沉积物理模拟了该段内砂质碎屑流与浊流沉积特征^[154]。基于大量钻井电性、岩芯等资料,已精细刻画出长6₃、长7₃、7₂和7₁亚段内重力流砂体分布特征^[28,150,160]。近几年,有学者提出长6和长7段发育洪水异重流沉积的新认识^[156,192]。实际上,不同类型重力流体之间是相互转化的^[193-194],例如三角洲前缘斜坡失稳,进而产生滑塌、碎屑流、浊流等,而碎屑流在向深水区搬运过程中,可以逐渐转化为浊流^[27,49];湿润气候条件下的季节性洪水可以

形成具有超强搬运能力的异重流,进而可诱导滑塌及碎屑流、浊流的发生^[195-198]。因此,鄂尔多斯盆地长6和长7段中砂质碎屑流沉积、浊积岩、异重流岩均有发育,它们一起组成一套复杂的深水重力流沉积体系。

3.2.5 致密油、页岩油甜点区(段)形成与分布:多种地质事件沉积耦合的结果

致密油与页岩油甜点段分别指页岩层系内石油相对富集的致密储层(砂岩、灰岩等)段和页岩层段,经过人工改造能够具有一定工业开采价值。大量致密油勘探开发实践及研究证实^[145-146,160,199-200],致密油甜点段形成需具备四项基本地质条件^[161]:1)大面积分布的优质有效烃源岩,有利于石油大量生成;2)大面积连续分布的有效致密储层,有利于石油大量储集;3)有效的源储接触关系,有利于石油大规模聚集;4)相对稳定的沉积构造背景,有利于石油有效保存。其中有利的构造—沉积背景是甜点段形成的前提条件,而优质有效烃源岩及其紧密接触的有效致密储层直接控制着致密油甜点段形成与分布。

鄂尔多斯盆地延长组致密油主要分布在长7₂、7₁亚段和长6段底部致密砂岩段(图5),而长6段底部之上基本不发育致密油,这与长7段优质烃源岩分布密切相关。在长7沉积初期,受到印支期秦岭—大别陆内造山事件影响,该盆地南部快速形成大规模坳陷,相对湖平面快速升高,半深湖—深湖区范围可达 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上^[144,150],为有机质沉积富集提供有利条件。与造山事件相伴的火山活动,如火山喷发、热液活动等,能够为湖水表层中藻类等生物生长提供大量P、N等营养元素,同时携带的H₂S等气体能够促进缺氧环境形成^[180-182],有利于有机质沉积富集。尽管自长7₃至7₁亚段湖平面逐渐下降,重力流沉积逐渐增强,底部沉积水体缺氧程度也在逐渐减弱,但藻类等生物大量繁盛提供大量有机质,以及湖底热源作用,使得长7段沉积时期底部水体总体上处于缺氧沉积条件,从而有利于长7段大规模优质烃源岩发育。长7段页岩层系有效烃源岩厚度一般30~60 m^[145],TOC平均含量一般高于5%(图5),有效分布面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$;生烃强度平均值约 $500 \times 10^4 \text{ t/km}^{2[145]}$,总生烃量可达 $(1\ 200 \sim 1\ 800) \times 10^8 \text{ t}$,平均排烃效率约40%~70%^[146],为长7段内和长6段底部致密油聚集提供充足物质基础。在长6段沉积时期,相对湖平面开始下降,湖盆底部水体开始转变为贫氧—富氧条件,

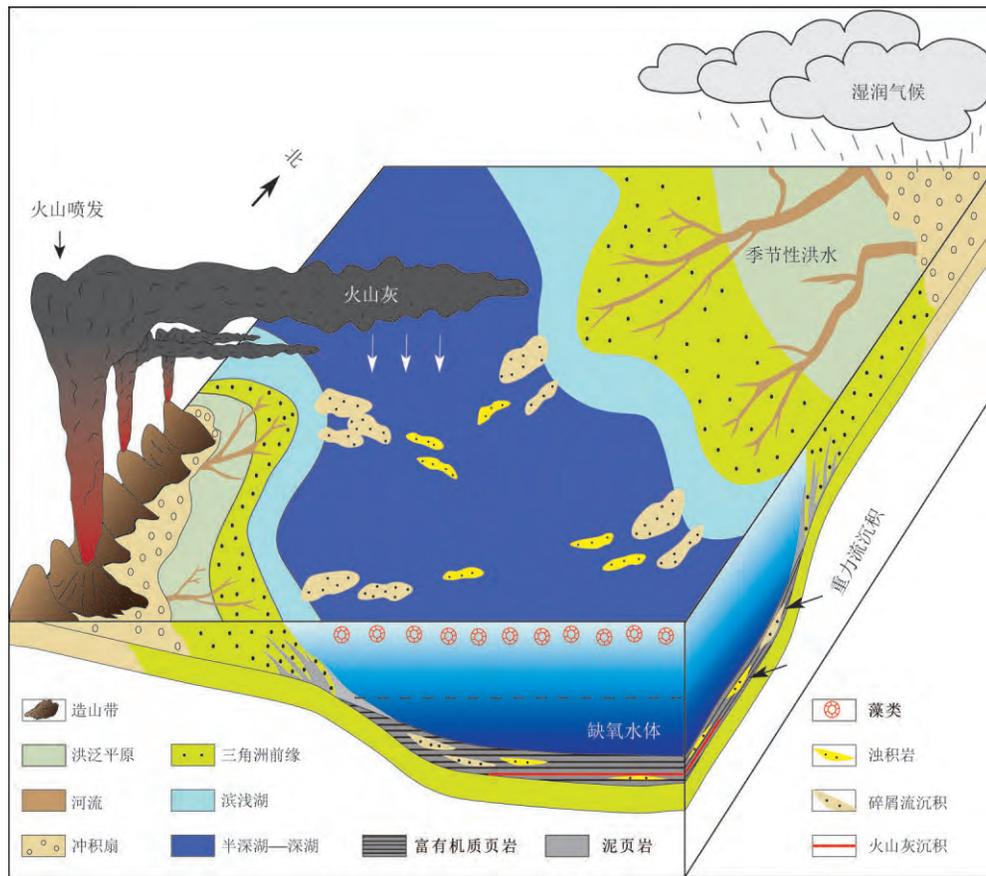


图6 鄂尔多斯盆地延长组致密油、页岩油甜点段沉积模式(修改自文献[20])

Fig.6 Depositional model of sweet-spot intervals of tight oil and shale oil from Yanchang Formation in Ordos Basin, Central China (modified from reference [20])

不利于有机质沉积富集。该段内泥页岩TOC含量一般低于2.0%,平均低于1.0%,难以生成大量石油,从而造成其上覆致密储层基本不含油(图5)。此外,由于重力流沉积砂体内部也具有一定非均质性^[201],会造成长7₂、7₁亚段和长6段底部致密砂岩段致密油富集程度具有差异性,甚至局部不发育致密油(图7)。

鄂尔多斯盆地致密油主要分布在该盆地中南部,位于环县—靖边—延安—正宁—庆阳范围(图5)^[145,150,153]。诸多研究已证实,长7段、长6大面积分布的致密油储层是重力流事件沉积的产物。它们主要是因构造抬升、火山活动等作用造成三角洲前缘斜坡失稳,进而产生滑塌、碎屑流、浊流等沉积形成的碎屑流岩和浊积岩^[27,188],局部为季节性洪水引发异重流形成的异重岩^[156,192]。这些重力流沉积产物主要由粉、细砂岩组成,岩石类型主要为长石砂岩和岩屑砂岩,砂体大面积连片叠置分布(约1400 km²)^[145,153,159]。由于这些砂体经过较长距离搬运,泥质含量少,具有较好的物性(孔隙度平均7.2%~

10.2%,渗透率为 $(0.18\sim 0.22)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)^[145,159],为致密油聚集提供大量储集空间。此外,这些致密储层与长7段富有机质页岩相互叠置发育,形成源储大面积紧密接触,聚集效率高,致密储层含油饱和度平均70%左右,有利于致密油甜点区大规模形成(图6,7)。

页岩油作为在成熟烃源岩中生成并滞留聚集于源岩层内的石油,其富集程度一般用游离烃含量(热解烃量 S_1)表示^[9,147,202]。 S_1 含量越高代表页岩油含量越大, S_1 含量 $\geq 2.5\text{ mg/g}$ 的泥页岩层段可以视为页岩油富集层段(甜点段)^[203]。鄂尔多斯盆地延长组页岩油主要分布于长7₃亚段(图5)。该页岩层段主要为深灰色、黑色泥页岩夹少量粉砂岩,其中黑色页岩分布范围约 $4.3\times 10^4\text{ km}^2$,平均厚度达16 m,有机质最为富集,平均TOC含量约14%,最高可达30%^[145,150]。诸多研究证实,长7₃沉积时期,与秦岭—大别陆内造山事件相伴的火山喷发、热液活动等促进湖水表层藻类大量繁盛,形成极高的生物生产力,与底部(硫化)缺

氧水体,共同促进长 7_3 中亚段有机质大量沉积富集。长 7_3 页岩层段现今埋深总体大于1 000 m, R_o 为0.85%~1.15%^[145,150,204],正处在生油高峰期, S_1 含量主体大于2.5 mg/g(图5)。这些特征表明,长 7_3 亚段总体上为页岩油甜点段(富集段)。目前在长 7_3 亚段获得13口井的页岩油工业油流,展示了良好勘探开发潜力^[151]。

综上所述,延长组致密油、页岩油甜点段形成与分布,受到其沉积时期区域性地质事件—陆内造山、湖平面升降、火山活动(喷发、热源活动等)、水体缺氧、重力流等事件不同程度的影响,是这些事件沉积耦合作用的结果。

4 问题与展望

上述对四川盆地海相页岩气、鄂尔多斯盆地致密油、页岩油等沉积富集过程中相关的各类地质事件开展精细解剖,证实了甜点区(段)关键要素(优质烃源岩、优质储层等)的沉积过程与全球性或区域性多种地质事件密切相关,是它们沉积耦合的结果。以此进一步明确了非常规油气沉积学理论内涵:非常规油气资源沉积富集是全球性或区域性构造与海(湖)平面升降、火山活动、气候突变、水体缺氧、生物灭绝/辐射、重力流等多种地质事件沉积耦合的结果。

非常规油气沉积学是研究与非常规油气资源密切相关的沉积(物)岩及其沉积过程、以及非常规油气沉积富集规律的学科,主要研究对象为相对细粒的沉积(物)岩。当前关于细粒沉积(物)岩研究中所存在的问题,一些学者已开展较为深入讨论^[21,23,205]。依据非常规油气沉积学的主要研究内容,本文着重从有机质富集机理、优质储层发育机制及重要地质事件耦合机制这三个方面,初步讨论其所面临的关键科学问题与挑战。

4.1 有机质富集机理

有机质沉积富集与优质烃源岩发育密切相关,其形成机理研究在油气(特别是非常规油气)勘探开发中具有极其重要的意义,是非常规油气沉积学研究的核心内容之一。影响有机质沉积富集因素较多,包括沉积水体表层初级生产力、底部水体缺氧条件、沉积速率、黏土矿物含量、海平面变化等。然而对于其控制因素研究,长期争论的焦点是表层水体初级生产力和底部水体缺氧条件,前者与藻类等生物繁盛程度密切相关,是有机质富集的物质基础;后

者受控于底部水体氧化还原条件,是有机质生成后能否被有效保存而不被氧化(分解)的关键因素。探讨这两大控制因素在有机质沉积富集过程中的作用,需要对表层水体初级生产力与缺氧条件进行表征。针对这两个因素,尽管目前已提出包括生物、地球化学等诸多指标,部分指标得到广泛应用,但这些指标对开展不同地质时代沉积物,尤其是古老沉积物研究的适用性存在较大差异。例如,现代或侏罗纪(硅藻开始出现)以来沉积物,可以通过直接测量沉积物中藻类等生物含量研究生物生产率变化。而在侏罗纪以前的古老沉积物中,由于与油气生成密切的藻类等难以有效保存(R_o 大约1.0%时藻类面貌已完全消失)^[206-207],常用浮游动物(如放射虫)含量或与有机质密切相关的元素含量(生源Ba、Si、P等)作为替代指标。沉积物在早期与水上覆水体相互作用过程中,以及后期成岩作用过程中,会使得这些元素含量发生变化,从而难以客观表征当时生物生产率高低;而浮游动物多少与藻类等生物繁盛程度也没有必然联系。因此,怎样更客观地评价地质历史时期(前侏罗纪)水体表层初级生产力,是开展有机质富集机理研究所面临的一个重要科学问题。

有机质富集机理研究所面临的另一个重要科学问题,是极高生物生产力与缺氧事件驱动机制的多样性问题。具体来说,如何客观地评价一些重要地质事件,如构造运动(快速沉降)、火山喷发、热源活动等,对沉积水体中生态系统及物理—化学条件的影响程度。尽管一些学者已开展这方面的工作,并取得一些重要成果(如文献[80,171,208]),但这些事件(火山喷发、热源活动)所发生空间范围、强度等,所形成环境压力程度、以及与富有机质沉积分布的空间匹配关系仍不是十分清楚。更为重要的是,不同地质时代的有机质沉积富集,其驱动机制也存在着一定差异。例如,现代火山活动喷发形成的火山灰沉降到贫营养化区域海水中,可以引发硅藻等生物繁盛,显著提高海洋表层生产力,但对于具有高生物生产力背景区域,其生物生产力是否也能够被显著提高?

在藻类等生物生长、死亡后沉积富集过程中,必然会留存一些与当时生产率密切相关的“痕迹”,如分子化石(生物标志物)、微生物(细菌等),或与有机质密切相关的自生矿物等。例如,有研究表明微生物能够准确记录前寒武10~20年周期性太阳黑子活

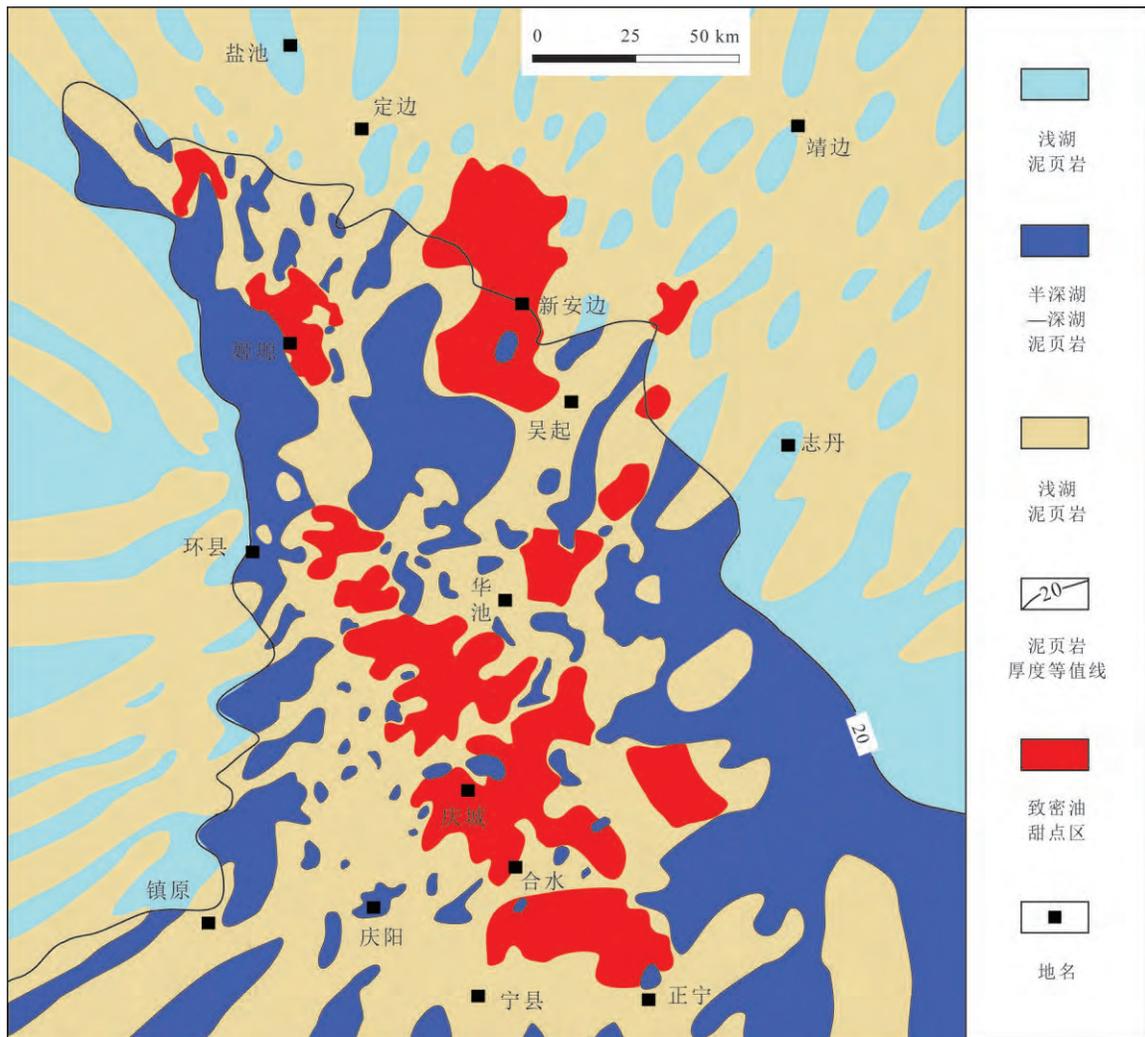


图7 鄂尔多斯盆地延长组致密油甜点区分布图(修改自文献[159])

Fig.7 Distribution of tight oil sweet-spot areas of Yanchang Formation in Ordos Basin, Central China (modified from reference [159])

动的变化^[67,207];最近有研究提出黏土矿物种类对海洋有机质保存具有重要作用^[208],即蒙脱石容易吸附海洋有机质,而陆源有机质与绿泥石等矿物在海水中能够紧密结合。这些研究为寻找生产率可靠指标提供了新思路。针对现代与古代富有机质沉积物,加强这些方面的研究,以期找到能够代表水体表层初级生产力的可靠指标。同时,针对特定区域,需系统开展该区域内各类地质事件沉积过程的研究,精细刻画各类事件沉积的空间展布范围与影响程度,明确这些事件与富有机质沉积作用机制及空间匹配关系。

4.2 优质储层发育机制

以黑色泥页岩等为主的细粒沉积岩沉积时间累计占整个显生宙的三分之一,约占沉积岩的三分之

二,全球油气储量的90%以上来自这些黑色泥页岩层系。泥页岩成分十分复杂,由脆性矿物(石英、方解石、白云石等)、黏土矿物(伊利石、伊/蒙间层等)、有机质(藻类等)及其他自生矿物等构成。在一定沉积条件下,受气候、陆源碎屑注入、水体表层生物生产力等因素影响,泥页岩中常发育纹层沉积^[209-210],包括有机质纹层、石英、长石等粉砂纹层、黏土纹层、碳酸盐纹层等。火山喷发会沉积火山灰(凝灰质)纹层。四川盆地五峰组—龙马溪组、鄂尔多斯延长组长7段、准噶尔盆地芦苇沟组等均可见到上述5类纹层。不同类型纹层发育的泥页岩常具有差异物性特征,对优质储层发育具有控制作用。与黏土纹层相比,粉砂纹层因具有较大粒间孔隙常聚集致密油;火山碎屑易发生溶蚀与钠长石化,次生孔隙发育,故火

山喷发形成凝灰质纹层可作为致密储层^[211]。处于生油窗的陆相泥页岩中有机质孔不发育,以黏土矿物粒内孔、粒(晶)间孔为主^[147,212];而处在生气窗或高成熟度海相页岩有机质发育大量纳米级孔隙,其孔隙占页岩总孔隙度的50%以上^[83,87]。尽管不同类型纹层连续分布可以形成水平层理(缝),能够为油气水平运移提供高速通道^[87,147],但是正是因为这些纹层的发育使得泥页岩层系具有较强非均质性,从而不利于页岩油气或致密油气的高效开采。尤其对于物源供应复杂多变的陆相湖盆,难以形成连续纹层,多种组分混合沉积,岩石类型复杂多变,储层非均质更强。因此,针对泥页岩层系岩石类型复杂性,如何准确地预测页岩油气优质储层分布,是开展优质储层发育机制研究所面临的重要挑战。

盆地深水地区易发育重力流沉积,所形成的砂体与富有机质页岩能够相互叠置大面积发育,从而形成致密油甜点区(如图6、图7)。由于不同类型重力流流体性质不同,所形成的砂体物性特征也必然存在着差异。例如,鄂尔多斯盆地长6、长7段砂质碎屑流沉积砂体孔隙度平均约9.8%,渗透率平均约 $0.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而浊积砂体物性明显偏低,孔隙度与渗透率分别为7.9%和 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[201]。更为复杂的是,浊流、砂质碎屑流、异重流等这些重力流在流动过程中,可以发生相互转化,从而形成复杂重力流沉积砂体。值得注意的是,盆地内部常发育底流,也可以对重力流沉积物进行再改造^[213-214]。因此,优质储层发育机制研究所面临的另一个重要挑战,针对盆地深水复杂重力流沉积体系,如何精确预测致密油气优质储层分布。

开展泥页岩层系从纳米级至米级跨尺度的沉积储层精细描述与评价,利用岩芯、露头、测井、地震等多种研究手段,建立从微观到宏观的优质储层发育模式,是实现泥页岩层系优质储层评价与分布预测的有效途径。例如,地震沉积学新技术与方法已成功预测浊流等重力流砂体平面分布^[188,215]。另外,沉积物理模拟技术通过水动力、物源供应、水体性质等参数能够重现沉积物的形成过程,并建立相关沉积模式,是开展优质储层发育机制研究的有效手段之一。鄂尔多斯盆地长7段通过重力流沉积物理模拟再现了砂体形成过程与分布规律,有效预测了该区优质致密油储层分布^[154]。粉砂纹层沉积物理模拟已取得重要进展,建立了粉砂纹层发育机制^[216]。下一

步可开展有机质或泥页岩多种成分的沉积物理模拟实验,结合数值模拟技术,研究其优质储层发育机制,精细刻画优质储层分布。

4.3 重要地质事件耦合机制

非常规油气资源沉积富集与重大地质环境突变密切相关,而重大地质环境突变是地球深部与表层相互作用的结果,具体表现为全球性或区域性地质事件对沉积环境的直接影响。这些地质事件包括构造事件、火山活动、气候突变、海(湖)平面突变、水体缺氧、生物群灭绝/辐射、重力流等。它们不是孤立发生的,在时间上与空间上具有耦合关系(图2,5)。其中全球性地质事件与区域性地质事件耦合沉积不仅仅局限在奥陶纪—志留纪之交(五峰组—龙马溪组沉积时期),它广泛存在于地质历史上各个重大地质转折期。例如,白垩纪末由于冈瓦纳大陆裂解造成洋壳体积增加,使得海平面快速上升;相伴的火山活动释放营养物质及喷发的反馈作用造成的大量陆地营养物质输入引发大洋表层富营养化和水体普遍缺氧,形成大洋缺氧事件和黑色页岩广泛沉积;火山喷发会造成大气 CO_2 浓度快速升高,引发气候“温室效应”^[217]。

尽管地球重大地质转折期相关的各类地质事件相互作用机制一直存在着争议,但它们对非常规油气资源形成与富集均产生重大影响。这是因为在这些时期地球表层发生的这些全球性或区域性地质事件,会对岩石圈表层、大气圈、水圈和生物圈产生重要影响,从而控制着全球富有机质泥页岩层系沉积与分布。目前随着理论、技术和方法的发展与创新,地质事件耦合机制研究呈现两大趋势:一是研究程度越来越深,对地质事件过程(时空分布等)刻画的越来越精确;二是研究内容也越来越广泛,多学科交叉融合成为地质事件沉积研究的特色。

总之,地质事件相关的沉积是不同于正常沉积的“非常规”沉积,全球性或区域性多种地质事件的耦合沉积直接控制着非常规油气甜点区(段)形成与分布。未来需从地球系统科学出发,采用“非常规思想”,不断深入研究各类地质事件耦合沉积机制,必将在寻找全球非常规油气资源过程中发挥重要作用。

5 认识与结论

(1) 非常规油气沉积学是研究与非常规油气资

源密切相关的沉积(物)岩及其沉积过程、沉积环境,以及非常规油气甜点区(段)、富集规律、资源潜力等的学科。基于四川盆地海相页岩气、鄂尔多斯盆地陆相致密油、页岩油等沉积富集过程中相关的各类地质事件精细解剖,提出非常规油气沉积学理论内涵:非常规油气资源沉积富集是全球性或区域性多种地质事件沉积耦合的结果。

(2) 非常规油气沉积学研究面临的关键科学问题与挑战,主要包括有机质富集机理、优质储层发育机制及重要地质事件耦合机制三个研究方面。其中有机质富集机理涉及到两个科学问题,即:如何客观地评价地质历史时期水体表层初级生产力、极高生物生产力与缺氧事件驱动机制的多样性问题;优质储层发育机制存在着两个挑战,即:如何在岩石类型复杂的泥页岩层系中准确地预测页岩油气优质储层分布、如何在盆地深水复杂重力流沉积体系中精确预测致密油气优质储层分布。

(3) 非常规油气资源沉积富集与重大地质环境突变密切相关,具体表现为地球深部与表层相互作用所引发的各类地质事件。未来需要从地球系统科学出发,采用“非常规思想”,以地质事件思维深入开展非常规油气沉积学研究,为寻找非常规油气资源发挥重要作用。

6 结束语

我国非常规油气资源类型多,包括致密油气、页岩油气、煤层气、油页岩等;地层年代跨度大,自元古代到新生代均有重要发现;区域分布广泛,涵盖了鄂尔多斯、四川、松辽、塔里木、渤海湾、准噶尔、柴达木、吐哈等主要大中型盆地。限于笔者研究工作与文章篇幅,本文仅对南方四川盆地海相页岩气与鄂尔多斯盆地陆相致密油、页岩油沉积层系进行了探讨。希望有更多感兴趣的科学工作者投身其中,进一步丰富完善非常规油气沉积学。

致谢 本文在研究过程中得到王红岩、董大忠、朱如凯、袁选俊、穆福元、刘洪林、赵群、陶士振、陈振宏、卢斌、杨智等专家的帮助。在完成此稿过程中与王清晨、陈代钊、严德天、陶辉飞、韦恒叶、王民、杨仁超、冀文斌、赵建华、何江林、褚杨、刘俊杰、刘贝、李志扬、吴松涛、林森虎、潘松圻、刘翰林等专家就一些问题作了讨论。中国科学院肖文交院士对文稿进行了审阅。在此向他们表示衷心感谢。

参考文献(References)

- [1] Hobson G D, Tiratsoo E N. Introduction to petroleum geology [M]. Bucks, UK: Scientific Press Ltd, 1975: 1-300.
- [2] 吴崇筠,薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,1993:1-484. [Wu Chongyun, Xue Shuhao. Sedimentology of petroliferous basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 1-484.]
- [3] Zimmerle W. Petroleum sedimentology [M]. Stuttgart, Germany: Springer, 1995: 1-400.
- [4] 刘宝珺. 中国沉积学的回顾和展望[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 1-7. [Liu Baojun. Sedimentology of China: A review and look forward[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 1-7.]
- [5] 孙枢. 中国沉积学的今后发展:若干思考与建议[J]. 地学前沿, 2005, 12(2): 3-10. [Sun Shu. Sedimentology in China: Perspectives and suggestions[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 3-10.]
- [6] 王成善,郑和荣,冉波,等. 活动古地理重建的实践与思考:以青藏特提斯为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 849-860. [Wang Chengshan, Zheng Herong, Ran Bo, et al. On paleogeographic reconstruction: An example for application in Tibetan tethys [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 849-860.]
- [7] 孙龙德,方朝亮,李峰,等. 中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 385-396. [Sun Longde, Fang Chaoliang, Li Feng, et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 385-396.]
- [8] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2011: 1-310. [Zou Caineng. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1-310.]
- [9] 邹才能. 非常规油气地质学[M]. 北京:地质出版社, 2014: 1-463. [Zou Caineng. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 1-463.]
- [10] 顾家裕,张兴阳. 油气沉积学发展回顾和应用现状[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 137-141. [Gu Jiayu, Zhang Xingyang. Development review and current application of petroleum sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 137-141.]
- [11] 孙龙德,方朝亮,李峰,等. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 129-136. [Sun Longde, Fang Chaoliang, Li Feng, et al. Innovations and challenges of sedimentology in oil and gas exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 129-136.]
- [12] 朱如凯,邹才能,袁选俊,等. 中国能源沉积学研究进展与发展战略思考[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 1004-1015. [Zhu Rukai, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Research progress and development strategic thinking on energy sedimentology [J]. Ac-

- ta *Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 1004-1015.]
- [13] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1993-1999.
- [14] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 1-11. [Jia Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 1-11.]
- [15] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 非常规油气地质学建立及实践[J]. *地质学报*, 2019, 93(1): 12-23. [Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Establishment and practice of unconventional oil and gas geology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(1): 12-23.]
- [16] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 238-246. [Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 238-246.]
- [17] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 385-399, 454. [Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399, 454.]
- [18] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 689-701. [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 689-701.]
- [19] 邹才能, 丁云宏, 卢拥军, 等. “人工油气藏”理论、技术及实践[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 144-154. [Zou Caineng, Ding Yunhong, Lu Yongjun, et al. Concept, technology and practice of “man-made reservoirs” development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 144-154.]
- [20] Qiu Z, Zou C N. Controlling factors on the formation and distribution of “sweet-spot areas” of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, doi: 10.1016/j.jseae.2019.103989.
- [21] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1031-1039. [Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031-1039.]
- [22] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 198-208. [Chen Shiyue, Zhang Shun, Wang Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 198-208.]
- [23] 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(1): 6-15. [Zhou Lihong, Pu Xiugang, Deng Yuan, et al. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(1): 6-15.]
- [24] 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 119-133. [Wang Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 119-133.]
- [25] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 572-586. [Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 572-586.]
- [26] 蒋裕强, 宋益滔, 漆麟, 等. 中国海相页岩岩相精细划分及测井预测: 以四川盆地南部威远地区龙马溪组为例[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 107-118. [Jiang Yuqiang, Song Yitao, Qi Lin, et al. Fine lithofacies of China's marine shale and its logging prediction: A case study of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in Weiyuan area, southern Sichuan Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 107-118.]
- [27] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075. [Zou Caineng, Zhao Zhengzhang, Yang Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.]
- [28] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式: 以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34-43. [Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34-43.]
- [29] 杜远生. 事件沉积学的历史、现状和展望[C]//第四届全国沉积学大会论文集. 青岛: 中国地质学会, 中国矿物岩石地球化学学会, 2009: 30-31. [Du Yuansheng. History, current, prospect of event deposition [C]//Academic proceedings of the fourth national conference of sedimentology. Qingdao: Chinese Geological Society, Chinese Society of Mineralogy and Petrochemistry, 2009: 30-31.]
- [30] McKenzie D P, Parker R L. The North Pacific: An example of tectonics on a sphere [J]. *Nature*, 1967, 216(5122): 1276-1280.

- [31] Le Pichon X. Sea-floor spreading and continental drift[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(12): 3661-3697.
- [32] Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(6): 1959-1982.
- [33] Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction [J]. *Science*, 1980, 208(4448): 1095-1108.
- [34] Raup D M, Sepkoski Jr J J. Mass extinctions in the marine fossil record[J]. *Science*, 1982, 215(4539): 1501-1503.
- [35] Sepkoski Jr J J. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. III. Post-Paleozoic families and mass extinctions [J]. *Paleobiology*, 1984, 10(2): 246-267.
- [36] 戎嘉余, 黄冰. 生物大灭绝研究三十年[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2014, 44(3): 377-404. [Rong Jiayu, Huang Bing. Study of mass extinction over the past thirty years: A synopsis [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2014, 44(3): 377-404.]
- [37] Morgan W J. Deep mantle convection plumes and plate motions [J]. *AAPG Bulletin*, 1972, 56(2): 203-213.
- [38] Condie K C. Supercontinents and superplume events: Distinguishing signals in the geologic record[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146(1/2): 319-332.
- [39] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与Rodinia超大陆聚合—裂解: 观察、解释与检验[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(6): 543-559. [Li Xianhua, Li Wuxian, He Bin. Building of the South China Block and its relevance to assembly and break-up of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(6): 543-559.]
- [40] Li Z X, Mitchell R N, Spencer C J, et al. Decoding Earth's rhythms: Modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes[J]. *Precambrian Research*, 2019, 323: 1-5.
- [41] 殷鸿福, 宋海军. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合 [J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2013, 43(10): 1539-1552. [Yin Hongfu, Song Haijun. Mass extinction and Pangea integration during the Paleozoic-Mesozoic transition [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2013, 43(10): 1539-1552.]
- [42] 沈树忠, 张华. 什么引起五次生物大灭绝?[J]. *科学通报*, 2017, 62(11): 1119-1135. [Shen Shuzhong, Zhang Hua. What caused the five mass extinctions?[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(11): 1119-1135.]
- [43] Bouma A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 1-168.
- [44] 王清晨. 事件沉积学[J]. *地球科学进展*, 1991, 6(3): 90-91. [Wang Qingchen. Advance of event deposition [J]. *Advances in Earth Sciences*, 1991, 6(3): 90-91.]
- [45] Shanmugam G. 50 years of the turbidite Paradigm (1950s—1990s): Deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [46] 何起祥. 沉积地球科学的历史回顾与展望[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 10-18. [He Qixiang. Sedimentary earth sciences: Yesterday, today and tomorrow [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 10-18.]
- [47] 王成善. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究: 从重大地质事件探寻地球表层系统耦合[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(7): 838-842. [Wang Chengshan. Coupling of the earth surface system: Inferring from the Cretaceous major geological events [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(7): 838-842.]
- [48] 胡修棉, 王成善. 白垩纪大洋红层: 特征、分布与成因[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1): 1-13. [Hu Xiumian, Wang Chengshan. Cretaceous oceanic red beds: Characters, occurrences, and origin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 1-13.]
- [49] Talling P J, Amy L A, Wynn R B. New insight into the evolution of large-volume turbidity currents: Comparison of turbidite shape and previous modelling results [J]. *Sedimentology*, 2007, 54(4): 737-769.
- [50] Kuenen P H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. *The Journal of Geology*, 1950, 58(2): 91-127.
- [51] Heezen B C, Ewing M. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake [J]. *American Journal of Science*, 1952, 250(12): 849-873.
- [52] Walker R G. The origin and significance of the internal sedimentary structures of turbidites [J]. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 1965, 35(1): 1-32.
- [53] Einsele G, Seilacher A. *Cyclic and event stratification* [M]. New York: Springer, 1982: 1-536.
- [54] Hsü K J. Actualistic catastrophism address of the retiring president of the international association of sedimentologists [J]. *Sedimentology*, 1983, 30(1): 3-9.
- [55] 欧阳自远, 管云彬. 巨大撞击事件诱发古气候旋回的初步研究 [J]. *科学通报*, 1992(9): 829-831. [Ouyang Ziyuan, Guan Yunbin. Preliminary study on paleoclimate cycle induced by huge collision [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992(9): 829-831.]
- [56] Myrow P M, Southard J B. Tempestite deposition [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(5): 875-887.
- [57] 龚一鸣. 风暴岩、震积岩、海啸岩: 几个名词含义的商榷 [J]. *地质论评*, 1988, 34(5): 481-482. [Gong Yiming. Tempestite, seismite, and tsunamite: A discussion of several sedimentological terms [J]. *Geological Review*, 1988, 34(5): 481-482.]
- [58] Hsu K J. Studies of ventura field, California: Facies geometry and genesis of Lower Pliocene turbidites [J]. *AAPG Bulletin*, 1977, 61: 137-168.
- [59] 孙枢, 李继亮. 我国浊流与其他重力流沉积研究进展概况和

- 发展方向问题刍议[J]. 沉积学报, 1984, 2(4): 1-7. [Sun Shu, Li Jiliang. Researches on turbidity and other gravity flow sedimentation in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(4): 1-7.]
- [60] 郑永飞. 新元古代雪球地球事件与地幔超柱活动[J]. 自然杂志, 2005, 27(1): 28-32. [Zheng Yongfei. Neoproterozoic snowball earth event and mantle superplume activity [J]. Chinese Journal of Nature, 2005, 27(1): 28-32.]
- [61] Parrish J T, Soreghan G S. Sedimentary geology and the future of paleoclimate studies[J]. The Sedimentary Record, 2013, 11(2): 4-10.
- [62] Zambito IV J J, Benison K C. Extremely high temperatures and paleoclimate trends recorded in Permian ephemeral lake halite [J]. Geology, 2013, 41(5): 587-590.
- [63] Dewey J F, Bird J M. Mountain belts and the new global tectonics[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(14): 2625-2647.
- [64] 徐义刚. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 341-353. [Xu Yigang. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 341-353.]
- [65] 戎嘉余, 方宗杰. 生物大灭绝与复苏: 来自华南古生代和三叠纪的证据[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004: 1-1087. [Rong Jiayu, Fang Zongjie. Mass extinction and recovery-evidences from the Palaeozoic and Triassic of South China [M]. Heifei: University of Science and Technology of China Press, 2004: 1-1087.]
- [66] Shen S Z, Crowley J L, Wang Y, et al. Calibrating the End-Permian mass extinction[J]. Science, 2011, 334(6061): 1367-1372.
- [67] 谢树成. 距今2.52亿年前后的生物地球化学循环与海洋生态系统崩溃: 对现代海洋的启示[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2018, 48(12): 1600-1605. [Xie Shucheng. The shift of biogeochemical cycles indicative of the progressive marine ecosystem collapse across the Permian-Triassic boundary: An analog to modern oceans[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2018, 48(12): 1600-1605.]
- [68] Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes [J]. Earth-Science Reviews, 1999, 48(4): 217-250.
- [69] Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. The phanerozoic record of global sea-level change [J]. Science, 2005, 310(5752): 1293-1298.
- [70] Haq B U, Schutter S R. A chronology of paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64-68.
- [71] 王成善, 胡修棉. 白垩纪世界与大洋红层[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 11-21. [Wang Chengshan, Hu Xiumian. Cretaceous world and oceanic red beds[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 11-21.]
- [72] Grice K, Cao C Q, Love G D, et al. Photic zone Euxinia during the Permian-Triassic superanoxic event[J]. Science, 2005, 307(5710): 706-709.
- [73] 胡修棉. 东特提斯洋晚中生代—古近纪重大事件研究进展[J]. 自然杂志, 2015, 37(2): 93-102. [Hu Xiumian. Overview of the Late Mesozoic Paleogene major paleoceanographic and geological events in eastern tethyan ocean[J]. Chinese Journal of Nature, 2015, 37(2): 93-102.]
- [74] Zhang S C, Wang X M, Wang H J, et al. Sufficient oxygen for animal respiration 1,400 million years ago[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(7): 1731-1736.
- [75] Zou C N, Qiu Z, Poulton S W, et al. Ocean euxinia and climate change "double whammy" drove the Late Ordovician mass extinction[J]. Geology, 2018, 46(6): 535-538.
- [76] Trabucho-Alexandre J, Hay W W, de Boer P L. Phanerozoic environments of black shale deposition and the Wilson Cycle [J]. Solid Earth, 2012, 3(1): 29-42.
- [77] Lee C T A, Jiang H H, Ronay E, et al. Volcanic ash as a driver of enhanced organic carbon burial in the Cretaceous [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4197.
- [78] 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 624-634. [Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Zhang Xiaolei, et al. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 624-634.]
- [79] 邱振, 邹才能, 王红岩, 等. 中国南方五峰组—龙马溪组页岩气差异富集特征与控制因素探讨[J]. 天然气地球科学, 2019, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2019.11.003. [Qiu Zhen, Zou Caineng, Wang Hongyan, et al. Discussion on characteristics and controlling factors of differential enrichment of Wufeng-Longmaxi Shale gas in South China [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2019.11.003.]
- [80] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机—无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2019, 49(3): 499-520. [Liu Quanyou, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2019, 49(3): 499-520.]
- [81] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 1-6. [Wang Zhigang. Breakthrough of fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.]
- [82] 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 等. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 24-37. [Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Zhihong, et al. Discovery and exploration of Fuling shale gas field[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 24-37.]
- [83] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574. [Ma Yong-

- sheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 561-574.]
- [84] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 161-169. [Ma Xinhua, Xie Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 161-169.]
- [85] 郑述权, 谢祥锋, 罗良仪, 等. 四川盆地深层页岩气水平井优快钻井技术: 以泸203井为例 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(7): 88-93. [Zheng Shuquan, Xie Xiangfeng, Luo Liangyi, et al. Fast and efficient drilling technologies for deep shale gas horizontal wells in the Sichuan Basin: A case study of well Lu 203 [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(7): 88-93.]
- [86] 胡伟光, 李发贵, 范春华, 等. 四川盆地海相深层页岩气储层预测与评价: 以丁山地区为例 [J]. *天然气勘探与开发*, 2019, 42(3): 66-77. [Hu Weiguang, Li Fagui, Fan Chunhua, et al. Prediction and evaluation on deeper marine shale-gas reservoirs, Dingshan area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2019, 42(3): 66-77.]
- [87] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素 [J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 1-10. [Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 1-10.]
- [88] 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析 [J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 8-17. [He Zhiliang, Nie Haikuan, Zhang Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 8-17.]
- [89] 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 等. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测 [J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1057-1068. [Zhai Gangyi, Wang Yufang, Bao Shujing, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China [J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1057-1068.]
- [90] Brenchley P J, Newall G. A facies analysis of upper Ordovician regressive sequences in the Oslo region, Norway: A record of glacio-eustatic changes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1980, 31: 1-38.
- [91] Sutcliffe O E, Dowdeswell J A, Whittington R J, et al. Calibrating the Late Ordovician glaciation and mass extinction by the eccentricity cycles of Earth's orbit [J]. *Geology*, 2000, 28(11): 967-970.
- [92] Trotter J A, Williams I S, Barnes C R, et al. Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry [J]. *Science*, 2008, 321(5888): 550-554.
- [93] Vandenbroucke T R A, Armstrong H A, Williams M, et al. Polar front shift and atmospheric CO₂ during the glacial maximum of the Early Paleozoic Icehouse [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(34): 14983-14986.
- [94] Finnegan S, Bergmann K, Eiler J M, et al. The magnitude and duration of Late Ordovician-Early Silurian glaciation [J]. *Science*, 2011, 331(6019): 903-906.
- [95] Huff W D. Ordovician K-bentonites: Issues in interpreting and correlating ancient tephra [J]. *Quaternary International*, 2008, 178(1): 276-287.
- [96] Tao H F, Qiu Z, Lu B, et al. Volcanic activities triggered the first global cooling event in the Phanerozoic [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, doi: 10.1016/j.jseaes. 2019. 104074.
- [97] Hammarlund E U, Dahl T W, Harper D A T, et al. A sulfidic driver for the End-Ordovician mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 331-332: 128-139.
- [98] Zou C N, Qiu Z, Wei H Y, et al. Euxinia caused the Late Ordovician extinction: Evidence from pyrite morphology and pyritic sulfur isotopic composition in the Yangtze area, South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 511: 1-11.
- [99] Bartlett R, Elrick M, Wheeley J R, et al. Abrupt global-ocean anoxia during the Late Ordovician-Early Silurian detected using uranium isotopes of marine carbonates [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(23): 5896-5901.
- [100] Li N, Li C, Fan J X, et al. Sulfate-controlled marine euxinia in the semi-restricted inner Yangtze Sea (South China) during the Ordovician-Silurian transition [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 534: 102981.
- [101] Harper D A T, Hammarlund E U, Rasmussen C M Ø. End ordovician extinctions: A coincidence of causes [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1294-1307.
- [102] Su W B, Huff W D, Etensohn F R, et al. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician-Silurian transition, South China: Possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and its implications for the evolution of Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 2009, 15(1): 111-130.
- [103] 戎嘉余, 陈旭, 王怿, 等. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示 [J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2011, 41(10): 1407-1415. [Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, et al. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2011, 41(10): 1407-1415.]

- [104] 戎嘉余,王怿,詹仁斌,等. 中国志留纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2019,49(1):93-114. [Rong Jiayu, Wang Yi, Zhan Renbin, et al. Silurian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2019, 49(1): 93-114.]
- [105] 戎嘉余,黄冰. 华南奥陶纪末生物大灭绝的肇端标志:腕足动物稀少贝组合(*Manosia* Assemblage)及其穿时分布[J]. 地质学报,2019,93(3):509-527. [Rong Jiayu, Huang Bing. An indicator of the onset of the End Ordovician mass extinction in South China: The *Manosia* brachiopod assemblage and its diachronous distribution [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 509-527.]
- [106] 陈旭,樊隽轩,陈清,等. 论广西运动的阶段性[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2014,44(5):842-850. [Chen Xu, Fan Junxuan, Chen Qing, et al. Toward a stepwise Kwangsi Orogeny[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2014, 44(5): 842-850.]
- [107] 卢斌,邱振,周杰,等. 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组钾质斑脱岩特征及其地质意义[J]. 地质科学,2017,52(1):186-202. [Lu Bin, Qiu Zhen, Zhou Jie, et al. The characteristics and geological significance of the K-bentonite in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas [J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(1): 186-202.]
- [108] 徐亚军,杜远生. 从板缘碰撞到陆内造山:华南东南缘早古生代造山作用演化[J]. 地球科学,2018,43(2):333-353. [Xu Yajun, Du Yuansheng. From periphery collision to intraplate orogeny: Early Paleozoic orogenesis in southeastern part of South China[J]. Earth Science, 2018, 43(2): 333-353.]
- [109] 张元东,詹仁斌,甄勇毅,等. 中国奥陶纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2019,49(1):66-92. [Zhang Yuandong, Zhan Renbin, Zhen Yongyi, et al. Ordovician integrative stratigraphy and timescale of China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2019, 49(1): 66-92.]
- [110] 王玉满,李新景,王皓,等. 四川盆地东部上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组斑脱岩发育特征及地质意义[J]. 石油勘探与开发,2019,46(4):653-665. [Wang Yuman, Li Xinjing, Wang Hao, et al. Developmental characteristics and geological significance of the bentonite in the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation in eastern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 653-665.]
- [111] 邱振,卢斌,陈振宏,等. 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨:以五峰组—龙马溪组含气页岩为例[J]. 沉积学报,2019,37(6):1296-1308. [Qiu Zhen, Lu Bin, Chen Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1296-1308.]
- [112] Blakey R C. Gondwana paleogeography from assembly to breakup—A 500 m. y. odyssey [M]//Fielding C R, Frank T D, Isbell J L. Resolving the Late Paleozoic ice age in time and space. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2008: 1-28.
- [113] Nance R D, Murphy J B, Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay [J]. Gondwana Research, 2014, 25(1): 4-29.
- [114] Torsvik T H, Cocks L R M. Gondwana from top to base in space and time [J]. Gondwana Research, 2013, 24(3/4): 999-1030.
- [115] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报,2012,31(7):1035-1053. [Shu Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035-1053.]
- [116] 马永生,陈洪德,王国力. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京:科学出版社,2009:303-312. [Ma Yongsheng, Chen Hongde, Wang Guoli. Sequence and palaeogeography in South China [M]. Beijing: Science Press, 2009: 303-312.]
- [117] Brenchley P J, Marshall J D, Harper D A T, et al. A Late Ordovician (Hirnantian) karstic surface in a submarine channel, recording glacio-eustatic sea-level changes: Meifod, central Wales [J]. Geological Journal, 2006, 41(1): 1-22.
- [118] Loi A, Ghiene J F, Dabard M P, et al. The Late Ordovician glacio-eustatic record from a high-latitude storm-dominated shelf succession: The Bou Ingarf section (Anti-Atlas, southern Morocco) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 296(3/4): 332-358.
- [119] Frakes L A, Francis J E, Skytys J I. Climate modes of the Phanerozoic [M]. New York: Cambridge University Press, 1992: 1-274.
- [120] Brenchley P J, Marshall J D, Carden G A F, et al. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse period [J]. Geology, 1994, 22(4): 295-298.
- [121] Berner R A. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂ [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(23): 5653-5664.
- [122] Ghiene J F, Desrochers A, Vandenbroucke T R A, et al. A Cenozoic-style scenario for the End-Ordovician glaciation [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4485.
- [123] Wang G X, Zhan R B, Percival I G. The End-Ordovician mass extinction: A single-pulse event? [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 192: 15-33.
- [124] Bergström S M, Huff W D, Saltzman M R, et al. The greatest volcanic ash falls in the phanerozoic: Trans-atlantic relations of the Ordovician millbrig and kinnekulle k-bentonites [J]. The Sedimentary Record, 2004, 2: 4-8.
- [125] Yang S C, Hu W X, Wang X L, et al. Duration, evolution, and implications of volcanic activity across the Ordovician-Silurian transition in the Lower Yangtze region, South China [J].

- Earth and Planetary Science Letters, 2019, 518: 13-25.
- [126] Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. Predominance of stratified anoxic Yangtze Sea interrupted by short-term oxygenation during the Ordo-Silurian transition[J]. Chemical Geology, 2012, 291: 69-78.
- [127] Shen J H, Pearson A, Henkes G A, et al. Improved efficiency of the biological pump as a trigger for the Late Ordovician glaciation[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(7): 510-514.
- [128] Rong J Y, Harper D A T. A global synthesis of the Latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1988, 79(4): 383-402.
- [129] Ahm A S C, Bjerrum C J, Hammarlund E U. Disentangling the record of diagenesis, local redox conditions, and global seawater chemistry during the Latest Ordovician glaciation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 459: 145-156.
- [130] Chen X, Rong J Y, Fan J X, et al. The global boundary stratotype section and point (GSSP) for the base of the Hirnantian Stage (the uppermost of the Ordovician System) [J]. Episodes, 2006, 29(3): 183-196.
- [131] Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. Large-scale climatic fluctuations in the Latest Ordovician on the Yangtze Block, South China[J]. Geology, 2010, 38(7): 599-602.
- [132] Gong Q, Wang X D, Zhao L S, et al. Mercury spikes suggest volcanic driver of the Ordovician-Silurian mass extinction[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 5304, doi: 10.1038/s41598-017-05524-5.
- [133] Jones D S, Martini A M, Fike D A, et al. A volcanic trigger for the Late ordovician mass extinction? Mercury data from South China and Laurentia [J]. Geology, 2017, 45 (7) : 631-634.
- [134] 谢军, 鲜成钢, 吴建发, 等. 长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优化关键要素实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 174-185. [Xie Jun, Xian Chenggang, Wu Jianfa, et al. Optimal key elements of geoenvironment integration in Changning National Shale Gas Demonstration Zone[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 174-185.]
- [135] 贾爱林, 位云生, 刘成, 等. 页岩气压裂水平井控压生产动态预测模型及其应用[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 71-80. [Jia Ailin, Wei Yunsheng, Liu Cheng, et al. A dynamic prediction model of pressure control production performance of shale gas fractured horizontal wells and its application[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 71-80.]
- [136] 梁兴, 徐进宾, 刘成, 等. 昭通国家级页岩气示范区水平井地质工程一体化导向技术应用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 226-232. [Liang Xing, Xu Jinbin, Liu Cheng, et al. Geosteering technology based on geological and engineering integration for horizontal wells in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 226-232.]
- [137] 邱振, 董大忠, 卢斌, 等. 中国南方五峰组—龙马溪组页岩中笔石与有机质富集关系探讨[J]. 沉积学报, 2016, 34(6): 1011-1020. [Qiu Zhen, Dong Dazhong, Lu Bin, et al. Discussion on the relationship between graptolite abundance and organic enrichment in shales from the Wufeng and Longmaxi Formation, South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(6): 1011-1020.]
- [138] Chen X, Rong J Y, Li Y, et al. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 204(3/4): 353-372.
- [139] 李双建, 沃玉进, 周雁, 等. 影响高演化泥岩盖层封闭性的主控因素分析[J]. 地质学报, 2011, 85(10): 1691-1697. [Li Shuangjian, Yue Yujin, Zhou Yan, et al. Controlling factors affect sealing capability of well-developed muddy cap rock[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(10): 1691-1697.]
- [140] 陈旭, 樊隽轩, 张元动, 等. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 351-358. [Chen Xu, Fan Junxuan, Zhang Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the subsurface areas of the Yangtze Platform [J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 351-358.]
- [141] 邱振, 邹才能, 李熙喆, 等. 论笔石对页岩气源储的贡献: 以华南地区五峰组—龙马溪组笔石页岩为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 606-615. [Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Xizhe, et al. Discussion on the contribution of graptolite to organic enrichment and reservoir of gas shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formations in South China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 606-615.]
- [142] Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 182-196.
- [143] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 34-44. [Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 34-44.]
- [144] 杨华, 邓秀芹. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 513-520. [Yang Hua, Deng Xiuqin. Deposition of Yanchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 513-520.]
- [145] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11. [Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2013, 34(1): 1-11.]
- [146] 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油形成机理与富

- 集规律[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1168-1184. [Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.]
- [147] 邱振, 卢斌, 施振生, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩油滞留聚集机理及资源潜力探讨[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1817-1827, 1847. [Qiu Zhen, Lu Bin, Shi Zhensheng, et al. Residual accumulation and resource assessment of shale oil from the Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1817-1827, 1847.]
- [148] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184. [Yang Zhi, Zou Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation and prospects of source rock oil and gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 173-184.]
- [149] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458. [Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.]
- [150] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 601-614. [Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 601-614.]
- [151] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568. [Du Jinhua, Hu Suyun, Pang Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.]
- [152] 周庆凡, 杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 541-544, 570. [Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-544, 570.]
- [153] 姚泾利, 邓秀琴, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150-158. [Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.]
- [154] 杨华, 牛小兵, 罗顺社, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂体重力流沉积模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 322-332. [Yang Hua, Niu Xiaobing, Luo Shunshu, et al. Research of simulated experiment on gravity flow deposits of tight sand bodies of Chang 7 Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 322-332.]
- [155] 孙宁亮, 钟建华, 田东恩, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 30-40. [Sun Ningliang, Zhong Jianhua, Tian Dongen, et al. Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 30-40.]
- [156] Yang R C, Jin Z J, van Loon T, et al. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: Implications for unconventional petroleum development [J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(1): 95-117.
- [157] Zou C N, Wang L, Li Y, et al. Deep-lacustrine transformation of sandy debrites into turbidites, Upper Triassic, central China [J]. Sedimentary Geology, 2012, 265-266: 143-155.
- [158] 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 511-520. [Yang Hua, Niu Xiaobing, Xu Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 511-520.]
- [159] 杨华, 梁晓伟, 牛小兵, 等. 陆相致密油形成地质条件及富集主控因素: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 12-20. [Yang Hua, Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: A case of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 12-20.]
- [160] 姚泾利, 赵彦德, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油成藏控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 983-992. [Yao Jingli, Zhao Yande, Deng Xiuqin, et al. Controlling factors of tight oil reservoir in Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(4): 983-992.]
- [161] 邱振, 李建忠, 吴晓智, 等. 国内外致密油勘探现状、主要地质特征及差异[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(4): 119-126. [Qiu Zhen, Li Jianzhong, Wu Xiaozhi, et al. Exploration status, main geologic characteristics and their differences of tight oil between America and China [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(4): 119-126.]
- [162] 姜星, 于建青, 史飞, 等. 鄂尔多斯盆地子北地区长6段油藏成藏条件及主控因素[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(4): 64-76. [Jiang Xing, Yu Jianqing, Shi Fei, et al. Hydrocarbon accumulation condition and main controlling factors of Chang-6 reservoir in Zibe area of Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(4): 64-76.]
- [163] 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识: 兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 846-853. [Zhang Guowei, Cheng Shun-

- you, Guo Anlin, et al. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the central orogenic system in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23 (9/10) : 846-853.]
- [164] 陈全红,李文厚,郭艳琴,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组浊积岩体系及油气勘探意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(5) : 656-663. [Chen Quanhong, Li Wenhou, Guo Yanqin, et al. Turbidite systems and the significance of petroleum exploration of Yanchang Formation in the southern Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5) : 656-663.]
- [165] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3) : 213-237.
- [166] 张文正,杨华,彭平安,等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J]. *地球化学*, 2009, 38(6) : 573-582. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 2009, 38(6) : 573-582.]
- [167] 陈安清,陈红德,侯明才,等. 鄂尔多斯盆地中一晚三叠世事件沉积对印支运动I幕的指示[J]. *地质学报*, 2011, 85(10) : 1681-1690. [Chen Anqing, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. The Middle-Late Triassic event sediments in Ordos Basin: Indicators for episode I of the indosinian movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10) : 1681-1690.]
- [168] 邓秀琴,蔺昉晓,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨[J]. *古地理学报*, 2008, 10(2) : 159-166. [Deng Xiuqin, Lin Fangxiao, Liu Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(2) : 159-166.]
- [169] 邱欣卫,刘池阳,李元昊,等. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6) : 1138-1146. [Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Li Yuanhao, et al. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6) : 1138-1146.]
- [170] Zhu R K, Cui J W, Deng S H, et al. High-precision dating and geological significance of Chang 7 tuff zircon of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin in central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6) : 1823-1834, doi: 10.1111/1755-6724.14329.
- [171] Zhang W Z, Yang W W, Xie L Q. Controls on organic matter accumulation in the Triassic Chang 7 lacustrine shale of the Ordos Basin, central China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 183: 38-51.
- [172] 付金华,李士祥,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6) : 936-946. [Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, et al. Paleosedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6) : 936-946.]
- [173] 李森,朱如凯,崔景伟,等. 古环境与有机质富集控制因素研究:以鄂尔多斯盆地南缘长7油层组为例[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(1) : 87-95. [Li Sen, Zhu Rukai, Cui Jingwei, et al. Paleoenvironment and controlling factors of organic matter enrichment: A case of Chang 7 oil reservoir in southern margin of Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(1) : 87-95.]
- [174] 傅强,吕苗苗,刘永斗. 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆浊积岩发育特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2) : 186-192. [Fu Qiang, Lü Miaomiao, Liu Yongdou. Developmental characteristics of turbidite and its implication on petroleum geology in Late-Triassic Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2) : 186-192.]
- [175] Wu Y B, Zheng Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling - Tongbai - Hong'an - Dabie - Sulu orogenic belt in central China [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4) : 1402-1428.
- [176] 刘池洋,赵红格,桂小军,等. 王建强. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5) : 617-638. [Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5) : 617-638.]
- [177] 邓胜徽,卢远征,罗忠,等. 鄂尔多斯盆地延长组的划分、时代及中一晚三叠统界线[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2018, 48(10) : 1293-1311. [Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Luo Zhong, et al. Subdivision and age of the Yanchang Formation and the Middle/Upper Triassic boundary in Ordos Basin, North China [J]. *Science China (Seri. D) : Earth Sciences*, 2018, 48(10) : 1293-1311.]
- [178] 王多云,辛补社,杨华,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2014, 44(10) : 2160-2171. [Wang Duoyun, Xin Bushe, Yang Hua, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age and geological implications of tuff at the bottom of Chang-7 member of Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. *Science China (Seri. D) : Earth Sciences*, 2014, 44(10) : 2160-2171.]
- [179] 张文,李玉宏,张乔,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组时代划分及长7³对印支I幕的响应[J]. *地球科学*, 2017, 42(9) : 1565-1577. [Zhang Wen, Li Yuhong, Zhang Qiao, et al. Chronostratigraphic division of Yanchang Formation in southern Ordos Basin and response of Chang 7³ to Episode I of Indosinian Movement [J]. *Earth Science*, 2017, 42(9) : 1565-1577.]
- [180] 贺聪,吉利明,苏奥,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组热水沉积

- 作用与烃源岩发育的关系[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 277-285. [He Cong, Ji Liming, Su Ao, et al. Relationship between hydrothermal sedimentation process and source rock development in the Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 277-285.]
- [181] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响: 以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 424-429. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 424-429.]
- [182] 宋世骏, 柳益群, 郑庆华, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组黑色岩系成因探讨: 以铜川地区长7₃段为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1117-1128. [Song Shijun, Liu Yiqun, Zheng Qinghua, et al. Genesis analysis of black rock series: A case study of Chang 7₃ member in Tongchuan area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1117-1128.]
- [183] Yang H, Zhang W Z, Wu K, et al. Uranium enrichment in lacustrine oil source rocks of the Chang 7 member of the Yanchang Formation, Erdos Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 39(4): 285-293.
- [184] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 湖相泥岩、页岩的沉积环境和特征对比: 以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 531-540. [Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu, et al. Depositional environment and characteristic comparison between lacustrine mudstone and shale: A case study from the Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 531-540.]
- [185] Yuan W, Liu G D, Stebbins A, et al. Reconstruction of redox conditions during deposition of organic-rich shales of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 486: 158-170.
- [186] Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(4): 454-466.
- [187] Kuypers M M M, Pancost R D, Nijenhuis I A, et al. Enhanced productivity led to increased organic carbon burial in the euxinic North Atlantic Basin during the Late Cenomanian oceanic anoxic event [J]. Paleoclimatology, 2002, 17(4): 1051, doi: 10.1029/2000PA000569.
- [188] 李相博, 刘化清, 潘树新, 等. 中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 904-921. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Pan Shuxin, et al. The past, present and future of research on deep-water sedimentary gravity flow in lake basins of China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 904-921.]
- [189] 李文厚, 邵磊, 魏红红, 等. 西北地区湖相浊流沉积[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2001, 31(1): 57-62. [Li Wenhou, Shao Lei, Wei Honghong, et al. Turbidity current deposits of lake facies in northwestern China [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2001, 31(1): 57-62.]
- [190] 赵俊兴, 李凤杰, 申晓莉, 等. 鄂尔多斯盆地南部长6和长7油层浊流事件的沉积特征及发育模式[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 389-394. [Zhao Junxing, Li Fengjie, Shen Xiaoli, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang 6 and Chang 7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 389-394.]
- [191] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 813-825. [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 813-825.]
- [192] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10-20. [Yang Renchao, Jin Zhijun, Sun Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 10-20.]
- [193] Talling P J, Masson D G, Sumner F J, et al. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. Sedimentology, 2012, 59(7): 1937-2003.
- [194] Kane I A, Pontén A S M. Submarine transitional flow deposits in the Paleogene Gulf of Mexico [J]. Geology, 2012, 40(12): 1119-1122.
- [195] 杨仁超, 尹伟, 樊爱萍, 等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组湖相重力流沉积细粒岩及其油气地质意义[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 791-806. [Yang Renchao, Yin Wei, Fan Aiping, et al. Fine-grained, lacustrine gravity-flow deposits and their hydrocarbon significance in the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(5): 791-806.]
- [196] Yang R C, He Z L, Qiu G Q, et al. A Late Triassic gravity flow depositional system in the southern Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 724-733.
- [197] Yang R C, Fan A P, Han Z Z, et al. An upward shallowing succession of gravity flow deposits in the Early Cretaceous Lingshanda Formation, western Yellow Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4): 1553-1554.
- [198] Yang R C, Fan A P, Han Z Z, et al. Lithofacies and origin of the Late Triassic muddy gravity-flow deposits in the Ordos Basin, central China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 85: 194-219.
- [199] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学

- 报, 2012, 33(2): 173-187. [Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.]
- [200] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 657-667. [Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 657-667.]
- [201] 孙宁亮, 钟建华, 刘绍光, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组重力流致密储层成岩作用及物性演化[J]. *地球科学*, 2017, 42(10): 1802-1816. [Sun Ningliang, Zhong Jianhua, Liu Shao-guang, et al. Diagenesis and physical property evolution of gravity flow tight reservoir of Yanchang Formation in southern Ordos basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(10): 1802-1816.]
- [202] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 249-256. [Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 249-256.]
- [203] 王民. 济阳坳陷沙河街组湖相页岩吸附油、游离油控制因素研究[C]//第十七届全国有机地球化学学术会议. 福州, 2019: 667-668. [Wang Min. Controlling factors of adsorbed oil and free oil in lacustrine shale of the Shahejie Formation in the Jiyang Depression [C]//Proceedings of the 17th national meeting on organic geochemistry. Fuzhou, 2019: 667-668.]
- [204] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. *地球化学*, 2005, 34(2): 147-154. [Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the seventh member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. *Geochimica*, 2005, 34(2): 147-154.]
- [205] 冉波, 刘树根, 孙玮, 等. 四川盆地及周缘下古生界五峰组—龙马溪组页岩岩相分类[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 96-107. [Ran Bo, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Lithofacies classification of shales of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 96-107.]
- [206] Chen D Z, Wang J G, Qing H R, et al. Hydrothermal venting activities in the Early Cambrian, South China: Petrological, geochronological and stable isotopic constraints[J]. *Chemical Geology*, 2009, 258(3/4): 168-181.
- [207] Tang D J, Shi X Y, Jiang G Q. Sunspot cycles recorded in Mesoproterozoic carbonate biolaminites [J]. *Precambrian Research*, 2014, 248: 1-16.
- [208] Blattmann T M, Liu Z, Zhang Y, et al. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean [J]. *Science*, 2019, 366(6466): 742-745.
- [209] von Rad U, Schaaf M, Michels K H, et al. A 5000-yr record of climate change in varved sediments from the oxygen minimum zone off Pakistan, northeastern Arabian sea [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51(1): 39-53.
- [210] 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23(1): 43-48. [Wang Guanmin, Zhong Jianhua. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23(1): 43-48.]
- [211] 蕙克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦苇沟组致密油储层岩石类型及特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1495-1507. [Xi Kelai, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1495-1507.]
- [212] 吴松涛, 邹才能, 朱如凯, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2015, 40(11): 1810-1823. [Wu Songtao, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Reservoir quality characterization of Upper Triassic Chang 7 shale in Ordos Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(11): 1810-1823.]
- [213] 吴嘉鹏, 王英民, 王海荣, 等. 深水重力流与底流交互作用研究进展[J]. *地质论评*, 2012, 58(6): 1110-1120. [Wu Jiapeng, Wang Yingmin, Wang Hairong, et al. The interaction between deep-water turbidity and bottom currents: A review [J]. *Geological Review*, 2012, 58(6): 1110-1120.]
- [214] 潘树新, 陈彬滔, 刘华清, 等. 陆相湖盆深水底流改造砂: 沉积特征、成因及其非常规油气勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1577-1585. [Pan Shuxin, Chen Bintao, Liu Huaqing, et al. Deepwater bottom current rework sand (BCRS) in lacustrine basins: Sedimentary characteristics, identification criterion, formation mechanism and its significance for unconventional oil/gas exploration [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1577-1585.]
- [215] 刘长利, 朱筱敏, 胡有山, 等. 地震沉积学在识别陆相湖泊浊积砂体中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(3): 657-664. [Liu Changli, Zhu Xiaomin, Hu Youshan, et al. Application of seismic sedimentology on lacustrine turbidite deposition identification [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(3): 657-664.]
- [216] Yawar Z, Schieber J. On the origin of silt laminae in laminated shales [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 22-34.
- [217] 王成善, 曹珂, 黄永建. 沉积记录与白垩纪地球表层系统变化[J]. *地学前缘*, 2009, 16(5): 1-14. [Wang Chengshan, Cao Ke, Huang Yongjian. Sedimentary record and Cretaceous Earth Surface System changes [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 1-14.]

Unconventional Petroleum Sedimentology: Connotation and prospect

QIU Zhen^{1,2}, ZOU CaiNeng^{1,2,3}

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

2. National Energy Shale Gas R & D (Experiment) Center, Langfang, Hebei 065007, China

3. National Energy Tight Oil and Gas R & D Center, Beijing 100083, China

Abstract: The theoretical framework of *Unconventional Petroleum Geology* has been gradually established along with the rapid progresses in exploration and development of unconventional petroleum resources. It is now imperative for innovative new insights into the unconventional petroleum sedimentology. Herein, the concept and scientific connotations of “*Unconventional Petroleum Sedimentology*” are proposed and briefly introduced. The research progresses are summarized for the sedimentology of typical unconventional petroleum resources in China, such as Wufeng-Longmaxi Shale gas in Sichuan Basin and tight oil and shale oil of Yanchang Formation in Ordos Basin. Further research themes and challenges of *Unconventional Petroleum Sedimentology* are discussed. Sedimentary enrichment of unconventional petroleum resources can be closely related with some critical environmental changes, which would be the result of coupling sedimentology from several geological events such as global or regional tectonic activities, sea (lake) level changes, volcanic eruptions, climate changes, anoxic bottom water, biotic mass extinctions and radiations, and gravity currents. For better understanding of *Unconventional Petroleum Sedimentology* in future, the Earth Systems Science view and “unconventional” insights should be applied to its research by analyzing geological events in details, which can play an important role in the discovery of new unconventional petroleum resources.

Key words: coupling of sedimentology; event deposition; geological event; shale oil and gas; tight oil and gas; sweet-spot interval and area