

垄沟种植对干旱半干旱地区作物水分利用效率和产量的影响：基于 Meta 分析

郭乔¹, 王冬梅¹, 张鹏¹, 李志梅²

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京市延庆区水务局水土保持管理站, 北京 102100)

摘要: [目的] 系统评估垄沟种植对作物水分利用效率(WUE)和产量的影响,探究影响垄沟种植增产效果的主要驱动因子,为北方干旱、半干旱雨养农业区垄沟种植推广与合理应用提供科学依据与理论基础。[方法] 以平作为对照,以垄沟种植为处理,系统分析 1980—2023 年公开发表的文献 68 篇,利用采用 Meta 分析方法定量分析了高($R/F > 1$)、中($R/F = 1$)、低($R/F < 1$)3 种典型垄沟比(R 为垄宽, F 为沟宽)对作物 WUE 和产量的影响,并从气候因素(即年平均降水量、年平均温度),土壤因素(土壤密度、土壤养分),人为管理因素(肥料使用、作物种类)出发,研究垄沟种植主要驱动因子对作物 WUE 和产量的综合影响。[结果] 与传统平作相比,垄沟种植 3 种垄沟比都显著提高了作物 WUE 和产量,且不同垄沟比间差异显著。高、中、低 3 种垄沟比条件下,作物 WUE 和产量分别显著提高了 34.9%, 27.48%, 32.4% 和 39.94%, 25.98%, 34.93%。 $R/F > 1$ 适用在年平均降雨量 < 400 mm 和年平均温度 < 8 °C 的地区,而 $R/F < 1$ 在年平均降雨量 > 600 mm 和年平均温度 > 10 °C 的地区对作物 WUE 和产量提高更大。在低土壤容重、高土壤全氮含量的条件下 $R/F > 1$ 具有更高的增产效果,而 $R/F < 1$ 在高土壤容重、低土壤速效氮和速效磷含量时更合适。高强度的肥料投入显著降低了垄沟种植的增产效果,低施肥量(氮肥施用量 $0 \sim 150$ kg/hm², 磷肥施用量 $0 \sim 75$ kg/hm²)时作物 WUE 和产量提高最为显著。[结论] 不同垄沟比对作物 WUE 和产量的提高受气候因素、土壤因素、人为管理因素的共同影响。在降水少、土壤贫瘠的自然条件下,更适宜采用垄沟种植。在使用化肥时,低施肥量可以让垄沟种植的增产和保水达到最佳效果。

关键词: Meta 分析; 垄沟种植; 产量; 水分利用效率

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2024)03-0190-11

中图分类号: S152.7

文献参数: 郭乔, 王冬梅, 张鹏, 等. 垄沟种植对干旱半干旱地区作物水分利用效率和产量的影响: 基于 Meta 分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 190-200. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.020; Guo Qiao, Wang Dongmei, Zhang Peng, et al. Effects of ridge-furrow planting on crop water use efficiency and yield in arid and semi-arid regions based on Meta-analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 190-200.

Effects of Ridge-furrow Planting on Crop Water Use Efficiency and Yield in Arid and Semi-arid Regions Based on Meta-analysis

Guo Qiao¹, Wang Dongmei¹, Zhang Peng¹, Li Zhimei²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Soil and Water Conservation Management Station of Yanqing District Water Affairs Bureau, Beijing 102100, China)

Abstract: [Objective] The effects of ridge and furrow planting on crop water use efficiency (WUE) and yield were systematically evaluated, and the main driving factors that affect the yield increase effect of ridge and furrow planting were studied, in order to provide scientific basis and theoretical basis for the promotion and reasonable application of ridge and furrow planting in arid and semi-arid rainfed agricultural areas in Northern China. [Methods] Using flat cultivation as a control and ridge-furrow cultivation as the treatment, a systematic analysis was conducted of 68 published studies from 1980 to 2023. The Meta-analysis methods was utilized to quantitatively analyze the effects of three typical ratios of ridge width (R) to furrow (F) (the higher with $R/F > 1$; the medium with $R/F = 1$; the lower with $R/F < 1$) on crop WUE and yield. The

收稿日期: 2023-11-17

修回日期: 2023-12-02

资助项目: 宁夏回族自治区水利厅生产建设项目“水土流失防治技术研究”(2013-69)

第一作者: 郭乔(1995—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持生态修复。Email: 2529953669@qq.com.

通信作者: 王冬梅(1963—), 女(汉族), 河北省保定市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持生态修复方面的研究。Email: dmwang_bjfu@126.

comprehensive impact of the main driving factors of ridge-furrow cultivation on crop WUE and yield was also investigated, with considering climatic factors (i. e., annual average precipitation, annual average temperature), soil factors (soil density, soil nutrients), and human management factors (fertilizer use, crop types). [Results] Compared with traditional flat cultivation, all three ridge-furrow ratios significantly increased crop WUE and yield, with significant differences observed among the different ratios. Under high, medium, and low ridge-furrow ratios, crop WUE was significantly increased by 34.9%, 27.48%, 32.4%, respectively, and yield was increased by 39.94%, 25.98%, 34.93%, respectively. The high R/F ratio (>1) was applicable in regions with an annual average rainfall of less than 400 mm and an annual average temperature of less than 8 °C, while the low R/F ratio (<1) was more effective in increasing crop WUE and yield in regions with an annual average rainfall of more than 600 mm and an annual average temperature above 10 °C. The high R/F ratio (>1) had a higher yield-increasing effect under conditions of low soil bulk density and high soil total nitrogen (TN) content, while the low R/F ratio (<1) was more suitable under conditions of high soil bulk density and low soil available nitrogen (AN) and available phosphorus (AP) content. Intensive fertilizer input significantly reduced the yield-increasing effect of ridge-furrow cultivation, whereas low fertilizer application rates (nitrogen fertilizer application rate of 0 to 150 kg/ha, phosphorus fertilizer application rate of 0 to 75 kg/ha) resulted in the most significant increases in crop WUE and yield. [Conclusion] The increase in crop WUE and yield due to different ridge-furrow ratios was influenced by a combination of climatic factors, soil factors, and human management factors. Ridge-furrow cultivation was more suitable under natural conditions of scarce rainfall and low soil fertility. Applying low amounts of chemical fertilizers can optimize the yield increase and water conservation benefits of ridge-furrow cultivation.

Keywords: Meta-analysis; ridge and furrow planting; yield; water use efficiency

雨养农业是中国最古老的农业生产系统^[1],具有巨大生产潜力,在经济和粮食安全方面发挥着无可替代的作用^[2]。目前,中国的雨养农业主要分布在北方干旱、半干旱地区^[2],由于北方地区蒸发量大,降水不足且分布不均^[3-5],在全球变暖的趋势下,土壤水分成为制约雨养农业发展最重要的因素^[6]。因此解决雨养农业产量问题的关键是采用合理人工管理策略,提高雨水收集利用效率,增加土壤储水量^[7]。

目前,中国雨养农业区已经使用了许多水土保持技术,其中垄沟集雨种植被认为是最有效的就地雨水收集技术之一^[8]。众多研究表明,垄沟集雨种植可以充分利用田间的微量和无效降水,调节土壤水热环境,显著提高作物水分利用效率^[9-11]。但在实践中,由于不同地区年平均温度、年平均降水量、作物类型、肥料投入^[12]等因素的影响,垄沟集雨种植对作物的增产效果存在差异。研究表明,在丰水年垄沟集雨种植对作物水分利用效率的提高幅度小于干旱或平水年^[13]。在水分胁迫较严重的地区,垄沟栽培对作物水分利用效率提高幅度更大,增产效果更显著^[14]。在华北地区种植玉米时,垄沟比等于1玉米的产量提高幅度最大^[15],而在黄土高原地区种植时垄沟比大于1,表明玉米增产效果最好^[16]。在半干旱区种植小麦时,刘晓莉等^[17]发现垄沟比等于1时产量提高幅

度最大,但当种植玉米时,垄沟比大于1增产效果最好^[18-19]。大量研究^[20-24]发现黄土高原地区玉米沟垄种植 $N:P_2O_5$ 施肥量为 200:100~307:154 kg/hm² 时,玉米产量最高,但西北地区有研究^[24]发现玉米种植最佳施氮量为 173 kg/hm²。

由于地区间的气候条件、土壤类型、种植作物、人为管理方法的差异,各地垄沟集雨种植最佳垄沟比不同,这让北方干旱、半干旱地区雨养农业区垄沟种植推广和规模化生产成为了难题。因此,迫切需要对区域尺度上不同垄沟比对不同作物水分利用效率和产量的影响进行评估。本研究通过荟萃分析(Meta)方法量化了北方干旱、半干旱雨养农业区不同作物(玉米、小麦、马铃薯、牧草)水分利用效率和产量对不同垄沟比的综合响应。为了更加明确不同垄沟比及其主要驱动因素对作物水分利用效率(WUE)和产量的影响,本研究将驱动因素进一步划分,从而评估不同垄沟比对作物 WUE 和产量影响的强度是否因气候因素(即年平均降水量、年平均温度)、土壤因素(土壤密度、土壤养分)、人为管理因素(肥料使用、作物种类)而异。

1 材料与方法

1.1 数据收集与筛选

本研究在 Web of Science, 中国知网 (<http://>

www.cnki.net/)上使用垄沟集雨种植和作物产量、作物 WUE 检索了 1980—2023 年 1 月之前发表的相关文献。

由于进行 Meta 分析时需要输入标准差等信息,我们使用以下标准对文献进行筛选:①研究区域位于中国北方雨养农业区。②试验方式为田间试验,试

验的重复次数不低于 3 次。③试验必须包含试验组和对照组,即设置垄沟集雨处理和传统平作。④所研究的植物仅限于玉米、小麦、马铃薯和饲草。⑤文献中垄沟种植方式为垄上覆盖透明塑料薄膜,沟中种植作物且不进行灌溉。共收集到有效文献 68 篇,文献中包含的试验地点共 44 个(表 1)。

表 1 采样点信息

Table 1 Sampling point information

试验作物	经度	纬度	年平均 降雨量/mm	年平均 温度/℃	试验地点
玉米	118°57'E	39°18'N	600	11.4	唐山市海港开发区王滩镇十家子村
	117°78'E	35°2'N	878.9	12	山东省临沂市费县
	108°52'E	34°36'N	560	10.5	陕西省咸阳市兴平市
	108°04'E	34°2'N	540	10	陕西省西安市周至县
	107°41'E	35°14'N	549	9.7	陕西省长武县洪家镇王东村
	106°20'E	34°10'N	550	11.5	陕西省河阳县西北农林科技大学旱地试验站
	106°79'E	35°86'N	430	8.0	宁夏回族自治区六盘山东麓
	106°45'E	35°51'N	440	6.1	宁夏固原市彭阳县
小麦	106°02'E	36°78'N	585	6.9	宁夏中卫市
	110°40'E	36°20'N	565	10.5	陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大学旱作试验站
	109°10'E	34°74'N	550	12.5	陕西省渭南市富平县西北农林科技大学富平综合实验站
	108°52'E	34°36'N	549.9	13.3	陕西省三原试验站
	108°24'E	34°20'N	638	13	西北农林科技大学杨凌实验站
	108°04'E	34°20'N	580.5	13.5	西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院
马铃薯	106°63'E	35°85'N	435	6.1	中国宁夏固原市西北农林科技大学旱地农业实验站
	106°45'E	35°79'N	435	6.1	宁夏彭阳县白杨镇
	111°17'E	41°8'N	281.2	6.5	内蒙古武川县农业部武川农业环境科学观测试验站
	106°44'E	36°44'N	350	7.4	宁夏农林科学院固原分院头营科研基地
牧草	104°14'E	35°95'N	381.8	6.57	兰州大学玉中分校干旱与农业生态实验站
	104°35'E	35°33'N	383.3	6.7	兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地
	104°25'E	36°02'N	320	6.5	兰州市榆中县中连川乡中连川村
	103°25'E	36°73'N	260	5.9	甘肃省永登县武胜驿镇霍家湾村

1.2 数据分类

对于文献中展示的数据,我们提取了平均值、标准差和样本量。数据从表格中提取或者利用 GetData Graph Digitizer 软件将图形数值化后提取利用。当我们既不能从标准误差中提取也不能计算标准差时,我们计算了每个数据集中的平均变异系数(CV),然后通过将报告的平均值乘以平均 CV 来近似计算缺失的标准差^[25-26]。

根据张光鑫^[12]在黄土高原针对垄沟结构的研究,将垄沟集雨种植垄沟比分为 3 组:垄宽度(R)大于沟宽度(F),即 $R/F > 1$;垄沟宽度相同,即 $R/F = 1$,垄宽度小于沟宽度,即 $R/F < 1$ 。为了进一步分析不同因素下垄沟集雨种植对作物增产效果的影响,我们又分了 3 个亚组:①气候因素:根据样本所在区域年平均降水量和年平均温度的不同,将年平均降水量分为 < 400 mm, $400 \sim 600$ mm, > 600 mm^[27],年平

均温度分为 < 8 °C, $8 \sim 10$ °C, > 10 °C^[28]。②土壤因素:将土壤容重分为 < 1.3 , $1.3 \sim 1.4$, > 1.4 g/cm³;将土壤中 TN 分为 < 0.9 , $0.9 \sim 1$, > 1 g/kg; TP 分为 < 0.7 , > 0.7 g/kg; AN 分为 < 60 , > 60 mg/kg; AP 分为 < 20 , > 20 mg/kg; AK 分为 < 150 , > 150 mg/kg^[12]。③人为管理因素:将肥料使用分为低肥(N: $0 \sim 150$ kg/hm² 和 P₂O₅: $0 \sim 75$ kg/hm²),中肥(N: $150 \sim 300$ kg/hm² 和 P₂O₅: $75 \sim 100$ kg/hm²),高肥(N: $300 \sim 400$ kg/hm² 和 P₂O₅: $100 \sim 150$ kg/hm²)^[29]。作物类型主要为玉米、小麦、马铃薯和饲草。

1.3 研究方法

Meta 分析在 MetaWin 2.1 软件中进行,以试验组(X_e)与对照组(X_c)的比值为响应比 R ,效应值($\ln R$)以响应比的自然对数来计算,最终通过相对变化率 Y 来评估变量对垄沟集雨种植增产率的响应。

$$\ln R = \ln\left(\frac{X_e}{X_c}\right) = \ln(X_e) - \ln(X_c) \quad (1)$$

$\ln R$ 的方差 v 根据公式(2)计算。

$$v = \frac{S_e^2}{N_e X_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2} \quad (2)$$

式中: S_e 和 S_c 分别是试验组和对照组的标准差; N_e 和 N_c 分别是试验组和对照组的样本量。为了使效应值更为准确,采用随机效应模型。综合效应值 $\ln R'$ 根据公式(3)、(4)计算。

$$\ln R' = \frac{\sum_{i=1}^k (\ln R_i \times \omega_i)}{\sum_{i=1}^k \omega_i} \quad (3)$$

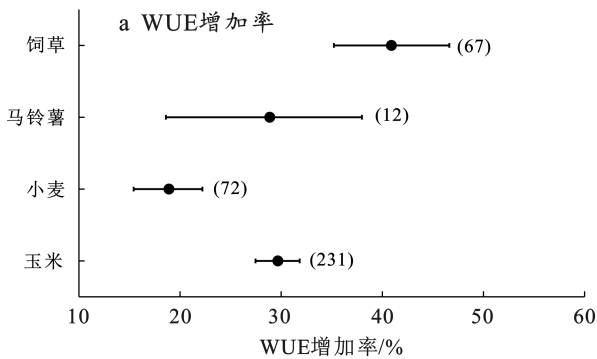
$$\omega_i^* = \frac{1}{(V_i + i^2)} \quad (4)$$

式中: $\ln R'$ 为加权后的综合效应值; ω_i^* 为随机效应模型中单个研究的权重; R_i 为第 i 对数据对的效应值; k 为组中的比较数; V_i 表示单个研究之内的变异; i^2 表示随机效应模型研究间方差,使用公式(5)计算。

$$\tau^2 = \frac{Q_t - (k-1)}{\sum_{i=1}^k \omega_i - \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i^2}{\sum_{i=1}^k \omega_i}} \quad (5)$$

其中,

$$Q_t = \sum_{i=1}^k \omega_i (R_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k \omega_i R_i)^2}{\sum_{i=1}^k \omega_i} \quad (6)$$



$$\omega_i = 1/v_i \quad (7)$$

式中: ω_i 为固定效应模型单个研究的权重; V_i 表示单个研究之内的变异; k 为组中的比较数; R_i 为单个研究的效应值。

为便于分析影响程度,一般使用相对变化率 Y 来表示结果。

$$Y = (\ln R - 1) \times 100\% \quad (5)$$

所有数据在 Metawin 软件中通过随机效应模型计算相对变化率以及 95% 置信区间,当 Y 的 95% 置信区间与 0 重叠时,表明垄沟种植与传统平作之间的差异不显著;当不与 0 重叠时,则表明垄沟种植和传统平作之间的差异显著。

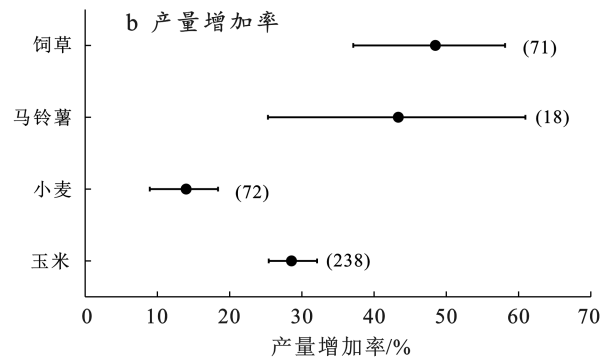
1.4 数据处理

本研究使用 MetaWin 2.1 软件进行 Meta 分析,用 ArcGIS 10.8 对采样点分布数据进行可视化处理,用 SPSS 方差分析中的 LSD 法进行显著性检验,用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 垄沟集雨种植对不同作物 WUE 和产量的影响

从图 1 可以看出,垄沟集雨种植下不同作物的 WUE 和产量均有显著提高 ($p < 0.05$)。与平作相比,垄沟种植对饲草的 WUE (40.9%) 和产量 (48.49%) 提升效果最好;其次是马铃薯 (29.67%, 43.36%), 玉米 (28.87%, 28.57%), 小麦 (18.91%, 13.99%)。



注:①误差条代表 95% 的置信区间。②比较次数显示在误差条旁边。③ p 值在 0.05 水平进行检验。下同。

图 1 垄沟集雨种植对不同作物水分利用效率和产量的影响

Fig.1 Impact of ridge-furrow rainwater harvesting on water use efficiency and yield of different crops

2.2 不同垄沟比对作物 WUE 和产量的影响

与平作相比,垄沟集雨种植下作物 WUE 和产量提高显著 ($p < 0.05$), 分别为 29.61%, 30.66%, 但不同垄沟比之间存在差异,随着垄沟比的增大,垄沟集雨种植对作物 WUE 和产量的增产效果都呈现先减小后增大的趋势(图 2)。与平作相比, $R/F > 1$, $R/F < 1$, $R/F = 1$ 分别使作物 WUE 提高了 34.9%,

32.4%, 27.48% (图 2a)。在 3 种垄沟比中, $R/F > 1$ 增产效果最好,为 39.94%, 其次为 $R/F < 1$, 34.93%, 最后是 $R/F = 1$, 为 25.98% (图 2b)。

2.3 气候因素对作物 WUE 和产量的影响

从图 3 可以看出在不同垄沟比下,年平均降水量显著提高了作物 WUE 和产量 ($p < 0.05$)。在年平均降水量 < 400 mm 区域, $R/F < 1$ 对作物 WUE 提高

最大,为 50.65%;在年平均降水量在 400~600 mm 区域, $R/F>1$ 对作物 WUE 提升效果最好;年平均降水量 >600 mm 区域, $R/F<1$ 对作物 WUE 提高最大(图 3a)。随着年平均降水量的增大,垄沟集雨种植对作物产量的提高效果逐渐降低,年平均降水量 <400 mm 区域,垄沟种植增产效果最好(图 3b),越干旱区域,增产效果越明显。

不同的垄沟比下,作物产量受年平均温度影响显著($p<0.05$),但 $R/F>1$ 和 $R/F<1$ 时年平均温度对作物水分利用效率无显著影响($p>0.05$),当 $R/F=1$ 时,随着年平均温度的升高垄沟集雨种植对作物 WUE 的增加率在减少(图 3c)。在不同垄沟比下,随着年平均温度升高,作物增产效果逐渐降低,在年平均温度 <8 °C 时,垄沟种植对作物产量提升最大(图 3d)。

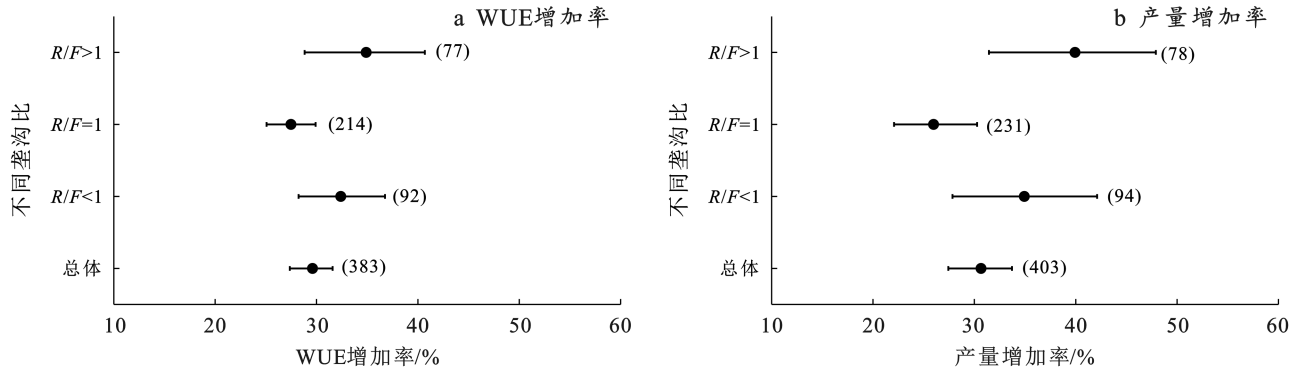


图 2 不同垄沟比对作物水分利用效率和产量的影响

Fig.2 Impact of different ridge-furrow ratios on crop water use efficiency and yield

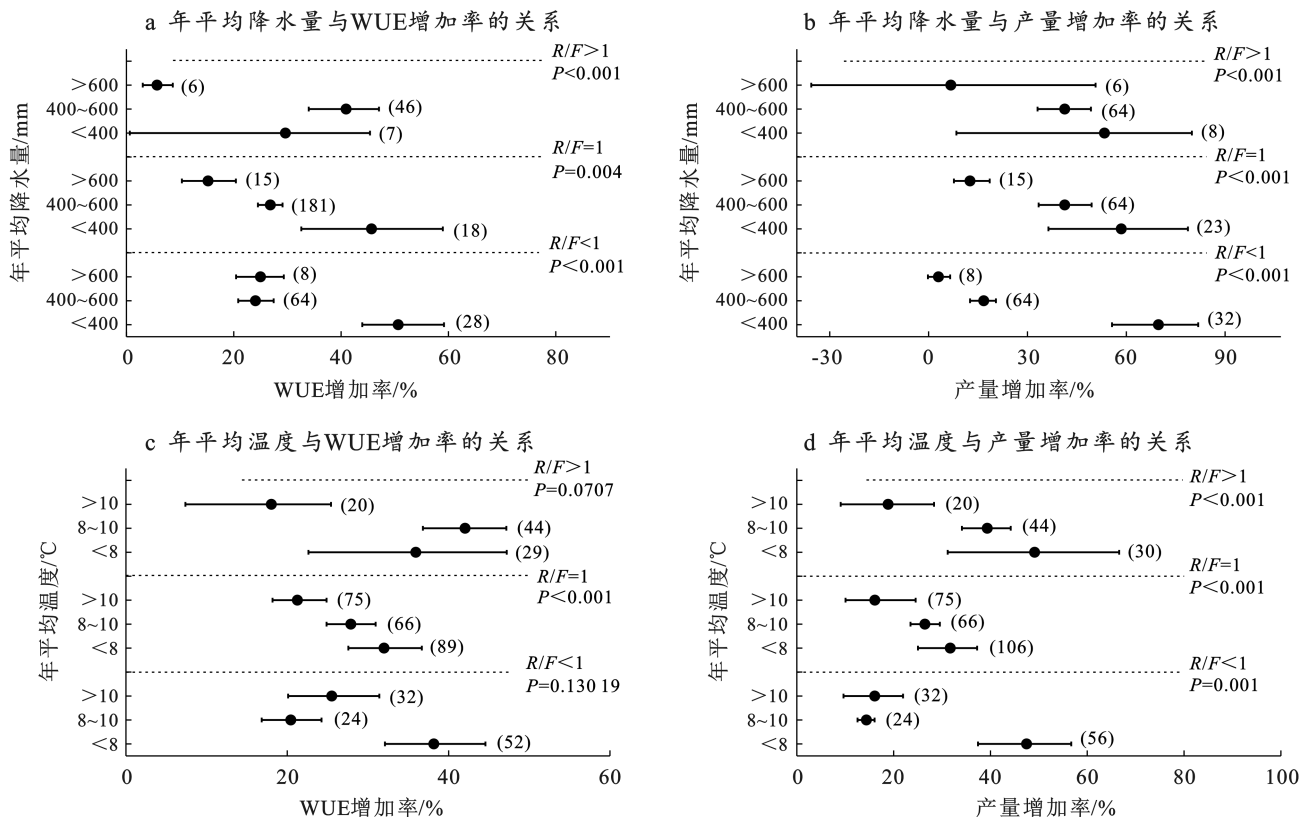


图 3 不同年平均降水量和年平均温度下不同垄沟比对水分利用效率、作物产量的影响

Fig.3 Impact of different ridge-furrow ratios on water use efficiency (a, c) and crop yield (b, d) under varying annual average precipitation and annual average temperature

2.4 土壤因素对作物 WUE 和产量的影响

从图 4 可以看出,不同垄沟比下作物 WUE 同样受土壤因素影响。但土壤容重对 $R/F<1$ 和 $R/F>1$ 时

作物 WUE 影响不显著,当 $R/F=1$ 时,随着土壤容重的增加,垄沟集雨种植下作物产量增加率先增大后减小(图 4a)。随着土壤中 TN 含量的增加,3 种垄沟比

下作物 WUE 增加率呈现先减小后增大的趋势(图 4b)。土壤中 TP 含量对 $R/F < 1$ 下作物 WUE 无显著影响, 当 $R/F = 1$ 时, 作物 WUE 提高效果随着 TP 含量增加而增加(图 4c)。土壤中 AN, AP 含量对 $R/F < 1$ 时作物 WUE 提升效果影响不显著, 当 R/F

$= 1$ 时, 作物 WUE 增产效果随着 AN, AP 含量增加而降低, 但当 $R/F > 1$ 时, 随着土壤中 AN, AP 含量增加, 作物 WUE 增加率也随之变大(图 4d, 4e)。随着土壤中 AK 含量增加, 垄沟集雨种植对作物 WUE 提升效果也逐渐增大(图 4f)。

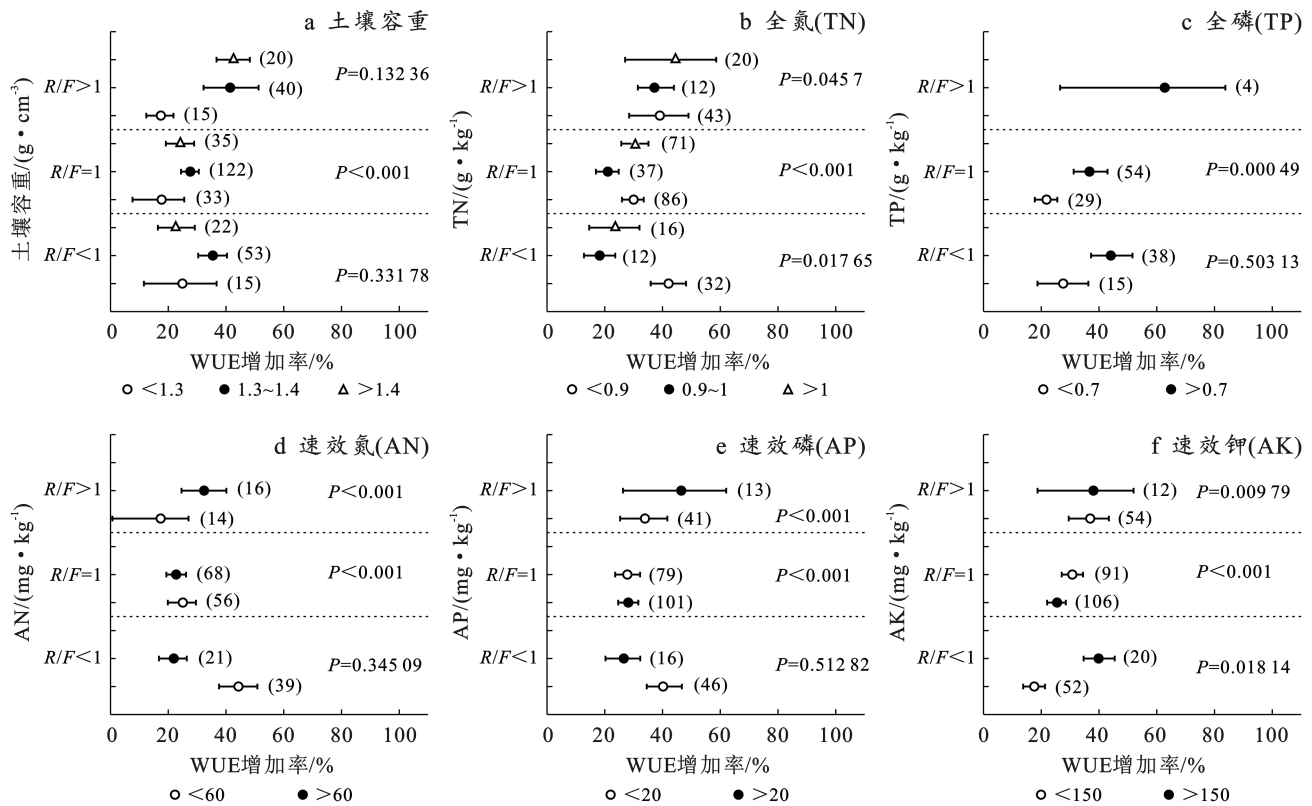


图 4 不同土壤因素〔土壤容重, 全氮(TN), 全磷(TP), 速效氮(AN), 速效磷(AP), 速效钾(AK)]下不同垄沟比作物 WUE 增加率的影响

Fig.4 Impact of different ridge-furrow ratios on increase rate of crop water use efficiency (WUE) under various soil factors (soil bulk density, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK))

从图 5 可以看出, 土壤因素显著影响垄沟种植对作物产量的提升效果($p < 0.001$)。当 $R/F < 1$ 时, 随着土壤容重的增加, 垄沟集雨种植下作物产量增加率先减小后增大; 当 $R/F = 1$ 时, 作物产量随着土壤容重的增加而增加; 当 $R/F > 1$ 时, 随着土壤容重的增加, 垄沟集雨种植下作物产量增加率先增大后减小(图 5a)。 $R/F < 1$ 时土壤中 TN 含量对于作物产量影响不显著。随着土壤中 TN 含量的增加, $R/F = 1$, $R/F > 1$ 时作物产量增加率呈现先减少后增大的趋势(图 5b)。 垄沟集雨种植对作物的增产效果随着 TP 含量增加而提高(图 5c)。在 $R/F < 1$ 和 $R/F = 1$ 下, 作物产量随着 AN, AP 含量增加而减少, 但当 $R/F > 1$ 时, 随着土壤中 AN, AP 含量增加, 作物产量增加率也随之变大(图 5d, 5e)。随着土壤中 AK 含

量增加, 3 种垄沟比下作物产量也逐渐增大(图 5f)。

2.5 人为管理对作物 WUE 和产量的影响

图 6 表明 3 种垄沟比下肥料的施用量对 WUE 和作物产量有显著影响($p < 0.05$)。当 $R/F = 1$ 时, 随着氮肥施用量的增加, 作物 WUE 增加率先增加后降低, 但当 $R/F > 1$ 时, 作物 WUE 增加率却随着氮肥施用量的增加而降低(图 6a)。随着氮肥施用量的增加作物产量增产效果先降低后增加, 在氮肥施用量为低肥($0 \sim 150 \text{ kg/hm}$)时作物增产效果最好(图 6b), 随着磷肥施用量的增加, 当 $R/F < 1$ 时, 作物 WUE 增加率先减少后增大, 当 $R/F > 1$ 和 $R/F = 1$ 时作物 WUE 增加率逐渐降低(图 6c)。在 $R/F < 1$ 和 $R/F = 1$ 时, 随着磷肥(P_2O_5)施用量的增加作物产量增加率却逐渐降低(图 6d)。

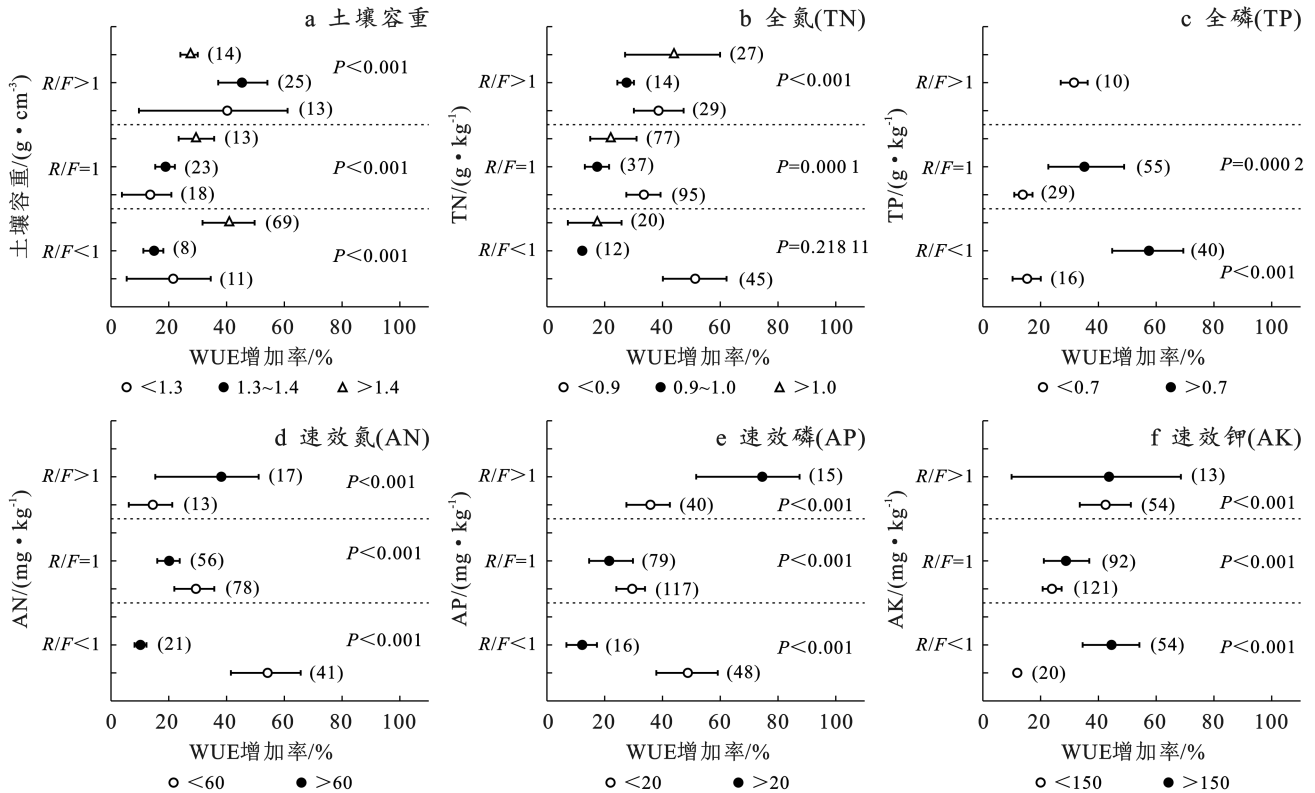


图 5 不同土壤因素〔土壤容重,全氮(TN),全磷(TP),速效氮(AN),速效磷(AP),速效钾(AK)]下不同垄沟比对照作物产量增加率的影响
 Fig.5 Impact of different ridge-furrow ratios on increase rate of crop yield under various soil factors [soil bulk density, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK)]

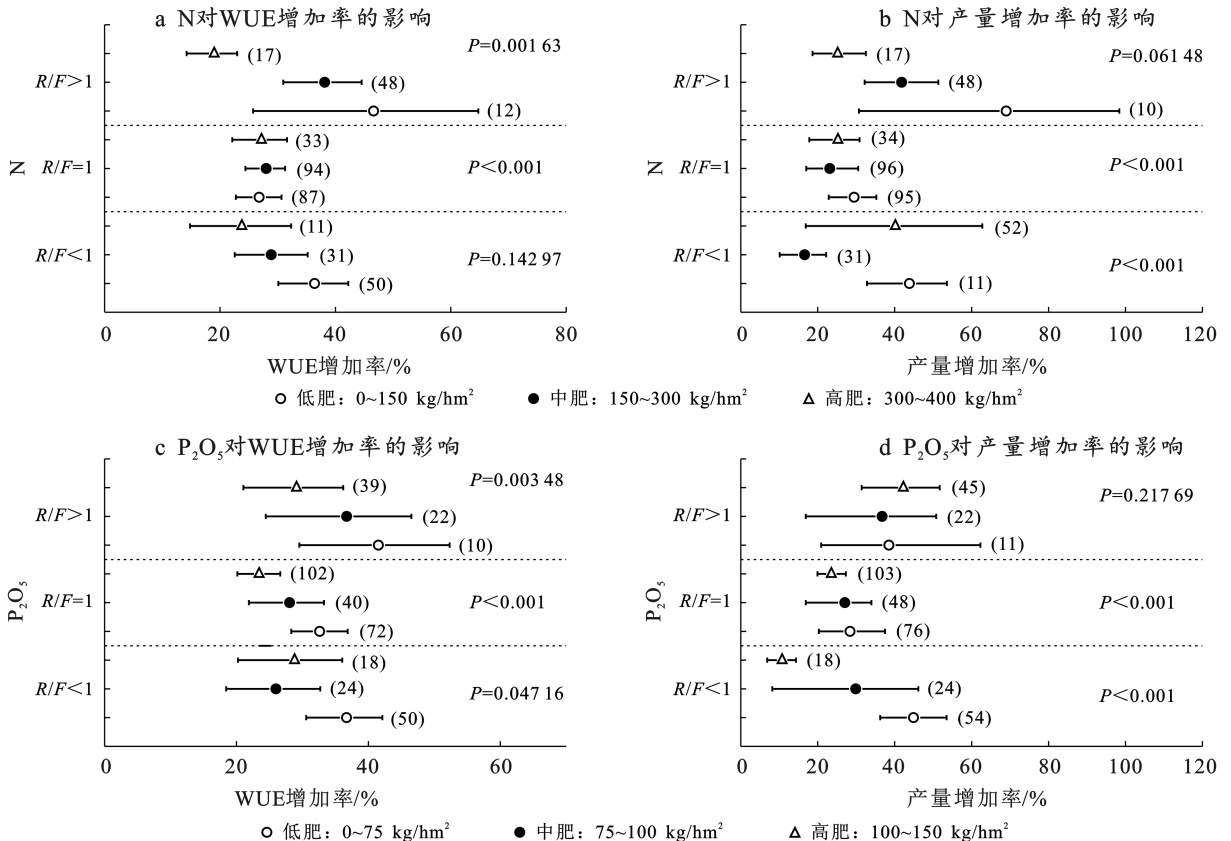


图 6 不同施肥量下不同垄沟比对照水分利用效率 (a,c)和作物产量 (b,d)的影响
 Fig.6 Impact of different ridge-furrow ratios on water use efficiency (a, c) and crop yield (b, d) under various fertilizer application rates

从图 7 可以看出, 垄沟集雨种植显著提高了不同作物的产量和 WUE ($p < 0.05$)。对于作物的 WUE 而言, 当 $R/F > 1$ 时玉米的 WUE 提升效果最好, 为 43.71%; 当 $R/F = 1$ 时垄沟种植对马铃薯的 WUE 提高最大, 为 56.2%; 当 $R/F < 1$ 时饲草的 WUE 增

加率最大, 为 41.89% (图 7a)。当 $R/F > 1$ 和 $R/F = 1$ 时, 垄沟集雨种植对饲草的产量提升效果最好, 对小麦产量提升最少, 但当 $R/F < 1$ 时, 马铃薯的增产效果最好, 为 91.98% (图 7b)。玉米在 $R/F > 1$ 时, 增产效果最佳。

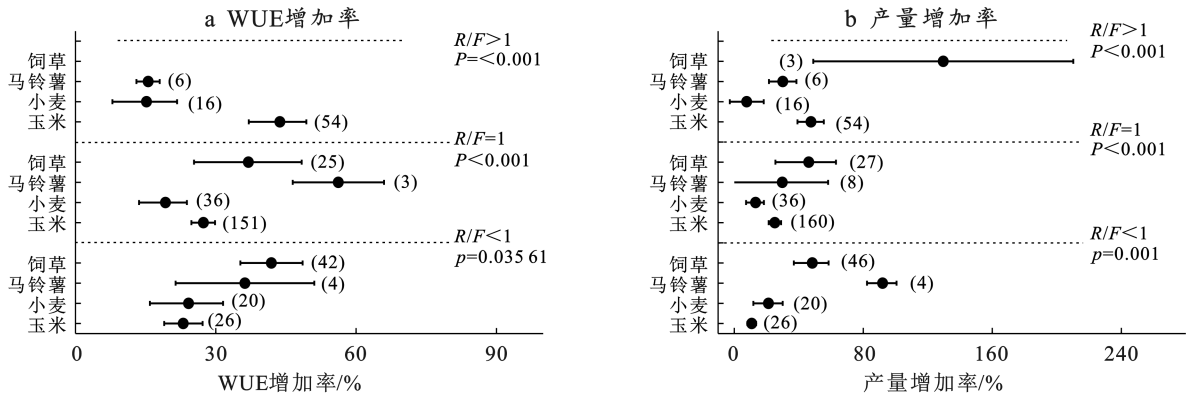


图 7 不同作物类型下不同垄沟比对作物水分利用效率 (a) 和产量 (b) 的影响 (%)

Fig.7 Impact of different ridge-furrow ratios on crop water use efficiency (a) and yield (b) across various crop types

3 讨论

3.1 垄沟集雨种植对不同作物 WUE 和产量的影响

在本研究中, 采用垄沟集雨措施后, 不同作物 WUE 和产量与平作相比均有显著提高, 这与已有的研究结果一致^[12,30]。相比于马铃薯、玉米和小麦, 在垄沟种植措施下, 饲草的 WUE 和产量提升最大, 这可能是由于饲草与粮食作物具有不同的根系吸水参数^[31], 并且饲草的根系在土壤中分布更加广泛^[32], 可以充分利用垄沟收集的雨水和深层土壤层的水分, 因此饲草产量提升最大。

本研究的分析结果表明随着垄沟比的增大不同作物 WUE 和产量的提升效果先降低后升高。这种差异是由于各地降雨量以及垄沟种植土壤表面积变化造成的^[12]。在一些半湿润或潮湿地区, $R/F < 1$ 有利于培育作物根系和扩大土壤水分可用空间^[33], 改善作物内部的通风光照条件, 提高作物对于自然资源的利用效率, 因此相比于 $R/F = 1$ 增产效果更好^[12]。然而, 在降水稀少的地区, 采用 $R/F > 1$ 的垄沟种植方法非常有效^[34], 这是由于较高的垄沟比会增大产生径流的土壤表面积, 并形成更窄的种植沟收集雨水, 这改善了土壤水分的入渗深度, 降低了土壤蒸发, 增加了土壤保水性^[35]。

3.2 气候因素对作物 WUE 和产量的影响

本研究的结果显示随着年平均降雨量和年平均温度的升高, 垄沟种植增产效果呈下降趋势, 这与张光鑫^[12]、Wang Yunqi 等^[36]研究一致。这是由于在干

旱半干旱地区, 长期干旱和降雨不稳定是雨养农业区作物歉收的主要制约因素。垄沟集雨种植可以充分利用田间的微量和无效降水^[12] 增加土壤含水量。此外, 垄沟集雨种植可以有效提高土壤温度^[18]。提高作物出苗率, 促进种子快速萌发和幼苗生长^[34], 以及促进根系发育^[18,35]。而在气候相对温和但仍不满足作物生长的地区, $R/F < 1$ 可以通过增加作物种植面积, 调整株间距, 从而避免作物地上冠层过度拥挤, 优化作物光能利用效率, 提高作物的产量^[10]。

3.3 土壤因素对作物 WUE 和产量的影响

张光鑫^[12]对黄土高原雨养农业区作物进行 Meta 分析发现垄沟集雨种植增产效果随土壤容重增加呈下降趋势, 但我们的荟萃分析结果显示在 $R/F < 1$ 和 $R/F = 1$ 时, 随着土壤容重的增加, 垄沟种植对产量的提升效果逐渐增大。目前有研究表明, 无论土壤质地如何, 土壤容重增加并不总是限制植物生长, 反而有可能提高作物产量^[37], 当土壤容重大于 1.6 g/cm^3 才会更倾向于抑制根系生长^[37]。这是由于不同植物对土壤容重的敏感性不同, 饲草、玉米、大麦和水稻在压实土壤中根系吸水速率会提高^[38], 并且 $R/F < 1$ 和 $R/F = 1$ 提供了更大的根系与土壤接触面积, 这可能促进了作物对水分和养分的吸收, 从而提高了垄沟种植的增产效果。此外, 研究结果表明随着土壤中 AN, AP 含量增加, 垄沟种植对作物产量增产效果呈现下降趋势。这是由于土壤 N 和 P 的供应在短期内由土壤 AN 和 AP 含量决定, 并会对作物产量产生显著影响^[39]。当土壤中 AN 和 AP 含量高时, 垄沟种植

对作物的增产效果会减弱。这也证明了垄沟种植在土壤肥力低的地区更有效^[12]。

3.4 人为管理对作物 WUE 和产量的影响

我们的研究结果显示人为管理,特别是施肥显著影响作物 WUE 和产量。氮肥施用量 150 kg/hm^2 , 磷肥施用量 75 kg/hm^2 以下时作物 WUE 和产量提升最高。这是由于施肥虽然同时提高了养分有效性和水分可用性^[40],但高氮肥和高磷肥投入也可能会发生拮抗作用,加剧干旱胁迫^[18],从而降低垄沟种植对作物 WUE 和产量的增产效果^[41]。因此,我们需要控制肥料施用量,从而使作物产量最大化。垄沟集雨种植对于不同作物 WUE 和产量影响不同。 $R/F > 1$ 时玉米和饲草的产量优势更明显,这可能是由于玉米和饲草对水分和温度的需求较高,并且在饲草、玉米生长期 $R/F > 1$ 可以收集更多降水,从而提高作物产量^[42]。相比之下,小麦在 $R/F < 1$ 时增产效果最好,原因可解释为其籽粒产量受种植面积影响较大。当播种密度不变时, $R/F < 1$ 提供了更大的种植面积,因此在 $R/F < 1$ 时小麦产量增加最高^[12]。马铃薯也在 $R/F < 1$ 时产量提升最大,与 Yuan Tian 等^[43] 的研究结果一致,这可能是由于 $R/F > 1$ 使马铃薯生长期土壤温度上升到最佳水平以上,限制了马铃薯的生长。

4 结论

结果表明,垄沟种植与传统平作相比显著提高了作物 WUE 和产量,且不同垄沟比间存在明显差异,3 种垄沟比中 $R/F > 1$ 增产效果最好。气候因素、土壤容重等土壤理化因素是影响垄沟种植增产效果的主要驱动因子。最佳垄沟比的确定应根据当地的气候条件和种植作物类型。施肥显著影响垄沟集雨种植系统的增产效果。随着田间施肥量的增加,垄沟种植的增产效果呈下降趋势,建议氮肥施用量 150 kg/hm ,磷肥施用量 75 kg/hm 以下。环境变化会影响垄沟种植的增产效果,因此,应及时调整垄沟配置,从而最大程度提高垄沟种植的增产效果。本研究定量分析了垄沟集雨种植高、中、低 3 种垄沟比及其主要驱动因子对不同作物 WUE 和产量的影响,为中国北方干旱、半干旱雨养农业区垄沟集雨种植技术的推广提供了数据支撑。

参考文献 (References)

[1] Li Lingling, Zhang Renzhi, Luo Zhuzhu, et al. Evolution of soil and water conservation in rain-fed areas of China [J]. *International Soil and Water Conservation*

Research, 2014,2(1):78-90.

- [2] Firoozzare A, Saghaian S, Bahraseman S E, et al. Identifying the best strategies for improving and developing sustainable rain-fed agriculture: An integrated SWOT-BWM-WASPAS approach [J]. *Agriculture*, 2023, 13(6):1215.
- [3] Cao Yuxin, Cai Huanjie, Sun Shikun, et al. Effects of drip irrigation methods on yield and water productivity of maize in Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022,259:107227.
- [4] Mo Yan, Li Guangyong, Wang Dan. A sowing method for subsurface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn [J]. *Agricultural Water Management*, 2017,179:288-295.
- [5] Payero J O, Tarkalson D D, Irmak S, et al. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate [J]. *Agricultural Water Management*, 2008,95(8):895-908.
- [6] Cai Xueliang, Molden David, Mainuddin Mohammed, et al. Producing more food with less water in a changing world: Assessment of water productivity in 10 major river basins [J]. *Water International*, 2011, 36(1): 42-62.
- [7] Li Rong, Hou Xianqing, Jia Zhikuan, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013,116:101-109.
- [8] Liu Yang, Zhang Xueling, Xi Luoyan, et al. Ridge-furrow planting promotes wheat grain yield and water productivity in the irrigated sub-humid region of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 105935.
- [9] Ren Xiaolong, Zhang Peng, Chen Xiaoli, et al. Effect of different mulches under rainfall concentration system on corn production in the semi-arid areas of the Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2016,6:19019.
- [10] Zhang Guangxin, Mo Fei, Shah F, et al. Ridge-furrow configuration significantly improves soil water availability, crop water use efficiency, and grain yield in dryland agroecosystems of the Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,245:106657.
- [11] 张登奎,王琦.垄沟集雨覆盖种植对土壤水分特征及红花草生长特性的影响[J].*草原与草坪*,2019,39(3):26-34.
- Zhang Dengkui, Wang Qi. Effects of ridge-furrow rainfall harvesting with ridge mulching on soil moisture condition and growth characteristics of sainfoin [J]. *Grassland and Turf*, 2019,39(3):26-34.

- [12] 张光鑫. 垄沟比和施氮量对黄土高原雨养春玉米产量的影响及其生理生态机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Zhang Guangxin. Effects of ridge-furrow ratio and nitrogen application rate on the yield of rain-fed spring maize and its physiological and ecological mechanism in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022.
- [13] 冯良山, 孙占祥, 肖继兵, 等. 不同微集水方式在不同降水年型对玉米产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(1): 50-55.
Feng Liangshan, Sun Zhanxiang, Xiao Jibing, et al. Effect of different soil micro-catchment pattern on maize yields in different precipitation years [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(1): 50-55.
- [14] 高亚军, 杨君林, 陈玲, 等. 旱地冬小麦不同栽培模式、施氮量和种植密度土壤水分利用状况[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 45-50.
Gao Yajun, Yang Junlin, Chen Ling, et al. Effect of cultivation methods, N fertilizer rate and winter wheat planting density on soil water utilization in dryland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(3): 45-50.
- [15] 李婷. 覆膜、施氮和密度对旱地玉米产量和水氮利用效率的互作效应[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Li Ting. Interaction effects of film mulching, nitrogen rate and plant density on grain yield, water and nitrogen use efficiency of spring maize under dryland system [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018.
- [16] 李方剑. 半干旱区集雨种植垄沟带型和氮肥分施对玉米水氮利用的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
Li Fangjian. Effects of ridge-furrow planting and nitrogen fertilizer application on water and nitrogen utilization of maize in semi-arid area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2020.
- [17] Liu Xiaoli, Wang Yandong, Yan Xiaoqun, et al. Appropriate ridge-furrow ratio can enhance crop production and resource use efficiency by improving soil moisture and thermal condition in a semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106289.
- [18] Li Weiwei, Xiong Li, Wang Changjiang, et al. Optimized ridge-furrow with plastic film mulching system to use precipitation efficiently for winter wheat production in dry semi-humid areas [J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 211-221.
- [19] Zhang Guangxin, Hou Yuting, Zhang Houping, et al. Optimizing planting pattern and nitrogen application rate improves grain yield and water use efficiency for rain-fed spring maize by promoting root growth and reducing redundant root growth [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105385.
- [20] Jia Qianmin, Xu Ranran, Chang Shenghua, et al. Planting practices with nutrient strategies to improve productivity of rain-fed corn and resource use efficiency in semi-arid regions [J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105879.
- [21] Li Chunxia, Li Yuyi, Li Youjun, et al. Cultivation techniques and nutrient management strategies to improve productivity of rain-fed maize in semi-arid regions [J]. Agricultural Water Management, 2018, 210: 149-157.
- [22] Zhang Yan, Liu Donghua, Jia Zhikuan, et al. Ridge and furrow rainfall harvesting can significantly reduce N₂O emissions from spring maize fields in semiarid regions of China [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104971.
- [23] Xue Gang, Liu Huabing, Peng Yufu, et al. Plastic film mulching combined with nutrient management to improve water use efficiency, production of rain-fed maize and economic returns in semi-arid regions [J]. Field Crops Research, 2019, 231: 30-39.
- [24] Fang Heng, Li Yuannong, Gu Xiaobo, et al. Optimizing the impact of film mulching pattern and nitrogen application rate on maize production, gaseous N emissions, and utilization of water and nitrogen in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 261: 107350.
- [25] van Groenigen K J, Osenberg C W, Hungate B A. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂ [J]. Nature, 2011, 475(7355): 214-216.
- [26] Wang Lifang, Chen Juan, Shangguan Zhouping. Yield responses of wheat to mulching practices in dryland farming on the Loess Plateau [J]. PLoS One, 2015, 10(5): e0127402.
- [27] Wang Yunqi, Zhang Yinghua, Zhou Shunli, et al. Meta-analysis of no-tillage effect on wheat and maize water use efficiency in China [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 635: 1372-1382.
- [28] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.
Meng Meng, Ni Jian, Zhang Zhiguo. Aridity index and its applications in geo-ecological study [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(6): 853-861.
- [29] Zhang Yan, Ma Qian, Liu Donghua, et al. Effects of different fertilizer strategies on soil water utilization and maize yield in the ridge and furrow rainfall harvesting

- system in semiarid regions of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018,208:414-421.
- [30] Zhang Shulan, Li Pingru, Yang Xueyun, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011,112(1):92-97.
- [31] Ge Jiamin, Fan Jun, Yuan Hongyou, et al. Soil water depletion and restoration under inter-conversion of food crop and alfalfa with three consecutive wet years [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585.
- [32] Huang Ze, Liu Yu, Cui Zeng, et al. Soil water storage deficit of alfalfa (*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China) [J]. *Field Crops Research*, 2018,221:1-6.
- [33] Li Xianglin, Su Derong, Yuan Qinghua. Ridge-furrow planting of alfalfa (*Medicago sativa* L.) for improved rainwater harvest in rainfed semiarid areas in Northwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,93(1):117-125.
- [34] Li Weiwei, Zhuang Qianlai, Wu Wei, et al. Effects of ridge-furrow mulching on soil CO₂ efflux in a maize field in the Chinese Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,264:200-212.
- [35] Wang Qi, Song Xingyang, Li Fuchun, et al. Optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-mulching material for alfalfa production in rainwater harvesting in semiarid regions of China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 180:186-196.
- [36] Wang Yunqi, Gao Fuli, Wang Lixin, et al. Crop yield and soil organic carbon under ridge-furrow cultivation in China: A meta-analysis [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(10):2978-2991.
- [37] Guimaraes Silva J F, de Souza Linhares A J, Goncalves W G, et al. Are the yield of sunflower and *Paspalum paspalodesgrass* biomass influenced by soil physical quality? [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 208.
- [38] Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth [J]. *Geoderma*, 2003,116(1/2):107-136.
- [39] Tian Shenzhong, Dong Xiaoxia, Guo Honghai, et al. Key soil nutrient requirements for different yield levels in North China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019,65(5):519-524.
- [40] Li Shengxiu, Wang Zhaohui, Malhi S S, et al. Chapter 7 nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China [M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2009:223-265.
- [41] Shi Jiao, Zhou Huaiping, Xu Minggang, et al. Fertilization highly increased the water use efficiency of spring maize in dryland of Northern China: A Meta-Analysis [J]. *Agronomy Basel*, 2023,13(5).
- [42] Zhang Shaohui, Wang Haidong, Sun Xin, et al. Effects of farming practices on yield and crop water productivity of wheat, maize and potato in China: A meta-analysis [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,243:106444.
- [43] YuanTian, Su Derong, Li Fengmin, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas [J]. *Field Crops Research*, 2003,84(3):385-391.

(上接第 179 页)

- [19] 刘利花,杨彬如.中国省域耕地生态补偿研究[J].*中国人口·资源与环境*,2019,29(2):52-62.
Liu Lihua, Yang Binru. Research on ecological compensation of provincial cultivated land in China [J]. *China population, resources and environment*, 2019,29(2):52-62.
- [20] 刘某承,李文华.基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J].*生态与农村环境学报*,2010,26(5):401-406.
Liu Moucheng, Li Wenhua. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010,26(5):401-406.
- [21] 李明琦,刘世梁,武雪,等.云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素[J].*生态学报*,2018,38(24):8822-8834.
Li Mingqi, Liu Shiliang, Wu Xue, et al. Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(24):8822-8834.