



刘丽平, 张克寒, 佟玲, 王素芬, 戴永辉. Meta分析滴灌灌溉量及品种对玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(01): 1-13.
LIU Liping, ZHANG Kehan, TONG Ling, WANG Sufen, DAI Yonghui. Effects of different irrigation amounts and maize varieties on the yield of maize and water use efficiency: A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 1-13.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.01

Meta分析滴灌灌溉量及品种对玉米产量和水分利用效率的影响

刘丽平^{1,2} 张克寒^{1,2} 佟玲^{1,2*} 王素芬^{1,2} 戴永辉^{1,2}

(1. 中国农业大学 农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083;
2. 甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站, 甘肃 武威 733009)

摘要 为探究我国北方地区滴灌条件下不同灌溉量及品种对玉米产量及水分利用效率的影响, 通过检索中国知网、万方数据知识服务平台和 Web of Science 等数据库, 收集 2000 年 1 月—2022 年 6 月公开发表的相关文献 74 篇, 提取 449 组产量数据和 453 组水分利用效率(WUE)数据, 对收集数据进行整合, 设置最大灌溉量 $\leq 50\%$ (W_1)、 $> 50\% \sim 60\%$ (W_2)、 $> 60\% \sim 70\%$ (W_3)、 $> 70\% \sim 80\%$ (W_4)、 $> 80\% \sim 90\%$ (W_5) 5 个亏缺灌溉处理组, 以最大灌溉量的 $> 90\% \sim 100\%$ 作为对照(W_6), 采用 Meta 分析方法定量分析不同灌溉量(W)和品种对玉米产量和 WUE 等指标的影响。结果表明: 与 W_6 相比, W_4 和 W_5 均可显著提升玉米的产量和水分利用效率(WUE), 分别提升 8.2%~15.2% 和 11.7%~16.5%; 当灌溉量为 W_3 时可维持玉米的产量且极大地提升了 WUE, 其效应值(SMD)分别为 0.12 和 0.89 ($P < 0.05$); 但当灌溉量为 W_1 和 W_2 时, 产量的 SMD 在 $-0.22 \sim 0.83$ 和 ($P < 0.05$), WUE 的 SMD 在 $-0.41 \sim 0.04$ ($P < 0.05$), 与 W_6 相比, 产量和 WUE 都出现显著下降。此外, 不同灌溉量下不同玉米品种对产量和 WUE 的影响不同, 综合考虑产量和 WUE, 对于‘西蒙 6’‘咸科 858’和‘先玉 1331’等水分较为敏感的品种, 建议采用轻度亏缺灌溉 W_4 和 W_5 处理; 而对于‘农华 101’‘中单 909’等具有一定抗旱性的品种可以进行中度亏缺灌溉处理(W_3); 对于‘均隆 1217’‘先玉 335’等抗旱性较强的品种, 则可以按照 W_1 和 W_2 进行灌溉; 最大限度提升 WUE。综上, 建议北方地区玉米生产采用最大灌溉量 $> 70\% \sim 90\%$ 的亏缺灌溉模式, 能够显著提高玉米产量和水分利用效率。

关键词 Meta 分析; 灌溉量; 品种; 产量; 水分利用效率; 亏缺灌溉

中图分类号 S507.1

文章编号 1007-4333(2025)01-0001-13

文献标志码 A

Effects of different irrigation amounts and maize varieties on the yield of maize and water use efficiency: A meta-analysis

LIU Liping^{1,2}, ZHANG Kehan^{1,2}, TONG Ling^{1,2*}, WANG Sufen^{1,2}, DAI Yonghui^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. National Field Scientific Observatory for Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province, Wuwei 733009, China)

Abstract To investigate the effects of different irrigation amounts and varieties on maize yield and Water Use Efficiency (WUE) under drip irrigation conditions in northern China, we searched relevant literature published from January 2000 to June 2022 in CNKI, Wanfang Data Knowledge Service Platform, and Web of Science. A total of 74 publications were collected, from which 449 sets of yield data and 453 sets of WUE

收稿日期: 2024-07-07

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFD1900401)

第一作者: 刘丽平(ORCID:0009-0009-5533-6234), 博士研究生, E-mail: 3188384086@qq.com

通讯作者: 佟玲(ORCID:0000-0003-2672-603X), 教授, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: tongling2001@cau.edu.cn

data were extracted. The collected data were then integrated. Taking 90% to 100% of the maximum irrigation amount as the control (W_6), five different deficit irrigation treatments were set as follows: the maximum irrigation $\leq 50\%$ (W_1), $>50\%-60\%$ (W_2), $>60\%-70\%$ (W_3), $>70\%-80\%$ (W_4), and $>80\%-90\%$ (W_5). A meta-analysis method was employed to quantitatively analyze the changes in maize yield and WUE indicators among different irrigation amounts (W) and varieties under drip irrigation. The results indicated that: Compared to the control W_6 , the moderate deficit irrigation levels W_4 and W_5 significantly increased maize yield and WUE by 8.2%-15.2% and 11.7%-16.5%, respectively. When the irrigation was at W_3 , WUE was greatly improved while maintaining maize yield, with the effect values (SMD)=0.12 and =0.89 ($P < 0.05$), respectively. However, at the irrigation levels W_1 and W_2 , both yield and WUE declined significantly compared to W_6 , with yield SMD= -0.22-0.83 ($P < 0.05$) and WUE SMD= -0.41-0.04 ($P < 0.05$), respectively. In addition, the effects of different maize varieties on yield and water use efficiency under different irrigation rates were different. Considering the yield and WUE, the light deficit irrigations W_4 and W_5 are recommended for the more water sensitive varieties such as 'Simon 6', 'Hamco 858' and 'Siena 1331'. For varieties with some drought resistance such as 'Nonghua 101' and 'Zhongdan 909', the medium deficit irrigation W_3 is recommended; for varieties with strong drought resistance, such as 'Junlong 1217' and 'Xianyu 335', they can be irrigated at W_1 and W_2 to maximize water productivity. In conclusion, it is suggested that a deficit irrigation pattern with 70% to 90% of the maximum irrigation can significantly improve the maize yield and water use efficiency.

Keywords meta-analysis; irrigation amounts; varieties; yield; water use efficiency; deficit irrigation

北方地区是我国玉米的主要种植区域之一,也是我国重要的灌溉农业区^[1],科学合理的灌溉制度对促进玉米增产节水至关重要。灌溉量过低,不能满足作物生长发育的需求,进而导致作物减产;灌溉量过高,不仅提高了种植成本,还降低了水肥利用效率,且过多的氮淋溶会造成一系列环境问题。灌溉对我国粮食增产的直接贡献率为36.27%^[2]。此外,玉米品种的选择同样对产量和水分利用效率(WUE)有着重要的影响。不同品种的玉米在耐旱性、吸水能力以及对水肥的响应等方面均存在差异,这使得它们在相同的灌溉条件下可能表现出截然不同的生长状况和产量表现。因此,明确不同灌溉量及品种对玉米产量和水分利用效率的影响对发展高水效农业具有重要意义。

截至目前,国内外许多学者在各地区设置不同灌溉量和玉米品种,开展了一系列试验。罗迪汉等^[3]研究发现,随着滴灌灌溉量(W)的增加,玉米产量和水分利用效率呈现先增大后减小的趋势;相较于最大 W (360 m³/hm²)的处理,当 W 为300 m³/hm²时,玉米的产量和WUE均达到最高,分别升高7.09%和12.91%。但王增丽等^[4]研究表明,适度的亏水虽然可以提高玉米的WUE,但会使春玉米减产4.45%~20.99%。

其次,水分亏缺程度具体多少合适,其研究结果也不尽一致,张国强等^[5]研究表明,灌溉水平降低10%,不仅可以保证较高的产量和经济效益,还能提高4.61%~6.66%的WUE。而宁东峰等^[6]在华北平原的田间试验表明, W 减少23%,即可以保证玉米不减产,又可以减少温室气体排放和提高WUE。王卫杰等^[7]研究发现,相较于高水、中水和雨养处理,低水处理(50%充分滴灌量)可显著提升玉米的经济产量和WUE。此外,不同玉米品种的产量和WUE也有所差异,谷岩等^[8]针对吉林省20种玉米的产量和水分利用效率进行了系统分析,发现不同品种玉米的耗水量不一样,其中'良玉66'和'良玉99'的耗水量在465 mm以下,处于较低水平,且其籽粒产量和水分利用效率较高,推荐其在实际生产中种植。由于我国不同地区的气候、土壤条件不同,田间管理措施和作物品种不尽相同,使得滴灌技术对玉米生产的影响效果不同,带来的增产、节水、节肥效应也有很大的差异。因此,系统化地评价滴灌条件下不同灌溉量和品种对我国北方主要作物玉米增产、节水的效益评价显得尤为重要,这对于精准滴灌的发展具有重要的意义。

Meta-Analysis作为一种对不同试验或研究的

结果进行搜集、归纳整理以及分析的方法,主要目的是弥补单一试验的不足,可对研究结果进行综合、系统、量化的评价^[9]。Meta-Analysis在农业科学领域被广泛应用,用于评估各种农业管理措施的效果,包括施肥、灌溉和品种选择等,通过整合大量试验数据,揭示潜在的趋势和关系,为科学决策提供坚实的依据。然而,目前有关灌溉量和品种互作对于玉米产量与水分利用效率的定量关系的研究尚未见报道。本研究采用Meta-Analysis方法,对2000年1月—2022年6月的公开发表的相关文献数据进行整合,分析不同滴灌量对北方地区(西北、东北、华北)玉米的产量和水分利用效率的影响,旨在进一步明确灌溉量优化对促进玉米增产节水的技术效果,以期为北方地区玉米生产中制定适宜的灌溉策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

基于中国知网、百度学术、谷歌学术、万方数据知识服务平台以及Web of Science等学术平台,以“玉米&滴灌&产量”“玉米&滴灌&水分利用效率”“玉米&滴灌&品种”“玉米&滴灌&亏缺灌溉”“maize & drip irrigation & yield”“maize & drip irrigation & water use efficiency”“maize & drip irrigation & variety”“maize & drip irrigation & deficit irrigation”等为主题检索词,检索2000年1月—2022年6月发表的有关中国滴灌玉米产量、水分利用效率、品种等的文献,共927篇中文文献和964篇英文文献。筛选标准为:1)研究区域位于中国北方地区(西北、华北、东北),并明确其具体的地理位置;2)有对照处理的试验,即同一研究中须包含滴灌条件下不同滴灌量水平的对比处理或滴灌条件下不同品种的对比处理;3)文献须列出玉米相关处理的产量、水分利用效率的均值、标准差及重复次数(≥ 2),或者通过文字描述、图表形式得到均值及标准差;4)试验方式为大田试验,试验设计与田间管理措施等基本信息明确详细;5)剔除其他无关主题的因素(滴灌带布置、秸秆覆盖或施用生物炭等)的文献;6)剔除重复文献。基于以上标准对文献进行筛选,最终确定符合要求的文献共74篇,共449组产量数据和453组水分利用效率数据,试验地点分布见图1。

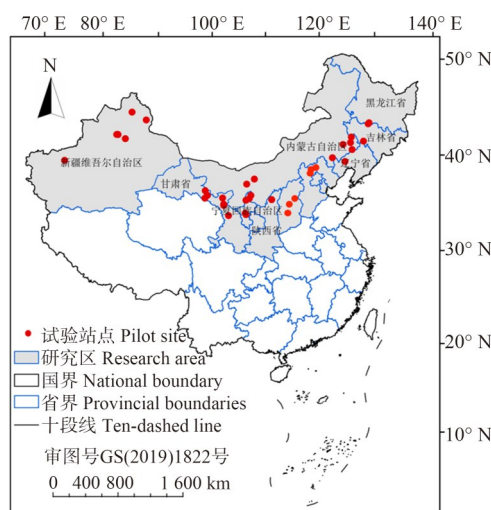


图1 试验地点分布图

Fig.1 Map of partial test sites

1.2 数据提取及分类

提取文献中的玉米灌溉量(W)、产量(Yield)、水分利用效率(WUE)等指标,搜集单一试验中试验和对照组的样本量、均值和标准差(SD)等数据信息并归纳整合(没有标准差的,按照均值的1/10进行计算)^[10-11],剔除异质性较大的数据或找到异质性较大的原因进一步分析。本研究数据资料是从原始文献中直接或间接获取,采用Getdata软件进行数据提取。

由于不同地区的气候、土壤等条件略有不同,直接使用灌溉量进行分组分析可能会引入偏差,因此将灌溉量等效为最大灌溉量的百分比,并进行分组分析。设置最大灌溉量 $\leq 50\%$ (W_1)、 $>50\% \sim 60\%$ (W_2)、 $>60\% \sim 70\%$ (W_3)、 $>70\% \sim 80\%$ (W_4)、 $>80\% \sim 90\%$ (W_5)5个亏缺灌溉处理,以最大灌溉量的 $>90\% \sim 100\%$ 作为对照(W_6)。

为降低灌溉量范围带来的异质性,纳入了玉米品种因素,检索并筛选文献,根据试验数据的收集情况, W_1 — W_6 灌溉量下分别以‘甘鑫630’‘利民33’‘新玉66’‘利民33’‘先锋32D22’‘翔玉998’品种作为产量指标的对照品种,以‘先玉1225’‘利民33’‘均隆1217’‘利民33’‘先玉1225’‘裕丰303’品种作为水分利用效率指标的对照品种。由于受限于试验数据的可获得性,在设定对照组时无法确保所有灌溉水平下均使用同一玉米品种作为对照。因此本研究通过了效应值的选取等统计手段,有效控制该因素对结果带来的差异,以确保分析结论的可

靠性和有效性。数据分组及样本见表1。

表1 数据分组及样本数

Table 1 Data groupings and sample sizes

影响因素 Influencing factor	产量 Yield	水分利用效率 Water use efficiency
灌溉量 Irrigation amount	266	430
品种 Variety	449	453

1.3 数据分析

效应值是量化现象强度的数值,效应值的选取对 Meta-Analysis 至关重要,Meta-Analysis 的效应值是比较对照与试验组最直接的参数^[12-15]。在农业领域,通常采用标准均值差(SMD)或均值差(MD)作为效应值,这是因为计算SMD和MD需要精确掌握每项研究的样本数量、均值以及标准差,以确保分析结果的准确性和可靠性。此外,SMD还能有效消除单位差异以及多个亚组之间绝对值的差异,这使得它在处理农业领域复杂多变的数据时具有独特的优势^[16]。因此,本研究选取SMD作为需要计算分析的效应值。

$$SMD = (X_t - X_c)J/S \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\left[(N_t - 1)^2 S_t^2 + (N_c - 1)^2 S_c^2 / (N_t + N_c - 2) \right]} \quad (2)$$

$$J = 1 - 3/[4(N_t - N_c - 2) - 1] \quad (3)$$

式中: X_t 、 X_c 分别为处理组和对照组的均值; J ,样本修正系数; N_t 、 N_c 分别为处理组和对照组的样本数; S_t 、 S_c 分别为处理组和对照组的标准差。

Meta-Analysis 数据合并最经典的统计模型有固定效应模型和随机效应模型。固定效应模型总体参数数量固定,不考虑每组之间的差异性;而随机效应模型不仅考虑组内的差异,还考虑每组之间的差异性。而本研究各个大田试验间的差异是不可忽略的^[17-18],故采取随机效应模型,各个处理组的权重计算公式如下:

$$\omega_i = W_i^* / \sum_{i=1}^n W_i^* \quad (4)$$

$$W_i^* = D + 1/W_i \quad (5)$$

$$W_i = 1/V_i \quad (6)$$

式中: ω_i 为第*i*个处理组的权重占比; W_i^* 为*i*个处理

组的权重; V_i 为第*i*个处理组的方差; D 为第*i*个处理组的组内取样方差和各处理组之间的方差估计值。

鉴于 I^2 统计量检验法的直观和简便性,不会受到样本数量的影响,本研究选择 I^2 统计量检验法作为异质性检验的主要工具^[19]。对于 I^2 检验, $0\% \leq I^2 < 25\%$,无异质性, $25\% \leq I^2 < 50\%$ 有轻度异质性, $50\% \leq I^2 < 75\%$ 有中度异质性, $75\% \leq I^2 < 100\%$ 有重度异质性。利用R语言进行Meta-Analysis。通过运行“meta”包或“metafor”包,对数据进行分析并获取对应的效应值并绘制森林图。

2 结果与分析

2.1 灌溉量对玉米产量及水分利用效率的影响

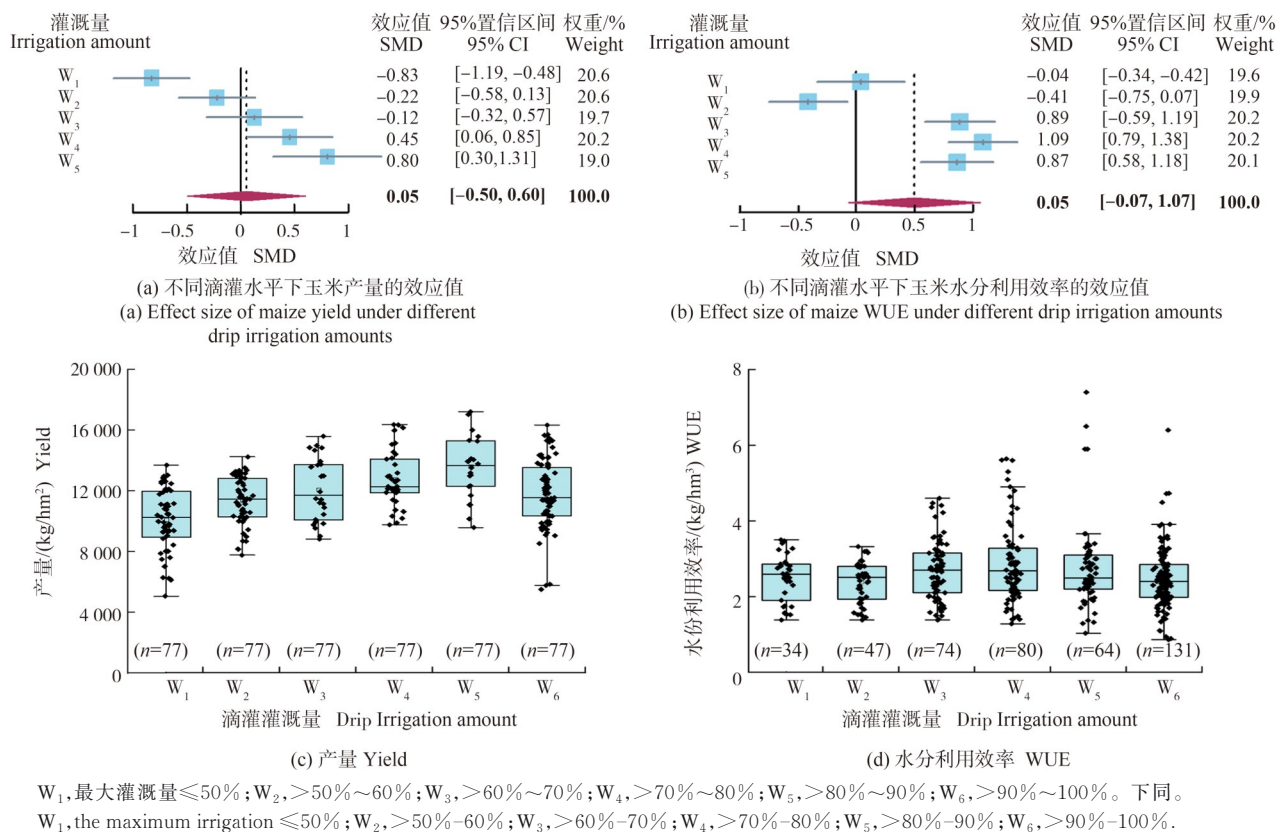
由图2可知,最大灌溉量 $\leq 50\%$ (W_1)、 $> 50\% \sim 60\%$ (W_2)、 $> 60\% \sim 70\%$ (W_3)、 $> 70\% \sim 80\%$ (W_4)、 $> 80\% \sim 90\%$ (W_5)5个亏缺灌溉处理,与最大灌溉量的 $> 90\% \sim 100\%$ (W_6)比较,产量的合并效应值为0.05,具有正效应;总体来看,产量的效应值(SMD)呈抛物线关系,随着灌溉量的增加,产量呈现增加的趋势,但是增加的幅度有所减少。灌溉量 W_1 、 W_2 与 W_6 相比产量的SMD分别为-0.83和-0.22,表明在此灌溉量范围内,其产量较 W_6 有减小的趋势。相反, W_3 、 W_4 、 W_5 与 W_6 比较产量的SMD分别为0.12、0.45和0.80,表明其相对于对照组产量有所提升。灌溉量为 $> 80\% \sim 90\%$ (W_5)的产量及其SMD均达到最大,且显著高于其他灌溉处理,因此,在此灌溉量下,玉米可以保持较高产量的同时可达到节水的目的。

灌溉量 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 与 W_6 比较,水分利用效率(WUE)的合并效应值为0.5,具有正效应(图2(b))。相较于 W_6 , W_1 、 W_3 、 W_4 、 W_5 处理WUE的SMD均为正, W_2 为负,且 W_1 、 W_2 处理WUE的SMD < 0.1 ,说明 W_1 、 W_2 的WUE较 W_6 升高并不显著,甚至可能出现降低的趋势;相反,相较于 W_6 , W_3 、 W_4 和 W_5 处理WUE的SMD在0.89~1.09,都较大,表明与充分灌溉相比,适度的亏缺灌溉可以提高水分利用效率,其中灌溉量为 $> 70\% \sim 80\%$ (W_4)的WUE最高,显著高于其他处理组(图2(b))。

综合考虑对玉米的增产节水效益发现,按照充分灌溉的 $> 70\% \sim 90\%$ (W_4 、 W_5)进行灌溉的效果最佳。相较于 W_6 , W_3 、 W_4 、 W_5 灌溉量范围的产量和

WUE 分别升高 2.3%、8.2%、15.2% 和 9.3%、16.5%、11.7%。对不同灌溉量处理的产量和 WUE

的 Meta-Analysis 进行异质性检验,统计量(I^2)为 89% 和 93%,具有高度的异质性。



The same below.

图 2 不同滴灌灌溉量下玉米的产量、水分利用效率及效应值(SMD)

Fig. 2 Maize yield, water use efficiency and effect size (SMD) under different drip irrigation amounts

2.2 品种对玉米产量及水分利用效率的影响

2.2.1 品种对玉米产量的影响

由图 3 可知,当灌溉量为 W₁ 时,‘均隆 1217’ ‘先玉 335’ 玉米品种的产量 SMD 较大,在 10~20,表明在此灌溉量范围下,‘均隆 1217’ ‘先玉 335’ 品种的产量比对照品种‘甘鑫 630’ 均有显著升高;而‘裕丰 303’ ‘辽单 575’ ‘西蒙 6’ ‘郑单 958’ ‘农华 101’ ‘利民 33’ ‘中地 77’ ‘先锋 32D22’ 和‘秦龙 11’ 的 SMD 则较小,表明与对照品种‘甘鑫 630’ 相比对产量的提升效果一般或可忽略不计。因此,对于种植‘均隆 1217’ ‘先玉 335’ 的生产地区,推荐最大灌溉量 ≤ 50% (W₁) 进行灌溉,以保证产量不显著降低的情况下,同时达到节水的效果。

当灌溉量为 W₂ 时,‘西蒙 6’ ‘先玉 1225’ ‘沈单 10’ ‘农华 106’ 玉米品种的 SMD 较大,在 5~10,表明这几个品种在此灌溉量范围内产量提升效果较

好;‘先玉 335’ ‘先玉 1311’ ‘华西 146’ ‘京科 858’ ‘京科 968’ ‘中地 77’ ‘郑单 958’ ‘富民 985’ ‘先玉 1331’ 和‘新玉 62’ 的 SMD 较小,在 0~5,表明产量较于对照品种‘利民 33’ 的提升效果不显著;‘甘鑫 630’ 的 SMD 为负值,表明该品种不适宜于此灌溉量。综上,在灌溉量减少至最大灌溉量的 > 50% ~ 60% (W₂) 的情况下,相较于对照品种‘利民 33’ 和其他品种,‘西蒙 6’ ‘先玉 1225’ ‘沈单 10’ ‘农华 106’ 的减产较少,属于优势品种,具有较强的耐旱性(图 3(b))。

当灌溉量为 W₃ 时,‘中单 9091’ ‘先玉 335’ ‘农华 10’ ‘均隆 1217’ 的 SMD 较大,均 ≥ 3,表明较对照品种‘新玉 66’ 而言这几个品种在此灌溉量范围内产量提升效果较好;而‘裕丰 303’ ‘西蒙 6’ ‘先玉 1225’ ‘农华 101’ ‘先玉 1311’ ‘甘鑫 630’ ‘沈单 10’ ‘郑单 958’ ‘武科 2’ ‘新玉 62’ ‘农华 106’ ‘先锋

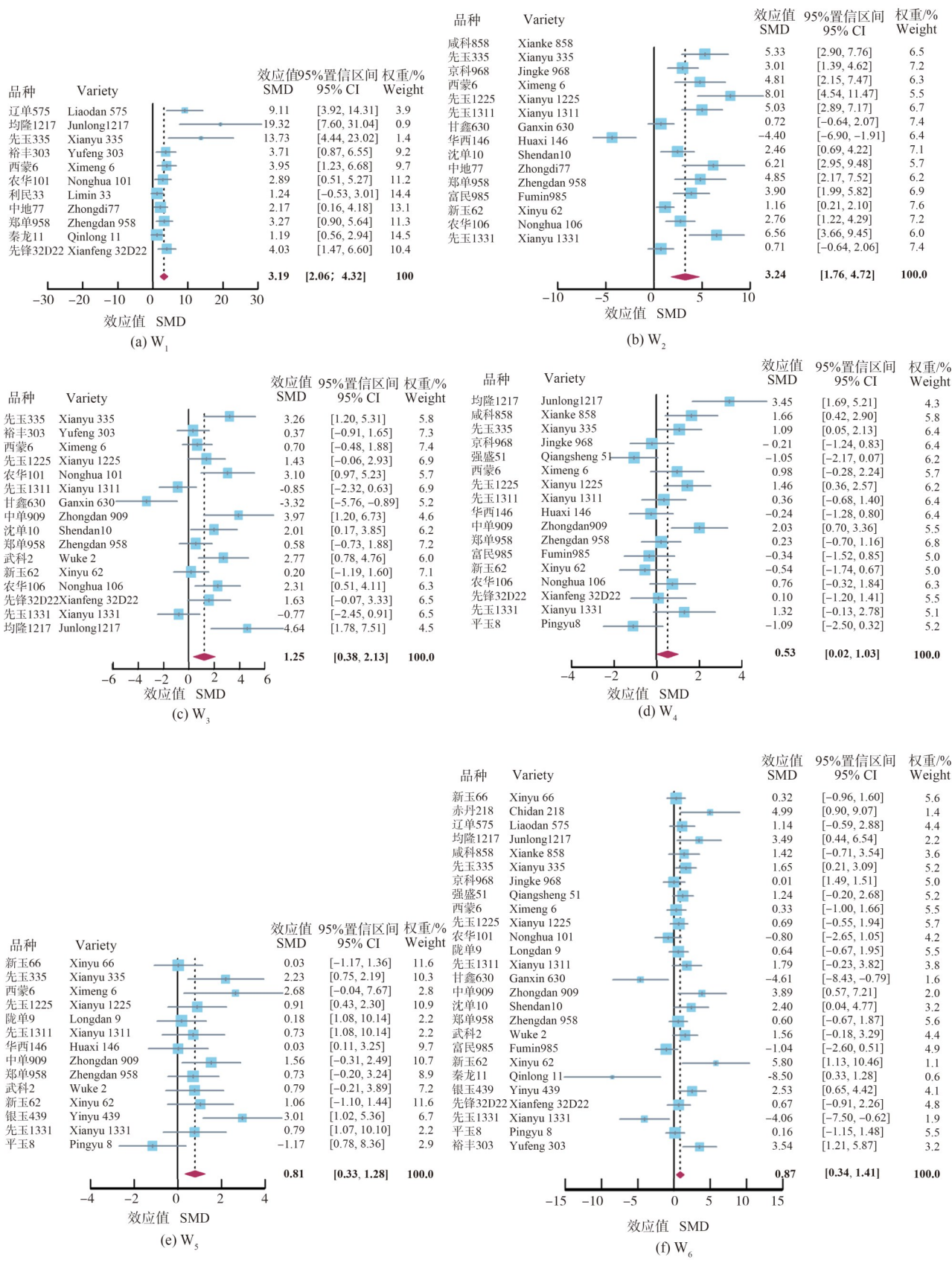


图3 不同滴灌灌溉量条件下不同品种玉米的产量

Fig. 3 Maize yield under different drip irrigation amounts and varieties

32D22'和'先玉 1331'的 SMD 较小或为负值,表明其对产量的提升效果不显著或有产量减小的情况。综上所述,'农华 101'、'中单 909'等玉米品种耐旱性一般,推荐灌溉量在充分灌溉的 $>60\% \sim 70\% (W_3)$ 可以促进玉米增产节水(图 3(c))。

当灌溉量为 W_4 时,'均隆 1217'、'咸科 858'、'中单 909'、'先玉 1225'、'先玉 1331'等玉米品种产量的 SMD 均较大,为 $1 \sim 4$ (图 3(d))。当灌溉量为 W_5 时,'先玉 335'、'西蒙 6'、'中单 909'和'银玉 439'等玉米品种产量的 SMD > 1 ,较大(图 3(e)),表明以上这些品种在轻度亏缺灌溉的情景下,不仅可以节水,还能显著提升其产量。当灌溉量为 W_6 时,相较于其对照品种'翔玉 998'、'赤丹 218'、'均隆 1217'、'中单 909'、'沈单 10'、'新玉 62'、'银玉 439'、'裕丰 303'的玉米品种产量提升效果较好,间接表明其对水分比较敏感,适合于充分灌溉(图 3(f))。在低滴灌量条件下适宜种植的品种,在高灌溉量中依旧有较高的产量,如'均隆 1217'、'先玉 335'玉米在灌溉量 W_1 时产量较好,在 $W_2 \sim W_6$ 同样有较大的效应值,此时,推荐采用 W_1 ,以提高滴灌水分利用效率(图 3)。

对结果进行异质性检验, W_2 的玉米产量的异质性检验结果 $I^2 = 85\%$, 具有较高的异质性,进一步需要考虑其他因素对其产生的影响。 W_1 、 W_3 、 W_4 、 W_5 、 W_6 的玉米产量异质性检验结果分别为 $I^2 = 63\%$ 、 71% 、 66% 、 41% 、 41% , 具有中度异质性,表明在允许的范围,考虑灌溉量和品种 2 个因素,产量的精确度得到较高地提升,具有较好的统计学意义。

2.2.2 品种对玉米水分利用效率(WUE)的影响

由图 4 可知,当灌溉量为 W_1 时,'沈单 10'和'裕丰 303'的 SMD ≥ 20 ,表明与对照品种'先玉 1225'相比,'裕丰 303'和'沈单 10'在此灌溉量范围内具有较高的 WUE;'均隆 1217'、'先玉 335'和'甘鑫 630'玉米品种的 SMD 在 $10 \sim 20$,表明与对照品种'先玉 1225'相比,在此灌溉量范围内种植'均隆 1217'、'先玉 335'和'甘鑫 630'对 WUE 有较好的提升;再者是'辽单 575'、'郑单 958'、'西蒙 6'、'秦龙 11'、'先锋 32D22'的 SMD 在 $1 \sim 10$,表明与对照组相比,这些玉米品种的 WUE 无显著差异;而'中地 77'存在负效应,节水能力较差,不适宜于此灌溉量。综上,'裕丰 303'、'沈单 10'、'均隆 1217'、'先玉 335'和'甘鑫 630'等玉米品种,可以按照 $\leq 50\% (W_1)$ 的最大灌溉量进行灌溉,可有效提高 WUE。

当灌溉量为 W_2 时,'咸科 858'、'西蒙 6'、'沈单 10'、'华西 146'、'富民 985'、'先玉 335'、'新玉 62'玉米品种的 SMD 较大,为 $5 \sim 10$,表明与对照品种'利民 33'相比,在此灌溉量范围内种植这些玉米品种对 WUE 的提升较大;'农华 106'、'先玉 1225'、'先玉 1311'、'先玉 1331'的 SMD 较小,为 $1 \sim 5$,表明此类玉米品种在采用该灌溉量范围时,节水效果一般;'京科 968'、'中地 77'、'甘鑫 630'、'郑单 958'的效应值较小或为负效应,表明在此灌溉量范围内种植该类品种对其 WUE 提升不显著或有所降低。综上所述,'咸科 858'、'先玉 335'、'西蒙 6'、'华西 146'、'沈单 10'、'富民 985'、'新玉 62'等玉米品种可选择最大灌溉量 $> 50\% \sim 60\%$ 进行灌溉,可较好地提升 WUE (图 4(b))。

当灌溉量为 W_3 时,'农华 101'、'西蒙 6'、'中单 909'、'先玉 1311'、'沈单 10'、'先锋 32D22'、'先玉 1331'玉米品种的 SMD ≥ 10 ,表明与对照品种'均隆 1217'相比,在此灌溉量范围下该类品种的 WUE 较高;而'武科 2'和'甘鑫 630'的 SMD 在 $5 \sim 10$,表明与对照品种'均隆 1217'相比,种植'武科 2'和'甘鑫 630'玉米品种采用该灌溉量对 WUE 有一定的提升;'新玉 66'、'新玉 62'、'先玉 335'、'先玉 1225'、'裕丰 303'、'郑单 958'、'武科 2'、'农华 106'的 SMD 较小,在 $0 \sim 5$,表明相较于对照品种'均隆 1217',此类玉米品种的 WUE 无显著提升或可忽略不计,总体上呈现正效应。综上所述,种植'西蒙 6'、'农华 101'、'先玉 1311'、'中单 909'、'沈单 10'、'先锋 32D22'和'先玉 1331'等玉米品种时,灌溉量在 W_3 较为适宜, WUE 较高(图 4(c))。

当灌溉量为 W_4 时,'西蒙 6'、'咸科 858'、'先玉 1311'、'均隆 1217'、'华西 146'、'先锋 32D22'、'平玉 8'等玉米品种的 SMD 较大,相较于其对照品种,此类玉米的 WUE 效果较高(图 4(d))。当灌溉量为 W_5 时,适宜于对'西蒙 6'、'先玉 1331'、'陇单 9'、'华西 146'、'平玉 8'等玉米品种进行灌溉(图 4(f))。当灌溉量为 W_6 时,可选择'翔玉 998'、'赤丹 218'、'均隆 1217'、'咸科 858'、'先玉 335'、'西蒙 6'、'农华 101'、'先玉 1311'、'武科 2'、'秦龙 11'、'银玉 439'、'先锋 32D22'、'先玉 1331'、'平玉 8'的玉米品种,以提高玉米的 WUE(图 4(e))。

异质性检验表明, W_1 、 W_2 条件下玉米 WUE 的异质性检验结果 I^2 分别为 86% 、 88% , 具有较高异质

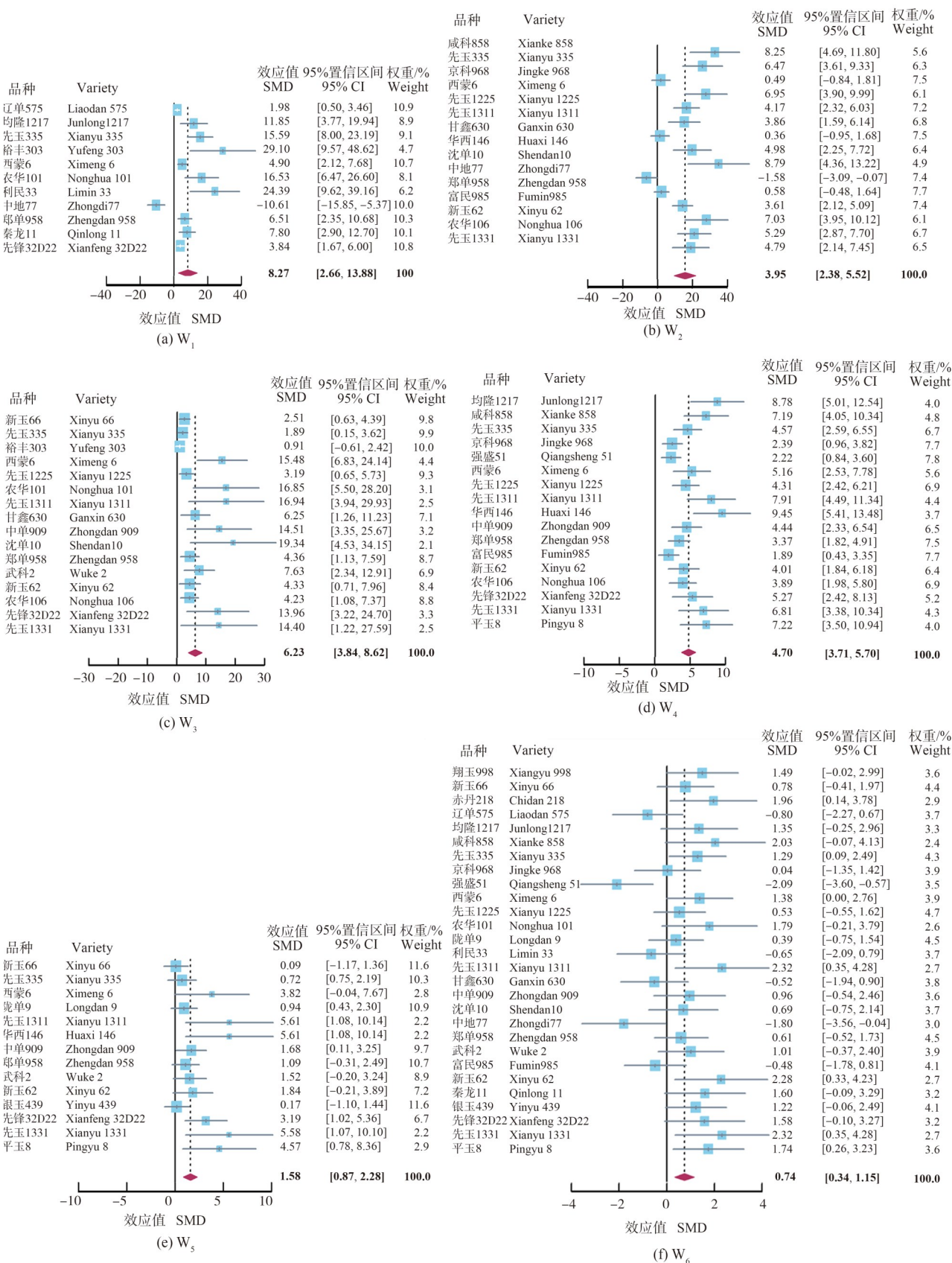


图4 不同滴灌灌溉量条件下不同品种玉米的水分利用效率

Fig. 4 Water use efficiency under different drip irrigation amounts and varieties

性,相较于只考虑灌溉量一种因素有所提升,但依旧存在一定的误差。 W_3 、 W_4 、 W_5 、 W_6 条件下玉米WUE的异质性检验结果 I^2 分别为70%、67%、50%、52%具有中度的异质性,表明异质性良好,WUE在灌溉量和品种2个因素的响应精确度较高,具有较好的统计学意义。

3 讨 论

3.1 灌溉量对玉米产量及水分利用效率的影响

玉米产量与水分利用效率(WUE)的提升对于保障粮食安全和促进农业可持续发展至关重要,为了更加深入地探讨玉米生产过程中的关键因素,本研究整合已发表的文献数据,通过Meta-Analysis分析了不同灌溉量对玉米产量和WUE的影响,结果表明,随着灌水量的增加,滴灌玉米的产量和WUE均呈单峰曲线变化,灌溉量为最大灌溉的 $>70\%\sim 90\%$ (W_4 、 W_5)可以保证高产的前提下具有一定的节水效果,与 $>90\%\sim 100\%$ (W_6)相比,其产量和WUE分别升高8.2%~15.2%和11.7%~16.5%,说明在保证作物正常需水的基础上进行适度减少灌溉量,可以促进作物增产节水。李昊儒等^[20]利用Meta分析方法定量评估滴灌各作物的节水潜力发现,玉米在保证不减产的条件下可减少14%的灌溉量。此外,已有研究发现,在滴灌量有限的条件下,根据作物的需水规律进行科学合理的分配,可以进一步显著提高产量和WUE^[21-22],吴宣毅等^[23]建议在保证拔节抽穗等敏感期用水的基础上,对玉米营养生长阶段后期及灌浆后期等非敏感时期进行轻度亏水处理,可保证产量不显著下降,同时可实现节水约23.14%。魏永霞等^[24]、刘战东等^[25]、张国强等^[26]、胡建强等^[27]、李全胜等^[28]、马永鑫等^[29]也得出了类似的结论。分析其原因主要有以下几点:1)对作物生长状态的调节:适度的亏缺灌溉主要是通过调控土壤含水率来间接调控作物生长^[30],这样的灌溉方式即可以保证玉米正常生长代谢,又在一定程度上减缓了玉米生育后期植株衰老速度^[31],促进了玉米光合产物的转运和果穗的形成^[32-34]。2)根系生长的促进:适度亏缺灌溉会刺激玉米改变自身导管结构、增加根部表面积和多糖含量^[35],从而增加根系对深层土壤水分和养分的吸收能力^[38-42]。孟兆江等^[43]研究认为其通过抑制营养生长,增大植株根冠比,来达到增产节水的效果。3)抗旱性的提升:在

干旱条件下,玉米会通过调整自身的生理生化过程来适应环境,例如增加细胞液的渗透浓度,提高原生质体的保水能力等,从而提高其对于干旱环境的适应性^[44]。但李茂娜等^[45]采用Meta分析方法分析亏缺灌溉对苜蓿生长的影响研究表明,亏缺灌溉虽然使苜蓿WUE提高14%。产量却减少17%,与本研究“亏缺灌溉能提升产量”的结果不一致,其原因是苜蓿是一种高耗水作物,对水分亏缺比较敏感,故该研究主要集中于如何在保证其产量不显著减小的情况下,提高WUE。

此外,本研究结果表明,当灌溉量减少至最大灌溉量的60%以下(W_1 、 W_2)时,玉米由于重度亏水造成产量显著下降。分析其原因:一方面,缺水干旱会导致气孔导度下降,阻碍 CO_2 的扩散和透过性,而 CO_2 是光合作用的重要原料,其供应不足会直接影响光合作用的效果,进而影响有机物的合成和积累^[46];另一方面,过度干旱增加蒸发作用,导致土壤盐分累积,增加土壤溶液渗透势,从而阻碍根系吸水,加剧作物的水分胁迫,造成减产^[47-49],其中玉米在拔节至抽穗期对于水分最为敏感^[50]。已有研究还发现,当灌溉量较大时,会增大蒸发损失和水分的无效深层下渗^[51],不仅产量不会显著增加,还会降低WUE,造成水资源浪费^[52],这可能是由于水分过分充足推迟了玉米的生育期,促使在原本该收获的时期玉米籽粒还未完全成熟^[53],导致产量相较于适宜的灌溉量处理有所降低;其次,当土壤水分达到饱和状态后,土壤中的养分也随多余的水一起下渗流失,造成水肥利用效率降低,故即使水分充足,产量增加依旧不显著。

3.2 不同灌溉量下不同玉米品种的产量及水分利用效率的差异分析

本研究异质性检验中,当只考虑灌溉量1个因素时,结果具有高度异质性,表明在该条件下分析产量和水分利用效率可能存在一定的误差,需进一步考虑其他因素的影响;当考虑灌溉量和品种2个因素时,结果具有中度异质性, I^2 显著降低,表明加入品种因素后玉米产量和水分利用效率精确度显著提高,具有较好的统计学意义。同一作物不同品种的耗水量和补偿能力有所不同^[4]。一些品种的玉米在较低的灌溉量下即可获得较高的产量和WUE,而另一些品种则需要更高的灌溉量^[54-55]。这表明针对不同品种合理灌溉是实现增产节水的关

键。本研究通过Meta分析大量文献发现,不同亏缺灌溉条件下不同玉米品种对产量和WUE的影响存在差异。对于‘西蒙6’‘均隆1217’‘咸科858’‘先玉1331’等水分较为敏感的品种,容易受到水分胁迫,只能进行轻度亏水($>70\%\sim 90\%$)灌溉;而对于具有一定抗旱性的品种,如‘农华101’‘中单909’等可以进行中度亏水($>60\%\sim 70\%$)灌溉;对抗旱性较强的品种,如‘均隆1217’‘先玉335’等,在水资源有限的条件下,甚至可以在重度亏水($W\leq 60\%$)的情况下维持生长。Allakonon等^[56]通过Meta分析研究表明,相较于中、长周期品种,短周期品种的玉米在亏缺灌溉条件下表现出更低的产量损失。短周期玉米产量的响应比率较中、长周期品种高1.8~2.3倍,具有更好的耐旱性^[57]。原因可能是不同品种对干旱的适应能力不同,而作物对干旱的适应能力是一个复杂而多样的过程,涉及到多个层面的机制。Smith等^[58]研究表明,根系深、根毛发达的品种在干旱条件下具有更高的水分吸收能力和较高的WUE。其次,抗旱性主要通过植株气孔调节、保水能力以及渗透调节物质的积累等生理和生化机制来调控^[59]。同时赵锦等^[60]研究还发现,抗旱品种在干旱胁迫下能够维持较高的叶片水分状态,从而确保光合作用和生长的持续进行。崔蓉等^[61]研究表明,不同抗旱性的品种对玉米产量及WUE影响不同,抗旱性强的品种在干旱条件下表现出较高的产量和WUE,本研究的整合分析也恰恰证明了这一点。今后可对不同生育期灌溉量的分配进行深入研究,以进一步提升玉米的增产节水潜力。

4 结 论

采用Meta分析方法分析不同灌溉量及品种对玉米产量和水分利用效率的系统性影响,得出以下结论:1)本研究异质性检验结果均在允许范围内,相对于只考虑灌溉量,灌溉量和品种2个因素的产量和水分利用效率精确度显著提高,具有较好的统计学意义。2)与最大滴灌灌溉量的 $>90\%\sim 100\%$ (W_6)相比, $>60\%\sim 70\%$ (W_3)可以节水9.3%、增产2.3%; $>70\%\sim 80\%$ (W_4)可以节水16.5%、增产8.2%; $>80\%\sim 90\%$ (W_5)的灌溉量可以节水11.7%、增产15.2%,其中 W_4 节水效果最好; W_5 的增产效果最好。总的来说,轻度亏缺灌溉($>70\%\sim 90\%$)可以显著提升玉米的产量和水分利

用效率。3)不同灌溉量范围下玉米品种对产量和水分利用效率的影响存在显著差异,综合考虑产量和水分利用效率,对于‘咸科858’和‘先玉1331’等水分较为敏感的品种,建议采用轻度亏缺灌溉($>70\%\sim 90\%$);而对于‘农华101’‘中单909’等具有一定抗旱性的品种,采用中度亏缺灌溉($>60\%\sim 70\%$)为宜;对‘均隆1217’‘先玉335’‘西蒙6’‘沈单10’等抗旱性较强的品种,则可进行重度亏缺灌溉($W\leq 60\%$),以实现玉米的高产和水分的高效利用。

参考文献 References

- [1] 刘钰,汪林,倪广恒,丛振涛. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12
Liu Y, Wang L, Ni G H, Cong Z T. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 6-12 (in Chinese)
- [2] 康绍忠. 藏粮于水 藏水于技:发展高水效农业保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022(13): 1-5
Kang S Z. Store grain in water and technology: Development of highly-efficient agricultural water use for ensuring national food security[J]. *China Water Resources*, 2022(13): 1-5 (in Chinese)
- [3] 罗迪汉,王勇,宇宙. 不同灌水定额对覆膜滴灌玉米生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2015(7): 5-8
Luo D H, Wang Y, Yu Z. Influence of drip irrigation quota on film maize growth, yield and water use efficiency[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015 (7): 5-8 (in Chinese)
- [4] 王增丽,董平国,樊晓康,王天任. 膜下滴灌不同灌溉定额对土壤水盐分布和春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2343-2352
Wang Z L, Dong P G, Fan X K, Wang T R. Effects of irrigation quota on distribution of soil water-salt and yield of spring maize with drip irrigation under mulch[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2343-2352 (in Chinese)
- [5] Zhang G Q, Liu C W, Xiao C H, Xie R Z, Ming B, Hou P, Liu G Z, Xu W J, Shen D P, Wang K R, Li S K. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211: 137-146
- [6] Ning D F, Zhang Y Y, Qin A Z, Gao Y, Duan A W, Zhang J Y, Liu Z G, Zhao B, Liu Z D. Interactive effects of irrigation system and level on grain yield, crop water use, and greenhouse gas emissions of summer maize in North China Plain[J/OL]. *Science of The Total Environment*, (2023-03-15). DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.161165
- [7] 王卫杰,张彦群,祁鸣笛,王传娟,吴忠东,王建东. 滴灌灌水量对玉米耗水及生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(10): 1063-1068
Wang W J, Zhang Y Q, Qi M D, Wang C J, Wu Z D, Wang J D. Effects of drip irrigation amount on water consumption and growth of maize[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38 (10): 1063-1068 (in Chinese)
- [8] 谷岩,孙扬,郭占全,吴春胜. 膜下滴灌不同玉米品种水分利用效率及产量

- 研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 51-55
- Gu Y, Sun Y, Guo Z Q, Wu C S. Water use efficiency and yield of different maize varieties under-mulch-drip irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(3): 51-55 (in Chinese)
- [9] 黄悦, 李思恩, 胡丹, 丛雪, 张若晴. 基于 Meta-Analysis 方法分析滴灌对玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 96-105
- Huang Y, Li S E, Hu D, Cong X, Zhang R Q. Effects of drip irrigation on water use efficiency and yield of maize based on Meta-Analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5): 96-105 (in Chinese)
- [10] Gattinger A, Muller A, Haeni M, Skinner C, Fliessbach A, Buchmann N, Mäder P, Stolze M, Smith P, Scialabba N. E. -H, Niggli U. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(44): 18226-18231
- [11] Luo Z K, Wang E L, Sun O J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(1-2): 224-231
- [12] Glass G V. Primary, secondary, and meta-analysis of research [J]. *Educational Researcher*, 1976, 5(10): 3-8
- [13] Hedges L V. Distribution theory for glass's estimator of effect size and related estimators [J]. *Journal of Educational Statistics*, 1981, 6(2): 107-128
- [14] Hedges L V, Olkin I. *Statistical Methods for Meta-Analysis* [M]. State of California: Academic Press, 2014
- [15] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156
- [16] 姜言娇, 袁园园, 薛丽, 武木兰, 黄峰. 基于 Meta 分析的灌溉模式对温室番茄产量和水分生产力的影响 [J]. 节水灌溉, 2020, (3): 40-45
- Jiang Y J, Yuan Y Y, Xue L, Wu S L, Huang F. Meta-analysis of effect of irrigation mode on yield and water productivity of greenhouse tomato [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020, (3): 40-45 (in Chinese)
- [17] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, Rothstein H R. A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis [J]. *Research Synthesis Methods*, 2010, 1(2): 97-111
- [18] Riley R D, Higgins J P T, Deeks J J. Interpretation of random effects meta-analyses [J/OL]. *The British Medical Journal*, (2011-03-30). DOI: 10.1136/bmj.d549
- [19] 何寒青, 陈坤. Meta 分析中的异质性检验方法 [J]. 中国卫生统计, 2006, 23(6): 486-487, 490
- He H Q, Chen K. Methods for measuring heterogeneity in a meta-analysis [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2006, 23(6): 486-487, 490 (in Chinese)
- [20] Li H R, Mei X R, Wang J D, Huang F, Hao W P, Li B G. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2020-10-03). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106534>
- [21] 郑荣, 王娟, 缪纯庆, 李长江, 杨义荣. 膜下滴灌条件下制种玉米灌水制度研究 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 55-58
- Zheng R, Wang J, Miao C Q, Li C J, Yang Y R. Irrigation schedules of seed maize with trickle irrigation technique under sub-film [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(9): 55-58 (in Chinese)
- [22] 孙景生, 康绍忠, 张寄阳, 郝江, 段爱旺, 俞希根, 肖俊夫. 霍泉灌区冬小麦夏玉米高产节水灌溉制度 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 50-53
- Sun J S, Kang S Z, Zhang J Y, Hao J, Duan A W, Yu X G, Xiao J F. Schedules of irrigation for the high-yield and water saving cultivation of winter wheat and summer maize in huoquan irrigation district of Shanxi Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(4): 50-53 (in Chinese)
- [23] 吴宣毅, 佟玲, 康德奎, 王磊, 马冬青, 杨其铨, 郭晓旭. 调亏灌溉对西北地区不同种植密度玉米耗水和产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 59-67
- Wu X Y, Tong L, Kang D K, Wang L, Ma D Q, Yang Q K, Guo X X. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption and yield of maize under different planting densities in Northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(S1): 59-67 (in Chinese)
- [24] 魏永霞, 马瑛瑛, 冯鼎瑞, 熊建, 张雨凤, 张翼鹏. 调亏灌溉下滴灌玉米根冠生长与水分动态响应特征 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 180-188
- Wei Y X, Ma Y Y, Feng D R, Xiong J, Zhang Y F, Zhang Y P. Characteristics of water dynamic response and growth of root and crown of maize under drip irrigation of regulated deficit irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 180-188 (in Chinese)
- [25] 刘战东, 肖俊夫, 刘祖贵, 南纪琴, 杨道成. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 60-64
- Liu Z D, Xiao J F, Liu Z G, Nan J Q, Yang D C. Effects of different irrigation treatment on morphological indexes, water consumption and yield of maize under mulch drip irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(3): 60-64 (in Chinese)
- [26] 张国强, 王克如, 肖春华, 谢瑞芝, 侯鹏, 李健, 徐文娟, 初振东, 刘广周, 刘朝巍, 李少昆. 滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率的影响研究 [J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 117-123
- Zhang G Q, Wang K R, Xiao C H, Xie R Z, Hou P, Li J, Xu W J, Chu Z D, Liu G Z, Liu C W, Li S K. Effect of drip irrigation on yield and water use efficiency of spring maize with high yield in Xinjiang [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 117-123 (in Chinese)
- [27] 胡建强, 赵经华, 马英杰, 杨磊, 徐剑. 不同灌水定额对膜下滴灌玉米耗水及产量的影响 [J]. 新疆农业大学学报, 2018, 41(1): 67-71
- Hu J Q, Zhao J H, Ma Y J, Yang L, Xu J. Effects of different irrigation quotas on water consumption and yield of maize under drip irrigation [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2018, 41(1): 67-71 (in Chinese)
- [28] 李全胜, 王国栋, 郭斌, 梁飞. 灌溉量对膜下滴灌玉米生长和产量的影响 [J]. 新疆农垦科技, 2019, 42(5): 31-32
- Li Q S, Wang G D, Guo B, Liang F. Effect of irrigation amount on growth and yield of maize under drip irrigation under plastic film [J]. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 2019, 42(5): 31-32 (in Chinese)
- [29] 马永鑫, 王西娜, 韦广源, 薛旭, 郝雯悦, 王朝辉, 谭军利. 减氮节水对宁夏引黄灌区春小麦光合特性与产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 75-84
- Ma Y X, Wang X N, Wei G Y, Xue X, Hao W Y, Wang Z H, Tan J L. Effects of nitrogen reduction and water saving on the photosynthetic characteristics and yield of spring wheat in the Yellow River Irrigation Areas of Ningxia [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(10): 75-84 (in Chinese)
- [30] 魏永霞, 马瑛瑛, 刘慧, 张雨凤, 杨军明, 张奕. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 252-260

- Wei Y X, Ma Y Y, Liu H, Zhang Y F, Yang J M, Zhang Y. Effects of soil water, plant, water saving and yield increasing of maize under regulated deficit drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 252-260 (in Chinese)
- [31] 唐光木, 何红, 杨金钰, 徐万里. 灌溉定额对膜下滴灌玉米生理性状及产量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 293-297
- Tang G M, He H, Yang J Y, Xu W L. Effect of irrigation quota on physiological characteristic and yield in drip irrigation under mulch of maize [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 293-297 (in Chinese)
- [32] 郑国玉, 朱新萍, 周建伟, 马军勇, 何帅. 滴灌土壤水分下限对春玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 河北农业科学, 2020, 24(4): 56-61
- Zheng G Y, Zhu X P, Zhou J W, Ma J Y, He S. Effects of lower limit of soil moisture on growth and water use efficiency of spring maize under drip irrigation [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(4): 56-61 (in Chinese)
- [33] 陈宣伊, 师晶晶, 张向前, 杜香玉, 步恒通, 白东星, 路战远, 孟天天, 王满秀, 陈丽荣. 滴灌水量对土壤水分变化特征和玉米水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 38-48
- Chen X Y, Shi J J, Zhang X Q, Du X Y, Bu H T, Bai D X, Lu Z Y, Meng T T, Wang M X, Chen L R. Effects of drip irrigation amount on water variation characteristics of soil and water use efficiency of maize [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 38-48 (in Chinese)
- [34] 李菊, 张富仓, 王艳丽, 赖珍林, 李越鹏, 严富来, 王海东, 郭金金. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8-20
- Li J, Zhang F C, Wang Y L, Lai Z L, Li Y P, Yan F L, Wang H D, Guo J J. Effects of irrigation amount and drip irrigation frequency on spring maize growth and water use in Hexi area of Gansu Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10): 8-20 (in Chinese)
- [35] 侯琼, 沈建国. 春玉米根系生育特征与冠层关系的研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1536-1541
- Hou Q, Shen J G. Study on root development characteristics of spring maize and its relationships with canopy growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1536-1541 (in Chinese)
- [36] 马旭凤, 于涛, 汪李宏, 石喜, 郑灵祥, 王密侠, 姚雅琴, 蔡焕杰. 苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1731-1736
- Ma X F, Yu T, Wang L H, Shi X, Zheng L X, Wang M X, Yao Y Q, Cai H J. Effects of water deficit at seedling stage on maize root development and anatomical structure [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1731-1736 (in Chinese)
- [37] 张岁岐, 周小平, 慕自新, 山仑, 刘小芳. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 1-6
- Zhang S Q, Zhou X P, Mu Z X, Shan L, Liu X F. Effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10): 1-6 (in Chinese)
- [38] 胡田田, 康绍忠. 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 885-891
- Hu T T, Kang S Z. The compensatory effect in drought resistance of plants and its application in water-saving agriculture [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 885-891 (in Chinese)
- [39] Eapen D, Martínez-Guadarrama J, Hernández-Bruno O, Flores L, Nieto-Sotelo J, Cassab G I. Synergy between root hydrotropic response and root biomass in maize (*Zea mays* L.) enhances drought avoidance [J]. *Plant Science*, 2017, 265: 87-99
- [40] Nakamoto T. Effect of soil water content on the gravitropic behavior of nodal roots in maize [J]. *Plant and Soil*, 1993, 152(2): 261-267
- [41] 胡田田, 牛晓丽, 漆栋良, Wu Yajun. 玉米初生根向水性诱导优化试验研究[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1829-1836
- Hu T T, Niu X L, Qi D L, Wu Y J. Optimizing hydrotropic response in the maize primary roots [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 1829-1836 (in Chinese)
- [42] Pasternak T, Rudas V, Potters G, Jansen M. Morphogenic effects of abiotic stress: Reorientation of growth in seedlings [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53(3): 299-314
- [43] 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 王和洲, 贾大林. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998(4): 94-98
- Meng Z J, Liu A N, Pang H B, Wang H Z, Jia D L. Study on physiological mechanism and index of regulated deficit irrigation for summer maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998, 14(4): 88-92 (in Chinese)
- [44] Eapen D, Barroso M L, Ponce G, Campos M E, Cassab G I. Hydrotropism: Root growth responses to water [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(1): 44-50
- [45] Li M N, Zhang Y L, Ma C Z, Sun H R, Ren W, Wang X G. Maximizing the water productivity and economic returns of alfalfa by deficit irrigation in China: A meta-analysis [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2023-07-20). 108454 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108454>
- [46] 张乐, 尹娟, 王怀博, 唐瑞. 不同灌水处理对玉米生长特性及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 24-29
- Zhang L, Yin J, Wang H B, Tang R. Effects of different irrigation treatments on growth characteristics and water use efficiency of maize [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 24-29 (in Chinese)
- [47] Katerji N, Van Hoorn J W, Hamdy A, Mastrorilli M. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 62(1): 37-66
- [48] Shani U, Dudley L M. Field studies of crop response to water and salt stress [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1522-1528
- [49] Ben-Hur M, Li F H, Keren R, Ravina I, Shalit G. Water and salt distribution in a field irrigated with marginal water under high water table conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(1): 191-198
- [50] 张芮, 成自勇. 调亏对膜下滴灌制种玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(4): 98-101
- Zhang R, Cheng Z Y. Effect of regulated deficit drip irrigation on yield and water use efficiency of plastic film mulched corn for seed [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2009, 30(4): 98-101 (in Chinese)
- [51] 王克全, 王国栋, 梁飞, 曾胜和. 灌溉定额对膜下滴灌春玉米土壤水热空间分布及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(11): 25-29
- Wang K Q, Wang G D, Liang F, Zeng S H. Effects of irrigating quota on the farmland soil water-heat spatial distribution and yield of spring maize under mulched drip irrigation [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(11): 25-29 (in Chinese)
- [52] 焦炳忠, 任秋实, 郭媛姣, 王力, 孙兆军. 不同灌溉定额对膜侧玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 18-22
- Jiao B Z, Ren Q S, Guo Y J, Wang L, Sun Z J. The effects of different irrigation patterns on the growth of maize and the temporal and spatial

- distribution of moisture [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018 (5): 18-22 (in Chinese)
- [53] 李媛媛, 杨恒山, 张瑞富, 范秀艳, 李金琴, 罗方. 灌溉定额对浅埋滴灌玉米生长与产量的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 345-348
- Li Y Y, Yang H S, Zhang R F, Fan X Y, Li J Q, Luo F. Effects of irrigation quota on growth and yield of spring maize under shallow subsurface drip irrigation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 345-348 (in Chinese)
- [54] 霍铁珍, 王文达, 韩翠莲, 李生勇, 郭彦芬. 河套灌区灌溉定额对膜下滴灌玉米生产性状及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 182-187
- Huo Y Z, Wang W D, Han C L, Li S Y, Guo Y F. Effects of irrigation quota on maize yield traits and water use efficiency under mulched drip irrigation in Hetao irrigation district [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 182-187 (in Chinese)
- [55] 张克寒. 不同田间管理措施下玉米产量和水氮利用效率的 Meta 分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2023
- Zhang K H. Meta-Analysis of maize yield, water and nitrogen use efficiency under different field management measures [D]. Beijing: China Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [56] Allakonon M G B, Zakari S, Tovihoudji P G, Fatondji A S, Irénikatché Akponikpè P B. Grain yield, actual evapotranspiration and water productivity responses of maize crop to deficit irrigation: A global meta-analysis [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2022-08-01). DOI: 10.1016/j.agwat.2022.1077469
- [57] Jones R L, Smith T B, Brown L M, Davis A J. The impact of short-maturity maize hybrids on drought tolerance [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(1): 90-95
- [58] Smith P R, Johnson D L, Green K E, Miller S T. Root architecture and drought tolerance in maize: A review [J]. *Field Crops Research*, 2012, 122(3): 111-119
- [59] Zhang Y H, Wang H J, Li Q F, Chen B G. Physiological mechanisms of drought resistance in maize [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(13): 3747-3761
- [60] Zhao J, Xue Q W, Jessup K E, Hao B Z, Hou X B, Marek T H, Xu W W, Evett S R, O'Shaughnessy S A, Brauer D K. Yield and water use of drought-tolerant maize hybrids in a semiarid environment [J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 1-9
- [61] 崔蓉, 王天野, 王呈玉, 李锦秀, 张欣宇, 刘淑霞. 干旱胁迫对不同玉米品种生长性状及产量的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1): 94-100
- Cui R, Wang T Y, Wang C Y, Li J X, Zhang X Y, Liu S X. Effects of drought stress on growth characters and yield of different maize varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36 (S1): 94-100 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 刘丽平, 博士研究生, 2022 年 9 月至今就读于中国农业大学农业水土工程专业, 2023 年获得中国农业大学博士学业奖学金, 曾获实用新型专利授权 2 项。



通讯作者简介: 佟玲, 博士, 中国农业大学教授, 博士生导师。主要从事变化环境下不同尺度作物耗水监测模拟与调控研究。兼任国务院学位委员会第七届农业工程学科评议组秘书。主持和参加国家自然科学基金等项目 20 余项, 在 *Agricultural Water Management*、*Irrigation Science*、*Crop Science*、《水利学报》、《农业工程学报》等国内外刊物上发表 (含合作发表) 学术论文 120 余篇。曾获教育部高校科技进步一等奖、大禹水利科学技术一等奖、中国学位与研究生教育学会研究生教育成果特等奖。