

免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用效率影响的整合分析

魏欢欢^{1,2}, 王仕稳^{1,3}, 杨文稼³, 孙海妮³, 殷俐娜^{1,3}, 邓西平^{1,3}

(¹中国科学院水利部水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】明确免耕、深松耕在黄土高原不同区域春玉米、冬小麦种植中的适用性和增产效果。【方法】通过文献检索共获得 45 篇大田试验文献和 209 组试验数据, 采用整合分析方法 (Meta-analysis), 定量分析免耕、深松耕在黄土高原不同区域、不同年降雨量和不同年均温度下对春玉米、冬小麦产量和水分利用效率的影响特征。【结果】与常规耕作相比, 在黄土高原北部和中部采用免耕能有效提高春玉米产量和水分利用效率 10% 以上; 在年降雨量 ≤ 500 mm 地区免耕春玉米的产量和水分利用效率增加最显著, 分别增加 13.4% 和 13.6% ($P < 0.05$); 在年均温度 $\leq 10^\circ\text{C}$ 地区免耕春玉米的产量和水分利用效率显著增加, 分别增加 7.6% 和 9.3% ($P < 0.05$)。在黄土高原东南部和西北部采用深松耕都能显著提高冬小麦产量和水分利用效率; 在年降雨量 500—600 mm 地区, 采用深松耕的冬小麦产量和水分利用效率增加最显著, 分别增加 14.5% 和 12.2% ($P < 0.05$); 在不同年均温度地区, 深松耕冬小麦的产量和水分利用效率均显著增加。在不同区域、不同年降雨量和不同年均温度下, 采用深松耕的冬小麦产量和水分利用效率增加率均高于免耕。【结论】免耕、深松耕在黄土高原不同区域的适应性不同, 在黄土高原中部和北部采用免耕更有利于提高春玉米产量和水分利用效率; 在年降雨量 ≤ 500 mm 地区和年均温度 $\leq 10^\circ\text{C}$ 地区采用免耕更有利于春玉米产量和水分利用效率的增加; 在黄土高原东南部和西北部采用深松耕均有利于提高冬小麦产量和水分利用效率, 且效果优于免耕。

关键词: 免耕; 深松耕; 作物; 产量; 水分利用效率; 整合分析

Meta Analysis on Impact of No-Tillage and Subsoiling Tillage on Spring Maize and Winter Wheat Yield and Water Use Efficiency on the Loess Plateau

WEI HuanHuan^{1,2}, WANG ShiWen^{1,3}, YANG WenJia³, SUN HaiNi³, YIN LiNa^{1,3}, DENG XiPing^{1,3}

(¹ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources/State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi; ² University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049; ³ Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】The objective of the experiment was to clarify the adaptability of no-tillage and subsoiling tillage to spring maize and winter wheat planting in different areas of Loess Plateau, and the effects of no-tillage and subsoiling tillage on crop yield-increasing in Loess Plateau. 【Method】A total of 209 databases were obtained from 45 published literatures, and then the effects of no-tillage and subsoiling tillage on the yield and water use efficiency of spring maize and winter wheat were quantified using a meta-analysis method in different areas, annual precipitations and annual average temperatures of Loess Plateau. 【Result】Compared with those under conventional tillage, the yield and water use efficiency of spring maize under no-tillage conditions increased by

收稿日期: 2016-06-20; 接受日期: 2016-09-12

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAD22B01)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2015CB150402)

联系方式: 魏欢欢, E-mail: weihuanhuan_ucas@126.com。通信作者王仕稳, E-mail: shiwenwang@nwsuaf.edu.cn

more than 10% in north and middle of Loess Plateau; the yield and water use efficiency of spring maize under no-tillage conditions significantly increased by 13.4% and 13.6% ($P < 0.05$) in areas with annual precipitation ≤ 500 mm and significantly increased by 7.6% and 9.3% ($P < 0.05$) in areas with annual average temperature $\leq 10^\circ\text{C}$. Moreover, the yield and water use efficiency of winter wheat under subsoiling tillage conditions significantly increased in southeast and northwest of Loess Plateau. In areas with annual precipitation of 500-600 mm, the yield and water use efficiency of winter wheat under subsoiling conditions significantly increased by 14.5% and 12.2% ($P < 0.05$), and the yield and water use efficiency of winter wheat under subsoiling conditions also increased significantly in areas with annual average temperature of $\leq 10^\circ\text{C}$ or $> 10^\circ\text{C}$. In various areas, annual precipitation, annual average temperature, the increases of the yield and water use efficiency of winter wheat under subsoiling tillage conditions were higher than that under no-tillage conditions. **【Conclusion】** In different areas of Loess Plateau, the adaptability of no-tillage and subsoiling tillage were different. No-tillage was beneficial to the yield and water use efficiency of spring maize in north and middle of Loess Plateau. The yield and water use efficiency of spring maize under no-tillage conditions increased more significantly in areas with annual precipitation of 500-600 mm and annual average temperature $\leq 10^\circ\text{C}$. Subsoiling tillage was beneficial to the yield and water use efficiency of winter wheat in southeast and northwest of Loess Plateau, and the effects of subsoiling tillage were better than that of no-tillage.

Key words: no-tillage; subsoiling tillage; crops; yield; water use efficiency; meta-analysis

0 引言

【研究意义】水资源短缺是限制黄土高原地区作物产量的主要因素^[1]。面对不断增长的人口压力、粮食需求以及生态环境改善的技术需求,寻求更有效的方式来提高作物水分利用效率和产量,成为保障黄土高原地区粮食安全和保护生态环境的关键^[2]。相比常规耕作,免耕和深松耕能够增加土壤持水量,有利于提高作物水分利用效率和产量^[3-4],因此免耕和深松耕常被作为黄土高原地区提高作物产量和水分利用效率的重要技术之一。**【前人研究进展】**代快等^[5]研究表明,在山西寿阳县免耕春玉米产量和水分利用效率比常规耕作分别增加 6.1%和 9.7%。尚金霞等^[6]研究表明,在陕西合阳县免耕春玉米产量和水分利用效率分别增加 4.0%和 9.4%。而张立建等^[7]研究表明,在甘肃省安定区免耕春玉米产量和水分利用效率分别增加 15.3%和 11.8%。王维等^[8]研究表明,相比常规耕作,在年降雨量 ≤ 500 mm 的宁夏彭阳县,深松耕冬小麦产量和水分利用效率分别增加 35.3%和 37.8%。柏炜霞等^[9]研究表明,在年降雨量 500—600 mm 的陕西省合阳县,深松耕冬小麦产量和水分利用效率分别增加 13.9%和 13.1%。而苏子友等^[10]研究表明,在年降雨量 > 600 mm 的河南省孟津县,深松耕冬小麦产量和水分利用效率分别增加 16.1%和 6.3%。柏炜霞等^[9]研究表明,免耕春玉米产量和水分利用效率比常规耕作分别增加-5.2%和-11.0%,而免耕冬小麦产量和水分利用效率分别增加 6.2%和 9.0%。**【本研究切入点】**已有研究结果表明,由于地域、气候、作物种类等的差异,导致免耕和深松耕对黄土高原不同区域作物产量和水

分利用效率的影响存在较大差异。而常规的独立单一试验因研究尺度小,受地区特定气候影响大,试验结果间差异较大,因此不能从区域尺度定量说明免耕和深松耕对黄土高原地区作物产量和水分利用效率的影响程度。为了整体认识黄土高原不同区域和不同气候条件下,免耕和深松耕对春玉米、冬小麦产量和水分利用效率的影响,须利用已有的独立单一试验结果,从宏观区域尺度进行大样本数据的定量综合分析。**【拟解决的关键问题】**本研究通过文献检索获得 45 篇大田试验文献和 209 组试验数据,运用整合分析方法 (meta-analysis),定量分析免耕和深松耕在黄土高原不同区域、不同年降雨量以及不同年均温度下对春玉米、冬小麦产量和水分利用效率的影响特征,为免耕和深松耕对黄土高原不同区域粮食增产效果的量化及该类技术的适宜应用区域提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

通过 Web of Science 和中国知网 (CNKI) 等数据库,分别输入“小麦 (wheat) / 玉米 (maize)”和 (and) “免耕 (no-tillage) / 深松耕 (Subsoiling)”、“小麦 (wheat) / 玉米 (maize)”和 (and) “水分利用效率 (water use efficiency)”关键词,检索近 30 年发表的黄土高原地区免耕、深松耕与作物产量及水分利用效率相关的文献,并对检索到的文献进行筛选。筛选标准如下:(1) 试验地点为黄土高原地区;(2) 试验方式为大田试验,且作物全生育期不灌溉;(3) 试验处理至少包含免耕和深松耕处理中的一项,且每项处理均以常规耕作为对照;(4) 玉米、小麦产量和水

分利用效率等指标以数字或图表形式报道；(5) 对不同文献报道的同一试验数据只纳入其中一次。经筛选，共有 45 篇文献（春玉米 19 篇，冬小麦 26 篇）符合要求。45 篇文献在黄土高原各区域的数量分布为：春玉米（东部 7 篇，中部 6 篇，南部 4 篇，北部 2 篇，西部无研究资料），冬小麦（东南部 19 篇，西北部 7 篇）。对筛选得到的文献提取试验地点、作物种类、耕作处理、籽粒产量、水分利用效率、作物耗水量等数据。为消除各试验点数据不同年份气象条件的差异，本研究根据引用文献对试验期降雨量和年型的说明，只将属于平水年（正常年份）的试验数据纳入分析。经筛选，共获得分布于黄土高原 15 个地区（图 1）的 209 组配对试验和 1190 个试验观测值。

1.2 数据分类

为分析免耕、深松耕在黄土高原不同区域、不同年降雨量和不同年均温度下对春玉米、冬小麦产量和水分利用效率的影响，根据耕作方式和作物种类对筛

选后的数据进行分类。根据文献报道的耕作类型，将数据分为 2 类：免耕，即前茬作物收获后的休闲期不对土壤进行任何耕作处理，到适播期直接播种；深松耕，即前茬作物收获后的休闲期按照一定间距对土壤深松 30—40 cm。免耕和深松耕处理均以常规耕作（前茬作物收获后的休闲期或者播种前对土壤进行旋耕或翻耕）作为对照。研究共涉及春玉米和冬小麦 2 种作物，春玉米耕作处理包含免耕和常规耕作（春玉米无深松耕研究资料），冬小麦耕作处理包含免耕、深松耕和常规耕作，具体统计分类如表 1 所示。

根据黄土高原地区气候的差异^[11-17]，本研究将黄土高原划分为 5 个区域（图 2）：东部、中部、西部、南部、北部，各区域气候特征如表 2 所示。考虑到春玉米和冬小麦试验点数量的限制及其种植区域的差异，将春玉米种植区划分为东部、中部、南部和北部 4 个区域（西部区域无免耕春玉米资料），冬小麦种植区划分为东南部和西北部 2 个区域（东南部为图 2 中的南部，西北部为图 2 中除南部以外的其他区域）。一般年降雨

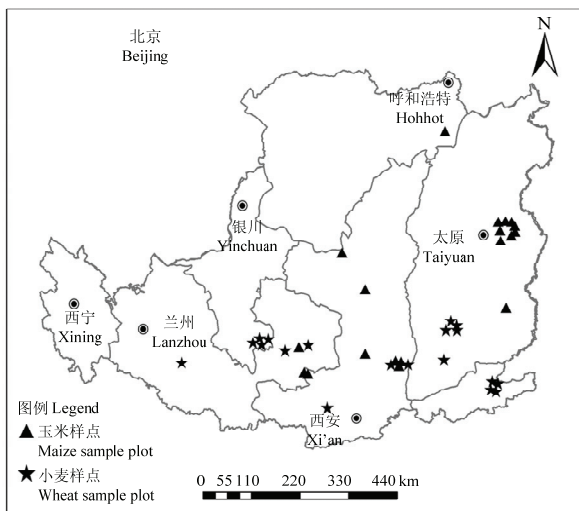


图 1 春玉米、冬小麦试验地点分布图

Fig. 1 Test places of spring maize and winter wheat in Loess Plateau

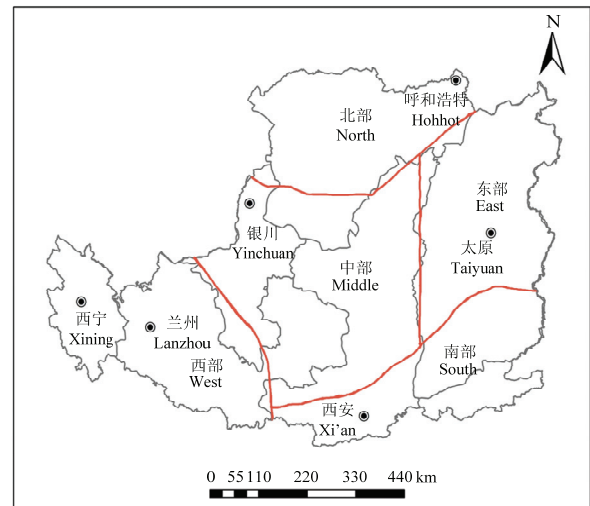


图 2 黄土高原分区示意图

Fig. 2 Zoning map of Loess Plateau

表 1 统计数据分类信息

Table 1 Analysis of classified data

作物种类 Crop	试验组 Experimental group	对照组 Control group	配对试验组数 Number of paired trials	试验观测数量 Number of observations
春玉米 Spring maize	免耕 No-tillage	常规耕作 Conventional tillage	63	378
冬小麦 Winter wheat	免耕 No-tillage	常规耕作 Conventional tillage	84	472
	深松耕 Subsoiling tillage	常规耕作 Conventional tillage	62	340

表 2 黄土高原区域划分及其气候特征

Table 2 Areas division and characteristics of climate in Loess Plateau

区域 Area	区域范围 Scope of the area	年均降雨量 Annual average Precipitation (mm)	≥0℃积温 Accumulative temperature above 0℃ (°C·a ⁻¹)	年平均温度 Annual average Temperature (°C)
东部 East	临汾市和长治市以北的山西省其他地区, 主要包括吕梁市、太原市、晋中市、阳泉市、忻州市、朔州市和大同市 The area north of Linfen and Changzhi city in Shanxi province, mainly including Lüliang, Taiyuan, Jinzhong, Yangquan, Xinzhou, Shuozhou and Datong city	400-700	3000-4500	6.4-12.2
中部 Middle	渭河平原以北的陕西省其他地区, 除中卫市和固原市以外的宁夏回族自治区其他地区, 甘肃省陇东地区以及内蒙古鄂托克旗以南地区 The area north of Wei River Plain in the Shaanxi province, the area of the Ningxia Hui Autonomous Region except Zhongwei and Guyuan city, the eastern region of Gansu province and the area south of Otog Front Banner in the Inner Mongolia	200-600	2900-4000	8.5-9.5
西部 West	主要包括甘肃省白银市、兰州市、临夏市、定西市、天水市, 宁夏回族自治区中卫市、固原市, 以及青海省西宁市 The area including Baiyin, Lanzhou, Linxia, Dingxi and Tianshui city in the Gansu province, Zhongwei and Guyuan city in the Ningxia Hui Autonomous Region and Xining city in the Qinghai province	130-500	2000-4000	6.4-7.7
南部 South	主要为渭河平原、山西省南部以及三门峡市和洛阳市北部地区, 主要包括宝鸡市、咸阳市南部、西安市、渭南市、临汾市、长治市、运城市、晋城市, 以及三门峡市和洛阳市北部 The area of Wei River Plain, southern Shanxi province and the northern region of Sanmenxia and Luoyang city, mainly including Baoji, southern Xianyang, Xi'an, Weinan, Linfen, Changzhi, Yuncheng, Jincheng, the northern region of Sanmenxia and Luoyang city	500-722	4500-5200	12.0-14.0
北部 North	内蒙古鄂托克前旗以北的黄土高原地区 The Loess Plateau area north of Otog Front Banner in the Inner Mongolia	130-400	2800-3400	6.8-8.0

量 350—500 mm 为半干旱地区, 大于 500 mm 为湿润地区^[18], 因此, 以年降雨量 500 mm 为分界, 将春玉米种植区年降雨量分为: ≤500 mm 和 >500 mm; 将冬小麦种植区年降雨量分为: ≤500 mm、500—600 mm 和 >600 mm。根据试验地点年均温度的差异, 将春玉米、冬小麦种植区年均温度划分为 ≤10℃ 和 >10℃。

1.3 数据分析方法

在 Meta 分析中, 当试验结果为物理尺寸测量, 且结果不可能为 0 的研究领域中, 两组数值间的均值比可作为效应量即反应比 R ^[19]。本研究使用反应比 R 计算效应量 M , 计算公式为^[20]:

$$M = \ln R = \ln(X_e/X_c) \quad (1)$$

式中, M 为试验的效应量; X_e 为试验组 (免耕/深松耕) 对应作物产量或水分利用效率的平均值, X_c 为对照组 (常规耕作) 对应作物产量或水分利用效率的平均值。为便于使用作物产量、水分利用效率相对变化率来解释免耕、深松耕对作物产量和水分利用效率的影响, 将分析结果转化为相对变化率 Y , 计算公式为^[21]:

$$Y = (R - 1) \times 100\% \quad (2)$$

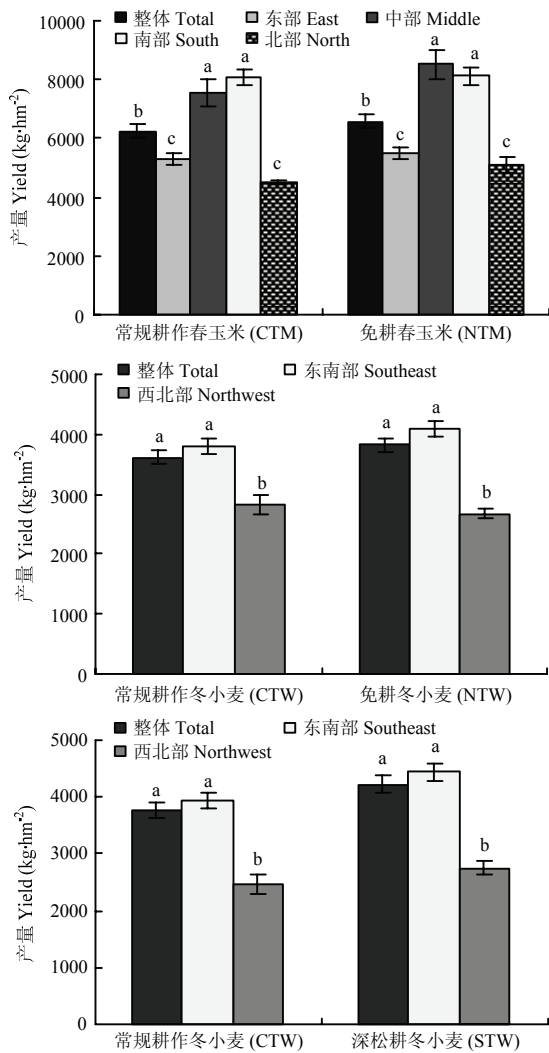
$$\text{即: } Y = (\exp(M) - 1) \times 100\% \quad (3)$$

如果 Y 的 95% 置信区间与 0 重叠, 可认为处理组与对照组间差异不显著, 即免耕、深松耕处理下作物产量和水分利用效率相比常规耕作处理差异不显著; 若不与 0 重叠, 则认为试验组和对照组间差异显著^[22] ($P < 0.05$)。本研究采用 SAS 9.4 软件进行数据分析, 采用 Excel 2007 和 Sigmaplot 12.0 进行数据处理和制图。

2 结果

2.1 不同区域免耕、深松耕对作物产量和水分利用效率的影响

在黄土高原不同区域, 免耕和深松耕对作物产量的影响不同 (图 3)。黄土高原地区免耕春玉米整体平均产量为 6 583 kg·hm⁻², 各区域产量为 5 119—8 513 kg·hm⁻²。与常规耕作相比, 免耕春玉米的产量整体平均增加 6.0% (图 4-a), 各区域中除南部以外其余 3 个区域的春玉米产量均显著增加, 增加率依次为中部



图中不同小写字母表示相同处理下不同区域在 5% 水平差异显著, CTM、CTW、NTM、NTW、STW 分别表示常规耕作春玉米、常规耕作冬小麦、免耕春玉米、免耕冬小麦、深松耕冬小麦。下同

The different lower-case letters indicate statistically significant differences between the areas under one treatment ($P < 0.05$). CTM, CTW, NTM, NTW, STW mean conventional tillage of spring maize, conventional tillage of winter wheat, no-tillage of spring maize, no-tillage of winter wheat and subsoiling tillage of winter wheat respectively. The same as below

图 3 免耕、深松耕对黄土高原不同区域春玉米、冬小麦产量的影响

Fig. 3 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on yield of spring maize and winter wheat in different areas of Loess Plateau

> 北部 > 东部。黄土高原地区免耕和深松耕冬小麦整体平均产量分别为 $3\ 818\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $4\ 225\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 各区域东南部产量均显著高于西北部 ($P < 0.05$)。深松耕冬小麦的整体平均产量和各区域产量均高于免耕。与常规耕作相比, 免耕冬小麦的产量整体平

均增加 6.1%, 东南部增加 8.2% ($P < 0.05$), 西北部减少 2.9%, 变化不显著; 深松耕冬小麦的整体平均产量和各区域产量均显著增加 ($P < 0.05$), 增加率均高于免耕。

在黄土高原不同区域, 免耕和深松耕对作物水分利用效率的影响不同 (图 5)。免耕春玉米整体平均水分利用效率为 $15.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 各区域水分利用效率为 $12.5\text{—}20.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。与常规耕作相比, 免耕春玉米的水分利用效率整体平均增加 7.6% (图 4-b), 各区域中除南部以外其余 3 个区域的春玉米水分利用效率均显著增加 ($P < 0.05$), 增加率依次为北部 > 中部 > 东部。免耕和深松耕冬小麦整体平均水分利用效率为 $12.3\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $13.3\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 各区域东南部水分利用效率均显著高于西北部 ($P < 0.05$)。深松耕冬小麦的整体平均水分利用效率和各区域水分利用效率均高于免耕。与常规耕作相比, 深松耕冬小麦的水分利用效率整体平均增加 9.8%, 东南部和西北部分别增加 9.6% 和 10.9% ($P < 0.05$), 增加率均高于免耕。图 4-c 表明, 免耕对春玉米生育期耗水量增加率整体影响不显著, 各区域东部和北部耗水量出现降低, 南部和中部增加不显著。免耕和深松耕条件下的冬小麦整体平均耗水量大于常规耕作, 各区域中深松耕冬小麦耗水量增加率均高于免耕。可见, 在黄土高原北部和中部采用免耕可显著提高春玉米产量和水分利用效率 10% 以上; 在黄土高原东南部和西北部采用深松耕有利于提高冬小麦产量和水分利用效率, 且效果优于免耕。

2.2 不同年降雨量下免耕、深松耕对作物产量和水分利用效率的影响

不同年降雨量下免耕和深松耕对作物产量的影响不同 (图 6)。年降雨量 $\leq 500\ \text{mm}$ 地区的免耕春玉米产量高于年降雨量 $> 500\ \text{mm}$ 地区, 二者差异不显著。与常规耕作相比, 免耕春玉米的产量在年降雨量 $\leq 500\ \text{mm}$ 地区增加 13.4% (图 7-a), 增加率显著高于年降雨量 $> 500\ \text{mm}$ 地区。免耕和深松耕冬小麦产量随年降雨量的增加而显著增加。在 3 个不同年降雨量地区, 深松耕冬小麦产量均高于免耕冬小麦。与常规耕作相比, 免耕冬小麦的产量在年降雨量 $500\text{—}600\ \text{mm}$ 和 $> 600\ \text{mm}$ 地区分别增加 5.4% 和 8.4% ($P < 0.05$), 年降雨量 $\leq 500\ \text{mm}$ 地区增加不显著; 深松耕冬小麦的产量在 3 个不同年降雨量地区均显著增加 ($P < 0.05$), 三者差异不显著, 但均高于免耕。

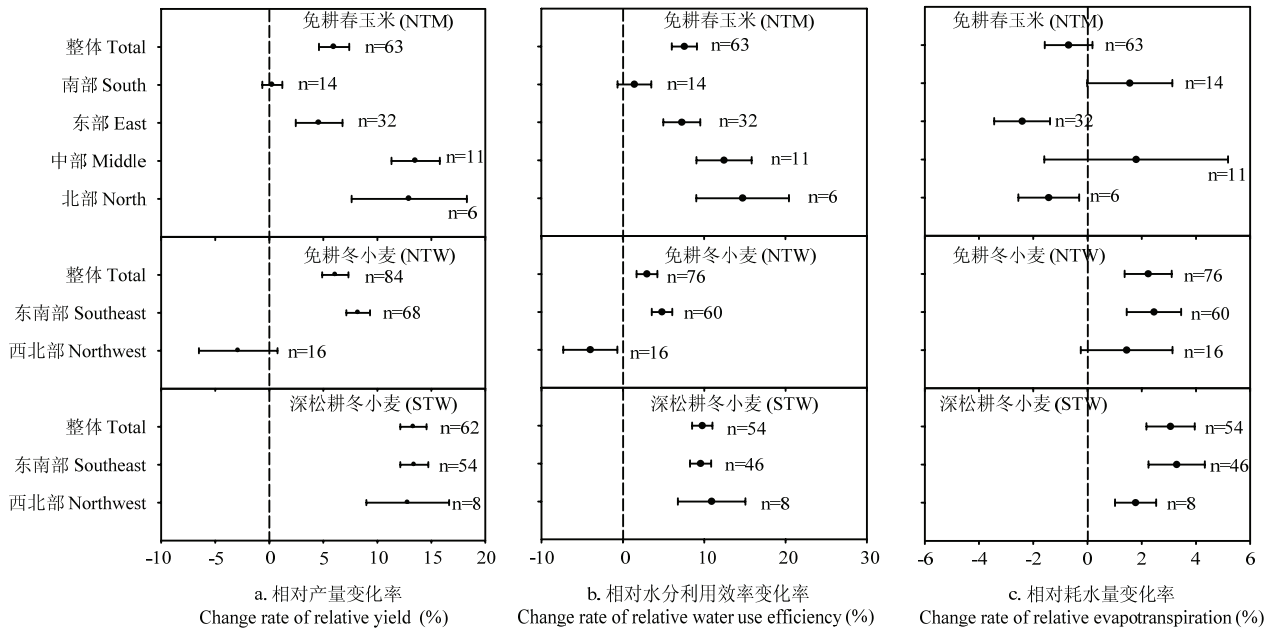


图 4 免耕、深松耕处理下黄土高原各区域作物相对产量变化率 (a)、相对水分利用效率变化率 (b)、相对耗水量变化率 (c)
 The corresponding value of dots to abscissa axis is change rate; Bars show 95% bias confidence intervals; n represents sample size. The same as below

图 4 免耕、深松耕处理下黄土高原各区域作物相对产量变化率 (a)、相对水分利用效率变化率 (b)、相对耗水量变化率 (c)

Fig. 4 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on change rate of relative yielded (a), change rate of relative water use efficiency (b), and change rate of relative evapotranspiration (c) of crops in different areas of Loess Plateau

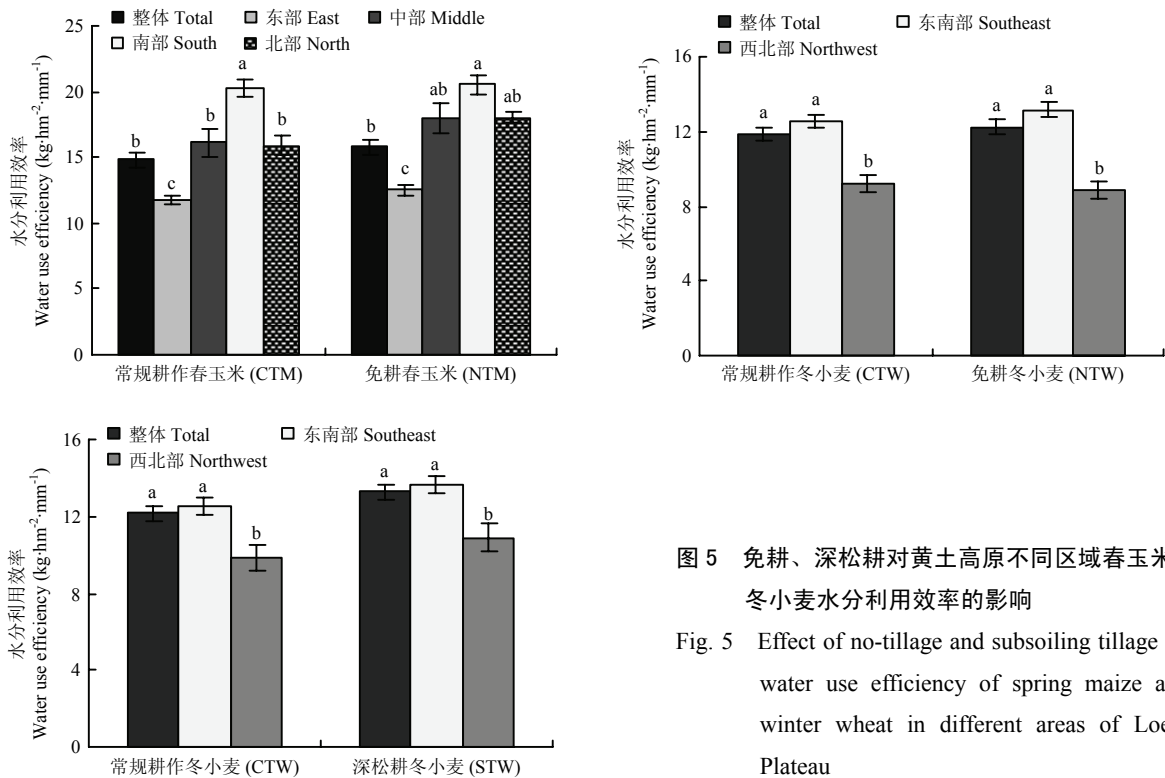


图 5 免耕、深松耕对黄土高原不同区域春玉米、冬小麦水分利用效率的影响

Fig. 5 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on water use efficiency of spring maize and winter wheat in different areas of Loess Plateau

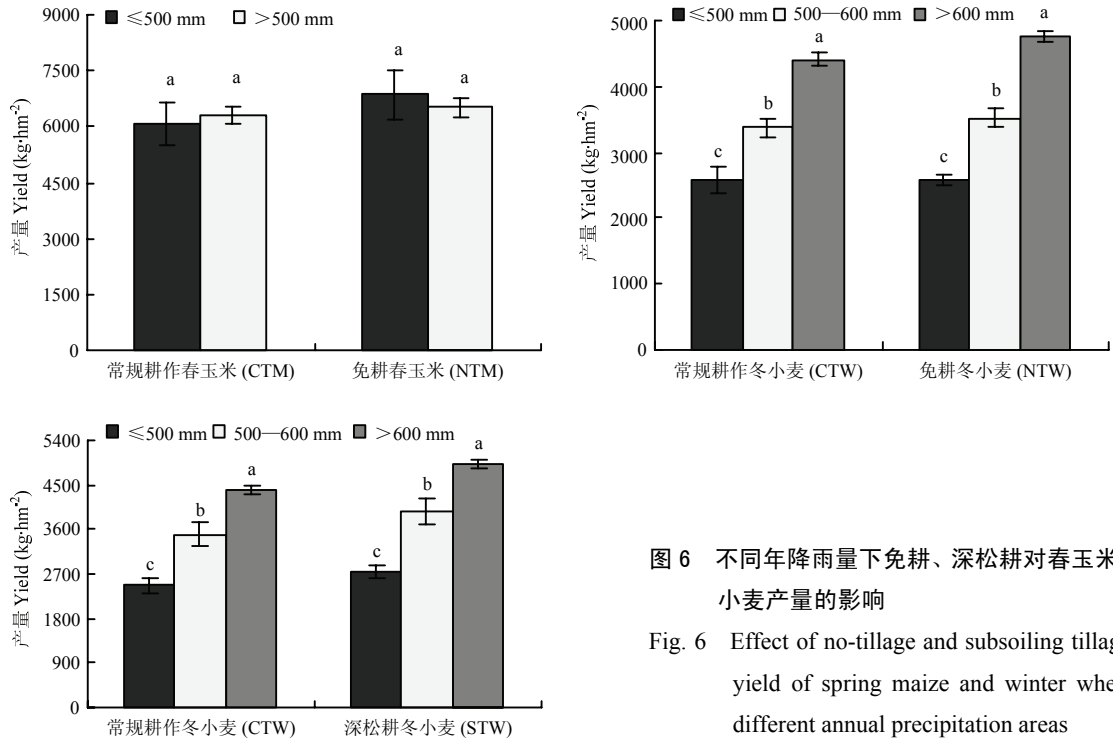


图 6 不同年降雨量下免耕、深松耕对春玉米、冬小麦产量的影响

Fig. 6 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on yield of spring maize and winter wheat in different annual precipitation areas

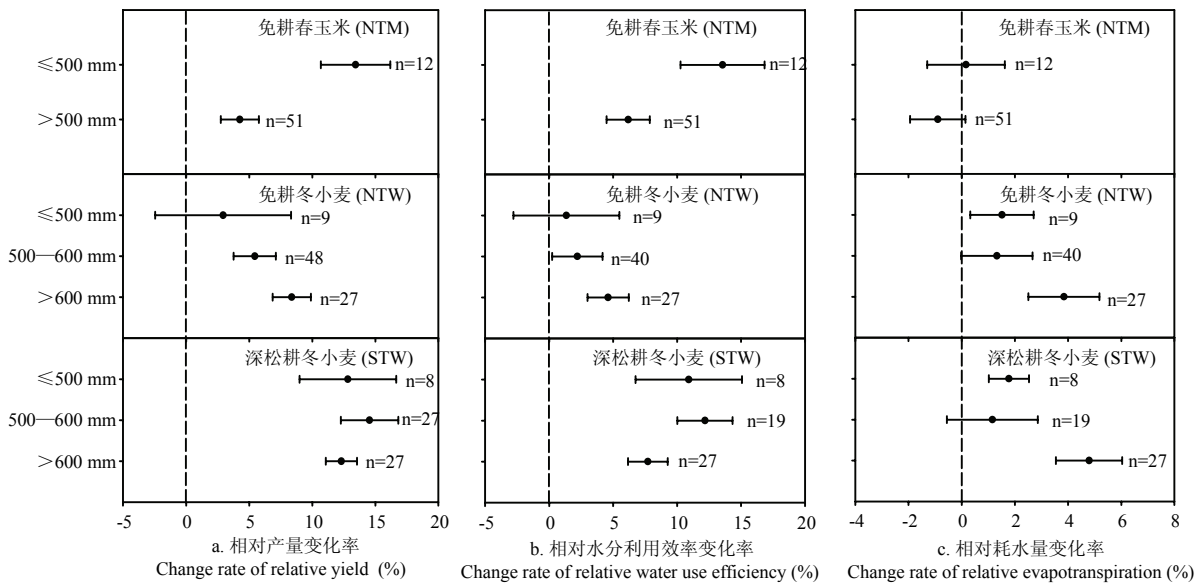


图 7 不同年降雨量下免耕、深松耕对作物相对产量变化率 (a)、相对水分利用效率变化率 (b)、相对耗水量变化率 (c) 的影响

Fig. 7 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on change rate of relative yield (a), change rate of relative water use efficiency (b), and change rate of relative evapotranspiration (c) of crops in different annual precipitation areas

不同年降雨量下免耕和深松耕对作物水分利用效率的影响不同 (图 8)。年降雨量 ≤500 mm 地区的免耕春玉米水分利用效率高于年降雨量 >500 mm 地区，二者差异不显著。与常规耕作相比，免耕春

玉米的水分利用效率在年降雨量 ≤500 mm 地区增加 13.6% (图 7-b)，增加率高于年降雨量 >500 mm 地区。免耕和深松耕冬小麦水分利用效率随年降雨量的增加而增加。在 3 个不同年降雨量地区，深松

耕冬小麦水分利用效率均高于免耕冬小麦。与常规耕作相比,在年降雨量 ≤ 500 mm、500—600 mm 和 > 600 mm 地区,深松耕冬小麦的水分利用效率分别增加 10.9%、12.2%和 7.7% ($P < 0.05$),三者间差异不显著,但均高于免耕。另外,由图 7-c 可知,与常规耕作相比,免耕春玉米耗水量在不同年降雨量地区增加不显著。免耕和深松耕冬小麦的耗水量在年降雨量 ≤ 500 mm 和 > 600 mm 地区显著增加,在年降雨量 500—600 mm 地区增加不显著。可见,在

黄土高原春玉米种植区采用免耕有利于提高春玉米产量和水分利用效率,且在年降雨量 ≤ 500 mm 地区的效果优于年降雨量 > 500 mm 地区。相比免耕,在黄土高原冬小麦种植区采用深松耕更有利于提高冬小麦产量和水分利用效率,其中在年降雨量 500—600 mm 地区效果最好。

2.3 不同年均温度下免耕、深松耕对作物产量和水分利用效率的影响

不同年均温度下免耕和深松耕对作物产量的影响不同(图 9)。年均温度 $\leq 10^\circ\text{C}$ 地区的免耕春玉米产量显著低于年均温度 $> 10^\circ\text{C}$ 地区 ($P < 0.05$)。与常规

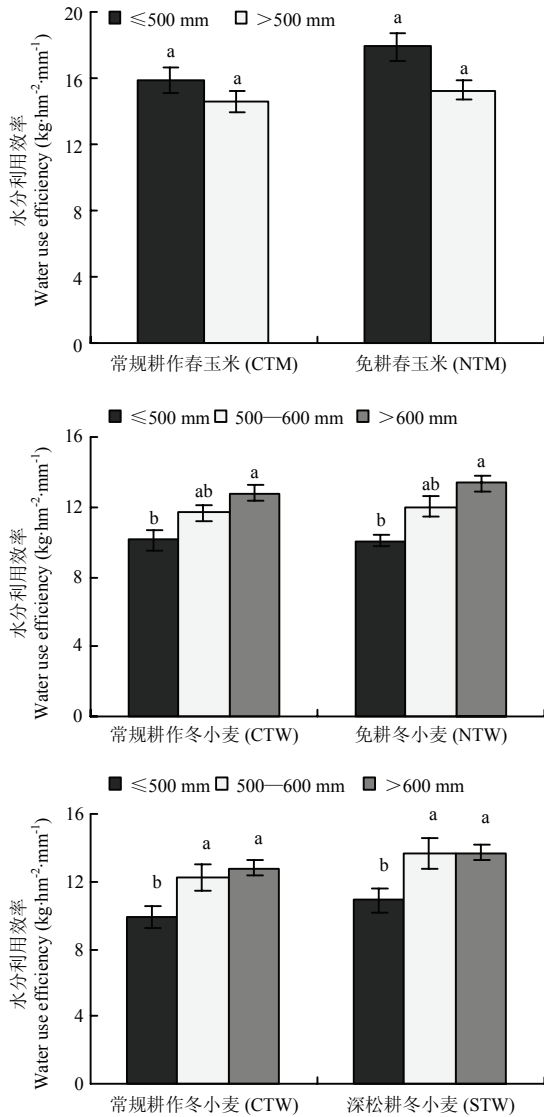


图 8 不同年降雨量下免耕、深松耕对春玉米、冬小麦水分利用效率的影响

Fig. 8 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on water use efficiency of spring maize and winter wheat in different annual precipitation areas

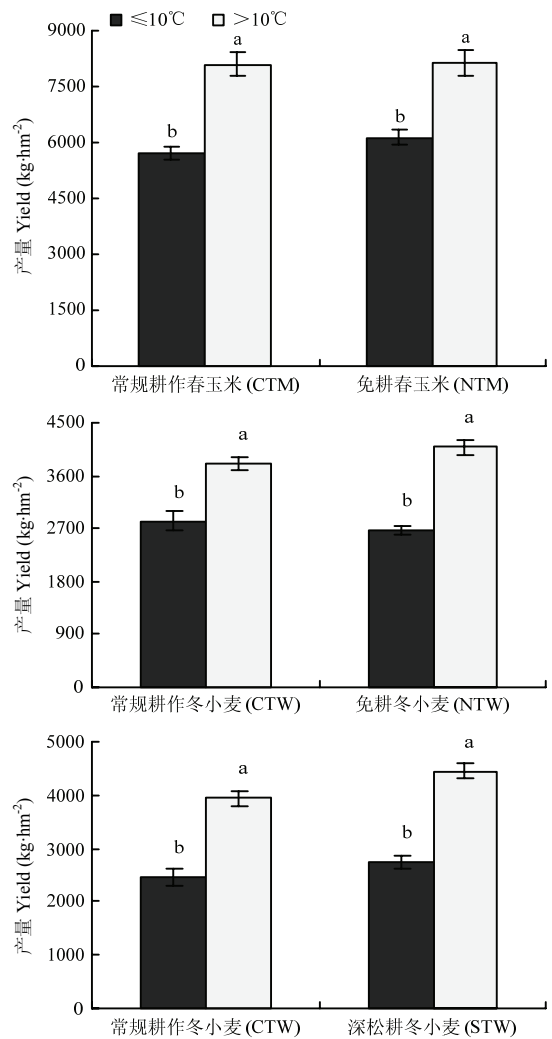


图 9 不同年均温度下免耕、深松耕对春玉米、冬小麦产量的影响

Fig. 9 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on yield of spring maize and winter wheat in different annual average temperature areas

耕作相比, 免耕春玉米的产量在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加 7.6% ($P < 0.05$), 在年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加不显著(图 10-a)。免耕和深松耕冬小麦的产量在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区显著低于年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区 ($P < 0.05$)。在不同年均温度地区, 深松耕冬小麦的产量均高于免耕冬小麦。与常规耕作相比, 免耕冬小麦的产量在年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加 8.2% ($P < 0.05$), 在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加不显著。深松耕冬小麦的产量在不同年均温度地区均显著增加, 增加率大于免耕。

不同年均温度下免耕和深松耕对作物水分利用效率的影响不同(图 11)。年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区的免耕春玉米水分利用效率显著低于年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区 ($P < 0.05$)。与常规耕作相比, 免耕春玉米的水分利用效率在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加 9.3% ($P < 0.05$) (图 10-b), 在年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加不显著。免耕和深松耕冬小麦的水分利用效率在年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区均显著高于年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区。在不同年均温度地区, 深松耕冬小麦的水分利用效率均高于免耕冬小麦。与常规耕作相比, 在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区, 深松耕冬小麦的水分利用效率分别增加 10.9% 和 9.6% ($P < 0.05$), 二者差异不显著, 但均高于免耕冬小麦。另外, 由图 10-c 可知, 与常规耕作相比, 免耕春玉米的耗水量在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区出现降

低, 在年均温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区增加不显著。深松耕冬小麦的耗水量在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区均出现增加, 增加率均高于免耕。可见, 在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区采用免耕, 有利于提高春玉米产量和水分利用效率; 在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 和 $> 10^{\circ}\text{C}$ 地区采用深松耕, 都有利于提高冬小麦产量和水分利用效率, 且效果优于免耕。

3 讨论

3.1 免耕、深松耕使作物产量和水分利用效率增加的原因

通过比较黄土高原不同区域、不同年降雨量和不同年均温度下, 免耕和深松耕对春玉米、冬小麦产量及水分利用效率的影响, 结果表明, 与常规耕作相比, 采用免耕和深松耕均能提高春玉米、冬小麦的整体平均产量和水分利用效率。前人研究免耕和深松耕条件下作物产量和水分利用效率增加的原因主要有: (1) 相比常规耕作, 免耕降低了对表层土壤的扰动, 保护了表层土壤微孔隙和其连续的孔隙路径^[23], 改善了土壤结构, 提高了土壤稳定性渗透率和饱和导水率^[24], 从而使土壤持水量增大, 有利于作物生长和增产; (2) 常规旋耕和翻耕作用土层为 0—30 cm 表层土壤, 由于旋耕刀和犁铧对土壤的挤压、打击作用, 连续采用常规耕作会使 30 cm 以下土壤层变紧、变硬, 形成犁底层, 土壤孔隙度和通透性降低, 土壤

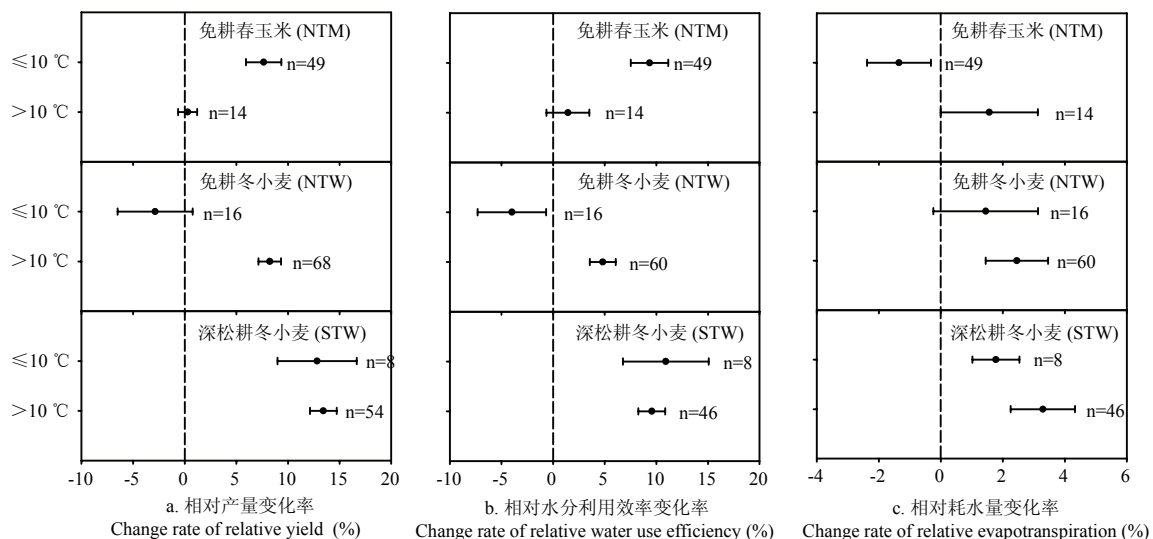


图 10 不同年均温度下免耕、深松耕对作物相对产量变化率 (a)、相对水分利用效率变化率 (b)、相对耗水量变化率 (c) 的影响

Fig. 10 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on change rate of relative yield (a), change rate of relative water use efficiency (b), and change rate of relative evapotranspiration (c) of crops in different annual average temperature areas

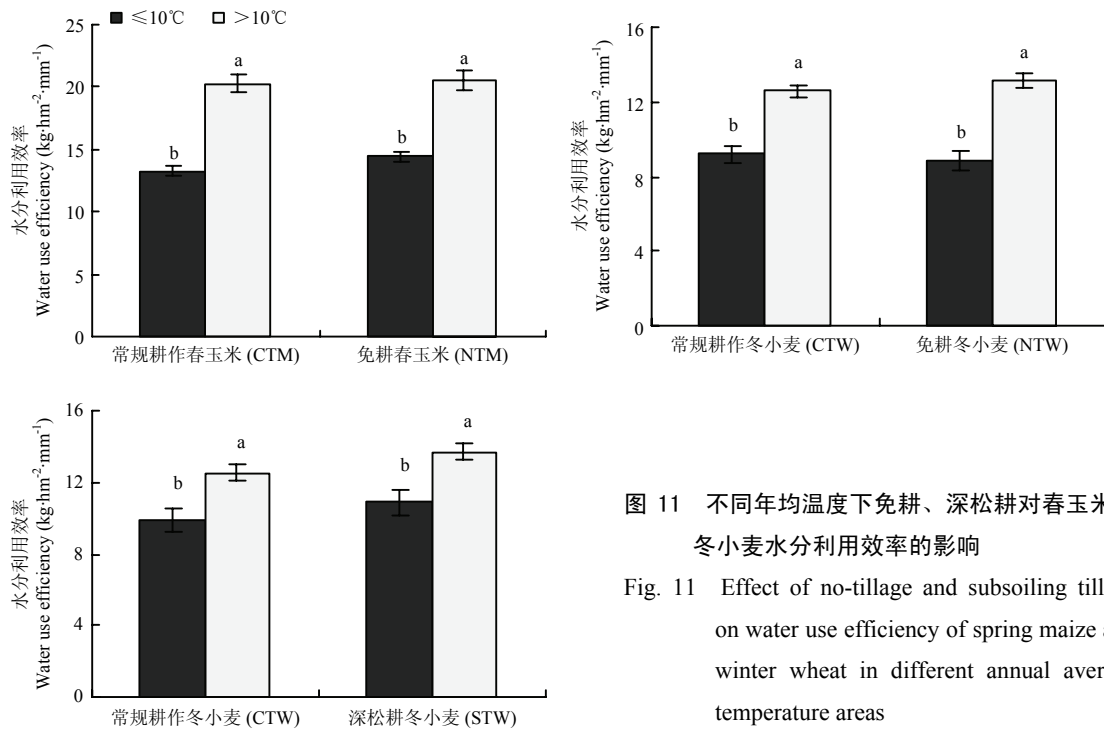


图 11 不同年均温度下免耕、深松耕对春玉米、冬小麦水分利用效率的影响

Fig. 11 Effect of no-tillage and subsoiling tillage on water use efficiency of spring maize and winter wheat in different annual average temperature areas

储水能力下降,不利于作物根系生长和对水分的吸收,从而导致作物产量和水分利用效率下降^[25]。深松耕打破了犁底层,相比常规耕作能显著降低土壤容重 6.6%^[3],降低土壤紧实度 25%左右^[26],同时深松耕增加了土壤孔隙度,提高了土壤持水能力,有利于作物的生长。

3.2 免耕、深松耕对作物产量和水分利用效率影响的因素分析

3.2.1 区域 结果表明,免耕和深松在黄土高原各区域的适应性存在差异,受地域影响比较大。其主要原因有:黄土高原地区年降雨量为 150—722 mm,平均为 434.4 mm^[12, 27],各区域间年降雨量差异较大。免耕和深松耕具有改善土壤结构,提高土壤水分入渗能力,增加土壤储水量的作用,但因各区域年降雨量存在较大差异,导致免耕和深松耕对不同区域作物产量和水分利用效率的影响不同。春玉米生育期降雨量约占全年降雨量 80%以上,降雨相对较多。相比其他区域,黄土高原东部和南部区域春玉米生育期降雨相对充沛,水分对春玉米生长制约程度减弱,因而在东部和南部区域免耕所具有的改善土壤结构、增加土壤储水的作用弱化,导致春玉米产量和水分利用效率在南部区域增长不显著,东部区域增加幅度相对较小。而在黄土高原北部和中部区域,春玉米生育期降雨量偏少,水分缺乏严重限制了春玉米生长,此时免耕所具有的

保蓄水分作用得到凸显,从而北部和中部区域的春玉米产量和水分利用效率显著增加,导致中部区域免耕春玉米产量高于南部。相比春玉米,冬小麦生育期需水与黄土高原季节降雨严重错位,冬小麦生育期降雨极少,冬小麦生长受水分制约严重^[28]。冬小麦生育期内黄土高原西北部区域降雨匮乏,加之蒸发量大,免耕有限的保蓄水分能力在此条件下受到限制,导致该区域免耕冬小麦产量增加不显著,且水分利用效率显著降低。而冬小麦生育期东南部区域降雨相对较多,免耕措施保蓄水分的作用得到凸显,因此在黄土高原东南部免耕冬小麦产量和水分利用效率显著增加。深松耕打破了犁底层结构,增加了土壤孔隙度,相比免耕措施具有更好的土壤储水能力,所以在黄土高原东部和西北部均有良好的适应性,因此深松耕冬小麦产量和水分利用效率在黄土高原东部和西北部显著增加,且增加率均高于免耕冬小麦。

3.2.2 年降雨量 因受水分制约程度不同,常规耕作条件下,年降雨量≤500 mm 地区春玉米产量低于年降雨量>500 mm 地区。但由于在黄土高原年降雨量≤500 mm 地区,太阳总辐射量和年日照时数均大于年降雨量>500 mm 地区^[29],这有利于年降雨量≤500 mm 地区春玉米产量的提高,因此在常规耕作条件下,年降雨量≤500 mm 地区的春玉米产量小于降雨量>500 mm 地区,但二者差异不显著。另外,由于 2 个

不同年降雨量地区在春玉米生育期间降雨量差异较大, 从而导致在常规耕作条件下, 年降雨量 ≤ 500 mm 地区春玉米水分利用效率大于年降雨量 > 500 mm 地区, 但二者差异不显著。与常规耕作相比, 免耕和深松耕在黄土高原不同年降雨量地区对作物产量和水分利用效率影响不同。其主要原因是, 免耕春玉米生育期降雨量约占全年降雨量 80% 以上, 且春玉米生长后期的 6—9 月份, 降雨类型多为暴雨^[30], 在降雨量 > 500 mm 地区容易造成土壤排水不畅和局部涝灾, 从而影响免耕春玉米产量和水分利用效率的进一步增加。而在年降雨量 ≤ 500 mm 地区, 由于春玉米全生育期和生长后期降雨量相对较少, 降雨被土壤吸收供植物生长, 不易形成土壤排水不畅和局部涝灾, 因此该地区免耕春玉米产量和水分利用效率增加率高于年降雨量 > 500 mm 地区。冬小麦生育期为 9 月至翌年 6 月, 而黄土高原地区 50%—60% 的年降雨量集中在 6—9 月^[31], 生育期需水与季节降雨错位导致冬小麦生长严重受水分制约。虽然免耕有助于增加土壤水分, 但是在黄土高原年降雨量 ≤ 500 mm 地区, 过低的降雨量并不能使免耕的保水能力得到发挥, 从而导致该地区免耕冬小麦产量和水分利用效率增加率不显著。而随着年降雨量逐渐增加, 免耕保蓄土壤水分的作用得到凸显, 从而使年降雨 500—600 mm 和 > 600 mm 地区免耕冬小麦产量和水分利用效率增加率依次显著升高。相比免耕, 深松耕改善了土壤 30—40 cm 层的结构, 增大了土壤孔隙度^[32], 使水分入渗能力和蓄水能力进一步增强, 在降雨季增加了深层土壤储水, 从而使深松耕冬小麦产量和水分利用效率在不同年降雨量地区均显著增加, 且高于免耕冬小麦。

3.2.3 年均温度 结果表明, 免耕和深松耕在黄土高原不同年均温度地区适应性不同。其主要原因是, 玉米是喜温作物, 生育期要求较高的温度, 在年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区日温差和季节温差较大, 不利于春玉米种子萌发和生长。免耕具有保蓄水分、稳定土壤温度的作用, 为春玉米种子萌发和生长提供了有利环境, 从而促进了年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区春玉米产量和水分利用效率的增加。深松耕改善了深层土壤透气性, 增强了土壤导热性, 正常情况下可提高土壤温度 $0.5\text{—}1^{\circ}\text{C}$, 有利于作物种子萌发和生长^[33]。另外, 在播种至拔节期, 深松耕 0—30 cm 土层温度波动小于免耕秸秆覆盖^[34], 有利于冬小麦生长。因此, 在黄土高原不同年均温度区域, 深松耕冬小麦产量和水分利用效率增加率显著高于免耕冬小麦。

4 结论

4.1 免耕和深松耕在黄土高原不同区域的适应性不同。与常规耕作相比, 在黄土高原中部和北部区域, 采用免耕可提高春玉米产量和水分利用效率 10% 以上。在黄土高原东南部和西北部区域, 采用深松耕可显著提高冬小麦产量和水分利用效率, 且效果优于免耕。

4.2 与常规耕作相比, 在黄土高原采用免耕都能提高春玉米的产量和水分利用效率, 其中年降雨量 ≤ 500 mm 地区的增加率显著高于年降雨量 > 500 mm 地区。在黄土高原不同年降雨量地区, 深松耕冬小麦的产量和水分利用效率均显著增加, 且增加率高于免耕处理。

4.3 与常规耕作相比, 在黄土高原年均温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 地区, 采用免耕能显著提高春玉米产量和水分利用效率。在不同年均温度地区采用深松耕可显著提高冬小麦产量和水分利用效率, 且效果优于免耕。

References

- [1] DENG X P, SHAN L, ZHANG H P, TURNER N C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1/3):23-40.
- [2] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, ZHANG F S. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management. *Field Crops Research*, 2013, 151(9): 9-18.
- [3] 刘战东, 刘祖贵, 宁东峰, 秦安振, 南纪琴, 张霄, 肖俊夫. 深松耕作对玉米水分利用和产量的影响. *灌溉排水学报*, 2015, 34(5): 6-12.
LIU Z D, LIU Z G, NING D F, QIN A Z, NAN J Q, ZHANG X, XIAO J F. Effects of subsoiling tillage on water utilization and yield of maize. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(5): 6-12. (in Chinese)
- [4] 余海英, 彭文英, 马秀, 张科利. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 99-104.
YU H Y, PENG W Y, MA X, ZHANG K L. Effects of no tillage on soil water content and physical properties of spring corn field in semiarid region of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99-104. (in Chinese)
- [5] 代快, 蔡典雄, 张晓明, 王燕, 赵全胜, 张丁辰, 冯宗全, 谢晓红, 王小彬. 不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 74-82.
DAI K, CAI D X, ZHANG X M, WANG Y, ZHAO Q S, ZHANG D C, FENG Z Q, XIE X H, WANG X B. Effects of nitrogen and phosphorus on dry farming spring corn yield and water use efficiency

- under different tillage practices. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 74-82. (in Chinese)
- [6] 尚金霞, 李军, 贾志宽, 张丽华. 渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2668-2678.
- SHANG J X, LI J, JIA Z K, ZHANG L H. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2668-2678. (in Chinese)
- [7] 张立健, 李玲玲, 谢军红, 李婧. 不同耕作措施对粮饲兼用玉米产量形成的影响. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(2):46-52.
- ZHANG L J, LI L L, XIE J H, LI J. Effects of different tillage measures on formation of grain and forage maize yield. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2015, 50(2): 46-52. (in Chinese)
- [8] 王维, 韩清芳, 吕丽霞, 侯贤清, 张鹏, 贾志宽, 丁瑞霞, 聂俊峰. 不同耕作模式对旱地小麦旗叶光合特性及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(1): 20-26.
- WANG W, HAN Q F, LÜ L X, HOU X Q, ZHANG P, JIA Z K, DING R X, NIE J F. Effects of different tillage patterns on photosynthetic characteristics and yield of dryland wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(1): 20-26. (in Chinese)
- [9] 柏炜霞, 李军, 王玉玲, 王丽. 渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 880-894.
- BO W X, LI J, WANG Y L, WANG L. Effects of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5): 880-894. (in Chinese)
- [10] 苏子友, 杨正礼, 王德莲, 蔡典雄, 姚雨卿, 吕军杰, 张洁. 豫西黄土坡耕地保护性耕作保水效果研究. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(3):6-8.
- SU Z Y, YANG Z L, WANG D L, CAI D X, YAO Y Q, LÜ J J, ZHANG J. Effect of conservation tillage on water conserving on loess slope-land in West Henan province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 6-8. (in Chinese)
- [11] 王麒翔, 范晓辉, 王孟本. 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征. *生态学报*, 2011, 31(19): 5512-5523.
- WANG Q X, FAN X H, WANG M B. Precipitation trends during 1961-2010 in the Loess Plateau Region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5512-5523. (in Chinese)
- [12] 李红梅, 王宇亮, 雷向杰, 权文婷, 何慧娟. 陕西省不同农业种植区热量资源的变化特征. *中国农业气象*, 2015, 36(6):653-665.
- LI H M, WANG Y L, LEI X J, QUAN W T, HE H J. Variation characteristics of thermal resources in different agricultural planting area in Shaanxi province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(6):653-665. (in Chinese)
- [13] 张智, 林莉. 宁夏近 40 多年积温及不同积温期降水量变化研究. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(2): 231-234.
- ZHANG Z, LIN L. Study on the accumulative temperature and the precipitation in the period of the accumulative temperature in Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(2): 231-234. (in Chinese)
- [14] 韩慧敏. 1971—2010 年内蒙古自治区农业气候资源变化特征研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- HAN H M. Analysis on the changes of agricultural climate resources in Inner Mongolia[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015. (in Chinese)
- [15] 陈少勇, 邢晓宾, 张俊红, 郑延祥. 白银市热量资源评估. *甘肃科学学报*, 2014, 26(1): 47-52.
- CHEN S Y, XING X B, ZHANG J H, ZHENG Y X. Assessment of thermal resources in Baiyin. *Journal of Gansu Sciences*, 2014, 26(1): 47-52. (in Chinese)
- [16] 代淑媚, 狄晓英, 景东平, 杨晓芳, 崔建国. 临汾市近 30 年热量资源变化特征分析. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 339-344.
- DAI S M, DI X Y, JING D P, YANG X F, CUI J G. Analysis of changing characteristics of heat resources over last 30 years in Linfen city. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 339-344. (in Chinese)
- [17] 姜志伟, 华璐, 武雪萍, 蔡典雄, 逢焕成, 姜涛, 吴会军, 郑妍, 李银坤. 洛阳孟津地区近 47 年来气温的变化特征. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 127-132.
- JIANG Z W, HUA L, WU X P, CAI D X, PANG H C, JIANG T, WU H J, ZHENG Y, LI Y K. Characteristics of temperature change for 47 years in Luoyang Mengjin. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 127-132. (in Chinese)
- [18] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 1-7.
- ZHAO A Q, WEI X J, ZHU M. Meta analysis on impact of plastic film on potato yield in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 1-7. (in Chinese)
- [19] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [20] LINQUIST B A, ADVIENTO-BORBE M A, PITTELKOW C M, VAN KESSEL C, VAN GROENIGEN K J. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A

- quantitative review and analysis. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10-21.
- [21] AINWORTH E A, DAVEY P A, BERNACCHI C J, DERMODY O C, HEATON E A, MOORE D J, MORGAN P B, NAIDU S L, RA H S Y, ZHU X G, CURTIS P S, LONG S P. A meta-analysis of elevated $[CO_2]$ effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 695-709.
- [22] MORGAN P B, AINSWORTH E A, LONG S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26(8): 1317-1328.
- [23] 彭文英. 免耕措施对土壤水分及利用效率的影响. 土壤通报, 2007, 38(2): 379-383.
PENG W Y. Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 379-383. (in Chinese)
- [24] ARSHAD M A, FRANZLUBBERS A J, AZOOZ R H. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1):41-47.
- [25] 郑侃, 何进, 李洪文, 王庆杰, 李问盈. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7-15.
ZHENG K, HE J, LI H W, WANG Q J, LI W Y. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22):7-15.(in Chinese)
- [26] 孔晓明, 韩成卫, 曾苏明, 吴秋平, 刘丽. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响. 玉米科学, 2014, 22(1): 108-113.
KONG X M, HAN C W, ZENG S M, WU Q P, LIU L. Effects of different tillage managements on soil physical properties and maize yield. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(1): 108-113. (in Chinese)
- [27] 万龙. 黄土高原地区 53 年来降雨量时空演变特征分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
WAN L. Spatial and temporal trend of precipitation on the Loess Plateau during the past 53 years [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [28] WANG L F, CHEN J, SHANG-GUAN Z P. Yield responses of wheat to mulching practices in dryland farming on the Loess Plateau. *PLoS ONE*, 2015, 10(5): e0127402.
- [29] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
SHEN Y. The spatial distribution of solar energy and the comprehensive potential evaluation of regional exploitation and utilization in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese)
- [30] 贾洪雷, 马成林, 刘昭辰, 杨青, 李广宇, 刘晖. 北方旱作农业区蓄水保墒耕作模式研究. 农业机械学报, 2007, 38(12): 190-194.
JIA H L, MA C L, LIU Z C, YANG Q, LI G Y, LIU H. Overview of study on the tillage mode of water storage and soil moisture conservation for dry farming region in northern China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(12): 190-194. (in Chinese)
- [31] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, ZHANG F S. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management. *Field Crops Research*, 2014, 163(1): 53-63.
- [32] DREWRY J J, LOWE J A H, PATON R J. Effect of subsoiling on soil physical properties and pasture production on a pallic soil in southland, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2000, 43(2): 269-277.
- [33] 王志穷, 王维新, 李霞, 李文春, 郭金龙, 汤明军, 方瑞. 保护性耕作条件下深松技术的国内外发展现状. 农机化研究, 2016, 38(6): 253-258.
WANG Z Q, WANG W X, LI X, LI W C, GUO J L, TANG M J, FANG R. Development status of subsoiling at home and abroad under conservation tillage. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(6): 253-258. (in Chinese)
- [34] 王育红, 蔡典雄, 姚宇卿, 吴雪萍, 吕军杰, 李俊红, 丁志强, 张洁. 豫西旱坡地长期定位保护性耕作研究-II. 连年免耕和深松覆盖对麦田土壤温度的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 59-64.
WANG Y H, CAI D X, YAO Y Q, WU X P, LÜ J J, LI J H, DING Z Q, ZHANG J. Study on long-term site-specific conservation tillage on sloping dryland in the western part of Henan-II. Effects of no-till and subsoiling with mulching on soil temperature in wheat field. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 59-64. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)

附录一: 春玉米数据来源文献

- [1] 尚金霞, 李军, 贾志宽, 张丽华. 渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2668-2678.
- SHANG J X, LI J, JIA Z K, ZHANG L H. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2668-2678. (in Chinese)
- [2] 张丽华, 李军, 贾志宽, 刘冰峰, 赵洪利, 尚金霞. 渭北旱塬保护性耕作对冬小麦-春玉米轮作田蓄水保墒效果的产量的影响. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1750-1758.
- ZHANG L H, LI J, JIA Z K, LIU B F, ZHAO H L, SHANG J X. Effects of conservation tillage on soil water conservation and crop yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei highland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1750-1758. (in Chinese)
- [3] 王玉玲, 李军. 黄土旱塬区平衡施肥下不同土壤耕作模式的蓄水纳墒及作物增产增收效应研究. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 151-163.
- WANG Y L, LI J. Study on soil water storage, crop yields and incomes under different soil tillage patterns with balance fertilization in the Loess Dryland Region. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 151-163. (in Chinese)
- [4] 李娟, 王丽, 李军, 尚金霞. 轮耕对渭北旱塬玉米连作系统土壤水分和作物产量的影响. 农业工程学报, 2015, 31(16): 110-118.
- LI J, WANG L, LI J, SHANG J X. Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei Dryland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 110-118. (in Chinese)
- [5] 周少平, 谭广洋, 沈禹颖, 南志标, 高崇岳, LI GUANGDI, 杨晶. 保护性耕作下陇东春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统土壤水分动态及水分利用效率. 草业科学, 2008, 25(7): 69-76.
- ZHOU S P, TAN G Y, SHEN Y Y, NAN Z B, GAO C Y, LI G D, YANG J. Dynamics of soil water and water use efficiency within maize-winter wheat-soybean rotation under different tillage treatments in the Longdong Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2008, 25(7): 69-76. (in Chinese)
- [6] 郭晓霞, 刘景辉, 田露, 张星杰, 李立军, 张向前. 免耕轮作对内蒙古地区农田贮水特性和作物产量的影响. 作物学报, 2012, 38(8): 1504-1512.
- GUO X X, LIU J H, TIAN L, ZHANG X J, LI L J, ZHANG X Q. Effects of no-tillage with rotation on soil water retaining properties and crop yield in Inner Mongolia. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(8): 1504-1512. (in Chinese)
- [7] WANG X B, WU H J, DAI K, ZHANG D C, FENG Z H, ZHAO Q S, WU X P, JIN K, CAI D X, OENEMA O, HOOGMOED W B. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China. *Field Crops Research*, 2012, 132(3): 106-116.
- [8] HE J, LI H W, WANG X Y, MCHUGH A D, LI W Y, GAO H W, KUHN N J. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2): 493-502.
- [9] WANG X B, DAI K, ZHANG D C, ZHANG X M, WANG Y, ZHAO Q S, CAI D X, HOOGMOED W B, OENEMA O. Dryland maize yield and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China. *Field Crops Research*, 2011, 120(1): 47-57.
- [10] 蔡典雄, 王小彬, 张志田, 高绪科, 张镜清. 寿阳旱农试区保护耕作体系研究. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 41-46.
- CAI D X, WANG X B, ZHANG Z T, GAO X K, ZHANG J Q. Conservation tillage systems in arid areas in Shouyang. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, 16(3): 41-46. (in Chinese)
- [11] 韩战省, 张进, 郭秀卿. 小麦玉米保护性耕作试验研究. 山西农机(学术版), 1998, 9: 20-24.
- HAN Z S, ZHANG J, GUO X Q. Experimental study on conservation tillage of wheat and maize. *Shanxi Farm Machinery (Academic Edition)*, 1998, 9: 20-24. (in Chinese)
- [12] 代快, 蔡典雄, 张晓明, 王燕, 赵全胜, 张丁辰, 冯宗全, 谢晓红, 王小彬. 不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率. 农业工程学报, 2011, 27(2): 74-82.
- DAI K, CAI D X, ZHANG X M, WANG Y, ZHAO Q S, ZHANG D C, FENG Z Q, XIE X H, WANG X B. Effects of nitrogen and phosphorus on dry farming spring corn yield and water use efficiency under different tillage practices. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 74-82. (in Chinese)
- [13] 孙建, 刘苗, 李立军, 刘景辉, SAYRE K D. 不同耕作方式对内蒙古旱作农田土壤性状及作物产量的影响. 生态学杂志, 2010, 29(2): 295-302.
- SUN J, LIU M, LI L J, LIU J H, SAYRE K D. Effects of different tillage modes on soil properties and crop yield in a rain-fed field of Inner Mongolia, 2010, 29(2): 295-302. (in Chinese)
- [14] 殷涛, 何文清, 严昌荣, 刘爽, 刘恩科. 地膜秸秆双覆盖对免耕种

- 植玉米田土壤水热效应的影响. 农业工程学报, 2014, 30(19): 78-87.
- YIN T, HE W Q, YAN C R, LIU S, LIU E K. Effects of plastic mulching on surface of no-till straw mulching on soil water and temperature. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 78-87. (in Chinese)
- [15] 李立群, 薛少平, 王虎全, 姚万生. 渭北高原旱地春玉米不同种植模式水温效应及增产效益研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 33-38.
- LI L Q, XUE S P, WANG H Q, YAO W S. Effects of different planting patterns on soil moisture, temperature and yield of spring maize on Weibei Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 33-38. (in Chinese)
- [16] 雷金银, 吴发启, 王健, 郭建华. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响. 农业工程学报, 2008, 24(10): 40-45.
- LEI J Y, WU F Q, WANG J, GUO J H. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 40-45. (in Chinese)
- [17] 王缠军, 郝明德, 折凤霞, 鲍艳杰. 黄土区保护性耕作对春玉米产量和土壤肥力的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 193-198.
- WANG C J, HAO M D, SHE F X, BAO Y J. Effects of different conservation tillage measures on spring maize yield and soil fertility in the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 193-198. (in Chinese)
- [18] 黄茂林, 梁银丽, 韦泽秀, 尚金霞. 免耕施肥对两个轮作系统生产力及水分利用效率的影响. 甘肃农业科技, 2013(8): 3-7.
- HUANG M L, LIANG Y L, WEI Z X, SHANG J X. Effect of no-tillage fertilization on productivity and water use efficiency of two cropping rotation system. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2013(8): 3-7. (in Chinese)
- [19] 李龙, 郝明德, 王缠军, 董晓兵. 渭北旱塬保护性耕作对春玉米产量及水分利用效率的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 46-52.
- LI L, HAO M D, WANG C J, DONG X B. Effects of conservation tillage on water use efficiency and yield of spring maize on Weibei Highland. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 42(12): 46-52. (in Chinese)
- 耕作方式对土壤水分及小麦水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 52-58.
- HOU X Q, HAN Q F, JIA Z K, LI Y P, YANG B P. Effects of different tillage practices in summer fallow period on soil water and crop water use efficiency in semi-arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(5): 52-58. (in Chinese)
- [2] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 王蕾. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应. 农业工程学报, 2010, 26(8): 44-51.
- MAO H L, LI J, JIA Z K, WANG L. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 44-51. (in Chinese)
- [3] 柏炜霞, 李军, 王玉玲, 王丽. 渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响. 中国农业科学, 2014, 47(5): 880-894.
- BO W X, LI J, WANG Y L, WANG L. Effects of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5): 880-894. (in Chinese)
- [4] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 王维, 贾志宽. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2012, 28(3): 94-100.
- HOU X Q, LI R, HAN Q F, WANG W, JIA Z K. Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3): 94-100. (in Chinese)
- [5] 王维, 韩清芳, 吕丽霞, 侯贤清, 张鹏, 贾志宽, 丁瑞霞, 聂俊峰. 不同耕作模式对旱地小麦企业光合特性及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 20-26.
- WANG W, HAN Q F, LÜ L X, HOU X Q, ZHANG P, JIA Z K, DING R X, NIE J F. Effects of different tillage patterns on photosynthetic characteristics and yield of dryland wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(1): 20-26. (in Chinese)
- [6] 廖允成, 韩思明, 温晓霞. 黄土高原旱地小麦机械化保护性耕作栽培体系的水分及产量效应. 农业工程学报, 2002, 18(4): 68-71.
- LIAO Y C, HAN S M, WEN X X. Soil water content and crop yield effects of mechanized conservative tillage-cultivation system for dryland winter wheat in the Loess Tableland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(4): 68-71. (in Chinese)
- [7] 姚宇卿, 吕军杰, 王育红, 黄江涛, 李云德, 王向阳. 保持耕作对

附录二：冬小麦数据来源文献

- 豫西旱地冬小麦产量及效益的影响. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4):42-44.
- YAO Y Q, LÜ J J, WANG Y H, HUANG J T, LI Y D, WANG X Y. Effect of conservation tillage on yield and benefit of winter wheat in dry-land in West Henan. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(4): 42-44. (in Chinese)
- [8] 苏子友, 杨正礼, 王德莲, 蔡典雄, 姚雨卿, 吕军杰, 张洁. 豫西黄土坡耕地保护性耕作保水效果研究. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 6-8.
- SU Z Y, YANG Z L, WANG D L, CAI D X, YAO Y Q, LÜ J J, ZHANG J. Effect of conservation tillage on water conserving on loess slope-land in West Henan province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 6-8. (in Chinese)
- [9] 李俊红, 吕军杰, 丁志强, 张洁, 姚宇卿, 蔡典雄, 吴会军, 于新峰. 保护性耕作冬小麦产量及土壤水分变化研究. 土壤通报, 2014, 45(6): 1343-1348.
- LI J H, LÜ J J, DING Z Q, ZHANG J, YAO Y Q, CAI D X, WU H J, YU X F. Study of conservation tillage on winter wheat yield and soil moisture. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(6): 1343-1348. (in Chinese)
- [10] 李友军, 吴金芝, 黄明, 姚宇卿, 张灿军, 蔡典雄, 金轲. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2006, 22(12): 44-48.
- LI Y J, WU J Z, HUANG M, YAO Y Q, ZHANG C J, CAI D X, JIN K. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12): 44-48. (in Chinese)
- [11] 吴金芝, 黄明, 李友军, 陈明灿, 姚宇卿, 郭大勇, 黄海霞. 不同耕作方式对冬小麦光合作用产量和水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5):17-21.
- WU J Z, HUANG M, LI Y J, CHEN M C, YAO Y Q, GUO D Y, HUANG H X. Effects of different tillage systems on the photosynthesis functions, grain yield and WUE in winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(5): 17-21. (in Chinese)
- [12] 张建军, 王勇, 唐小明, 樊廷录, 李尚中, 党翼, 王磊. 陇东黄土旱塬不同耕作方式及施肥处理对冬小麦产量和土壤肥力的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1):247-254.
- ZHANG J J, WANG Y, TANG X M, FAN T L, LI S Z, DANG Y, WANG L. The effects of different tillage methods and fertilizer treatments on yield of winter wheat and soil fertility in the Loess Plateau of East Gansu. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 247-254. (in Chinese)
- [13] 周少平, 谭广洋, 沈禹颖, 南志标, 高崇岳, LI GUANGDI, 杨晶. 保护性耕作下陇东春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统土壤水分动态及水分利用效率. 草业科学, 2008, 25(7): 69-76.
- ZHOU S P, TAN G Y, SHEN Y Y, NAN Z B, GAO C Y, LI G D, YANG J. Dynamics of soil water and water use efficiency within maize-winter wheat-soybean rotation under different tillage treatments in the Longdong Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2008, 25(7): 69-76. (in Chinese)
- [14] 刘晋宏, 孙建好, 陈英, 张绪成, 刘晓伟, 王朝辉. 优化施肥和栽培模式对旱地冬小麦产量和土壤水分及 N 素利用的影响. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(2): 53-58.
- LIU J H, SUN J H, CHEN Y, ZHANG X C, LIU X W, WANG C H. Effects of different fertilization and cultivation models on grain yield, soil water content and N utilization. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2015, 50(2): 53-58. (in Chinese)
- [15] 蔡典雄, 张志田, 高绪科, 王小彬, 张镜清. 半湿润偏旱区旱地麦田保护耕作技术研究. 干旱地区研究, 1995, 13(4): 67-74.
- CAI D X, ZHANG Z T, GAO X K, WANG X B, ZHANG J Q. Research on the conservation tillage technology in wheat fields in the semi-humid region liable to drought. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1995, 13(4): 67-74. (in Chinese)
- [16] 韩战省, 张进, 郭秀卿. 小麦玉米保护性耕作试验研究. 山西农机(学术版), 1998, 9: 20-24.
- HAN Z S, ZHANG J, GUO X Q. Experimental study on conservation tillage of wheat and maize. *Shanxi Farm Machinery (Academic Edition)*, 1998, 9: 20-24. (in Chinese)
- [17] 杜兵, 李问盈, 邓健, 廖植樾. 保护性耕作表土作业的田间试验研究. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 65-67.
- DU B, LI W Y, DENG J, LIAO Z X. Research on surface tillage in conservation tillage. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(4): 65-67. (in Chinese)
- [18] 马爱平, 王娟玲, 靖华, 王裕智, 逮腊虎, 崔欢虎. 土壤耕作方式对小麦产量及水分利用的影响. 河南科技学院学报, 2009, 37(2):1-4.
- MA A P, WANG J L, JING H, WANG Y Z, LU L H, CUI H H. Effect of soil tillage practices of summer fallow period of light loamy soil on wheat yield and water use efficiency. *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, 2009, 37(2): 1-4. (in Chinese)

- [19] 赵红梅, 高志强, 任爱霞, 李光, 邓妍, 孙敏. 基于旱地小麦“三提前”蓄水保墒技术播种方式的研究. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(5): 395-402.
- ZHAO H M, GAO Z Q, REN A X, LI G, DENG Y, SUN M. Study on sowing methods for dryland wheat based on the “Three Advance” soil moisture preservation technology. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(5): 395-402. (in Chinese)
- [20] SU Z Y, ZHANG J S, WU W L, CAI D X, LÜ J J, JIANG G H, HUANG J, GAO J, HARTMANN R, GABRIELS D. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 307-314.
- [21] JIN K, CORNELIS W M, SCHIETTECATTE W, LU J J, YAO Y Q, WU H J, GABRIELS D, NEVE S D, CAI D X, JIN J Y, HARTMANN R. Effects of different management practices on the soil-water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 131-144.
- [22] HE J, LI H W, WANG X Y, MCHUGH A D, LI W Y, GAO H W, KUHN N J. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2): 493-502.
- [23] LI H W, GAO H W, WU H D, LI W Y, WANG X Y, HE J. Effect of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(5): 344-350.
- [24] WANG X B, WU H J, DAI K, ZHANG D C, FENG Z H, ZHAO Q S, WU X P, JIN K, CAI D X, OENEMA O, HOOGMOED W B. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China. *Field Crops Research*, 2012, 132(3): 106-116.
- [25] CHEN H. Traffic and tillage effects on soil water conservation and winter wheat yield in the Loess Plateau, China. *Ecological Chemistry and Engineering S-Chemia I Inzynieria Ekologicznas*, 2013, 20(3): 507-517.
- [26] HOU X Q, LI R, JIA Z K, HAN Q F, WANG W, YANG B Q. Effects of rotational tillage practices on soil properties, winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north-west China. *Field Crops Research*, 2012, 129(1): 7-13.