

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/278327781>

The First Precise Age Constraints on the Jixian System of the Meso- and Neoproterozoic Standard Section of China: SHRIMP Zircon U-Pb dating of bentonites from the Wumishan and Teil...

Article in *Acta Petrologica Sinica* · October 2014

CITATIONS

39

READS

252

8 authors, including:



Huaikun Li

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources

68 PUBLICATIONS 2,693 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Wenbo Su

China University of Geosciences (Beijing)

23 PUBLICATIONS 807 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



H. Tian

Tianjin center, China Geological Survey

3 PUBLICATIONS 56 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Warren Huff

University of Cincinnati

136 PUBLICATIONS 3,638 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Age-dating of K-bentonite/tuffite in the Mesoproterozoic succession, NCC [View project](#)



PhD Dissertation research [View project](#)

中-新元古界标准剖面蓟县系首获高精度年龄制约——蓟县剖面雾迷山组和铁岭组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年研究^{*}

李怀坤¹ 苏文博² 周红英¹ 相振群¹ 田辉¹ 杨立公³ Warren D HUFF⁴ Frank R ETTENSOHN⁵
LI HuaiKun¹, SU WenBo², ZHOU HongYing¹, XIANG ZhenQun¹, TIAN Hui¹, YANG LiGong³, Warren D HUFF⁴ and Frank R ETTENSOHN⁵

1. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170
 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
 3. 天津市蓟县中上元古界国家自然保护区管理中心, 天津 301900
 4. Department of Geology, University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0013
 5. Department of Earth and Environment Sciences, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0053
1. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Tianjin 300170, China*
2. *School of Earth-sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*
3. *Management Centre of National Nature Reserve for the Middle-Upper Proterozoic, Jixian County, Tianjin 301900, China*
4. *Department of Geology, University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0013, USA*
5. *Department of Earth and Environment Sciences, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0053, USA*

2014-05-10 收稿, 2014-07-20 改回.

Li HK, Su WB, Zhou HY, Xiang ZQ, Tian H, Yang LG, Huff WD and Ettensohn FR. 2014. The first precise age constraints on the Jixian System of the Meso- to Neoproterozoic Standard Section of China: SHRIMP zircon U-Pb dating of bentonites from the Wumishan and Tieling formations in the Jixian Section, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (10):2999–3012

Abstract Although known as the Meso- to Neoproterozoic Standard Section of China for more than half a century, the age of the famous Jixian Section (Jixian County, Tianjin City) has been rather poorly constrained, mainly by Rb-Sr and K-Ar ages that have proven unreliable and inaccurate in most cases. In recent years, significant progress has been made in studying the Meso- to Neoproterozoic geochronology of the North China Craton. To date, however, only one accurate U-Pb zircon age of 1625 ± 6 Ma from volcanic rocks of the Dahongyu Formation, and two duplicate zircon U-Pb ages of about 1635 Ma from mafic sills crosscutting the Chuanlinggou Formation of the Changchengian System in the lower part of the Jixian Section, has been reported. In addition, no one until now has obtained this kind of age dates directly from carbonate-dominated parts of the succession at the Jixian Section. Fortunately, bentonite beds were recently discovered for the first time in the Tieling and Wumishan formations at the Jixian Section, and ages of ~ 1440 Ma (1439 ± 14 Ma) and ~ 1485 Ma (1483 ± 13 Ma and 1487 ± 16 Ma) for the bentonite beds were obtained by means of SHRIMP zircon U-Pb dating. This achievement means that the shallow-marine, carbonate-dominated Tieling and Wumishan formations, the upper two stratigraphic units of the conventional Jixian System at the Jixian Standard Section, are now temporally constrained by direct zircon U-Pb dating. Furthermore, it is the first time that the Wumishan Formation from the entirety of the North China Craton has been precisely dated. Moreover, the current SHRIMP zircon age of about 1440 Ma for the bentonite in the Tieling Formation at the Jixian Standard Section is the same as the age reported earlier in Pingquan County, Hebei Province, in the east Yanshan Mountains on the northern margin of the NCC. Consequently, this progress in age dating of the bentonite beds in the carbonate-dominated succession provides new, accurate, benchmark ages for further clarification of the chronostratigraphic framework of the well-known Jixian Meso- to Neoproterozoic Standard Section and helps to consolidate its position for correct correlation with relevant

^{*} 本文受中国地质调查局项目(12120113013900、1212011120142)和国家自然科学基金项目(40772076、41272046)联合资助.

第一作者简介: 李怀坤, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 地层学专业, 主要从事前寒武纪年代学研究, E-mail: huaikunli@sina.com

strata, both regionally and internationally.

Key words Jixian Section; Bentonite; Tieling Formation; Wumishan Formation; SHRIMP U-Pb dating; Mesoproterozoic; North China Craton

摘 要 近期在蓟县中-新元古界标准剖面铁岭组和雾迷山组首次发现斑脱岩、并测得其锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 $\sim 1440\text{Ma}$ ($1439 \pm 14\text{Ma}$) 和 $\sim 1485\text{Ma}$ ($1483 \pm 13\text{Ma}$ 和 $1487 \pm 16\text{Ma}$), 这标志着这条传统的标准剖面上以碳酸盐岩为主体的蓟县系上部的两个重要组, 从此也获得了直接的、高精度的锆石 U-Pb 同位素年龄约束。这是华北中-新元古界标准剖面蓟县系相关地层单位首次获得直接而精确的锆石 U-Pb 同位素年龄约束, 也是在整个华北北缘燕山地区雾迷山组内部首次获得精确的直接定年。这一进展为闻名中外的天津蓟县剖面中-新元古界年代地层格架的正确厘定、以及今后继续作为华北该阶段的标准剖面, 并与国内外其他地区相关地层的正确对比等, 提供了新的、精确的年代学“锚点”, 因而具有重要的科学和实际意义。

关键词 蓟县剖面; 斑脱岩; 铁岭组; 雾迷山组; SHRIMP U-Pb 同位素测年; 中元古界; 华北克拉通

中图法分类号 P597.3

1 引言

著名的蓟县剖面最早于 20 世纪 30 年代初为世人所知 (高振西等, 1934)。自此以后, 从最初的“震旦系”到后来的“震旦亚界”, 几经演变, 终在 20 世纪 90 年代初, 这一厚近万米的地层序列被确认为中国的“中-新元古界”标准剖面 (中国地质科学院天津地质矿产研究所, 1980; 邢裕盛等, 1996; 陈晋镛等, 1999; 全国地层委员会, 2001, 2002)。其归属“摇摆”不定的原因, 在于这一地层序列的地质年代学属性在相当长时间里都未能得到有效且准确的标定。

以蓟县剖面为核心的燕山地区及华北克拉通北缘中-新元古界的同位素年龄测定和地质年代学研究, 肇始于 20 世纪 50 年代末, 由前苏联学者在该剖面景儿峪组等层位率先开展了初步的海绿石 K-Ar 年龄测定; 1960 ~ 1970 年, 中国科学院贵阳地球化学研究所通过对该剖面景儿峪组、铁岭组和大红峪组的海绿石、大红峪组和串岭沟组火山岩及云母的 K-Ar 年龄测定, 首次提出了较为系统的燕山中-新元古界 (震旦地层) 地质年表 (钟富道, 1977)。此后一些学者又针对海绿石、燧石以及碳酸盐等测年对象, 分别采用 Rb-Sr 法、K-Ar 法及 Pb-Pb 法等, 在上述地层中开展了进一步的测年研究 (于荣炳和张学祺, 1984; 王松山等, 1995; 张巧大等, 2002)。然而, 由于测年技术方法的历史限制, 上述测年研究结果的精确性和可信性在与后来逐渐发展和完善的锆石 U-Pb 同位素测年方法与结果比较时, 显示出越来越多的缺陷和问题。

进入 20 世纪 90 年代以后, 随着锆石 U-Pb 同位素测年技术的进步, 单颗粒锆石同位素稀释-热电离质谱法 (ID-TIMS) 和锆石微区原位 U-Pb 同位素定年技术 (SHRIMP、LA-ICP-MS) 相继在国内得到推广与应用, 我国地层同位素年代学研究进入了一个新阶段, 蓟县剖面及燕山地区中-新元古界的同位素年代学研究也相继取得了一些重要成果。只是这些工作及近来的进一步验证主要都是围绕着这套地层序列下部含有火山岩夹层的大红峪组和团山子组展开的 (陆松

年和李惠民, 1991; 李怀坤等, 1995, 2011; Lu *et al.*, 2008; 张拴宏等, 2013)。

近年来, 得益于相关沉积地层中斑脱岩 (蚀变凝灰岩) 等火山沉积物的识别确认, 以及对相关地层序列中某些侵入体侵位时代的精确标定, 华北克拉通中-新元古界年代地层学研究取得了一系列新的突破性进展, 主要包括: (1) 在以往长期被认为属于“新元古代早期”、年龄为“1000 ~ 900Ma”的下马岭组, 通过对其第三段中钾质斑脱岩夹层 (苏文博等, 2006) 的锆石以及对侵入该组中的辉绿岩床 (中国地质科学院天津地质矿产研究所, 1980; 河北省地质矿产局, 1989) 的斜锆石的 U-Pb 同位素年龄精确测定, 下马岭组的形成年龄被重新限定为 1380 ~ 1320Ma 之间, 应属中元古代延展纪的早期地层 (高林志等, 2007, 2008, 2009; Su *et al.*, 2008; 李怀坤等, 2009; Zhang *et al.*, 2009; 苏文博等, 2010)。这也是华北中-新元古代含火山岩夹层的大红峪组及团山子组之外的沉积地层单元首次获得直接的、高精度的年代学标定, 突出彰显了钾质斑脱岩等火山沉积物夹层良好的直接而精确的定年价值; (2) 在冀北-辽西铁岭组二段下部发现钾质斑脱岩, 并获得其锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄 $1437 \pm 21\text{Ma}$ (苏文博等, 2010)。根据这一进展并结合上覆下马岭组的测年成果, 可将燕山地区铁岭组及蓟县系的顶界较为精确地限定在 1400Ma 左右; (3) 在北京延庆高于庄组张家峪亚组上部发现凝灰岩, 并测得了该凝灰岩的锆石 U-Pb 同位素年龄 $1559 \pm 12\text{Ma}$ (SHRIMP) 和 $1560 \pm 5\text{Ma}$ (LA-MC-ICPMS) (李怀坤等, 2010)。依据这一进展, 并结合下伏的大红峪组测年资料, 可进一步将燕山地区蓟县系 (以高于庄组为最下部的一个组) 的底界限定为 1600Ma 左右; (4) 在北京密云发现被常州沟组不整合覆盖的花岗斑岩脉, 测得了其锆石 U-Pb 同位素年龄 $1673 \pm 10\text{Ma}$ (LA-MC-ICPMS, 李怀坤等, 2011) 和 $1669 \pm 20\text{Ma}$ (SHRIMP, Li *et al.*, 2013), 精确限定了常州沟组底界、亦即燕山地区长城系底界的初始形成年龄应为 1650Ma 左右, 而不是长期认为的 1800Ma。需要说明的是, 与此同时, 彭澎等 (2011) 获得了密云地区被常州沟组不整合覆盖的基性岩墙斜锆石 U-Pb 同位素年龄 $1731 \pm 4\text{Ma}$ (ID-TIMS), 和

政军等(2011)测得密云地区常州沟组和环斑花岗岩之间的古风化壳的碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄为 $1682 \pm 20\text{Ma}$ (SHRIMP) 和 $1708 \pm 6\text{Ma}$ (LA-MC-ICPMS)。显然这两项研究,均从不同角度进一步支持和验证了李怀坤等(2011)有关常州沟组底界形成年龄的推断。

依据上述新进展,燕山地区以及整个华北克拉通中-新元古界年代地层格架已在相当大程度上得到了重新厘定(Li *et al.*, 2013; 苏文博, 2014)。然而令人遗憾的是,迄今为止的这些研究成果均来自冀北-辽西以及北京西山等“外围”地区;而作为我国中-新元古界标准剖面所在地的蓟县地区,除上述含火山岩夹层的长城系大红峪组获得了精确定年之外,其上巨厚的地层序列(蓟县系及青白口系)却一直缺乏新的进展。

近期笔者在蓟县中元古界蓟县系雾迷山组和铁岭组首次确认了钾质斑脱岩夹层,并成功分选出岩浆型锆石,对其开展了高精度的 SHRIMP U-Pb 年代学研究。这是我国中-新元古界标准剖面蓟县系相关地层单位首次获得直接的年代学约束,也是整个燕山地区及华北大缘雾迷山组内部首次获得直接定年。这一进展为闻名中外的天津蓟县剖面中-新元古界地层格架的重新厘定、以及今后继续作为华北该阶段标准剖面并与其他地区进行正确对比等,提供了新的、精确的年代学“锚点”,因而具有重要科学意义。

2 雾迷山组和铁岭组地质背景

2.1 雾迷山组

雾迷山组为高振西等于 1934 年建立,当时定名为“雾迷山灰岩”。雾迷山是五名山的谐音,五名山主峰位于蓟县城西北约 4km 处(图 1)。

雾迷山组由以白云岩为主的碳酸盐岩所组成,具有如下特征:(1)厚度巨大,共有 3416m,是蓟县中-新元古界剖面各组中厚度最大的一个组;(2)微生物碳酸盐岩占绝对优势,占雾迷山组总量的 80%~90%;岩层中有机质极为丰富,野外观察时常见为棕色豆状、球状斑点,并串连成叠层石基本层;(3)沉积韵律极为发育,实际上是由不同级别的沉积韵律和旋回所叠加而成。

在雾迷山组不同级别的沉积韵律(和旋回)中,最基本的沉积韵律自下而上大都由下列五个单元所组成:(1)底层:主要是潮上带上部的含砂泥质泥晶白云岩,可见干裂和岩盐假晶;(2)下层:主要是潮间带的纹层状硅质条带微晶白云岩,为藻席白云岩(下藻席层),以产层状和穹状叠层石的微生物岩为特征;(3)中层:主要由潮下带厚层至块状亮晶白云岩组成,以具凝块状和锥叠层石微生物岩为特征;(4)上层:为潮间带的纹层状硅质条带微晶白云岩,属于上藻席层下部,以产层状和穹状叠层石为特征;(5)顶层:为潮上带浅色硅质条带微晶白云岩(淡水淋滤带),属于上藻席层的上部,同样可产浅色硅化的层状和穹状叠层石。据不完全统计,整个雾迷

山组由 400 多个这样的基本沉积韵律所组成(Lu *et al.*, 1996)。根据基本韵律和沉积旋回特征的变化,蓟县地区的雾迷山组可进一步划分成四个亚组,自下而上分别为:罗庄亚组、磨盘峪亚组、二十里堡亚组和闪坡岭亚组(河北省地质矿产局,1989;陈晋镛等,1999)。雾迷山组与下伏杨庄组之间为整合接触关系,与上覆洪水庄组之间为超覆不整合接触关系。

2.2 铁岭组

铁岭组主要为碳酸盐岩沉积,高振西等(1934)选用蓟县铁岭村地名,称为“铁岭灰岩”。铁岭组早先分为两段,鉴于发现两段岩性有明显区别,并认为之间还存在着较明显的沉积间断和古地磁极倒转等现象,陈晋镛等(1980)将其进一步分为两个亚组,即下部代庄子亚组和上部老虎顶亚组。前者命名地点在蓟县城北 5km 的代庄子村,后者最早为长春地质学院 1973 年命名,命名地点在蓟县城北 3km 的夏庄子村附近山名。从更大区域来看,研究者更倾向于铁岭组两段的划分(河北省地质矿产局,1989;陈晋镛等,1999;苏文博等,2010)。

代庄子亚组底部为灰白色薄层石英砂岩或石英砂岩透镜体;下部棕褐色内碎屑含锰叠层石白云岩、含砂含锰砾屑砂屑泥晶白云岩夹灰绿色页岩;上部紫红色、翠绿色及杂色页岩夹含锰白云岩。在蓟县,代庄子亚组厚 153m。代庄子亚组与下伏洪水庄组为整合过渡关系。

老虎顶亚组,以灰岩为主,在蓟县厚 181m。在蓟县该组下部主要为灰质白云岩、白云质灰岩和竹叶状砾屑灰岩;上部除顶部为泥质和白云质灰岩外,几乎全部由叠层石灰岩组成。老虎顶亚组与下伏代庄子亚组之间有清晰的沉积间断面。本组与上覆地下马岭组之间为平行不整合接触。

3 测年样品岩石学特征

本次测年样品均采自洪水庄-井儿峪向斜的南西翼(图 1)。

样品 13WMS01-1 采自蓟县县城西郊、五名山主峰西北侧前往盘山的公路边。采样点经纬度: $40^{\circ}3'12.12''\text{N}$, $117^{\circ}21'26.17''\text{E}$ 。样品岩性为灰白色斑脱岩,位于雾迷山组第四亚组即闪坡岭亚组底部。采样点所见岩性主要为薄层状白云岩,夹大量黑色硅质岩条带或透镜体(图 2a,b),其间见两层厚度为 5cm 左右的斑脱岩,沿着斑脱岩层发育相对较为茂密的植被。两层斑脱岩之间相距 10m 左右,在下层和上层斑脱岩层分别采集样品 13WMS01-1 和 13WMS01-2。在附近白云岩层面上见有小型波痕构造等,指示形成于浅水环境。岩层产状 $105^{\circ}\angle 30^{\circ}$ (图 3a)。

样品 13WMS02 采样点位于 13WMS01-1 北侧的一个废弃采石场,采样点经纬度: $40^{\circ}3'39.11''\text{N}$, $117^{\circ}21'49.63''\text{E}$,所属层位也是雾迷山组第四亚组底部,与 13WMS01-1 层位相

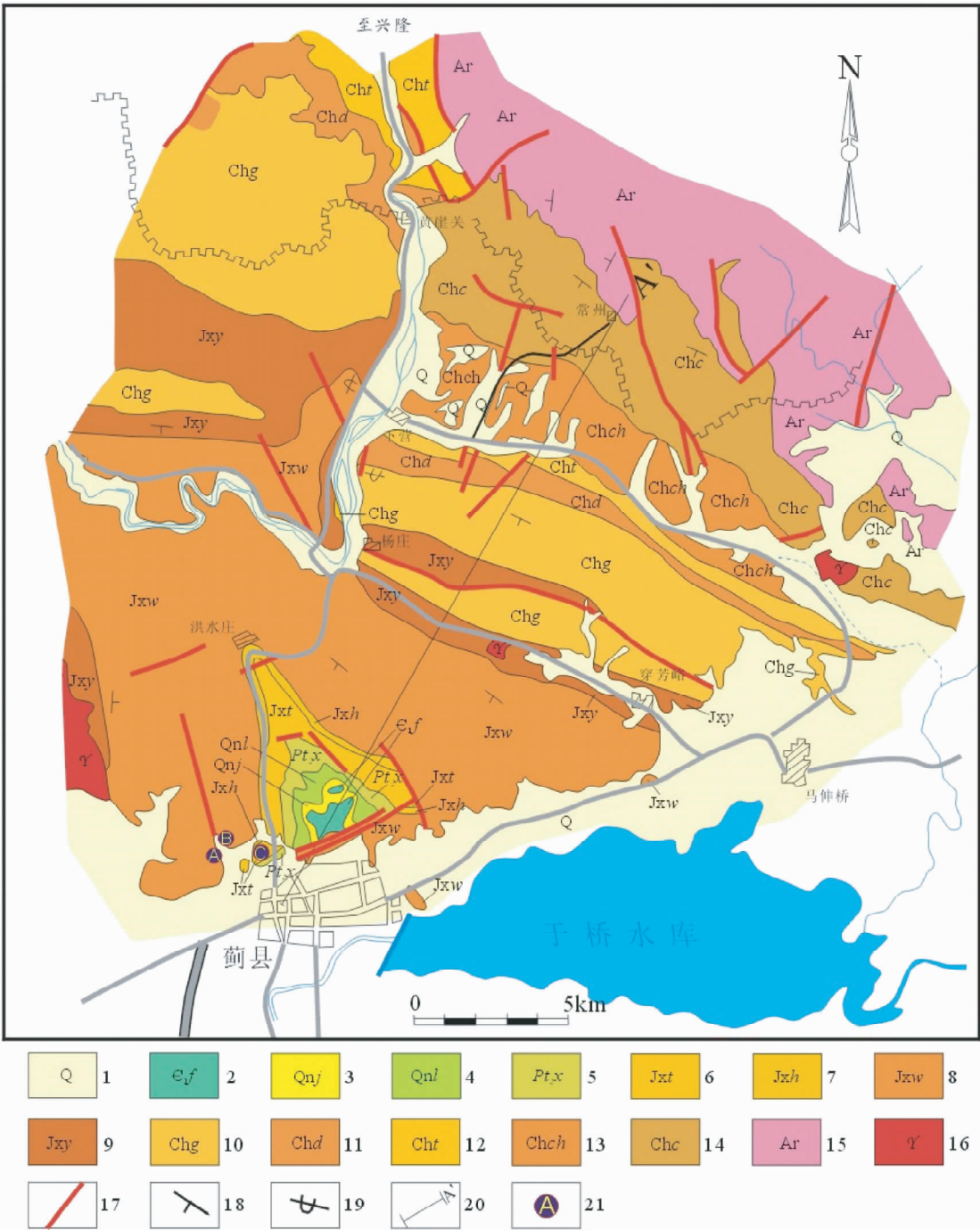


图1 蓟县北部地区地质略图与采样位置图
1-第四系;2-下寒武统府君山组;3-青白口系景儿峪组;4-青白口系长龙山组;5-下马岭组;6-蓟县系铁岭组;7-蓟县系洪水庄组;8-蓟县系雾迷山组;9-蓟县系杨庄组;10-蓟县系高于庄组;11-长城系大红峪组;12-长城系团山子组;13-长城系串岭沟组;14-长城系常州沟组;15-太古宙遵化岩群;16-花岗岩;17-断层;18-地层产状;19-倒转地层;20-中国中-新元古界标准剖面位置;21-采样点: A-13WMS01-1, B-13WMS02, C-13TL01-3

Fig. 1 The geological sketch of the northern Jixian County, showing the sampling localities

近。采样点所见为中薄层状灰白色白云岩,夹有一层厚约10cm的斑脱岩,因吸附了有机质,其新鲜面呈灰黑色,但风化面仍呈灰白色(图2c)。13WMS02为采自该斑脱岩层的测年样品。

样品 13TL01-3 采样点位于蓟县县城西郊大喻山采石场,采样点经纬度:40°3'16.96"N,117°23'4.39"E。所属层位为铁岭组上亚组下部,岩性主要为灰黑色厚层石灰岩,岩层产状120°∠45°,夹有多层斑脱岩,斑脱岩层厚1~35cm。对



图2 采样点野外露头照片
(a)-13WMS01-1 采样点,斑脱岩为薄层白云岩中的夹层,呈疏松土状,顺斑脱岩层植被相对较茂密;(b)-13WMS01-1 采样点,斑脱岩层上、下相邻层中发育黑色硅质岩透镜体;(c)-13WMS02 采样点,斑脱岩为薄层白云岩中的夹层,呈疏松土状,斑脱岩层厚 10cm 左右;(d)-13TL01-3 采样点,斑脱岩呈浅黄色,为石灰岩中夹层,其上、下的灰岩中夹黑色硅质岩条带

Fig. 2 Pictures of outcrops of the sampling sites

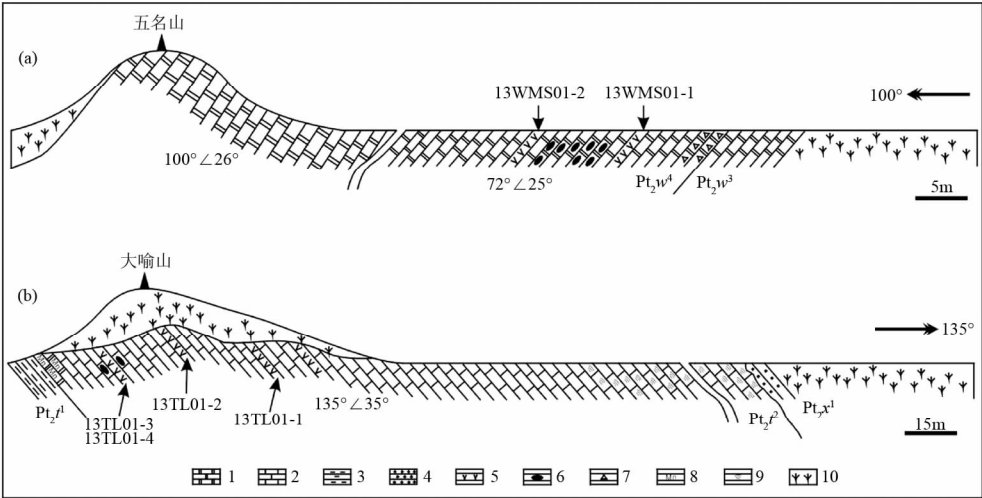


图3 采样点剖面图
(a)-蓟县五名山雾迷山组三-四段界线附近采样剖面;(b)-蓟县大喻山铁岭组二段下部采样剖面. 1-白云岩;2-灰岩;3-泥岩;4-砂岩;5-钾质斑脱岩;6-燧石;7-砾屑;8-含锰;9-叠层石;10-植被掩盖, Pt_2w^3 -雾迷山组第三亚组, Pt_2x^4 -雾迷山组第四亚组, Pt_2t^1 -铁岭组第一亚组, Pt_2t^2 -铁岭组第二亚组, Pt_2x^1 -下马岭组第一亚组

Fig. 3 The stratigraphic profiles of the sampling sites

其中较厚的 4 层采集了测年样品。其中最上部的一层呈浅黄绿色、土状,层厚 20cm 左右,样品编号:13TL01-1;从上往下第二层呈土黄色,层厚约 25cm,样品编号:13TL01-2;第三层呈浅黄色,层厚约 30cm,其上下的灰岩中夹黑色硅质岩条带(图 2d),样品编号:13TL01-3;第四层距离铁岭组上亚组的

底界 25m 左右,层厚大约 35cm,呈土黄色、土状,样品编号:13TL01-4,斑脱岩层之上为纹层状泥质灰岩,之下为厚层状灰黑色灰岩。13TL01-1 和 13TL01-2 层之间相距约 13m,13TL01-2 和 13TL01-3 层之间相距约 15m,13TL01-4 与 13TL01-3 的层位大致相当。此处铁岭组下亚组顶部为杂色

表1 测年锆石特征

Table 1 The characteristics of the dating zircons

| 序号 | 样品号 | 采样地点 | 岩性 | 锆石特征 |
|----|-----------|------------|-----|--|
| 1 | 13WMS01-1 | 蓟县五名山西侧公路旁 | 斑脱岩 | 500 粒,深粉色自形短柱状,粒径 0.05 ~ 0.15mm,似岩浆锆石 |
| 2 | 13WMS01-2 | 蓟县五名山西侧公路旁 | | 200 粒,玫瑰粉色,自形程度不一、较差,0.03 ~ 0.06mm,主要为岩浆锆石,少量为碎屑锆石 |
| 3 | 13WMS02 | 蓟县五名山西侧公路旁 | | 200 粒,粉色自形柱状,粒径 0.05 ~ 0.2mm,岩浆锆石 |
| 4 | 13TL01-1 | 蓟县大喻山采石场 | | 59 粒,主要浅粉色,似为岩浆锆石;少量深粉色,为碎屑锆石. 粒径 0.05 ~ 0.1mm |
| 5 | 13TL01-2 | 蓟县大喻山采石场 | | 300 粒,主要粉色自形柱状,粒径 0.05 ~ 0.2mm,为岩浆锆石;含 10% 左右浑圆状碎屑锆石 |
| 6 | 13TL01-3 | 蓟县大喻山采石场 | | 500 粒,粉色自形柱状,粒径 0.03 ~ 0.15mm,岩浆锆石;含有少量碎屑锆石 |
| 7 | 13TL01-4 | 蓟县大喻山采石场 | | 500 粒,粉色自形柱状,粒径 0.05 ~ 0.2mm,岩浆锆石 |

泥页岩,上亚组底部为含锰灰质白云岩,岩层产状 115°∠45°(图 3b)。

由于上述斑脱岩样品均呈疏松土状,未能磨制岩石薄片,因此暂未获得显微镜下薄片鉴定资料。但从其露头特征以及遇水迅速膨胀等特点不难判定,上述夹层都属于比较典型的斑脱岩,而且随后的室内单矿物分选结果(参见下文)也证实了野外这一观察的正确性。

4 实验方法和测年结果

4.1 实验方法

在雾迷山组第四亚组(闪坡岭亚组)底部采集 3 件斑脱岩样品:13WMS01-1、13WMS01-2 和 13WMS02,在铁岭组上亚组(老虎顶亚组)底部采集 4 件斑脱岩样品:13TL01-1、13TL01-2、13TL01-3 和 13TL01-4,每件样品的重量在 10kg 左右。将样品粉碎至 80 目,经过淘洗和分选之后在实体显微镜下手工挑出待测锆石。锆石分选工作在河北省廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。待测锆石的基本特征见表 1。将待测锆石样品颗粒和锆石标样 TEM(Black *et al.*, 2003)和 M257(Nasdala *et al.*, 2008)浇铸在环氧树脂靶上,待环氧树脂固化以后将样品靶打磨、抛光至锆石的核部。对锆石进行透、反射光显微照相以及阴极发光图象分析,以检查锆石的内部结构、选择适宜的测试点位。

根据透射光和反射光显微照相、阴极发光图象、以及显微镜下实体观察分析,初步判断上述 7 件锆石样品中除 13WMS01-2 之外的 6 件较为适合 SHRIMP U-Pb 同位素年龄测定,并以 13WMS01-1、13WMS02 和 13TL01-3 为重点测试对象。由于对 13WMS01-1、13WMS02 和 13TL01-3 三件样品的测定,均获得了代表地层沉积时代的、谐和度很高的年龄数据,所以就未对 13TL01-1、13TL01-2 和 13TL01-4 三件样品进行系统的测定。因此,本文只报道 13WMS01-1、13WMS02 和 13TL01-3 三件样品的测年结果。

13WMS01-1、13WMS02 和 13TL01-3 三件样品的锆石 CL 图像见图 4,该三件锆石样品在 CL 图像上均显示具有振荡生长环带内部结构特征,均为柱状自形晶体,显示为典型的

岩浆锆石。样品 13WMS01-1 锆石晶体长宽比为 2 : 1 ~ 3 : 1(图 4a-d),13WMS02 锆石晶体长宽比为 2 : 1 ~ 4 : 1(图 4e-j),13TL01-3 锆石晶体长宽比为 2 : 1 ~ 3 : 1(图 4k-p)。

锆石 U-Th-Pb 同位素测定在北京离子探针中心的 SHRIMP II 二次离子探针质谱仪上完成,测试流程见文献 Compston *et al.* (1984, 1992) 和 Williams (1998)。在测定过程中,分别采用标准锆石 TEM(参考年龄为 417Ma,Black *et al.*, 2003) 和 M257(参考年龄为 561Ma, Nasdala *et al.*, 2008)进行同位素分馏校正和标定待测锆石中的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理采用 SQUID (Ludwig, 2001) 和 Isoplot (Ludwig, 2003)程序,利用实测的²⁰⁴Pb 进行普通铅校正。

4.2 测年结果

雾迷山组上部第四亚组(闪坡岭亚组)底部两件斑脱岩样品(13WMS01-1 和 13WMS02)的锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果见表 2 和图 5、图 6。对样品 13WMS01-1 共测定了 20 个 U-Th-Pb 同位素数据点,它们具有一致的 U-Pb 年龄(表 2 和图 5),且年龄谐和度都比较高,75% 的数据点的谐和度大于 95%,其中 19 个数据点(因为数据点 1.1 的误差偏大,予以剔除)构成的不一致线与谐和线的上交点年龄为 1483 ± 13Ma,而这 19 个点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄加权平均值为 1484 ± 13Ma,二者完全一致。对样品 13WMS02 共测定了 30 个 U-Th-Pb 同位素数据点(表 2 和图 6),结果显示该锆石样品具有不同程度的放射成因铅丢失:表现为年龄的不谐和度从 2.9% 到 55.9%,但是全部数据点均落在一条不一致线上,该不一致线与谐和线的上交点年龄为 1487 ± 16Ma。两件雾迷山组斑脱岩锆石 U-Pb 年龄数据在误差范围内完全一致,应代表了蓟县地区雾迷山组沉积晚期的一次火山喷发事件的年龄。

铁岭组上亚组(老虎顶亚组)底部斑脱岩样品(13TL01-3)的锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果见表 2 和图 7。一共测定了 22 个锆石 U-Th-Pb 同位素数据点,其中 7.1 和 12.1 具有明显较大的年龄值——可能为碎屑锆石年龄,而 17.1、20.1 和 22.1 具有较大的放射成因铅丢失——表现为年龄的不谐和度较大(分别为 37.1%、39.8% 和 27.2%),除了这 5 个数

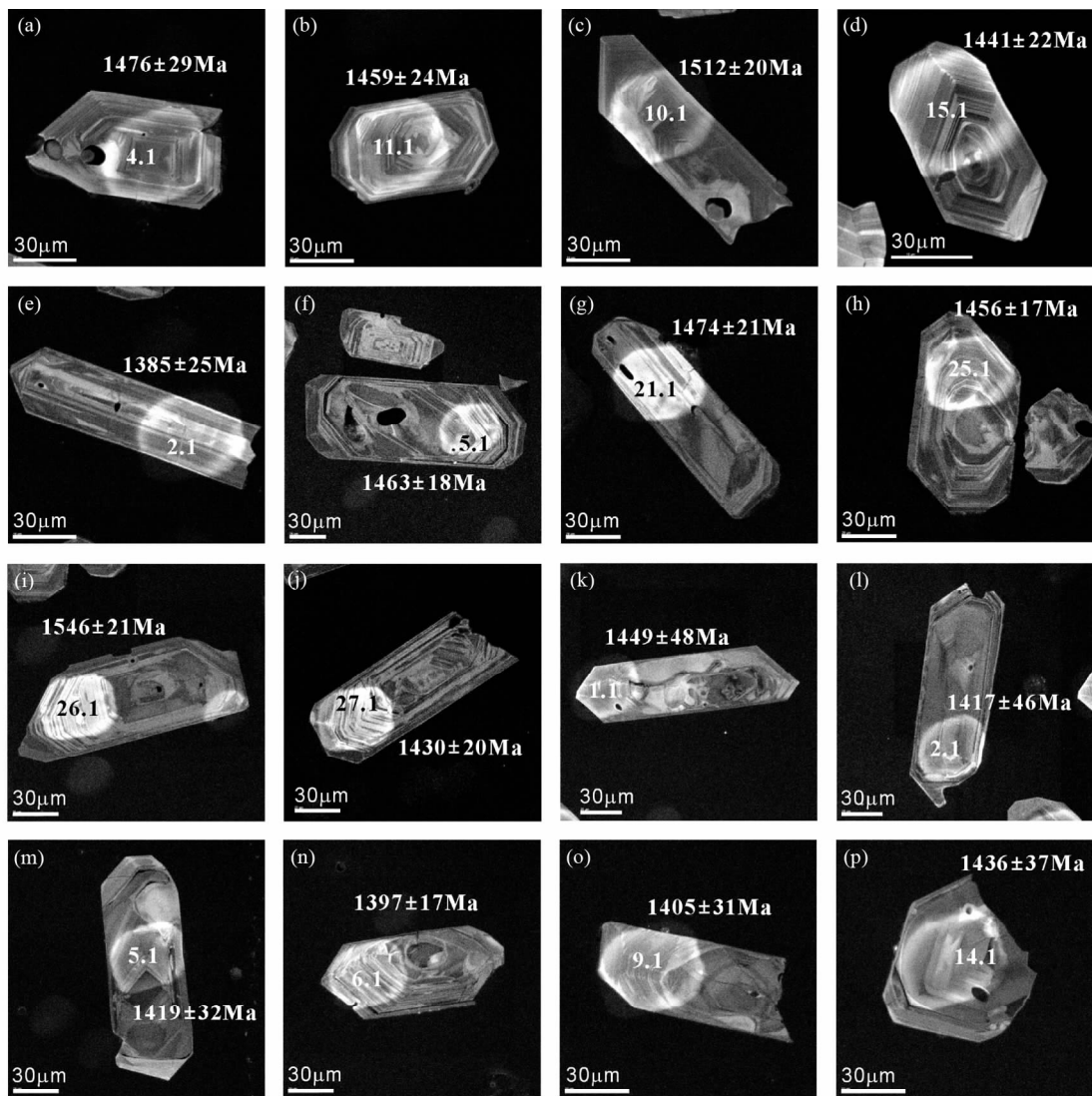


图4 测年锆石 CL 图像

(a-d)-13WMS01-1; (e-j)-13WMS02; (k-p)-13TL01-3. 图中标注的年龄均为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄

Fig. 4 The cathodoluminescence images of dated zircons

据点之外的 17 个数据点具有一致且较谐和的 U-Pb 同位素年龄 (12 个数据点的不谐和度小于 5%, 5 个数据点的不谐和度在 5% ~ 9% 范围内), 这 17 个数据点拟合的不一致线和谐和线的上交点年龄为 $1442 \pm 22\text{Ma}$, 而它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄加权平均值为 $1439 \pm 14\text{Ma}$, 二者在误差范围内完全一致, 代表蓟县地区铁岭组上亚组 (老虎顶亚组) 底部的一次火山喷发事件的年龄。

5 讨论

迄今为止在蓟县剖面这条华北中-新元古界标准剖面上, 只有其长城系上部含有火山岩夹层的大红峪组的地质年代得到了精确标定。本文在蓟县剖面铁岭组和雾迷山组分别发现斑脱岩, 并成功获得其锆石 SHRIMP U-Pb 同位素

年龄 $\sim 1440\text{Ma}$ 和 $\sim 1485\text{Ma}$, 这标志着这条传统的标准剖面上以碳酸盐岩为主体的蓟县系上部的两个重要组, 从此也获得了直接的、高精度的岩浆型锆石 U-Pb 年龄的精确约束。

5.1 蓟县剖面铁岭组形成时代的直接标定

作为蓟县剖面中元古界“蓟县系”最顶部的地层单元, 铁岭组的测年一直是一个研究重点。在 20 世纪 70 ~ 80 年代, 根据海绿石 K-Ar 年龄, 该组的形成时限被限定在 1010 ~ 1200Ma (钟富道, 1977; 王曰伦等, 1980; 陈毓蔚等, 1981), 从而被认为是华北中元古代最晚期的沉积序列。其中钟富道 (1977) 最早报导了蓟县剖面该组海绿石的 K-Ar 年龄 1205 ~ 1132Ma, 紧接着天津地质矿产研究所又获得了 1010 ~ 1128Ma 的数据 (王曰伦等, 1980)。进入 90 年代以来一些学

表2 蓟县雾迷山组(13WMS01-1、13WMS02)和铁岭组(13TL01-3)斑脱岩样品锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果

Table 2 U-Th-Pb isotopic data of zircons from bentonite samples of the Wumishan Formation (13WMS01-1 and 13WMS02) and the Tieling Formation (13TL01-3) in Jixian County

| 点号 | ²⁰⁶ Pb (%) | ²⁰⁶ Pb * U Th | | | | 表面年龄 (Ma) | | | | | ²⁰⁶ Pb * / ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb * / ²⁰⁶ Pb * | | ²⁰⁷ Pb * / ²³⁵ U | | 误差 相关 | |
|-----------|--------------------------|--------------------------|-----|-----|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------|-------|-------------|--|-------------|---|-------------|--|-------|----------|--|
| | | Th/U | | | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 不谐和 度 (%) | 测值 | 误差 (± %) | 测值 | 误差 (± %) | 测值 | 误差 (± %) | | | | |
| | | (× 10 ⁻⁶) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13WMS01-1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. 1 | 4. 25 | 28 | 115 | 182 | 1. 64 | 1,568 | ± 16 | 1,445 | ± 150 | - 8. 5 | 0. 2753 | 1. 20 | 0. 0909 | 7. 70 | 3. 450 | 7. 70 | 0. 151 | |
| 2. 1 | 0. 22 | 30 | 134 | 168 | 1. 29 | 1,504 | ± 12 | 1,522 | ± 26 | 1. 2 | 0. 2629 | 0. 90 | 0. 0947 | 1. 40 | 3. 433 | 1. 60 | 0. 547 | |
| 3. 1 | 0. 58 | 37 | 175 | 268 | 1. 58 | 1,393 | ± 10 | 1,508 | ± 34 | 7. 6 | 0. 2413 | 0. 78 | 0. 0940 | 1. 80 | 3. 127 | 2. 00 | 0. 394 | |
| 4. 1 | 0. 30 | 64 | 288 | 413 | 1. 48 | 1,477 | ± 9 | 1,476 | ± 29 | 0. 0 | 0. 2574 | 0. 64 | 0. 0924 | 1. 50 | 3. 281 | 1. 60 | 0. 393 | |
| 5. 1 | 0. 54 | 57 | 300 | 330 | 1. 14 | 1,281 | ± 8 | 1,465 | ± 43 | 12. 6 | 0. 2198 | 0. 65 | 0. 0919 | 2. 30 | 2. 785 | 2. 40 | 0. 275 | |
| 6. 1 | 0. 28 | 32 | 141 | 245 | 1. 80 | 1,503 | ± 13 | 1,467 | ± 31 | - 2. 5 | 0. 2626 | 10. 00 | 0. 0920 | 1. 60 | 3. 331 | 1. 90 | 0. 524 | |
| 7. 1 | 0. 11 | 31 | 145 | 164 | 1. 17 | 1,439 | ± 11 | 1,476 | ± 31 | 2. 5 | 0. 2501 | 0. 88 | 0. 0924 | 1. 60 | 3. 187 | 1. 80 | 0. 479 | |
| 8. 1 | 0. 32 | 29 | 130 | 162 | 1. 29 | 1,495 | ± 12 | 1,536 | ± 31 | 2. 7 | 0. 2610 | 0. 92 | 0. 0954 | 1. 60 | 3. 434 | 1. 90 | 0. 489 | |
| 9. 1 | 0. 34 | 37 | 170 | 229 | 1. 40 | 1,448 | ± 11 | 1,485 | ± 51 | 2. 5 | 0. 2519 | 0. 86 | 0. 0929 | 2. 70 | 3. 225 | 2. 80 | 0. 308 | |
| 10. 1 | 0. 15 | 42 | 181 | 225 | 1. 28 | 1,536 | ± 10 | 1,512 | ± 20 | - 1. 6 | 0. 2690 | 0. 74 | 0. 0942 | 1. 00 | 3. 493 | 1. 30 | 0. 581 | |
| 11. 1 | 0. 32 | 34 | 150 | 177 | 1. 22 | 1,513 | ± 11 | 1,459 | ± 24 | - 3. 7 | 0. 2645 | 0. 82 | 0. 0916 | 1. 30 | 3. 341 | 1. 50 | 0. 540 | |
| 12. 1 | 0. 26 | 31 | 134 | 164 | 1. 27 | 1,541 | ± 12 | 1,494 | ± 27 | - 3. 1 | 0. 2700 | 0. 87 | 0. 0933 | 1. 40 | 3. 474 | 1. 70 | 0. 523 | |
| 13. 1 | 0. 11 | 37 | 161 | 280 | 1. 80 | 1,521 | ± 11 | 1,481 | ± 22 | - 2. 7 | 0. 2662 | 0. 79 | 0. 0927 | 1. 20 | 3. 401 | 1. 40 | 0. 554 | |
| 14. 1 | 0. 35 | 37 | 166 | 234 | 1. 45 | 1,468 | ± 10 | 1,465 | ± 30 | - 0. 2 | 0. 2558 | 0. 79 | 0. 0919 | 1. 60 | 3. 241 | 1. 80 | 0. 444 | |
| 15. 1 | 0. 18 | 31 | 138 | 208 | 1. 57 | 1,517 | ± 12 | 1,441 | ± 22 | - 5. 3 | 0. 2654 | 0. 86 | 0. 0907 | 1. 20 | 3. 321 | 1. 40 | 0. 592 | |
| 16. 1 | 0. 28 | 40 | 177 | 288 | 1. 68 | 1,493 | ± 14 | 1,486 | ± 24 | - 0. 5 | 0. 2605 | 1. 10 | 0. 0929 | 1. 30 | 3. 337 | 1. 60 | 0. 640 | |
| 17. 1 | 0. 69 | 35 | 176 | 246 | 1. 45 | 1,329 | ± 10 | 1,453 | ± 43 | 8. 5 | 0. 2290 | 0. 80 | 0. 0913 | 2. 30 | 2. 883 | 2. 40 | 0. 333 | |
| 18. 1 | 0. 29 | 31 | 145 | 207 | 1. 47 | 1,441 | ± 11 | 1,485 | ± 25 | 3. 0 | 0. 2506 | 0. 86 | 0. 0929 | 1. 30 | 3. 209 | 1. 60 | 0. 544 | |
| 19. 1 | 0. 56 | 27 | 122 | 138 | 1. 17 | 1,475 | ± 12 | 1,461 | ± 39 | - 1. 0 | 0. 2571 | 0. 92 | 0. 0917 | 2. 00 | 3. 250 | 2. 20 | 0. 410 | |
| 20. 1 | 0. 24 | 28 | 125 | 133 | 1. 10 | 1,497 | ± 12 | 1,485 | ± 23 | - 0. 8 | 0. 2613 | 0. 92 | 0. 0929 | 1. 20 | 3. 346 | 1. 50 | 0. 598 | |
| 13WMS02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. 1 | 0. 27 | 73 | 630 | 486 | 0. 80 | 815 | ± 4 | 1,339 | ± 21 | 39. 1 | 0. 1348 | 0. 50 | 0. 0860 | 1. 10 | 1. 598 | 1. 20 | 0. 411 | |
| 2. 1 | 0. 32 | 58 | 459 | 669 | 1. 51 | 877 | ± 5 | 1,385 | ± 25 | 36. 7 | 0. 1458 | 0. 58 | 0. 0881 | 1. 30 | 1. 771 | 1. 40 | 0. 400 | |
| 3. 1 | 0. 24 | 41 | 190 | 181 | 0. 98 | 1,432 | ± 10 | 1,475 | ± 23 | 2. 9 | 0. 2487 | 0. 76 | 0. 0924 | 1. 20 | 3. 168 | 1. 40 | 0. 536 | |
| 4. 1 | 0. 11 | 59 | 423 | 413 | 1. 01 | 963 | ± 5 | 1,418 | ± 16 | 32. 1 | 0. 1612 | 0. 57 | 0. 0897 | 0. 86 | 1. 992 | 1. 00 | 0. 553 | |
| 5. 1 | 0. 12 | 64 | 319 | 228 | 0. 74 | 1,358 | ± 8 | 1,463 | ± 18 | 7. 2 | 0. 2344 | 0. 62 | 0. 0918 | 0. 92 | 2. 966 | 1. 10 | 0. 558 | |
| 6. 1 | 0. 11 | 58 | 456 | 436 | 0. 99 | 889 | ± 5 | 1,440 | ± 18 | 38. 3 | 0. 1478 | 0. 58 | 0. 0907 | 0. 92 | 1. 848 | 1. 10 | 0. 533 | |
| 7. 1 | 0. 09 | 62 | 302 | 217 | 0. 74 | 1,388 | ± 8 | 1,497 | ± 18 | 7. 3 | 0. 2403 | 0. 62 | 0. 0935 | 0. 96 | 3. 096 | 1. 10 | 0. 545 | |
| 8. 1 | 0. 14 | 63 | 457 | 451 | 1. 02 | 959 | ± 5 | 1,437 | ± 18 | 33. 3 | 0. 1603 | 0. 55 | 0. 0905 | 0. 93 | 2. 002 | 1. 10 | 0. 511 | |
| 9. 1 | 0. 20 | 54 | 512 | 361 | 0. 73 | 741 | ± 4 | 1,380 | ± 21 | 46. 3 | 0. 1218 | 0. 56 | 0. 0879 | 1. 10 | 1. 476 | 1. 20 | 0. 452 | |
| 10. 1 | 0. 14 | 65 | 366 | 321 | 0. 91 | 1,215 | ± 7 | 1,468 | ± 17 | 17. 2 | 0. 2074 | 0. 59 | 0. 0920 | 0. 90 | 2. 632 | 1. 10 | 0. 547 | |
| 11. 1 | 0. 07 | 66 | 397 | 390 | 1. 01 | 1,138 | ± 6 | 1,459 | ± 14 | 22. 0 | 0. 1931 | 0. 56 | 0. 0916 | 0. 76 | 2. 438 | 0. 94 | 0. 593 | |
| 12. 1 | 0. 46 | 80 | 426 | 389 | 0. 94 | 1,268 | ± 7 | 1,460 | ± 23 | 13. 2 | 0. 2174 | 0. 57 | 0. 0916 | 1. 20 | 2. 746 | 1. 30 | 0. 423 | |
| 13. 1 | 0. 20 | 50 | 293 | 257 | 0. 91 | 1,173 | ± 7 | 1,444 | ± 20 | 18. 8 | 0. 1995 | 0. 62 | 0. 0909 | 1. 10 | 2. 499 | 1. 20 | 0. 505 | |
| 14. 1 | 0. 08 | 71 | 378 | 277 | 0. 76 | 1,276 | ± 6 | 1,487 | ± 15 | 14. 2 | 0. 2188 | 0. 56 | 0. 0930 | 0. 78 | 2. 805 | 0. 96 | 0. 580 | |
| 15. 1 | 0. 12 | 43 | 474 | 365 | 0. 79 | 653 | ± 4 | 1,394 | ± 21 | 53. 2 | 0. 1065 | 0. 58 | 0. 0885 | 1. 10 | 1. 301 | 1. 20 | 0. 469 | |
| 16. 1 | 0. 06 | 60 | 349 | 318 | 0. 94 | 1,179 | ± 7 | 1,475 | ± 16 | 20. 1 | 0. 2007 | 0. 64 | 0. 0924 | 0. 86 | 2. 556 | 1. 10 | 0. 597 | |
| 17. 1 | 0. 16 | 69 | 423 | 348 | 0. 85 | 1,116 | ± 6 | 1,435 | ± 18 | 22. 2 | 0. 1891 | 0. 55 | 0. 0905 | 0. 92 | 2. 358 | 1. 10 | 0. 513 | |
| 18. 1 | 1. 74 | 70 | 384 | 462 | 1. 24 | 1,226 | ± 12 | 1,428 | ± 76 | 14. 1 | 0. 2096 | 1. 00 | 0. 0901 | 4. 00 | 2. 600 | 4. 10 | 0. 253 | |
| 19. 1 | 0. 07 | 72 | 417 | 312 | 0. 77 | 1,178 | ± 6 | 1,470 | ± 19 | 19. 9 | 0. 2005 | 0. 55 | 0. 0922 | 1. 00 | 2. 547 | 1. 10 | 0. 480 | |
| 20. 1 | 0. 16 | 69 | 487 | 371 | 0. 79 | 977 | ± 5 | 1,419 | ± 25 | 31. 2 | 0. 1636 | 0. 54 | 0. 0897 | 1. 30 | 2. 023 | 1. 40 | 0. 377 | |
| 21. 1 | 0. 24 | 62 | 349 | 317 | 0. 94 | 1,209 | ± 7 | 1,474 | ± 21 | 18. 0 | 0. 2062 | 0. 65 | 0. 0923 | 1. 10 | 2. 625 | 1. 30 | 0. 510 | |
| 22. 1 | 0. 32 | 37 | 454 | 588 | 1. 34 | 581 | ± 3 | 1,317 | ± 34 | 55. 9 | 0. 0943 | 0. 61 | 0. 0851 | 1. 80 | 1. 105 | 1. 90 | 0. 326 | |
| 23. 1 | 0. 15 | 59 | 354 | 282 | 0. 82 | 1,135 | ± 6 | 1,465 | ± 19 | 22. 5 | 0. 1925 | 0. 59 | 0. 0919 | 1. 00 | 2. 438 | 1. 20 | 0. 510 | |
| 24. 1 | 0. 32 | 66 | 410 | 425 | 1. 07 | 1,101 | ± 6 | 1,477 | ± 25 | 25. 5 | 0. 1862 | 0. 58 | 0. 0924 | 1. 30 | 2. 374 | 1. 50 | 0. 401 | |
| 25. 1 | 0. 16 | 49 | 238 | 183 | 0. 80 | 1,388 | ± 8 | 1,456 | ± 17 | 4. 7 | 0. 2402 | 0. 68 | 0. 0915 | 0. 90 | 3. 029 | 1. 10 | 0. 602 | |
| 26. 1 | 0. 22 | 74 | 419 | 317 | 0. 78 | 1,202 | ± 6 | 1,546 | ± 21 | 22. 2 | 0. 2050 | 0. 58 | 0. 0959 | 1. 10 | 2. 711 | 1. 20 | 0. 469 | |
| 27. 1 | 0. 26 | 68 | 441 | 392 | 0. 92 | 1,061 | ± 5 | 1,430 | ± 20 | 25. 8 | 0. 1789 | 0. 56 | 0. 0902 | 1. 00 | 2. 225 | 1. 20 | 0. 470 | |

续表 2

Continued Table 2

| 点号 | ²⁰⁶ Pbc (%) | ²⁰⁶ Pb * | | U | Th | 表面年龄 (Ma) | | | | | ²⁰⁶ Pb * / ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb * / ²⁰⁶ Pb * | | ²⁰⁷ Pb * / ²³⁵ U | | 误差 相关 |
|----------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------|------|---------------|------|---------------|--|---------------|---|-------|--|-------|----------|
| | | (× 10 ⁻⁶) | Th/U | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 不谐和 度 (%) | 测值 | 误差 (± %) | 测值 | 误差 (± %) | 测值 | 误差 (± %) | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28. 1 | 0. 07 | 48 | 228 | 202 | 0. 92 | 1,412 | ± 9 | 1,514 | ± 25 | 6. 7 | 0. 2449 | 0. 71 | 0. 0943 | 1. 30 | 3. 184 | 1. 50 | 0. 477 |
| 29. 1 | 0. 16 | 65 | 408 | 382 | 0. 97 | 1,088 | ± 6 | 1,451 | ± 17 | 25. 0 | 0. 1839 | 0. 56 | 0. 0912 | 0. 89 | 2. 312 | 1. 00 | 0. 531 |
| 30. 1 | 0. 15 | 78 | 373 | 284 | 0. 79 | 1,402 | ± 8 | 1,449 | ± 16 | 3. 3 | 0. 2429 | 0. 59 | 0. 0911 | 0. 86 | 3. 051 | 1. 00 | 0. 565 |
| 13TL01-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. 1 | 1. 09 | 32 | 153 | 93 | 0. 63 | 1,391 | ± 11 | 1,449 | ± 48 | 4. 0 | 0. 2409 | 0. 85 | 0. 0911 | 2. 50 | 3. 026 | 2. 60 | 0. 323 |
| 2. 1 | 1. 16 | 50 | 249 | 187 | 0. 78 | 1,349 | ± 9 | 1,417 | ± 46 | 4. 8 | 0. 2328 | 0. 71 | 0. 0896 | 2. 40 | 2. 876 | 2. 50 | 0. 283 |
| 3. 1 | 0. 05 | 40 | 184 | 116 | 0. 65 | 1,470 | ± 10 | 1,470 | ± 19 | 0. 0 | 0. 2561 | 0. 78 | 0. 0922 | 1. 00 | 3. 254 | 1. 30 | 0. 609 |
| 4. 1 | 0. 17 | 41 | 190 | 105 | 0. 57 | 1,445 | ± 10 | 1,439 | ± 23 | - 0. 4 | 0. 2512 | 0. 77 | 0. 0906 | 1. 20 | 3. 140 | 1. 40 | 0. 540 |
| 5. 1 | 0. 69 | 47 | 217 | 129 | 0. 61 | 1,442 | ± 9 | 1,419 | ± 32 | - 1. 6 | 0. 2507 | 0. 66 | 0. 0897 | 1. 70 | 3. 100 | 1. 80 | 0. 371 |
| 6. 1 | 0. 25 | 76 | 390 | 254 | 0. 67 | 1,314 | ± 6 | 1,397 | ± 17 | 6. 0 | 0. 2261 | 0. 52 | 0. 0887 | 0. 89 | 2. 763 | 1. 00 | 0. 507 |
| 7. 1 | 0. 96 | 47 | 134 | 214 | 1. 65 | 2,195 | ± 15 | 2,190 | ± 25 | - 0. 2 | 0. 4057 | 0. 80 | 0. 1370 | 1. 50 | 7. 660 | 1. 70 | 0. 480 |
| 8. 1 | 0. 96 | 54 | 264 | 165 | 0. 65 | 1,362 | ± 8 | 1,451 | ± 36 | 6. 1 | 0. 2352 | 0. 62 | 0. 0912 | 1. 90 | 2. 959 | 2. 00 | 0. 309 |
| 9. 1 | 0. 46 | 33 | 149 | 87 | 0. 60 | 1,458 | ± 10 | 1,405 | ± 31 | - 3. 8 | 0. 2539 | 0. 77 | 0. 0891 | 1. 60 | 3. 117 | 1. 80 | 0. 426 |
| 10. 1 | 0. 72 | 49 | 217 | 146 | 0. 70 | 1,484 | ± 9 | 1,442 | ± 32 | - 2. 9 | 0. 2588 | 0. 67 | 0. 0908 | 1. 70 | 3. 238 | 1. 80 | 0. 374 |
| 11. 1 | 0. 70 | 41 | 193 | 109 | 0. 58 | 1,420 | ± 9 | 1,462 | ± 34 | 2. 9 | 0. 2463 | 0. 70 | 0. 0918 | 1. 80 | 3. 116 | 1. 90 | 0. 362 |
| 12. 1 | 0. 24 | 25 | 106 | 173 | 1. 68 | 1,552 | ± 12 | 1,531 | ± 28 | - 1. 4 | 0. 2722 | 0. 89 | 0. 0952 | 1. 50 | 3. 572 | 1. 70 | 0. 520 |
| 13. 1 | 0. 44 | 23 | 105 | 57 | 0. 56 | 1,425 | ± 11 | 1,443 | ± 36 | 1. 2 | 0. 2474 | 0. 89 | 0. 0908 | 1. 90 | 3. 098 | 2. 10 | 0. 422 |
| 14. 1 | 0. 95 | 51 | 244 | 153 | 0. 65 | 1,389 | ± 8 | 1,436 | ± 37 | 3. 3 | 0. 2404 | 0. 64 | 0. 0905 | 1. 90 | 2. 999 | 2. 00 | 0. 315 |
| 15. 1 | 0. 19 | 35 | 162 | 113 | 0. 72 | 1,443 | ± 10 | 1,438 | ± 21 | - 0. 3 | 0. 2508 | 0. 74 | 0. 0906 | 1. 10 | 3. 132 | 1. 30 | 0. 552 |
| 16. 1 | 1. 22 | 46 | 228 | 160 | 0. 73 | 1,356 | ± 8 | 1,443 | ± 45 | 6. 0 | 0. 2341 | 0. 67 | 0. 0908 | 2. 30 | 2. 932 | 2. 40 | 0. 272 |
| 17. 1 | 0. 33 | 62 | 504 | 377 | 0. 77 | 857 | ± 4 | 1,362 | ± 22 | 37. 1 | 0. 1422 | 0. 51 | 0. 0871 | 1. 10 | 1. 706 | 1. 20 | 0. 413 |
| 18. 1 | 2. 32 | 39 | 182 | 112 | 0. 64 | 1,413 | ± 10 | 1,371 | ± 79 | - 3. 1 | 0. 2451 | 0. 77 | 0. 0875 | 4. 10 | 2. 960 | 4. 20 | 0. 185 |
| 19. 1 | 0. 93 | 43 | 220 | 140 | 0. 66 | 1,314 | ± 8 | 1,440 | ± 37 | 8. 8 | 0. 2260 | 0. 68 | 0. 0907 | 2. 00 | 2. 827 | 2. 10 | 0. 327 |
| 20. 1 | 1. 00 | 86 | 558 | 187 | 0. 35 | 1,052 | ± 5 | 1,747 | ± 27 | 39. 8 | 0. 1773 | 0. 50 | 0. 1069 | 1. 50 | 2. 612 | 1. 60 | 0. 314 |
| 21. 1 | 1. 88 | 38 | 192 | 97 | 0. 53 | 1,311 | ± 10 | 1,433 | ± 65 | 8. 5 | 0. 2255 | 0. 82 | 0. 0904 | 3. 40 | 2. 809 | 3. 50 | 0. 235 |
| 22. 1 | 0. 38 | 59 | 368 | 295 | 0. 83 | 1,089 | ± 6 | 1,496 | ± 24 | 27. 2 | 0. 1841 | 0. 55 | 0. 0934 | 1. 20 | 2. 370 | 1. 40 | 0. 407 |

注：误差为1σ；Pb_c、Pb* 分别指示普通铅和放射成因铅；所有的同位素比率已对实测的²⁰⁴Pb 进行了普通铅校正；表面年龄不谐和度计算公式为： $100 \cdot t_{206/238} / t_{207/206} \times 100$

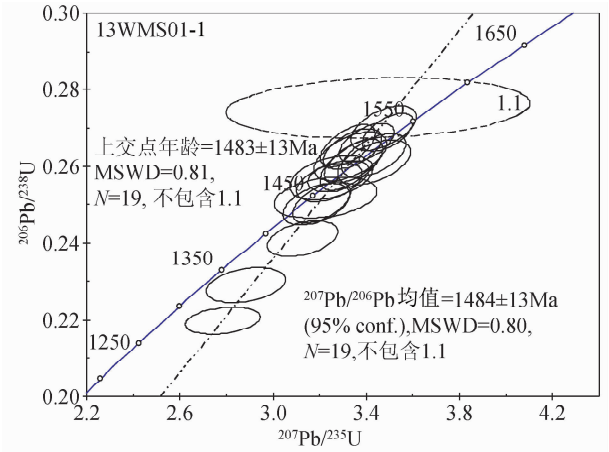


图 5 雾迷山组斑脱岩 (13WMS01-1) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia of zircons from the Wumishan Formation bentonite sample (13WMS01-1)

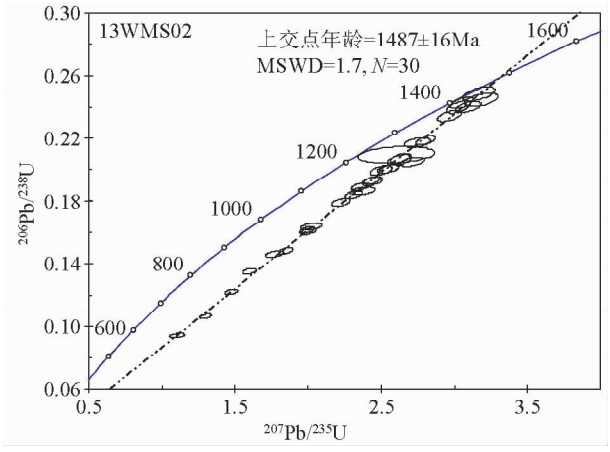


图 6 雾迷山组斑脱岩 (13WMS02) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia of zircons from the Wumishan Formation bentonite sample (13WMS02)

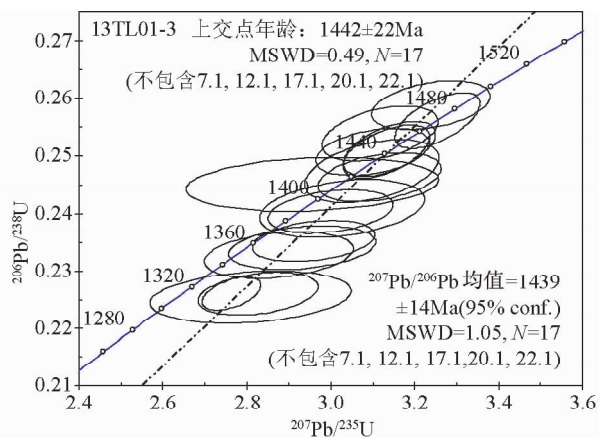


图7 铁岭组斑脱岩(13TL01-3)锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 7 U-Pb concordia of zircons from the Tieling Formation bentonite sample (13TL01-3)

者又在同一层位的海绿石中获得了 1070 ~ 1175Ma 的年龄(李明荣等, 1996)。由此并参考其他地区相关资料, 华北北部铁岭组的年龄被限定为不小于 1050Ma, 归属蓟县系, 并对应于国际地层委员会所命名的中元古代最晚期的狭带纪。随着在其上覆地层——下马岭组第三段钾质斑脱岩(苏文博等, 2006)相继获得 ~ 1380Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄(高林志等, 2007, 2008, 2009; Su *et al.*, 2008; 苏文博等, 2010), 铁岭组的时限被下压到不小于 1400Ma, 并划归盖层纪。苏文博等(2010)在河北平泉双洞乡刘家沟剖面铁岭组二段底部发现了钾质斑脱岩, 并获得了其锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄 1437 ± 21 Ma, 从而第一次明确标定了该组的形成时代; 同时结合早先在上覆的下马岭组斑脱岩的测年结果, 苏文博等(2010)将铁岭组顶界、也即该组与下马岭组分界年限进一步推定为 ~ 1400Ma。

当前在蓟县铁岭组二段近底部所发现的斑脱岩(样品号 13TL01-3), 其锆石 SHRIMP U-Pb 不一致线与谐和线的上交点年龄为 1442 ± 22 Ma、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄加权平均值为 1439 ± 14 Ma, 这表明该层斑脱岩的形成时间应该在 1440Ma 左右, 也大体代表了该地区铁岭组的形成时间。显然, 当前蓟县剖面铁岭组斑脱岩锆石年龄与河北平泉双洞一带的铁岭组斑脱岩 SHRIMP U-Pb 同位素年龄 1437 ± 21 Ma(苏文博等, 2010)在误差范围内是完全一致的。这一结果充分说明, 蓟县地区的铁岭组与燕山地区其他地方该组的时限完全一致, 传统上根据岩石地层所建立的有关该组的时空分布及区域对比关系(王曰伦等, 1980; 河北省地质矿产局, 1989; 辽宁省地质矿产局, 1989; 陈晋镛等, 1999)是完全成立的。

由于遭受了后期剥蚀, 在蓟县地区上覆于铁岭组的下马岭组实际上只保留了该组第一段和第二段的沉积序列(中国地质科学院天津地质矿产研究所, 1980; 陈晋镛等, 1999)。而迄今为止在下马岭组发现的斑脱岩, 都位于该组第三段黑色碳硅质页岩-板岩中(苏文博等, 2006, 2010; 高林志等,

2007, 2008, 2009; Su *et al.*, 2008)。因此从目前来看, 蓟县地区下马岭组尚无法获得类似的精确测年。另一方面, 因夹有火山岩, 蓟县及附近地区的团山子组、大红峪组已获精确测年(陆松年等, 1991; Lu *et al.*, 2008; 张拴宏等, 2013), 但在燕山其他地点至今还没有相关报道; 李怀坤等(2011)虽然已在北京延庆高于庄组发现了层凝灰岩并成功测年, 但在蓟县地区该组却一直未能找到相应的层凝灰岩。由此可见, 在蓟县铁岭组发现斑脱岩并获得精确测年, 无疑将成为当前唯一能够有效连接蓟县与燕山其他地区相应地层序列的关键支撑点。

5.2 蓟县剖面雾迷山组形成时代的直接标定

与上述铁岭组等有所不同, 20 世纪 90 年代之前, 由于蓟县地区的雾迷山组一直没有获得过包括海绿石 K-Ar 年龄在内的并不准确的年代学标定, 人们只能依靠在其上覆及下伏地层单位的测年资料, 将该组大致地限定在 1400 ~ 1000Ma 阶段中期, 从而被归属于我国中元古界蓟县系中部(钟富道, 1977; 王曰伦等, 1980; 陈毓蔚等, 1981)。进入 90 年代后, 王松山等(1995)通过对雾迷山组燧石条带的测年研究, 分别在该组底部获得其 Ar-Ar 等时线年龄为 1317 ± 22 Ma, 在其顶部获得 1206 ± 27 Ma 和 1208 ± 21 Ma, 认为该组的沉积时限为 1310 ± 20 Ma ~ 1207 ± 10 Ma。另外, 张巧大等(2002)还在雾迷山组第三段获得了 1373 ± 92 Ma 的碳酸盐 Pb-Pb 等时线年龄。显然, 这两项研究仍然支持人们长期以来的观点, 即雾迷山组应属于中元古代晚期, 相当于国际中元古代延展纪-狭带纪中期(王鸿祯和李光岑, 1990; 刘本培和金秋琦, 1993; 陈晋镛等, 1999; 全国地层委员会, 2001, 2002)。

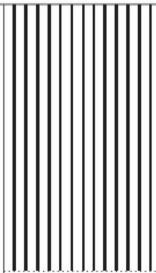
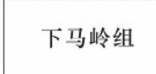
当前在蓟县雾迷山组四段下部发现斑脱岩, 并在其两个不同样品中分别获得了锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄 1483 ± 13 Ma 及 1487 ± 16 Ma, 这精确标定了此间火山喷发事件的准确时间, 同时也标定了雾迷山组四段及整个该组的形成时限。考虑到当前样品层位到雾迷山组顶部尚有厚度超过 800m 的灰质白云岩夹燧石条带泥晶白云岩、厚层叠层石白云岩等浅水碳酸盐沉积, 而在上覆的铁岭组二段底部此次在蓟县及早先(苏文博等, 2010)在河北平泉都获得了 ~ 1440Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄, 且与雾迷山组之间尚有一个以碳泥质页岩沉积为主、厚度超过 200m 的洪水庄组, 因此推测雾迷山组的顶部时限可能为 1470Ma 左右。

5.3 蓟县剖面中元古界的进一步厘定

根据上述进展, 现在可以将蓟县剖面以及整个华北北缘中元古界年代地层划分做更进一步的精确厘定(表 3)。特别是雾迷山组和铁岭组所在的蓟县系, 与燕山地区其他地点完全可以对比, 且都代表了 1600 ~ 1400Ma 这一阶段的沉积记录, 对应于当前国际地层划分方案中的盖层系(Gradstein *et al.*, 2004)。这一厘定表明, 虽然在蓟县以及华北北缘缺失了早于 1650Ma 以及晚于 1380Ma 的沉积记录, 但是至少在

表 3 本文重新厘定的华北北缘中元古界地层划分方案

Table 3 The newly clarified Mesoproterozoic stratigraphic chart in the northern margin of the North China Craton

| 国际地层表 | | | 中国地层表 | | | 华北北缘中元古界厘定划分方案 | | | |
|---------|------|-----------|-------|---------------|---------|----------------|--|---------------------------|---------|
| | | | | | | 地层格架 | | 控制年龄 (Ma) | |
| 中元古界 | 狭带系 | 1000 Ma | 中元古界 | 蓟县系 | 铁岭组 | "神农系" |  | | |
| | 延展系 | 洪水庄组 | | | 1200 Ma | | | | |
| | | 雾迷山组 | | | | | | | |
| 中元古界 | 盖层系 | 1400 Ma | 中元古界 | 蓟县系 | 杨庄组 | "神农系" |  | 1320 (1)(基性岩床) | |
| | | 1400 Ma | | | 下马岭组 | | | 1368~1366 (2) 1380 (3) | |
| | | | | | | | | 古元古界 | 盖层系 |
| 1600 Ma | 洪水庄组 | 1440 (本文) | | | | | | | |
| | | 古元古界 | 盖层系 | 1600 Ma | 古元古界 | 蓟县系 | 雾迷山组 | | |
| 1600 Ma | 杨庄组 | | | 高于庄组 | | | 1560 (5) | | |
| | | | | | | | 古元古界 | 盖层系 | 1600 Ma |
| 1600 Ma | 团山子组 | 1641 (8) | | | | | | | |
| | | 古元古界 | 盖层系 | 1600 Ma | 古元古界 | 蓟县系 | | | 串岭沟组 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | | | 1621 (?) (11) | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | | 盖层系 | 1600 Ma | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系 | | 1600 Ma | 古元古界 | |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | | 古元古界 | | 盖层系 | 1600 Ma | | 古元古界 |
| 1600 Ma | 常州沟组 | 常州沟组 | | | | | | | |
| | | | 古元古界 | | 盖层系</ | | | | |

U-Pb 同位素年龄 $1625 \pm 6\text{Ma}$ (ID-TIMS, 陆松年等, 1991) 及 $1622 \pm 23\text{Ma}$ (SHRIMP, Lu *et al.*, 2008), 而且也小于在蓟县剖面获得的侵入串岭沟组的基性岩床的就位锆石 U-Pb 同位素年龄 $1638 \pm 14\text{Ma}$ (SHRIMP, 高林志等, 2009) 和 $1634 \pm 9\text{Ma}$ (LA-MC-ICPMS, 张拴宏等, 2013)。尽管孙会一等 (2013) 将这一矛盾结果归因为“串岭沟组”在空间上的“穿时性”, 然而, 在下面两方面客观前提限制下 (1) 两地直线距离不足 120km, 并同处华北地台北缘台地相区 (王鸿祯, 1985; 刘本培和金秋琦, 1993); (2) 1960 年代至今不同尺度的地质填图工作已相继证明, 上述两地的这两套沉积都属于由完全可以一一对比的岩石地层序列所限定的同一个基本岩性地层单位——串岭沟组 (王曰伦等, 1980; 陈晋镛等, 1999), 其形成时代的约束竟然出现如此之大的“穿时性”, 这无论是在地层属性上还是在逻辑自洽上都是令人难以信服的。因此, 孙会一等 (2013) 有关河北宽城串岭沟组凝灰岩的年代学标定有待进一步深入研究。

6 结论

(1) 在蓟县剖面雾迷山组和铁岭组第一次发现斑脱岩, 并对其所含岩浆型锆石开展了 SHRIMP U-Pb 同位素年代学测定, 分别获得了 $\sim 1485\text{Ma}$ 和 $\sim 1440\text{Ma}$ 的高精度年龄, 代表了此间两次火山喷发事件的时间, 从而第一次直接标定了蓟县剖面这两个重要地层单位的沉积时限。

(2) 蓟县剖面铁岭组形成时代的直接标定, 表明该组与燕山其他地区铁岭组的沉积时代是完全一致的。同时这一进展也有有力地证明, 多年来研究者们关于蓟县地区与华北北缘包括铁岭组及其上下沉积在内的中元古界的传统划分及其区域对比关系是完全正确的。

(3) 上述两组获得直接而精确的岩浆型锆石测年约束表明, 至少在 $1650 \sim 1400\text{Ma}$ 这一阶段, 即对应于传统的“长城系(纪)”上部以及整个“蓟县系(纪)”, 蓟县剖面仍是迄今为止华北北缘乃至整个中国东部中元古界发育最为完整、最具有代表性、大部分地层单位已获高精度年代学标定的标准剖面。当前研究对增强这一传统的华北中元古界标准剖面的科学性, 进一步巩固其在国内外中元古代相关研究中的标准性和可对比性等, 都具有重要的科学和实际意义。

致谢 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测年得到北京离子探针中心刘敦一研究员、张玉海研究员和宋彪研究员等的大力支持和帮助; 任纪舜院士和陆松年研究员等对我们的研究工作给予了长期的指导和帮助; 样品锆石分选由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司王建华高工完成; 同位素测年实验过程中还得到任云伟、张阔、张家辉等的帮助; 在此一并致以诚挚的感谢。特别感谢三位评审专家徐备教授、张世红教授和耿元生研究员提出的十分宝贵的修改意见。

References

- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1–2): 155–170
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989. *Regional Geology of Hebei Province*, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Beijing: Geological Publishing House, 1–741 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. 1989. *Regional Geology of Liaoning Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–856 (in Chinese)
- Chen JB, Zhang HM, Zhu SX, Zhao Z and Wang ZG. 1980. Research on Sinian Suberathem of Jixian, Tianjin. In: *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS (ed.). Research on Precambrian Geology-Sinian Suberathem in China*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 56–114 (in Chinese)
- Chen JB, Zhang PY, Gao ZJ and Sun SF. 1999. *Lexicon of China Stratigraphy: Mesoproterozoic Era*. Beijing: Geological Publishing House, 1–89 (in Chinese)
- Chen YW, Zhong FD, Liu JY, Mao CX and Hong WX. 1981. Pb isotopic age determination of some Precambrian rocks from North China (additional discussion on Precambrian geochronological scale of China). *Geochimica*, (3): 209–219 (in Chinese)
- China Commission on Stratigraphy. 2001. *Guide to Stratigraphy in China and the Introduction to the Guide (revised edition)*. Beijing: Geological Publishing House, 1–59 (in Chinese)
- China Commission on Stratigraphy. 2002. *Explanation of China Regional Stratigraphic Chart*. Beijing: Geological Publishing House, 1–72 (in Chinese)
- Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Journal Geophysical Research*, 89(S2): 525–534
- Compston W, Williams IS, Kröner JL, Zhang ZC and Guogan MA. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171–184
- Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Zhou HR and Wang ZQ. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan System in North China. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 249–255 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Song B, Wang ZQ and Liu YM. 2008. Mesoproterozoic age for Xiamaling Formation in North China Plate indicated by zircon SHRIMP dating. *Chinese Science Bulletin*, 53(17): 2665–2671
- Gao LZ, Zhang CH, Liu PJ, Ding XZ, Wang ZQ and Zhang YJ. 2009. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China. *Acta Geologica Sinica*, 30(4): 433–446 (in Chinese with English abstract)
- Gradstein FM, Ogg JG, Smith AG, Bleeker W and Lourens LJ. 2004. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27(2): 83–100
- He ZJ, Niu BG, Zhang XY, Zhao L and Liu YY. 2011. Discovery of the paleo-weathered mantle of the rapakivi granite covered by the Proterozoic Changzhougou Formation in the Miyun area, Beijing and their detrital zircon dating. *Geological Bulletin of China*, 30(5): 798–802 (in Chinese with English abstract)
- Kao CS, Hsiung YH and Kao P. 1934. Preliminary notes on Sinian stratigraphy of North China. *Bulletin of the Geological Society of China*, 13: 243–288 (in Chinese)
- Li HK, Li HM and Lu SN. 1995. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi Formation of Changcheng System and their geological implications. *Geochimica*, 24(1): 43–48 (in Chinese with English abstract)

- Li HK, Lu SN, Li HM, Sun LX, Xiang ZQ, Geng JZ and Zhou HY. 2009. Zircon and baddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling formation, North China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1396–1404 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Zhu SX, Xiang ZQ, Su WB, Lu SN, Zhou HY, Geng JZ, Li S and Yang FJ. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131–2140 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Su WB, Zhou HY, Geng JZ, Xiang ZQ, Cui YR, Liu WC and Lu SN. 2011. The base age of the Changchengian System at the Northern North China Craton should be younger than 1670Ma: Constraints from zircon U-Pb LA-MC-ICPMS dating of a granite-porphry dike in Miyun County, Beijing. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 112–124 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Lu SN, Su WB, Xiang ZQ, Zhou HY and Zhang YQ. 2013. Recent advances in the study of the Mesoproterozoic geochronology in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 216–227
- Li HK, Zhang CL, Xiang ZQ, Lu SN, Zhang J, Geng JZ, Qu LS and Wang ZX. 2013. Zircon and baddeleyite U-Pb geochronology of the Shennongjia Group in the Yangtze Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 673–697 (in Chinese with English abstract)
- Li MR, Wang SS and Qiu J. 1996. The ages of glauconites from Tieling and Jingeryu Formations, Beijing-Tianjin area. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 416–423 (in Chinese with English abstract)
- Liu BP and Quan QQ. 1993. *Historical Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 1–275 (in Chinese)
- Lu SN and Li HM. 1991. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanics of Dahongyu Formation, Changcheng System in Jixian. *Chinese Academy of Geological Science Bulletin*, 22(1): 137–146 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yang CL, Zhu SX and Mei HL. 1996. Precambrian continental crust profile from Eastern Hebei to Jixian, Tianjin. 30th International Geological Congress Field Trip Guide (Vol. 2). Beijing: Geological Publishing House, 1–42
- Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160(1–2): 77–93
- Ludwig KR. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 1a: 1–56
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Mattinson JM, Corfu F, Dörr, W, Kamo SL, Kennedy AK, Kronz A, Reiners PW, Frei D, Kosler J, Wan YS, Gütze J, Häger T, Kröner A and Valley JW. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247–265
- Peng P, Liu F, Zhai MG and Guo JH. 2012. Age of the Miyun dyke swarm: Constraints on the maximum depositional age of the Changcheng System. *Chinese Science Bulletin*, 57(1): 105–110 (in Chinese)
- Qiao XF, Gao LZ and Zhang CH. 2007. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino-Korean Plate. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 503–509 (in Chinese with English abstract)
- Su WB, Li ZM, Shi XY, Zhou HR, Huang SJ, Liu XM, Chen XY, Zhang JE, Yang HM, Jia LJ, Huff WD and Ettensohn FR. 2006. K-bentonites and black shales from the Wufeng-Longmaxi formations (Early Paleozoic, South China) and Xiamaling Formation (Early Neoproterozoic, North China): Implications for tectonic processes during two important transitions. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 82–95 (in Chinese with English abstract)
- Su WB, Zhang SH, Huff WD, Li HK, Ettensohn FR, Chen XY, Yang HM, Han YG, Song B and Santosh M. 2008. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton. *Gondwana Research*, 14(3): 543–553
- Su WB, Li HK, Huff WD, Ettensohn FR, Zhang SH, Zhou HY and Wan YS. 2010. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China. *Chinese Science Bulletin*, 55(29): 3312–3323 (in Chinese)
- Su WB, Li HK, Xu L, Jia SH, Geng JZ, Zhou HY, Wang ZH and Pu HY. 2012. Luoyu and Ruyang Group at the south margin of the North China Craton (NCC) should belong in the Mesoproterozoic Changchengian system: Direct constraints from the LA-MC-ICPMS U-Pb age of the tuffite in the Luoyukou Formation, Ruzhou, Henan, China. *Geological Survey and Research*, 35(2): 96–108 (in Chinese with English abstract)
- Su WB. 2014. A review of the revised Precambrian time scale (GTS2012) and the research of the Mesoproterozoic chronostratigraphy of China. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 119–138 (in Chinese with English abstract)
- Sun HY, Gao LZ, Bao C, Chen YL and Liu DY. 2013. SHRIMP zircon U-Pb of Mesoproterozoic Chuanlinggou Formation from Kuancheng County in Hebei Province and its geological implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 87(4): 591–596 (in Chinese with English abstract)
- Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS. 1980. *Research on Precambrian Geology-Sinian Suberathem in China*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1–407 (in Chinese)
- Van Kranendonk MJ. 2012. Chapter 16: A chronostratigraphic division of the Precambrian. In: Gradstein FM (ed.). *The Geological Time Scale 2012*. Boston: Elsevier Science Limited, 299–392
- Wang HZ. 1985. *Atlas of the Palaeogeography of China*. Beijing: Cartographic Publishing House, 1–143 (in Chinese)
- Wang HZ and Li GC. 1990. *Correlation Table of Stratigraphical Subdivision*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang J, Deng Q, Wang ZJ, Qiu YS, Duan TZ, Jiang XS and Yang QX. 2013. New evidences for sedimentary attributes and timing of the “Macaoyuan conglomerates” on the northern margin of the Yangtze block in southern China. *Precambrian Research*, 235: 58–70
- Wang SS, Sang HQ, Qiu J, Chen ME and Li MR. 1995. The metamorphic age of Pre-Changcheng System in Beijing-Tianjin area and a discussion about the lower limit age of Changcheng System. *Chinese Journal of Geology*, 30(4): 348–354 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Lu ZB, Xing YS, Gao ZJ, Lin WX, Ma GG, Zhang LY and Lu SN. 1980. Subdivision and correlation of the Upper Precambrian in China. In: Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS (ed.). *Research on Precambrian Geology-Sinian Suberathem in China*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1–30 (in Chinese)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Review in *Economic Geology*, 7: 1–35
- Xing YS, Gao ZJ, Wang ZQ, Gao LZ and Yin CY. 1996. *Lexicon of China Stratigraphy: Neoproterozoic Era*. Beijing: Geological Publishing House, 1–117 (in Chinese)
- Yu RB and Zhang XQ. 1984. Study of Geochronology of Late Precambrian in the Yanshan Ranges. *Bulletin of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources*, 11: 1–23 (in Chinese)
- Zhang QD, Song TR, He ZJ and Ding XZ. 2002. Pb-Pb age determination of Meso- to Neoproterozoic carbonates in the Ming Tombs district, Beijing. *Geological Review*, 48(4): 416–423 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Yang ZY, He ZF and Wu H. 2009. The 1.35Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3–4): 588–600

- Zhang SH, Zhao Y, Ye H, Hu JM and Wu F. 2013. New constraints on ages of the Chuanlinggou and Tuanshanzi formations of the Changcheng System in the Yan-Liao area in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2481–2490 (in Chinese with English abstract)
- Zhong FD. 1977. On Sinian geological time scale based on isotopic ages of the Sinian strata in the Yanshan region. *Science in China (Series D)*, 20(2): 151–161 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈晋铤, 张惠民, 朱士兴, 赵震, 王振刚. 1980. 蓟县震旦亚界的研究. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 56–114
- 陈晋铤, 张鹏远, 高振家, 孙淑芬. 1999. 中国地层典-中元古界. 北京: 地质出版社, 1–89
- 陈毓蔚, 钟富道, 刘菊英, 毛存孝, 洪文兴. 1981. 我国北方前寒武岩石铅同位素年龄测定: 兼论中国前寒武地质年表. *地球化学*, (3): 209–219
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 26(3): 249–255
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 宋彪, 王自强, 刘耀明. 2008. 华北古陆下马岭组归属中元古界的 SHRIMP 锆石新证据. *科学通报*, 53(11): 2617–2623
- 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 丁孝忠, 王自强, 张彦杰. 2009. 华北-江南地区中-新元古代地层格架的再认识. *地球学报*, 30(4): 433–446
- 高振西, 熊永先, 高平. 1934. 中国北部震旦纪地层. *中国地质学会会志*, 13: 243–288
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–741
- 和政军, 牛宝贵, 张新元, 赵磊, 刘仁燕. 2011. 北京密云元古宙常州沟组之下环斑花岗岩古风化壳岩石的发现及其碎屑锆石年龄. *地质通报*, 30(5): 798–802
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 24(1): 43–48
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. *地质通报*, 28(10): 1396–1404
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨峰杰. 2010. 北京延庆高子庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. *岩石学报*, 26(7): 2131–2140
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 耿建珍, 相振群, 崔玉荣, 刘文灿, 陆松年. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1670Ma——来自北京密云花岗岩斑岩岩脉锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的约束. *地学前缘*, 18(3): 112–124
- 李怀坤, 张传林, 相振群, 陆松年, 张健, 耿建珍, 瞿乐生, 王志先. 2013. 扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. *岩石学报*, 29(2): 673–697
- 李明荣, 王松山, 裘冀. 1996. 京津地区铁岭组、景儿峪组海绿石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄. *岩石学报*, 12(3): 416–423

- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–856
- 刘本培, 全秋琦. 1993. 地史学教程. 北京: 地质出版社, 1–275
- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. *中国地质科学院院报*, 22(1): 137–146
- 彭彭, 刘富, 翟明国, 郭敬辉. 2011. 密云岩墙群的时代及其对长城系底界年龄的制约. *科学通报*, 56(35): 2975–2980
- 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中-新元古界年代地层柱与构造环境新思考. *地质通报*, 26(5): 503–509
- 全国地层委员会. 2001. 中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版). 北京: 地质出版社, 1–59
- 全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书. 北京: 地质出版社, 1–72
- 苏文博, 李志明, 史晓颖, 周洪瑞, 黄思骥, 刘晓茗, 陈晓雨, 张继恩, 杨红梅, 贾柳静, Huff WD, Ettensohn FR. 2006. 华南五峰组-龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系——两个地史转折期板块构造运动的沉积响应. *地学前缘*, 13(6): 82–95
- 苏文博, 李怀坤, Huff WD, Ettensohn FR, 张世红, 周红英, 万渝生. 2010. 铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义. *科学通报*, 55(22): 2197–2206
- 苏文博, 李怀坤, 徐莉, 贾松海, 耿建珍, 周红英, 王志宏, 蒲含勇. 2012. 华北克拉通南缘洛峪群-汝阳群属于中元古界长城系——河南汝州洛峪口组层凝灰岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的直接约束. *地质调查与研究*, 35(2): 96–108
- 苏文博. 2014. 2012 年全球前寒武纪新年表与中国中元古代年代地层学研究. *地学前缘*, 21(2): 119–138
- 孙会一, 高林志, 包创, 陈岳龙, 刘敦一. 2013. 河北宽城中元古代串岭沟组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质学报*, 87(4): 591–596
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社, 1–143
- 王鸿祯, 李光岑. 1990. 国际地层时代对比表. 北京: 地质出版社
- 王松山, 桑海清, 裘冀, 陈孟莪, 李明荣. 1995. 京津地区长城系下伏变质岩系变质年龄及长城系底界年龄的厘定. *地质科学*, 30(4): 348–354
- 王曰伦, 陆宗斌, 邢裕盛, 高振家, 林蔚兴, 马国干, 张录易, 陆松年. 1980. 中国上前寒武系的划分和对比. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所主编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1–30
- 邢裕盛, 高振家, 王自强, 高林志, 尹崇玉. 1996. 中国地层典-新元古界. 北京: 地质出版社, 1–117
- 于荣炳, 张学祺. 1984. 燕山地区晚前寒武纪同位素地质年代学的研究. *中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊*, 11: 1–23
- 张巧大, 宋天锐, 和政军, 丁孝忠. 2002. 北京十三陵地区中-新元古界碳酸盐岩 Pb-Pb 年龄研究. *地质论评*, 48(4): 416–423
- 张拴宏, 赵越, 叶浩, 胡健民, 吴飞. 2013. 燕辽地区长城系串岭沟组及团山子组沉积时代的新制约. *岩石学报*, 29(7): 2481–2490
- 钟富道. 1977. 从燕山地区震旦地层同位素年龄论中国震旦地质年表. *中国科学(D 辑)*, 20(2): 151–161
- 中国地质科学院天津地质矿产研究所. 1980. 前寒武地质研究中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1–407