

渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦 产量形成及土壤水分利用的影响

薛澄, 王朝辉, 李富翠, 赵护兵, 周玲, 李小涵

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】研究不同施肥和覆盖栽培模式对渭北旱塬旱地冬小麦产量和水分利用的影响。【方法】通过田间试验, 研究测土推荐施氮、顶凌追肥、垄覆沟播、秸秆还田覆盖等措施对冬小麦产量、生物量、收获指数、水分利用效率及土壤水分周年变化的影响。【结果】旱地早春追肥使冬小麦增产 6%—14%, 水分利用效率提高 7%—10%, 达到 $12.2\text{—}13.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$; “减氮+垄覆沟播”增产达 15%—41%, 水分利用率提高 10%—30%, 达到 $12.2\text{—}16.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。主要原因是, 通过测土优化氮肥用量, 采用基肥: 追肥 (3: 1) 方式, 并与起垄覆膜栽培措施相结合可促进冬小麦利用深层土壤水分, 提高冬小麦抽穗开花期植株含水量和成熟期的生物量及收获指数; 虽然生育期耗水增加, 但水分利用效率也提高。而单纯减少氮肥用量, 不利于水分利用效率的提高; 夏季垄上覆膜沟内覆盖作物秸秆可提高休闲效率, 利于土壤水分恢复, 实现土壤水分周年平衡和旱地小麦可持续增产。【结论】优化施氮结合垄覆沟播是黄土高原渭北旱地小麦增产增效的栽培模式。

关键词: 冬小麦; 施肥; 垄覆沟播; 籽粒产量; 土壤水分

Effects of Different Fertilization and Mulching Cultivation Methods on Yield and Soil Water Use of Winter Wheat on Weibei Dryland

XUE Cheng, WANG Zhao-hui, LI Fu-cui, ZHAO Hu-bing, ZHOU Ling, LI Xiao-han

(College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】 Research on effects of fertilization and mulching cultivation patterns on yield and water use of winter wheat is recognized to be of great significance in increasing crop yield and water and nutrient efficiency on Weibei dryland. 【Method】 Field experiments were carried out to study the effects of recommended N fertilization based on soil test, topdressing, ridge-mulching and furrow seeding, and covering soil surface by retention of wheat straw during summer fallow on winter wheat yield, biomass, harvesting index, water use efficiency and annual changes of soil water. 【Result】 Results showed that compared to local farmers' cultivation mode (apply all the fertilizers to soil once before seeding), topdressing of partial N fertilizer (25% of total) in dry-land region increased winter wheat yield by 6%-14% and WUE by 7%-10%, with WUE reaching $12.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ to $13.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$; ridge-mulching and furrow seeding combined with N reduced topdressing increased winter wheat yield by 15%-41% and WUE by 10%-30%, and the WUE were as high as $12.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ to $16.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$. Optimizing nitrogen fertilizer application by 1/4 nitrogen fertilizer being topdressed and at the same time using the ridge-mulching and furrow seeding was found to be able to enhance deep soil water usage by winter wheat, increase water content of winter wheat at heading stage and then enhance the biomass and harvesting index at harvest. This method led to a higher soil water consumption over the whole growing season, but the water use efficiency was also increased due to much more increase of grain yield. However, only reducing nitrogen input did not increase the water use efficiency. Nitrogen reduced topdressing combined with ridge-mulching and furrow seeding also increased soil storage of rainfall water during summer fallow and the summer fallow efficiency, by covering

收稿日期: 2010-07-26; 接受日期: 2011-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (30871596, 30971866)、农业公益性行业科研专项经费项目 (201103003)、现代农业产业技术体系建设专项资金

联系方式: 薛澄, E-mail: xue_283@163.com. 通信作者王朝辉, Tel: 029-87082234; E-mail: w-zhaohui@263.net

furrow soil surface by retention of wheat straw and keeping the ridge mulched plastic film during summer fallow. This method achieved annual soil water balance and was proved to be able to sustainably increase winter wheat yield. 【Conclusion】 Optimizing nitrogen application combined with ridge-mulching and furrow seeding was showed to be the cultivation and fertilization method to increase yield and water use efficiency for winter wheat growing in Weibei dryland area on the Loess Plateau.

Key words: winter wheat; fertilization; ridge-mulching and furrow seeding; grain yield; soil water

0 引言

【研究意义】目前,中国西北干旱半干旱地区有耕地 0.13 亿多公顷,约占全国耕地总面积的 1/3,尚有 0.26—0.33 亿公顷土地可供开垦,种植粮食作物^[1]。冬小麦是渭北旱塬区最重要的粮食作物之一,降水时空分布不均且与冬小麦水分需求规律不吻合严重制约该区冬小麦生产。因而,寻求有效集雨保墒并提高降水利用效率的措施是该区小麦稳产高产的关键,也是该区农业生产中亟待解决的重要问题。【前人研究进展】黄土高原是中国西北地区的主要粮食产区之一,也是中国以生产小麦为主的古老旱作区^[2]。渭北旱塬属于黄土高原区典型的旱地,年平均降水量 500—600 mm,属于半湿润干旱气候。该区地下水位深达 60 m,很难供作物吸收利用,因此作物生长主要依靠自然降水,为典型的雨养农业区。该地区降水少,时空分布不均匀,主要集中在每年夏季的 7、8、9 三个月,占全年降水的 60%—70%,而冬小麦生育期(当年 9 月或 10 月至次年 6 月)降水仅有 30%—40%。集中的夏季降水以暴雨形式出现,不仅容易导致严重的水土流失,也不利于地表水分下渗,并贮存到土壤深层。同时,夏季温度高,雨过天晴又会导致土壤水分大量无效蒸发损失,蒸发量高达 1 500 mm 以上,传统的深翻晒垡、纳雨蓄墒、耙耱保墒等措施,夏季休闲期土壤蓄水率仅为 35.0%—38.6%^[3]。由于冬小麦生育期内自然降水少,又无其它水源补充,因此,产量低而不稳,远低于当地气候生产潜力,作物增产潜力远未得到发挥^[4]。因此,在夏季增加降水入渗,减少蒸发损失增加土壤贮水将为小麦生长提供充足的水分。但已有研究多是集中在减少小麦生长季节地表水分蒸发、增加作物对水分的利用,而对夏季降水的管理,特别是新型的地表覆盖集水关注不足。传统的免耕或少耕可以减少径流和水分蒸发,增加播前 0—50 cm 土层有效水分含量 13 mm,较夏季常规耕翻提高 14.13%^[5-6]。赵聚宝等^[7]在山西种植冬小麦和春玉米发现,麦田夏闲期和春玉米田冬闲期秸秆覆盖处理,0—50 cm 土层蓄水量分别比对照增加 45.3 mm 和 45.2 mm,土壤蒸发

量减少 21.5%—63.2%,同时土壤有机质含量由 0.59% 增加至 0.73%,有利于培肥地力^[8];覆膜能够提高作物水分利用效率,改善土壤水、热状况,尤其是 0—5 cm 表层土壤^[9],并增强土壤微生物活性。有研究发现^[10],在甘肃省覆膜种植春小麦后,每克土壤微生物数量最高可达 33.9×10^6 ,较未覆膜提高 49.3%。在渭北旱塬南部的田间试验发现,小麦生长期起垄覆膜栽培产量增加 39.5%,水分利用效率达到 $22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ^[11]。除水资源不足外,土壤贫瘠、有机质含量低,供肥和保肥能力差是限制这一地区作物产量提高的另一因素。与水分不同的是养分投入可以人为调控。但长期以来小麦施肥的问题一是过量施肥,特别是过量施氮,降低了肥料利用效率。与 20 世纪 50 年代末相比,80 年代每 kg N 增加的小麦产量由 10—15 kg 下降至 10 kg^[12],在陕西省每 kg 化肥养分 (N+P₂O₅+K₂O) 仅增产小麦 4.5 kg,增产量最高的渭北旱塬也只有 7.2 kg^[13];二是施肥时间,多是“重基肥、轻追肥”,“一炮轰”的施肥现象十分普遍,而在陇东旱塬研究表明^[14],施纯氮 150 kg·hm⁻² 情况下,氮肥分次施用(2/3 底施,1/3 返青施)相对“一炮轰”可使冬小麦增产 6%,达到 5.5 t·hm⁻²。因此,如何最大限度地收集和保蓄有限的降水,减少地表水分无效蒸发,优化养分投入数量、时间和方式是旱地冬小麦增产和水分、养分高效利用的关键^[1]。【本研究切入点】渭北旱塬是黄土高原典型旱作雨养农业区,干旱胁迫和地力贫瘠是旱地小麦生产的主要限制因素。已往的工作多是各处理单一因素的分析 and 对比,或重视提高作物生产力,或注重提高水分、养分利用效率,缺乏对集水、保水及养分调控的集成,且多关注作物生长季节的水管理,缺乏对夏季降水以及周年土壤水分平衡和作物高产的研究,无法反映各种优化措施的综合效应和可持续性。【拟解决的关键问题】本研究以中国渭北旱塬旱地冬小麦为例,通过减氮、追肥、垄覆沟播、秸秆覆盖等施肥与栽培措施集成,加强夏季降水管理、进行周年水分养分调控,探讨这些综合措施对渭北旱塬冬小麦产量和水分利用效率的影响以及土壤水分变化与平衡的影响,评价和筛选与

当地降水状况和冬小麦种植制度相适应的增产增效生产模式, 为促进黄土高原旱地农业可持续发展提供理论和生产依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于黄土高原丘陵沟壑区, 陕西省长武县十里铺村(东经 107°45′、北纬 35°12′)。海拔 1 200 m, 年均降水量 580 mm, 降水主要集中在 7、8、9 三个月, 占全年降水量的 60% 以上, 年均蒸发量 1 500 mm, 平均气温 9.1℃, 无霜期 172 d。2008 年试验开始前土壤的基本理化性状见表 1。2008—2010 年小麦生育期及休闲期内的月降水量见表 2。

1.2 田间试验

2008—2009 年田间试验设 6 个处理, 即对照、农户模式、顶凌追肥、减氮追肥 1、减氮追肥 2、垄覆沟播 6 种施肥与栽培模式(表 3); 2009—2010 年对试验方案进行了改进和调整, 仍设 6 个处理, 分别为对照、农户模式、顶凌追肥、减氮追肥 1、垄覆沟播、高密垄覆沟播(表 3)。氮肥为尿素, 磷肥为重过磷酸钙。田间布局采用完全随机区组设计, 小区面积 6 m×22 m=132 m², 4 次重复。冬小麦品种为长武 521, 播量为 150 kg·hm⁻² (高密垄覆沟播模式播量为 225 kg·hm⁻²)。2008 年 9 月 23 日播种, 2009 年 6 月 22 日收获; 2009 年 10 月 3 日播种, 2010 年 6 月 28 日收获。播种、收获及犁地、旋地均采用当地农业生产中

使用的机械操作。

1.3 样品采集与测定

在冬小麦播前、抽穗开花期(约 50% 冬小麦开花时)和收获后用土钻分别采集 0—300 cm 剖面土壤样品。田间取样时每小区设 2 个采样点, 0—40 cm 每 10 cm 为一层, 40—300 cm 每 20 cm 为一层采取不同土层土壤样品, 2 个样点同一土层土壤混合作为一个分析样品, 迅速装入预先标记好的塑料袋, 密封带回实验室, 4℃ 保存。土壤矿质氮的测定采用鲜土样, 用 1 mol·L⁻¹的 KCl 溶液浸提, 液土比 10:1, 震荡 1 h, 过滤, 滤液中硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)用连续流动分析仪测定; 用烘干法(105℃, 24 h)测定土壤重量含水量。

在抽穗开花期和收获期采集植物样品, 每小区随机选取 4 个采样点, 每点按行取 1 m 长样段, 沿根茎结合处剪去根系后, 同一小区 4 个样段混合, 作为一个分析样品。抽穗开花期地上部植株分为茎叶和穗, 收获期进一步分为茎叶、颖壳和籽粒。称量鲜重后, 在 90℃ 下杀青 30 min, 70℃ 烘干, 称量干重。冬小麦产量数据采用全区收获法确定, 现场称鲜重, 取样测定含水量后计算烘干重。小麦抽穗开花期的生物量, 收获期的生物量和产量均采用烘干重表示。

1.4 数据计算

(1) 土壤贮水量 w (mm) = $\rho \times h \times \omega \times 10$ 。式中, w 为土壤水分总贮存量 (mm), ρ 为实测土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), h 为土层厚度 (cm), ω 为土壤水分 (%);

表 1 供试土壤性质

Table 1 Basic nutrient status in the plough layer soil of the experiment field

土层 Layer (cm)	容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	有机碳 Organic C ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH (土壤水溶液 Soil solution)	矿质氮 Mineral N	
							NO ₃ ⁻ -N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ -N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0—10	1.22	8.73	0.81	5.4	139.9	8.18	13.0	2.9
10—20	1.49	8.32	0.73	3.6	119.4	8.17	13.2	2.2
20—40	1.32	6.28	0.58	1.6	122.0	8.24	8.6	1.8

表 2 2008—2010 年小麦生育期及夏季休闲期内月降水量

Table 2 Monthly precipitation during winter wheat growing stage and summer fallow from 2008 to 2010 (mm)

时间 Time	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May.	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sept.	总和 Total
2008—2009	17.4	9.2	0	0	17.2	22	15.6	59.4	14.4	117.6	93.8	37.8	404.4
2009—2010	16.4	36.8	2.8	0	11.6	18.8	38	32.4	28.8	164.5	210.5	77.2	637.8

降水量资料来源: 中国科学院水利部水土保持研究所长武黄土高原农业生态试验站

Resource of precipitation data: Changwu Agro-ecological Experiment Station of Loess Plateau of the Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources

表 3 田间试验设计

Table 3 Field experimental design

处理名称 Treatments	基肥与追肥 Basal and topdressing fertilizer	播种与管理 Seeding and management
对照 Control	基肥仅施磷 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² Only P was applied at 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer	播量 150 kg·hm ⁻² , 常规平作, 行宽 15 cm; 小麦收获时秸秆全部收走, 收获后 1 周翻耕 1 次, 经过夏闲后下季小麦播前 2 周, 再翻耕整地 1 次, 耕深均为 40 cm Winter wheat was seeded at 150 kg·hm ⁻² and row space was 15 cm with flat soil surface. Wheat straw was removed after harvest. Plots were plowed to 40 cm soil depth a week after winter wheat was harvested and plowed and harrowed again two weeks before next winter wheat seeding
农户模式 Farmers' mode	施氮 162 kg N·hm ⁻² , 施磷 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² N and P were applied at 162 kg N·hm ⁻² and 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer	播量及耕作方式等同对照 The same as control
顶凌追肥模式 Early spring topdressing	基肥 104 kg N·hm ⁻² +105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² ; 追肥为 58 kg N·hm ⁻² , 返青前 2 月 20 日追肥 N and P were applied at 104 kg N·hm ⁻² and 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer, another 58 kg N·hm ⁻² as topdressing fertilizer was applied on February 20	播量及耕作方式等同对照 The same as control
减氮追肥模式 1 N reduced topdressing 1	采用测土推荐施肥量, 基肥为 104 kg N·hm ⁻² +105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² ; 追肥为 34 kg N·hm ⁻² , 返青前 2 月 20 日追肥 According to soil testing results, N and P were applied at 104 kg N·hm ⁻² and 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer, another 34 kg N·hm ⁻² as topdressing fertilizer was applied on February 20	播量及耕作方式等同对照 The same as control
减氮追肥模式 2 N reduced topdressing 2	采用测土推荐施肥量, 基肥为 104 kg N·hm ⁻² +105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² ; 返青前 2 月 20 日、拔节前 3 月 20 日各追肥 17 kg N·hm ⁻² According to soil testing results, N and P were applied at 104 kg N·hm ⁻² and 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer, another two 17 kg N·hm ⁻² as topdressing fertilizer were applied on February 20 and March 20	播量及耕作方式等同对照 The same as control
垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding	采用测土推荐施肥量, 基肥为 104 kg N·hm ⁻² +105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² ; 追肥为 34 kg N·hm ⁻² , 返青前 2 月 20 日追肥 According to soil testing results, N and P were applied at 104 kg N·hm ⁻² and 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer, another 34 kg N·hm ⁻² as topdressing fertilizer were applied on February 20	播量 150 kg·hm ⁻² , 播前起垄, 垄上覆膜, 垄宽 35 cm, 垄间沟宽 30 cm。沟内播种, 行距 20 cm。小麦收获时不揭膜且秸秆全部还田, 覆盖垄间。小麦播前翻耕整地一次, 耕深 40 cm Winter wheat was seeded at 150 kg·hm ⁻² and row space was 20 cm with ridge-mulching and furrow seeding cultivation. The ridges were 35 cm wide and the furrows were 30 cm wide. Furrow soil surface was covered by retention of wheat straw during summer fallow. The plots were plowed and harrowed to 40 cm soil depth once before next winter wheat seeding
高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate	采用测土推荐施肥量, 基肥为 104 kg N·hm ⁻² +105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² ; 追肥为 34 kg N·hm ⁻² , 返青前 2 月 20 日追肥 According to soil testing results, N and P were applied at 104 kg N·hm ⁻² and 105 kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻² as basal fertilizer, another 34 kg N·hm ⁻² as topdressing fertilizer was applied on February 20	播量 225 kg·hm ⁻² , 播前起垄, 垄上覆膜, 垄宽 35 cm, 垄间沟宽 30 cm。沟内播种, 行距 20 cm。小麦收获时不揭膜且秸秆全部还田, 覆盖垄间。小麦播前翻耕整地一次, 耕深 40 cm Winter wheat was seeded at 225 kg·hm ⁻² and row space was 20 cm with ridge-mulching and furrow seeding cultivation. The ridges were 35 cm wide and the furrows were 30 cm wide. Furrow soil surface was covered by retention of wheat straw during summer fallow. The plots were plowed and harrowed to 40 cm soil depth once before next winter wheat seeding

(2) 生育期耗水量 E_t (mm) = $P + (W_e - W_b)$, 其中, P 为作物生育期有效降水量 (mm), W_e 和 W_b 分别为播前和收获时的土壤贮水量 (mm);

(3) 水分利用效率 WUE ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$) = Y_a / E_t , 其中, Y_a 为单位面积的籽粒产量 ($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.5 数据处理

试验数据采用 DPS 软件进行方差分析和多重比较。

2 结果

2.1 不同施肥与覆盖栽培冬小麦产量、生物量及收获指数

收获期小麦籽粒产量 (表 4) 表明, 在施肥量一致的情况下, 顶凌追肥较农户模式前季 (2008—2009 年) 产量提高 14%, 后季 (2009—2010 年) 产量提高

表 4 冬小麦产量、生物量及收获指数

Table 4 Yield, biomass and harvesting index of winter wheat

处理 Treatments	2008—2009			2009—2010		
	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	生物量 Biomass (kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvesting index (%)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	生物量 Biomass (kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvesting index (%)
对照 Control	2538d	6022c	42.2b	2938.5d	6523.2c	45.0b
农户模式 Farmers' mode	3365bc	8058b	41.7b	3168.1cd	6607.1c	47.9a
顶凌追肥 Early spring topdressing	3852b	8966b	43.0ab	3353.1bc	7104.6bc	47.2ab
减氮追肥 1 N reduced topdressing 1	3301c	7502b	43.9ab	3365.3bc	7223.3bc	46.8ab
减氮追肥 2 N reduced topdressing 2	3254c	7691b	42.3ab			
垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding	4741a	10644a	44.5a	3645.7ab	7668.1ab	47.6a
高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate				3924.9a	8527.3a	46.1ab

6%；减氮追肥 1 依据测土推荐施肥使氮肥用量减少 15%，但与农户模式相比，前季小麦产量无显著变化，后季增产 6%；减氮结合垄覆沟播栽培技术（垄覆沟播模式）前后两季小麦产量分别增加 41%和 15%，且将播种量由 150 kg·hm⁻²增加到 225 kg·hm⁻²时，后季垄覆沟播小麦产量进一步提高，增产 24%。顶凌追肥和垄覆沟播模式 2008—2009 年的生物量和收获指数均高于农户模式，说明小麦增产的一个重要原因是增加了干物质形成并促进其向籽粒转移；但 2009—2010 年，顶凌追肥、垄覆沟播、高密垄覆沟播模式的收获指数较农户模式分别降低 1.5%、0.6%和 3.8%，而生物量却明显增加，说明这几种模式增产的原因主要是增加了干物质形成。造成这种现象的原因可能与冬前

冻害有关，2009—2010 降雪提前，使小麦在苗期遭受了冻害，因此产量普遍偏低且顶凌追肥、垄覆沟播模式 2009—2010 年增产幅度小于 2008—2009 年。

2.2 抽穗开花期土壤贮水、植株生长量和水分含量

抽穗开花期土壤贮水量、植株生长量和水分含量分析表明（表 5），2008—2009 年，顶凌追肥、减氮追肥 1 和 2、垄覆沟播模式抽穗开花期 0—300 cm 土层贮水量与农户模式相比分别提高 3.5%、1.9%和 7.9%和 8.1%；顶凌追肥模式植株生长量表现出一定程度的增加，但其它模式均降低。2009—2010 年，各处理抽穗开花期土壤贮水量无差异，植株生长量表现出与 2008—2009 年相同的趋势，高密垄覆沟播模式由于增加了播种密度，植株生长量较农户模式增加 36.7%。

表 5 不同施肥和栽培条件下抽穗开花期 0—300 cm 土层贮水及植株生长量和水分含量

Table 5 Water storage in 0-300 cm soil layers, crop biomass and water content at heading stage under different fertilization and cultivation methods

处理 Treatments	2008—2009 年			2009—2010 年		
	0—3 m 土壤贮水 0-3 m soil water storage (mm)	植株生长量 Biomass (kg·hm ⁻²)	植株水分含量 Water content of plant (%)	0—3 m 土壤贮水 0-3 m soil water storage (mm)	植株生长量 Biomass (kg·hm ⁻²)	植株水分含量 Water content of plant (%)
对照 Control				481.3a	6059.1ab	70.4c
农户模式 Farmers' mode	426.9b	6910.2a	66.5b	477.6a	6039.2ab	73.4ab
顶凌追肥 Early spring topdressing	441.9ab	8190.1a	67.3b	481.6a	6820.8b	71.6bc
减氮追肥 1 N reduced topdressing 1	434.8b	6892.4a	66.0b	478.3a	5880.9ab	73.1ab
减氮追肥 2 N reduced topdressing 2	460.6a	7637.7a	66.8b			
垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding	461.5a	6172.3a	71.5a	480.0a	5273.6c	74.8a
高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate				483.4a	8254.6a	73.1ab

这表明农户模式基肥施用了较多的氮肥,促进小麦冬前旺盛生长,消耗了较多的土壤水分,因此在抽穗开花期,土壤水分较少;采用顶凌追肥、减氮追肥模式减少了基肥中的氮素,阻止了冬前小麦过旺生长,从而减少了冬前土壤水分过量消耗;垄覆沟播模式在此基础上还减少了土壤水分蒸发,因此在抽穗开花期土壤贮水更高。2009—2010年抽穗开花期各处理土壤贮水量无差异,且前季作物抽穗开花期各处理土壤贮水量差异大于后季作物,原因可能是后季冬小麦播种至抽穗开花期降雨量(156.8 mm)高于2008—2009年同期降雨量(140.8 mm),且2009—2010年冬前冻害,使得抽穗开花期冬小麦生物量显著低于前季作物,作物水分消耗降低。垄覆沟播模式2008—2009年和2009—2010年植株水分含量较农户模式分别提高7.5%和2.0%;顶凌追肥模式2008—2009年提高1.2%,2009—2010年却降低2.5%。高密垄覆沟播模式2009—2010年植株水分含量与农户模式无差异。小麦植株较高的水分含量和生长量,说明早春追肥或垄覆沟播模式小麦在抽穗开花期有较好的长势,为产量提高打下了良好的基础。

2.3 小麦生育期耗水和水分利用效率

对小麦生育期耗水和水分利用效率的分析表明(表6),2008—2009年,顶凌追肥模式的小麦生育期耗水和水分利用效率较农户模式均表现出增加趋势;但减氮追肥1和2处理小麦生育期耗水量有一定增加,水分利用效率降低;垄覆沟播模式作物生育期耗水虽比农户模式增加7.9%,但水分利用效率提高29.9%,达到 $16.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。2009—2010年,顶

凌追肥和减氮追肥1的作物耗水均低于农户模式,水分利用效率比农户模式分别提高9.9%和8.1%,造成该两种模式两季作物耗水量与农户模式相比规律不同的原因是,顶凌追肥模式后季作物增产幅度降低,作物水分消耗相对减少,而水分利用效率较农户模式增加的幅度高于前季作物;减氮追肥1则是由于后季作物产量和水分利用效率较农户模式均增加,因此与前季作物规律不同;垄覆沟播模式和高密垄覆沟播模式水分利用效率较农户模式分别提高9.9%和18.9%。可见,在施氮总量较高的情况下,进行追肥,可明显增强作物后期生长和对土壤水分的利用,促进干物质累积与转移,最终形成较高的籽粒产量;减氮后结合起垄覆膜措施不仅具有集水、保水作用,还能促进小麦的水分吸收利用,以及干物质累积并向籽粒转移,从而使籽粒产量显著提高,在垄覆沟播模式基础上增加播种密度,还可进一步提高作物对土壤水分的吸收和利用,这也是该模式能够进一步增产的重要原因。

2.4 小麦收获期土壤0—300 cm土层水分变化

对冬小麦收获期和播前土壤0—300 cm土层贮水量(表7)差值分析表明,2008—2009年顶凌追肥、减氮追肥1和2、垄覆沟播模式土壤水分减少量均高于农户模式,其中顶凌追肥和垄覆沟播模式土壤水分减少量最多,均为123 mm。2009—2010年顶凌追肥和减氮追肥1模式的土壤水分减少量略低于农户模式,垄覆沟播模式在收获期土壤水分减少仍最多,垄覆沟播和高密垄覆沟播模式分别减少113 mm和112 mm。可见,与播前相比,生物量和产量的提高均导致了土壤水分较多的消耗。

表6 小麦收获后0—300 cm土层贮水、作物水分消耗和水分利用效率

Table 6 Water storage in 0-300 cm soil layers at harvesting stage, crop water consumption over the entire growing season and WUE under different fertilization and cultivation methods

处理 Treatments	2008—2009		2009—2010	
	作物耗水 Crop water consumption (mm)	水分利用效率 WUE ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)	作物耗水 Crop water consumption (mm)	水分利用效率 WUE ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)
	对照 Control	240.8b	10.5c	286.8ab
农户模式 Farmers' mode	265.8ab	12.7b	284.3ab	11.1bc
顶凌追肥 Early spring topdressing	283.1a	13.6b	276.0b	12.2ab
减氮追肥 1 N reduced topdressing 1	282.9a	11.7bc	280.1ab	12.0ab
减氮追肥 2 N reduced topdressing 2	272.9ab	11.9bc		
垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding	286.9a	16.5a	298.7a	12.2ab
高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate			297.7a	13.2a

表 7 小麦收获后 0—300 cm 土层的水分变化

Table 7 Compared to soil water storage before seeding, changes of water storage in 0-300cm soil layers at harvest under different fertilization and cultivation methods (mm)

处理 Treatments	播前土壤贮水量 Soil water storage before winter wheat sowing	2008—2009		播前土壤贮水量 Soil water storage before winter wheat sowing	2009—2010	
		收获期土壤贮水 Soil water storage at harvest	土壤水分变化 Changes of soil water storage		收获期土壤贮水 Soil water storage at harvest	土壤水分变化 Changes of soil water storage
对照 Control	504.4	415.3a	-89a	536.3	435.1a	-101ab
农户模式 Farmers' mode	504.4	404.7ab	-99ab	508.8	410.1b	-99ab
顶凌追肥 Early spring topdressing	504.4	381.2b	-123b	503.0	412.7b	-90a
减氮追肥 1 N reduced topdressing 1	504.4	384.2b	-117ab	516.1	421.6ab	-95ab
减氮追肥 2 N reduced topdressing 2	504.4	398.6ab	-105b	-		
垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding	504.4	378.5b	-123b	523.3	410.3b	-113b
高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate	-			523.3	411.2b	-112b

2.5 夏季休闲期降水接纳保蓄

2008—2009 年, 经过夏季休闲期, 不同施肥与栽培模式 0—300 cm 土壤贮水均得到不同程度恢复 (表 8)。农户模式土壤贮水增加 104 mm, 休闲效率 (休闲效率 (%) = 夏季休闲期土壤 0—300 cm 土层贮水增加量 (mm) / 夏季休闲期降水量 (mm) × 100%) 为 35.1%。减氮结合垄覆沟播模式由于采用休闲期垄上继续覆膜, 沟内秸秆覆盖的集水、保水措施, 土壤增加贮水 145 mm, 较农户模式提高 39.4%, 休闲效率最高, 为 48.8%。顶凌追肥土壤贮水增加 122 mm, 介于减氮追肥 1 (132 mm) 和减氮追肥 2 (117 mm) 之间。2009—2010 年, 夏季休闲期 (7—9 月) 降水量 (452.2 mm) 显著高于 2008—2009 年 (249.2 mm) (表 2), 因此 2009—2010 年各处理土壤贮水增加量均高于

2008—2009 年休闲期。垄覆沟播和高密垄覆沟播模式土壤贮水增加依然最高, 分别为 296 和 299 mm, 休闲效率也最高分别为 64.8% 和 65.3%。顶凌和减氮追肥两种模式并没有表现出增加土壤贮水的作用。两年的结果表明, 在渭北旱塬区夏季休闲期垄上覆膜、沟内覆盖秸秆的栽培模式在不同降水年份均可较好地发挥集水、保水效果, 最大限度地提高夏季休闲效率。

2.6 土壤的周年水分平衡

不同施肥与栽培模式 2008—2009 年和 2009—2010 年两季小麦播前土壤贮水均恢复或超过前一年播前水平。2009—2010 年与 2008—2009 年小麦播前的土壤水分相比 (表 9), 除顶凌追肥模式持平外, 其它模式 0—300 cm 土壤贮水均有增加。这主要是由于顶凌追肥使上一季小麦产量显著提高, 虽然

表 8 休闲期不同施肥与栽培模式 0—300 cm 土层贮水增加量和休闲效率

Table 8 Increase of water storage in 0-300 cm soil layers after summer fallow compared to that at harvest and summer fallow efficiency under different fertilization and cultivation methods

处理 Treatments	2008—2009		2009—2010	
	土壤贮水增加量 Increase of soil water storage (mm)	休闲效率 Fallow efficiency (%)	土壤贮水增加量 Increase of soil water storage (mm)	休闲效率 Fallow efficiency (%)
对照 Control	121ab	40.8ab	273ab	59.8ab
农户模式 Farmers' mode	104b	35.1b	248bc	54.2bc
顶凌追肥 Early spring topdressing	122ab	41.1ab	236c	51.6c
减氮追肥 1 N reduced topdressing 1	132ab	44.5ab	239c	52.2c
减氮追肥 2 N reduced topdressing 2	117ab	39.6ab		
垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding	145a	48.8a	296a	64.8a
高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate			299a	65.3a

表 9 2009 年与 2008 年小麦播前不同施肥与栽培模式 0—300 cm 土层水分变化

Table 9 Change of water storage in 0-300 cm soil layers before seeding in 2009 compared to that in 2008 under different fertilization and cultivation methods

土层深度 Soil depth (cm)	对照 Control (mm)	农户模式 Farmers' mode (mm)	顶凌追肥 Early spring topdressing (mm)	减氮追肥 1 N reduced topdressing 1 (mm)	减氮追肥 2 N reduced topdressing 2 (mm)	垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding (mm)
0—20	2	0	-1	-2	-2	2
20—40	5	4	4	3	3	5
40—60	3	3	3	4	4	4
60—80	3	3	4	4	4	5
80—100	4	4	3	3	3	6
100—200	2	-3	-3	-1	-1	5
120—140	0	-3	-3	-2	-2	-1
140—160	1	-1	-2	0	0	-2
160—180	2	-1	-1	1	1	-2
180—200	3	0	0	1	1	-1
200—220	2	0	0	1	1	0
220—240	2	1	0	1	1	0
240—260	2	0	-1	1	1	-1
260—280	2	0	0	0	0	0
280—300	0	0	-1	-1	-1	-1
贮水变化总量 Total change of soil water storage (mm)	33a	6bc	0c	13bc	13bc	20ab

表中数值=2009 年小麦播种前土壤水分 (mm) -2008 年小麦播种前土壤水分 (mm)

The data in table 9 = Soil water storage (mm) before sowing in 2009-Soil water storage (mm) before sowing in 2008

休闲效率也有所提高,但并不足以补充小麦生育期多消耗的水分。减氮追肥 1 和 2 较前一年播前土壤多贮水均为 13 mm。减氮结合垄覆沟播模式 0—300 cm 增加贮水 20 mm,较农户模式多贮水 14 mm。2009—2010 年由于夏季降水显著高于前一年,小麦播前不同施肥与栽培模式土壤贮水均显著高于 2008—2009 年播前水平,且 1 m 以下的土壤深层水分补充明显(表 10)。顶凌追肥和减氮追肥 1 与农户模式土壤贮水增加量相同,比前一年播前土壤多贮水 144—149 mm。垄覆沟播模式土壤贮水量较前一年播前增加 174 mm,高密垄覆沟播模式达 186 mm,分别比农户模式增加 25 mm 和 37 mm。两年的土壤水分周年变化表明,垄覆沟播栽培模式由于夏季休闲期的集水、保水作用,足以从总量上弥补较高产量和生物量所消耗的土壤水分,可以保证土壤水分的周年补充和平衡,具有可持续性。

3 讨论

在总氮量一定的前提下,将“一炮轰”改为基追结合可提高小麦产量,氮肥的适宜基追比例和追肥时

期是小麦氮肥运筹的技术关键^[15]。本试验条件下,顶凌追肥冬小麦产量达到 3.4—3.9 t·hm⁻²,相对农户模式增产 6%—14%。这主要是由于氮肥追施促进了冬小麦干物质形成,提高了生物量,尤其是提高了抽穗开花期植株生物量,却没有降低收获指数。顶凌追肥冬小麦较高的生物量使得该模式消耗了较多的土壤水分,但水分利用效率较农户模式提高 7%—10%,达到 12.2—13.6 kg·hm⁻²·mm⁻¹。这是由于适量提高施氮量,可促进冬小麦根系生长及对深层土壤水分的利用,提高水分利用效率^[16-18]。

垄覆沟播模式冬小麦产量和水分利用效率分别达到 3.6—4.7 t·hm⁻²和 12.2—16.5 kg·hm⁻²·mm⁻¹,相对农户模式分别提高 15%—41%和 10%—30%。可见,该模式发挥了氮肥追施^[15]和起垄覆膜栽培^[19]的双重增产增效作用。但是两年的增产原因存在不同,从冬小麦生物量和收获指数看,2008—2009 年该模式大幅度增产的原因之一是能够增加冬小麦干物质形成并促进其向籽粒转移^[20];2009—2010 年各处理的收获指数均高于 2008—2009 年,且农户模式的收获指数最高,垄

表 10 2010 年与 2009 年小麦播前不同施肥与栽培模式 0—300 cm 土层水分变化

Table 10 Change of water storage in 0-300 cm soil layers before seeding in 2010 compared to that in 2009 under different fertilization and cultivation methods

土层深度 Soil depth (cm)	对照 Control (mm)	农户模式 Farmers' mode (mm)	顶凌追肥 Early spring topdressing (mm)	减氮追肥 1 N reduced topdressing 1 (mm)	垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding (mm)	高密垄覆沟播 Ridge-mulching and furrow seeding with higher seeding rate (mm)
0—20	-3	-4	0	2	-2	-1
20—40	1	6	2	3	2	1
40—60	3	3	3	1	5	2
60—80	3	4	2	1	-1	1
80—100	5	5	9	7	3	4
100—200	13	18	18	16	11	15
120—140	20	21	22	20	21	20
140—160	20	21	23	21	23	24
160—180	20	19	20	18	23	24
180—200	20	18	18	16	24	25
200—220	18	15	12	11	21	21
220—240	17	10	9	9	18	19
240—260	14	7	5	7	16	17
260—280	12	4	2	9	7	8
280—300	10	2	1	4	2	6
贮水变化总量 Total change of soil water storage (mm)	172ab	149b	146b	144b	174ab	186a

表中数值=2010 年小麦播种前土壤水分 (mm) -2009 年小麦播种前土壤水分 (mm)

The data in table 10 = Soil water storage (mm) before sowing in 2010-Soil water storage (mm) before sowing in 2009

覆沟播模式收获指数略低于农户模式, 增产的主要原因在于生物量的增加。造成这种现象的原因可能与 2009—2010 年播种偏晚和冬前冻害有关。2009—2010 年播种期, 由于天气原因, 播种日期比正常年份推迟 1 周, 导致整体出苗较晚, 苗小苗弱, 其抗寒能力较弱; 而 2009—2010 年初冬降雪提前, 温度骤降, 使小麦在苗期遭受了冻害, 因此产量普遍偏低且增产幅度小于 2008—2009 年。减氮结合垄覆沟播模式增产的另一个原因是由于减少了追肥时氮肥投入, 抽穗开花期小麦生物量低于其它处理, 植株水分含量却高达 71.5%—74.8%, 为灌浆期植株生长、干物质累积和转移以及产量形成打下了良好的基础。收获期该模式深层土壤水分减少说明追肥和起垄覆膜栽培能够促进冬小麦根系发育, 使深层土壤水分在产量形成关键期(灌浆期)或上层土壤水分供给不足时得到利用, 最终提高产量^[11]。本试验减氮结合垄覆沟播模式均比顶凌追肥与农户模式的产量和水分利用效率高, 说明减氮结合垄覆沟播模式提高冬小麦水分利用效率的原因主要是由于垄覆沟播模式在冬小麦生育期内将有限的降水汇集至沟内, 并可将无效降水变为有效降水供冬小麦

生长, 大大提高了作物对土壤水分的利用能力, 进而提高了单位养分生产作物产量的能力, 因此在显著增产的同时提高了水分利用效率。另外, 覆膜栽培的保水、增温作用也已被大量试验所证明^[21-22]。

土壤底墒在小麦生产中具有重要的作用^[23-24]。由于减氮结合垄覆沟播模式大幅度增加了冬小麦生物量和籽粒产量, 因此其生育期耗水较多。土壤贮水能否在降水量较多且相对集中的夏季休闲期得到恢复, 成为该模式的增产效应是否可持续的重要因素。夏季休闲期, 减氮结合垄覆沟播模式采取不耕作, 垄上覆膜, 沟内秸秆还田覆盖的新模式, 使得夏休闲期该模式 0—300 cm 土层贮水增加 145—296 mm, 显著高于其它模式。其原因是垄上覆膜可阻断水分从垄上蒸发损失, 并可将降水汇集至沟内; 而夏季休闲期沟内秸秆覆盖可减少沟内水分蒸发^[25-26], 增加土壤水分入渗^[27]。夏季休闲期起垄覆膜和秸秆覆盖的双重集水、保水作用使得减氮结合垄覆沟播模式土壤贮水在第二年播前恢复并超过第一年播前水平。减氮结合垄覆沟播模式还有进一步提高冬小麦产量和水分利用效率的潜力。由 2009—2010 年的试验结果得出, 在减氮追肥结合垄覆

沟播模式基础上,增加冬小麦播种密度,可以进一步提高冬小麦产量和水分利用效率,且由于冬小麦生物量较高,夏季休闲期秸秆覆盖量增加,其抑制沟内土壤水分的无效蒸发的效果更为明显,在垄覆沟播模式的基础上进一步提高了休闲效率。从土壤水分利用与补充的角度,减氮结合垄覆沟播模式是可持续的高产高效施肥与栽培模式。顶凌追肥、减氮追肥1和2处理,2008—2009年夏季休闲效率均高于农户模式,且追肥量低比追肥量较高时的休闲效率高;而2009—2010年顶凌追肥和减氮追肥1的休闲效率却都低于农户模式,造成这种现象的原因可能与不同施肥与土壤结构的改变有关^[28],也说明了不进行夏季地表覆盖,播前土壤贮水减少会降低小麦增产的稳定性。这方面的相关研究较少,还需多年连续试验进行观察和深入研究。

4 结论

通过测土优化氮肥用量,采用基肥:追肥=3:1的方式,并与夏季休闲期垄上覆膜沟内覆盖作物秸秆、小麦生长期垄上覆膜沟内播种的垄覆沟播栽培模式相结合,可促进夏季降水入渗,减少蒸发,促进了冬小麦对深层土壤水分利用,从而提高休闲效率、小麦产量和水分利用效率。虽然这种栽培方式增加了小麦生育期耗水,但由于有利于夏季土壤水分恢复,可实现土壤周年平衡,是适合渭北旱塬小麦增产和水分、养分高效利用的作物种植模式。

References

- [1] 李生秀. 旱地: 农业发展的寄托. 自然杂志, 2008, 30(6): 344-349.
Li S X. Drylands: Sustenance for agricultural development in the future. *Chinese Journal of Nature*, 2008, 30(6): 344-349. (in Chinese)
- [2] 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作冬小麦增产潜力研究. 自然资源学报, 2000, 15(2): 143-148.
Huang M B, Li Y S. On potential yield increase of dryland winter wheat on the loess tableland. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(2): 143-148. (in Chinese)
- [3] 罗俊杰, 王 勇, 樊廷录. 旱地不同生态型冬小麦水分利用效率对播前底墒的响应. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 61-65.
Luo J J, Wang Y, Fan T L. Effect of winter wheat yield and WUE with different soil water before sowing in semi-arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 61-65. (in Chinese)
- [4] 李 岗, 王虎全, 谢惠民, 韩思明. 渭北旱地小麦生产潜力及开发对策研究. 西北农业大学学报, 1997, 25(3): 26-30.
Li G, Wang H Q, Xie H M, Han S M. Potential productivity and developmental countermeasures of wheat in Weibei dryland. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 1997, 25(3): 26-30. (in Chinese)
- [5] 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术. 农业工程学报, 2003, 19(3):1-4.
Gao H W, Li W Y, Li H W. Conservation tillage technology with Chinese characteristics. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] Baumhardt R L, Jones O R. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68(2): 71-82.
- [7] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 钟兆站, 张天佑. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响. 中国农业科学, 1996, 29(2): 59-66.
Zhao J B, Mei X R, Xue J H, Zhong Z Z, Zhang T Y. The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(2): 59-66. (in Chinese)
- [8] 周凌云. 秸秆覆盖对农田土壤物理条件影响的研究. 农业现代化研究, 1997, 18(5): 311-314.
Zhou L Y. Effects of straw mulch on soil physical conditions in field. *Research of Agricultural Modernization*, 1997, 18(5): 311-314. (in Chinese)
- [9] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat. *Field Crops Research*, 1999, 63: 79-86.
- [10] 宋秋华, 李凤民, 王 俊, 刘洪升, 李世清. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响. 生态学报, 2002, 22(12): 2125-2132.
Song Q H, Li F M, Wang J, Liu H S, Li S Q. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2125-2132. (in Chinese)
- [11] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响. 中国农业科学, 2004, 37(2): 208-214.
Wang C R, Tian X H, Li S X. Effects of plastic sheet-mulching on ridge for rainwater-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(2): 208-214. (in Chinese)
- [12] Li S X, Wang Z H, Hu T T, Gao Y J, Stewart B A. Nitrogen in dryland soils of china and its management. *Advances in Agronomy*, 2009, 101: 123-181.
- [13] 王圣瑞, 马文奇, 徐文华, 黎青慧, 张福锁. 陕西省小麦施肥现状与评价研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 31-37.
Wang S R, Ma W Q, Xu W H, Li Q H, Zhang F S. Evaluation and present situation of fertilization for wheat in Shaanxi Province.

- Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1): 31-37. (in Chinese)
- [14] 胡恒觉, 张仁陟, 黄高宝. 黄土高原旱地农业: 理论、技术、潜力. 北京: 中国农业出版社, 2002: 249-250.
- Hu H J, Zhang R Z, Huang G B. *Dryland Farming for Loess Plateau*. Beijing: China Agricultural Press, 2002: 249-250. (in Chinese)
- [15] 周 奇, 赵永敢, 张存岭. 氮肥基追比和追肥时期对小麦产量的影响. 安徽农学通报, 2009, 15(3): 92-95.
- Zhou Q, Zhao Y G, Zhang C L. Effect of topdressing time and ratio between basic manuring and after manuring of nitrogenous fertilizers on yield of wheat. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(3): 92-95. (in Chinese)
- [16] 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 221-226.
- Zhang R Z, Li X G, Hu H J. The mechanism of fertilization in increasing water use efficiency. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(3): 221-226. (in Chinese)
- [17] 李芳林, 郝明德, 杨 晓, 许晶晶. 黄土旱塬施肥对土壤水分和冬小麦产量的影响. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 154-157
- Li F L, Hao M D, Yang X, Xu J J. Effects of fertilization on soil water and winter wheat yield in dry land of Loess Plateau. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 154-157. (in Chinese)
- [18] 王小燕, 张永丽, 于振文. 水氮互作对济麦 20 籽粒蛋白质品质及氮素和水分利用效率的影响. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 318-325.
- Wang X Y, Zhang Y L, Yu Z W. Effect of water-nitrogen interaction on grain protein quality, nitrogen use efficiency and water use efficiency of Jimai 20. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 318-325. (in Chinese)
- [19] 李志军, 赵爱萍, 丁晖兵, 李 科, 简毓峰. 旱地玉米垄沟周年覆膜栽培增产效应研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 12-17.
- Li Z J, Zhao A P, Ding H B, Li K, Jian Y F. Production effect of corn under whole-year furrow-film cultivation in dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 12-17. (in Chinese)
- [20] 邱临静, 王林权, 李生秀, 张素霞. 旱地不同栽培模式和施肥方法对小麦光合产物积累运转的影响. 土壤通报, 2007, 38(3): 513-518.
- Qiu L J, Wang L Q, Li S X, Zhang S X. Effect of different cultivation models and fertilization patterns on the accumulation and transportation of photosynthate for wheat in rain-fed land. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 513-518. (in Chinese)
- [21] 王俊鹏, 蒋 骏, 韩清芳, 贾志宽, 张久成. 宁南半干旱地区春小麦农田微集水种植技术研究. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 8-13.
- Wang J P, Jiang J, Han Q F, Jia Z K, Zhang J C. Technique of spring wheat cultivation of farmland water micro-collection in semiarid areas of Southern Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(2): 8-13. (in Chinese)
- [22] 李 军, 王龙昌, 孙小文, 王立祥. 宁南半干旱偏旱区旱作农田沟垄径流集水蓄墒效果与增产效应研究. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 16-20.
- Li J, Wang L C, Sun X W, Wang L X. The effect of water harvesting with ridge building on semi-arid fields in South Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 16-20. (in Chinese)
- [23] 徐学选, 穆兴民. 小麦水肥产量效应研究进展. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 6-12.
- Xu X X, Mu X M. Research achievements on the relationship between wheat yield and water and fertilizer. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(3): 6-12. (in Chinese)
- [24] 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统的综合研究. 北京: 科学技术文献出版社, 1991.
- Li Y S, Su S M. *Efficient Ecological and Economic System in Wangdong Watershed of Changwu County*. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991. (in Chinese)
- [25] 陈君达, 李洪文. 旱地玉米保护性机械化耕作技术和机具体系. 中国农业大学学报, 1998, 3(4): 33-38.
- Chen J D, Li H W. Technology and machinery system of mechanized conservation tillage for dryland maize. *Journal of China Agricultural University*, 1998, 3(4): 33-38. (in Chinese)
- [26] 余泳昌, 刘晓文, 李明枝, 梁晓辉. 夏玉米免耕秸秆覆盖机械化栽培栽培技术的研究. 河南农业大学学报, 2002, 36(4): 309-312.
- Yu Y C, Liu X W, Li M Z, Liang X H. Study on summer corn mechanization cultivating technology no-tillage drilling with mulching. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002, 36(4): 309-312. (in Chinese)
- [27] 李生秀. 西北地区农业持续发展面临的问题和对策. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 1-10.
- Li S X. Constraints and strategies for agricultural sustainability on the drylands in northwest China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3): 1-10. (in Chinese)
- [28] 柳云龙, 吕 军, 王人潮, 韩小非, 陈永强. 低丘侵蚀红壤垦种绿化后土壤结构、养分积聚和持水性能. 水土保持学报, 2000, 14(4): 79-82.
- Liu Y L, Lü J, Wang R C, Han X F, Chen Y Q. Soil structure, nutrient accumulation and water retention character in eroded hilly red soil after virecence. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 79-82. (in Chinese)