



白梓辰,李保成,杜二小,张乐,侯建伟,赵沛义,任永峰,王伟妮,刘勇,张德全. 内蒙古黄土高原区限量补灌对玉米根系及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(07):66-80.

BAI Zichen, LI Baocheng, DU Erxiao, ZHANG Le, HOU Jianwei, ZHAO Peiyi, REN Yongfeng, WANG Weini, LIU Yong, ZHANG Dequan. Effects of limited supplementary irrigation on maize roots and yield in the Loess Plateau region of Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 66-80.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.06

内蒙古黄土高原区限量补灌对玉米根系及产量的影响

白梓辰^{1,2} 李保成^{1,2} 杜二小^{1,2} 张乐^{1,2} 侯建伟^{1,2} 赵沛义^{1,2} 任永峰^{1,2*}
王伟妮³ 刘勇⁴ 张德全⁴

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院 资源环境与可持续发展研究所, 呼和浩特 010031;

2. 内蒙古自治区旱作农业重点实验室, 呼和浩特 010031;

3. 鄂尔多斯市农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017010;

4. 鄂尔多斯水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要 为探究不同补灌量下土壤水分对玉米根系及产量的影响,于2022—2023年在内蒙古自治区准格尔旗纳林果园设置900(W₁)、1 050(W₂)、1 200(W₃)、1 350(W₄)和1 500 m³/hm²(CK)5个补灌量处理,测定不同处理下玉米全生育期土壤含水率、耗水量、根长密度、根表面积密度、根重密度、根系伤流强度和玉米产量等指标,并解析土壤水分、根系分布及二者之间的交互效应。结果表明:土壤含水率、贮水量和耗水量均随着补灌量的递增而增加,其中含水率、贮水量和耗水量在不同土层深度(0—20、>20—40、>40—60 cm)和生育期均呈单峰曲线变化趋势,分别在>20—40 cm土层和玉米抽雄期达峰值。0—100 cm土层内,玉米根系主要集中在0—20 cm土层中,根系总量占比为60%~80%,且根系密度随着土层深度延伸而急剧减少,随着灌水量的增加,0—20 cm表层土壤中根系密度呈上升趋势,而>20—100 cm则反之。此外,随着补灌量的增加,玉米根系伤流强度具有显著差异,其中W₃的伤流强度最高,较其他处理增加1.28%~30.72%。2022和2023年,W₁、W₂、W₃、W₄的经济产量较CK分别降低12.78%、6.34%、0.51%、5.64%和9.52%、7.79%、3.93%、0.54%,其中W₃降幅最小,但水分利用效率较其他处理高3.37%~23.17%。综上,W₃既可以在限量补灌条件下实现该地区玉米的稳产,又可以提高水分利用效率,因此,内蒙古黄土高原区玉米整个生育期最佳补灌量为1 200 m³/hm²。

关键词 玉米; 限量补灌; 土壤水分; 根系密度; 产量; 内蒙古黄土高原区

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2025)07-0066-15

文献标志码 A

Effects of limited supplementary irrigation on maize roots and yield in the Loess Plateau region of Inner Mongolia

BAI Zichen^{1,2}, LI Baocheng^{1,2}, DU Erxiao^{1,2}, ZHANG Le^{1,2}, HOU Jianwei^{1,2}, ZHAO Peiyi^{1,2},
REN Yongfeng^{1,2*}, WANG Weini³, LIU Yong⁴, ZHANG Dequan⁴

(1. Institute of Resource Environment and Sustainable Development, Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Dryland Agriculture, Hohhot 010031, China;

3. Ordos Agricultural and Animal Husbandry Ecology and Resources Protection Center, Ordos 017010, China;

4. Ordos Water Utility Development Center, Ordos 017000, China)

收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 鄂尔多斯市揭榜挂帅项目(JBGS-2021); 科技兴蒙行动重点专项(2022EEDSKJXM004)

第一作者: 白梓辰(ORCID: 0009-0004-3607-6856), 硕士研究生, E-mail: baizichen0405@163.com

通讯作者: 任永峰(ORCID: 0009-0001-0858-0949), 研究员, 主要从事旱作农业与作物栽培研究, E-mail: renyongfeng_1984@163.com

Abstract In order to investigate the effects of soil moisture on maize root system and yield under different supplementary irrigation amounts, five supplementary irrigation treatments of 900 (W_1), 1,050 (W_2), 1,200 (W_3), 1,350 (W_4) and 1,500 m^3/hm^2 (CK) were set up in one Nalin orchard of Jungar Banner, Inner Mongolia in 2022-2023. Determination of soil water content, water consumption, root length density, root surface area density, root weight density, root wounding intensity and yield of maize throughout the reproductive period in different treatments, and the interaction effects between soil moisture, root distribution and the two were investigation of conducted. The results showed that: The soil water content, water storage and water consumption increased with the increase of supplementary irrigation, in which water content, water storage and water consumption showed a single-peak curve trend in different soil depths (0-20, >20-40, >40-60 cm) and fertility periods, respectively. Peak values were reached in the >20-40 cm soil layer and during the tasseling stage of the maize. Within the 0-100 cm soil layer, the maize root system was mainly concentrated in the 0-20 cm soil layer, with the proportion of the total root system ranging from 60% to 80%. The root density decreased sharply with the extension of the soil layer depth, and with the increase of irrigation volume, the root density in the surface soil layer of 0-20 cm showed an increasing trend, while the opposite was true for >20-100 cm. In addition, there were significant differences in maize root wounding intensity with increasing supplementary irrigation amount, among which W_3 had the highest wounding intensity, which increased by 1.28% to 30.72% compared to the other treatments. The economic yields of W_1 , W_2 , W_3 and W_4 were reduced by 12.78%, 6.34%, 0.51%, 5.64% and 9.52%, 7.79%, 3.93%, 0.54% respectively, compared to the CK treatment in 2022 and 2023. W_3 had the smallest reduction, but its water use efficiency was 3.37% to 23.17% higher than other treatments. In conclusion, W_3 can achieve stable maize yield in this region under limited supplementary irrigation condition and also improve water use efficiency. Therefore, the optimal supplementary irrigation rate for maize in Loess Plateau region of Inner Mongolia is 1 200 m^3/hm^2 (W_3) for the whole reproductive period.

Keywords maize; limited supplementary irrigation; soil moisture; root density; yield; Loess Plateau region of Inner Mongolia

玉米作为我国第一大粮食作物,种植区主要分为5个区域,即东北、黄淮海、西南山地、南方丘陵和西北灌溉产区^[1]。2018—2021年,中国玉米总产量保持稳定增长,其中,2021年玉米产量最高,达27 255万t^[2]。玉米产量的提高对于稳定我国的粮食安全及相关行业的不断发展具有重要意义。内蒙古黄土高原区是我国玉米重要产地,该区属于典型的温带干旱半干旱气候,光热资源丰富、降水较少且分布不均,水资源紧缺,土地贫瘠^[3-4]。随着农业用水量的逐年递增,农业水资源供需缺口持续增大,严重影响春玉米高产、稳产,在严重干旱年份可减产20%~40%^[5]。内蒙古黄土高原区水资源短缺问题已经成为限制玉米生长的关键因素,该地区水资源利用效率低且灌溉方式不合理,严重影响了农业可持续发展。根系作为植物-土壤系统的核心纽带和作物吸收营养物质的重要途径,对土壤环境的变化极为敏感,其中土壤水分是影响根系生长发育的重要因素^[6]。土壤水分通过直接(水分胁迫)和间接(土壤通气性、养分有效性)途径影响根系发育,水分过量会导致土壤通气能力下降,阻碍根系对水

分和养分的吸收;而缺水的情况下,根系为了获得水源,会将碳水化合物输送到根部,使根冠比增加,从而对地上部的生长产生一定的影响^[7]。因此,研究不同补灌量下土壤水分-根系互作效应,对于实现玉米稳产与水资源高效利用的协同提升具有重要价值。

裴胜利等^[8]研究表明,有效的补灌策略可通过调控根系空间分布和生理活性来优化作物水分利用效率。薛丽华等^[9]通过探究补灌后冬小麦根系发育的过程,证实补灌量高的小麦根系多分布于0—80 cm土层,而补灌量不足的处理根系在80 cm以下土层中分布更密,对深层土壤的水分利用能力更强。郭建文等^[10]研究发现,前期水分亏缺对根系伸长的促进作用显著强于中期水分亏缺的处理,而中期补水处理的根长、根密度均显著高于全生育期补水处理。张岁岐等^[11]研究表明,在拔节期通过减少灌溉定额,能够增加玉米根系在深层土壤中的分布,从而提高玉米根系对下层土壤水分、营养物质的吸收与利用;同时,增大抽雄和灌浆期的灌溉定额,可以弥补前期缺水对根系的不良作用,且后期

补灌也可减缓表层土壤水分的快速下降。而根系伤流特性是在不破坏玉米根系生长发育的基础上反映根系活动的一种可持续研究方式^[12]。与其他灌溉方式不同的是,滴灌可以直接将玉米所需的养分和水分直接输送至玉米根区附近,根系会对不同滴灌条件产生更为直接的响应^[13]。目前有关内蒙古黄土高原区玉米根系分布与灌水量交互效应的研究鲜见报道。本研究在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗设置不同补灌量,测定玉米全生育期土壤含水率、耗水量和玉米关键生育时期(拔节期—灌浆期)根长密度、根表面积密度、根重密度、根系伤流强度以及玉米产量等指标,并解析土壤水分、根系分布及二者之间的交互效应,旨在探究不同补灌量下土壤水分对玉米根系及产量的影响,以期为

该地区玉米高效节水栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021—2022年在内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗纳林果园小杂粮科技试验示范基地进行(39°44′7.35″N,110°48′18.35″E,海拔1 038.3 m)。该地区属温带大陆性季风气候,2022年降水量为351.6 mm,年均气温为9.0℃,5—10月最高气温为30.5℃、最低气温为−13.1℃,日照时长为2 729.5 h;2023年降水量为578.8 mm,年均气温为8.6℃,5—10月最高气温为29.9℃、最低气温为−14.7℃,日照时长2 805.2 h。玉米供试品种为‘玉惠丰188’,试验土壤类型为砂壤土,2年的逐月降水量和月平均温度见图1。

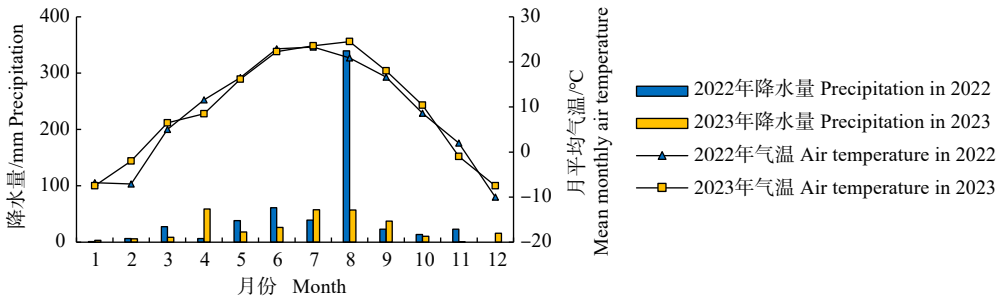


图1 2022—2023年试验区月降水量及月平均气温

Fig. 1 Monthly precipitation and average monthly air temperature in the test area in 2022-2023

1.2 试验设计

采用单因素随机区组试验设计,玉米全生育期共设置5个田间补灌量,分别为900(W₁)、1 050(W₂)、1 200(W₃)、1 350(W₄)、1 500 m³/hm²(CK),每个处理重复3次,共15个小区,小区面积为26.4 m²(4.4 m×6.0 m)。于出苗前定额滴灌

225 m³/hm²、灌浆期滴灌150 m³/hm²,其余水量分别于拔节期和抽雄期平均分2次滴灌,见表1。灌溉方式为膜下滴灌。玉米采用人工播种,播种时间为5月10日,播种密度为75 000株/hm²,55 cm等行距种植,株距为24.3 cm。试验所用肥料为缓释尿素300 kg/hm²(N含量44 g/100 g)、磷酸二铵228 kg/hm²

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

m³/hm²

处理 Treatment	灌溉定额 Irrigation quota				总补灌量 Total supplementary irrigation amount
	出苗前 Before seedling	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage	
W ₁	225	300 (150.0+150.0)	225 (112.5+112.5)	150	900
W ₂	225	375 (187.5+187.5)	300 (150.0+150.0)	150	1 050
W ₃	225	450 (225.0+225.0)	375 (187.5+187.5)	150	1 200
W ₄	225	525 (262.5+262.5)	450 (225.0+225.0)	150	1 350
CK	225	600 (300.0+300.0)	525 (262.5+262.5)	150	1 500

注:括号内为拔节期和抽雄期各分2次的补灌量。
Note: In parentheses is the amount of supplemental irrigation divided into 2 doses each at the nodulation and stamen withdrawal stages.

(P_2O_5 含量 46 g/100 g, N 含量 18 g/100 g) 和硫酸钾 120 kg/hm² (K_2O 含量 52 g/100 g), 作种肥一次性施入, 于拔节期和抽雄期随滴灌各追施 200 kg/hm² 水溶肥 ($w_N:w_{P_2O_5}:w_{K_2O}=30:10:10$)。试验地 0—20 cm 土层土壤有机质 12.68 mg/kg, 碱解氮 48.65 mg/kg, 有效磷 16.30 mg/kg, 速效钾 118.74 mg/kg, pH 8.38, 其他田间管理与当地农事措施相同。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 土壤样品采集

取各处理玉米播前和收获后 0—100 cm 土层, 以及苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期 0—60 cm 土层内每 20 cm 的土壤样品, 用土钻法^[14]测定土壤含水率, 用环刀法^[14]测定土壤容重。土壤含水率计算公式^[15]为:

$$W = \frac{g_2 - g_3}{g_3 - g_1} \times 100\%$$

式中: W , 土壤质量含水率, %; g_1 , 铝盒重量, g; g_2 , 湿土和铝盒总重, g; g_3 , 干土与铝盒重量, g。土壤容重计算公式^[16]为:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

式中: ρ , 土壤容重, g/cm³; M , 土壤干重, g; V , 环刀容量 100 cm³。

1.3.2 植株根系采集

在玉米拔节期、抽雄期、灌浆期测定根长、根表面积、根重。每小区 3 次重复, 采样时先割除地上部分, 以植株为中心, 以播行为基线, 依株行距划定根系采样范围。按 20 cm 分层, 采集 0—100 cm 土层内全部根系, 洗净吸干后装袋带回实验室。用北京海富达科技有限公司的彩色平台扫描仪 (STD4800) 测根长与根表面积, 之后将根系烘干至恒重并称质量。

在拔节期、抽雄期和灌浆期测定根系伤流强度^[17], 将单株玉米地上部距地面 10~15 cm 处剪断, 迅速用脱脂棉 (G_1) 把根部切口包好, 套上塑料袋避免伤流液蒸发, 2 h 后把脱脂棉、塑料袋和橡皮套取下带回实验室用分析天平称其重量 (G_2)。测定时间为 9:00—11:00, 每个处理测定 3 株。

根系伤流强度 (G) = [采样后脱脂棉重量 (G_2) - 采样前脱脂棉重量 (G_1)] / t 。

式中: t , 吸取伤流液时间, h。

1.3.3 计算指标

土壤贮水量计算公式^[15]为:

$$SWS = 10 \times \sum_{i=1}^5 h_i \rho_i W_i$$

式中: SWS , 土壤贮水量, mm; h , 土层深度, cm; ρ , 各土层土壤容重, g/cm³; W , 各土层土壤质量含水率, g/100 g。玉米耗水量计算公式^[18]为:

$$ET = P + I + G - D - R + \Delta SWS$$

式中: ET , 作物耗水量, mm; P , 生育期有效降水量, mm; I , 生育期灌水量, mm; G , 生育期地下水补给量, mm; R , 生育期地表径流量, mm; D , 生育期地下渗漏量, mm; ΔSWS , 时段内土壤贮水变化量, mm。

试验地点地势平坦, 可视地表径流为 0; 地下水埋深 4 m 以下, 可视为地下水补给量为 0; 降水入渗深度不超过 2 m, 可视深层渗漏为零, 因此 G 、 D 和 R 可以忽略不计。水分利用效率计算公式^[19]为:

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

式中: WUE , 水分利用效率, kg/(hm²·mm); Y , 经济产量, kg/hm²。

1.3.4 玉米收获指数和产量

在玉米收获后, 各小区随机选取 1 m² 玉米植株, 将玉米收割称量鲜重, 在 105 °C 下杀青 1 h, 然后在 75 °C 下烘干至恒重并称量干重, 计算生物产量, kg/hm²。收获指数 = 籽粒产量 / 地上部生物量。

待玉米成熟后, 选取 5 m 长双行植株进行收获, 脱粒后晒干、称重。各小区单独收获测定小区实际产量, 最后折算公顷产量, kg/hm²。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2019 和 Origin 2021 作图, SAS 9.0 软件进行方差分析, SPSS 26.0 进行相关性分析。

2 结果与分析

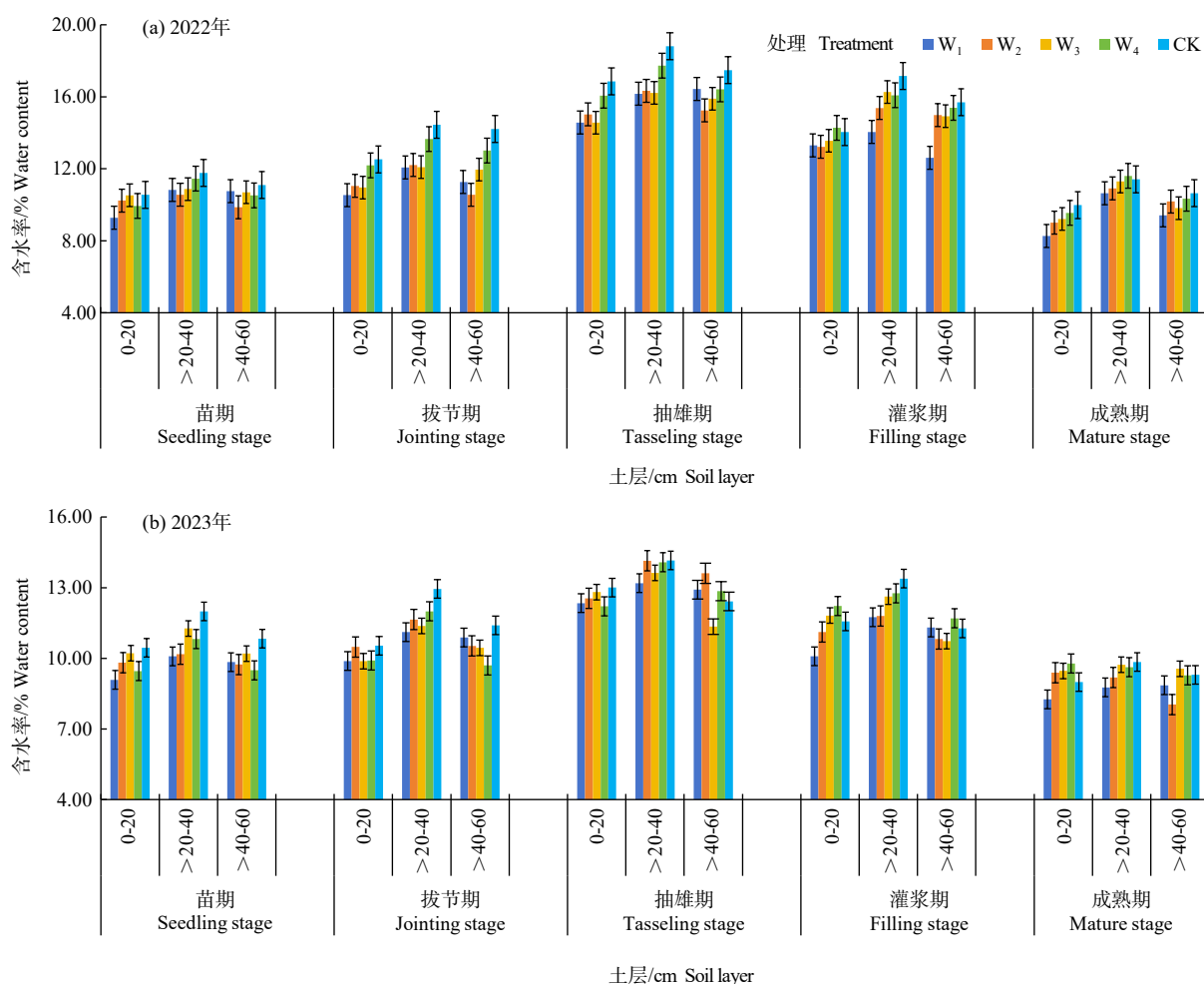
2.1 限量补灌对土壤水分的影响

2.1.1 对土壤含水率的影响

由图 2 可知, 2022 和 2023 年, 8 月份降水量分别为 339.60 和 57.00 mm, 2023 年土壤含水率整体上低于 2022 年。土壤含水率随生育进程呈单峰曲线, 峰值出现在抽雄期; 垂直剖面上则形成“低-高-低”分布格局, >20—40 cm 土层持水能力最强, 且 0—60 cm 土层中土壤含水率随补灌量的增加而增大。拔节期,

0—60 cm 土层中,各处理>20—40 cm 土层的土壤含水率较表层(0—20 cm)土壤分别升高 10.42%~15.36%(2022 年)和 11.16%~22.87%(2023 年),较深层(>40—60 cm)土壤分别升高 1.15%~15.70%(2022 年)和 2.09%~23.73%(2023 年)。抽雄期,

0—40 cm 土层中,各处理>20—40 cm 土层的土壤含水率较表层土壤分别升高 8.68%~11.58%(2022 年)和 6.39%~15.36%(2023 年)。灌浆期,因 2022 年降水量的迅速增加,不同处理土壤含水率之间无明显规律。



W₁、W₂、W₃、W₄和CK为灌水量9 00、1 050、1 200、1 350和1 500 m³/hm²。下同。

W₁、W₂、W₃、W₄ and CK are irrigation amount 9 00, 1 050, 1 200, 1 350 and 1 500 m³/hm², respectively. The same below.

图2 不同补灌量下玉米各生育时期土壤含水率的变化

Fig. 2 Changes of soil moisture content in maize growth period under different supplemental irrigation

2.1.2 对土壤贮水量的影响

由图3可知,玉米各生育时期土壤贮水量的变化规律呈现生育进程与垂直剖面的双维度单峰规律。在拔节期,2022和2023年均以CK的0—60 cm土层的贮水量最大,分别为103.46和87.80 mm,较其他处理分别高5.92%~21.45%和6.88%~10.27%。>20—40 cm土层的贮水量较表层(0—20 cm)高出10.27%~19.00%(2022年)、15.41%~

28.00%(2023年),较深层(>40—60 cm)土壤高出9.86%~25.66%(2022年)、10.88%~34.39%(2023年)。2年生育期土壤贮水量最高的均为抽雄期,0—60 cm土层较拔节期和灌浆期分别升高13.44%~39.10%(2022年)和7.48%~19.38%(2023年);在灌浆期,土壤贮水量整体上表现为2022年高于2023年;而成熟期因补灌终止和降水锐减,各处理贮水量趋于一致。

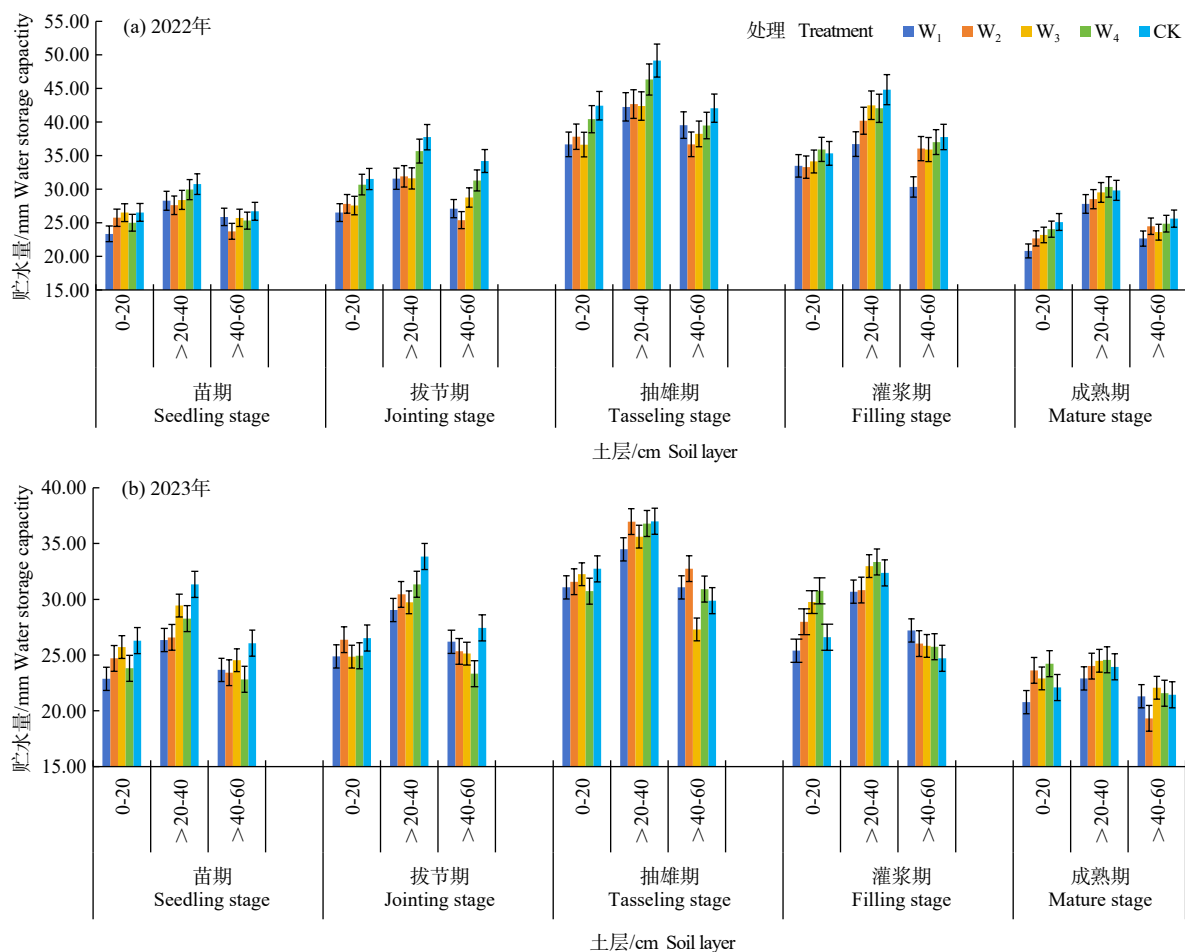


图3 不同补灌量下玉米各生育时期土壤贮水量的变化

Fig. 3 Changes of soil water storage at different growth stages of maize under different supplemental irrigation

2.1.3 对土壤耗水量的影响

由图4可知,随着补灌量的增加,土壤耗水量也增加,2022和2023年全生育期各处理0—60 cm土层平均耗水量为565.60和290.07 mm,由高到低均为CK>W₄>W₃>W₂>W₁,且土壤耗水量随生育

时期的推移呈先升高后降低的变化趋势,在抽雄期耗水量达最大值。2年不同处理的玉米耗水量变化趋势基本一致,抽雄期耗水最高,成熟期耗水量最少。2022年全生育期耗水量约为2023年的2倍,其原因在于2022年生育期降水量远高于2023年。

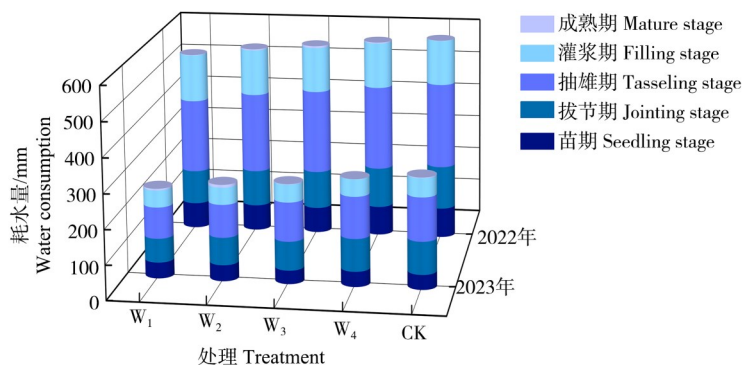


图4 不同补灌量下玉米全生育时期土壤耗水量

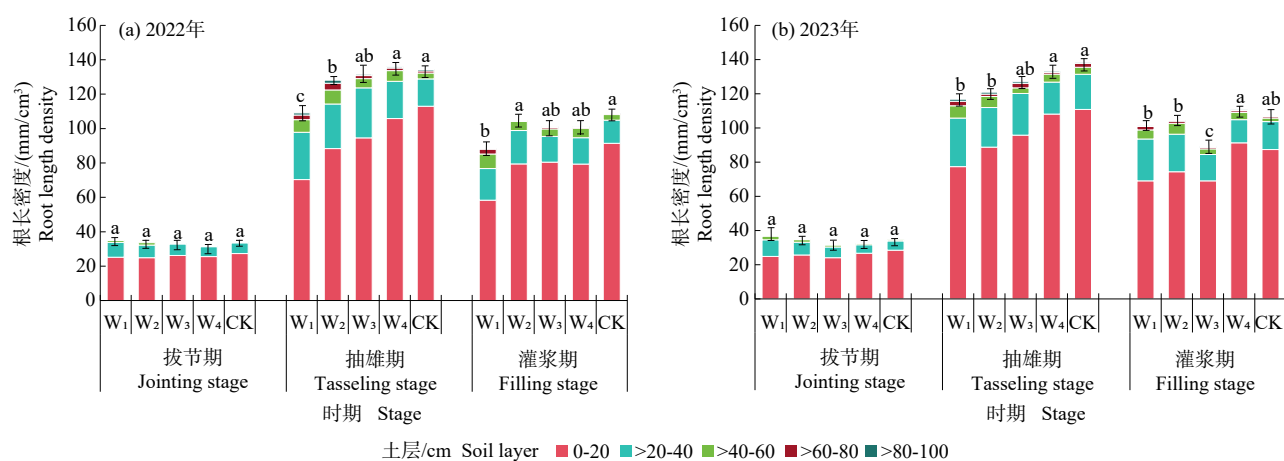
Fig. 4 Soil water consumption in the whole growing period of maize under different supplementary irrigation

2.2 限量补灌对玉米关键生育时期根系的影响

2.2.1 对根长密度的影响

由图5可知,拔节期的玉米根系生长迅速,此时为水分敏感期,80 cm以下土层仅有少数处理出现根系。抽雄期各处理呈现相似的变化趋势,2年随着补灌量的增加,0—20 cm土层中根长密度在0—100 cm土层中的占比增加,>40—100 cm土层中根长密度占0—

100 cm土层中的占比减少, W_1 的0—20 cm土层较其他处理分别低20.37%~37.69%(2022年)和12.80%~30.18%(2023年),>40—100 cm土层较其他处理高4.77%~81.04%(2022年)和22.64%~57.38%(2023年);灌浆期,0—20 cm土层中根长密度随补灌量的增加而增加, W_1 较其他处理低26.46%~36.12%(2022年)和0.04%~24.37%(2023年)。



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant different at 0.05 level. The same below.

图5 不同补灌量下玉米关键生育时期根长密度的变化

Fig. 5 Changes of root length density of maize in key growth period under different supplemental irrigation

2.2.2 对根表面积密度的影响

由图6可知,玉米拔节、抽雄、灌浆期0—20 cm土层中根表面积密度均表现为 W_1 低于其他处理,2年, W_1 较CK分别低21.21%、16.54%、19.44%(2022年)和7.94%、22.22%、27.59%(2023年)。2022年拔节

期 W_4 较CK高1.50%,2023年拔节期 W_4 较CK高1.59%,抽雄期和灌浆期 W_3 较CK高0.74%和1.72%。在>20—100 cm土层中,2022和2023年,各生育时期根表面积密度由高到低分别为 $W_1 > W_2 > W_3 > W_4 > CK$ 和 $W_1 > W_2 > W_3 > CK > W_4$ 。

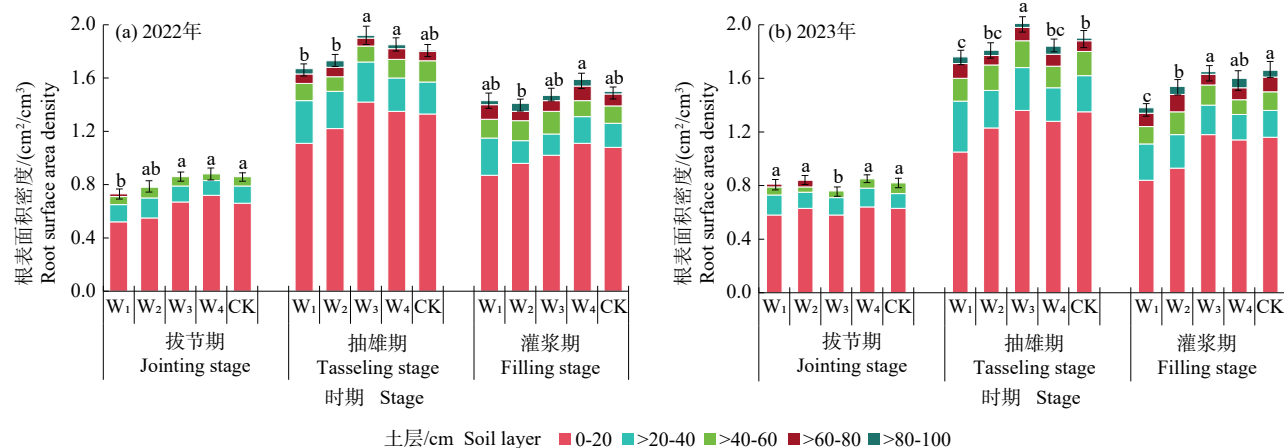


图6 不同补灌量下玉米关键生育时期根表面积密度的变化

Fig. 6 Changes of root surface area density in maize critical growth period under different supplemental irrigation

2.2.3 对根重密度的影响

由图 7 可知,随着玉米的生长,不同补灌量处理的玉米根重密度总体趋势表现为随着土层深度的增加而呈快速下降趋势,而随着生育时期的推进呈先升高后降低的变化趋势,且不同补灌量对根重密度的影响不同。2022 和 2023 年,0—20 cm 土层中根重密度均表现为 W_1 低于其他处理,拔节、抽雄、灌浆期的 W_1 分别较 CK 低 23.34%、14.53%、20.26% 和 24.78%、18.87%、22.63%;拔节、灌浆期 W_4 较

CK 分别高 8.36%、3.57% 和 7.39%、4.34%;抽雄期 W_3 较 CK 分别高 5.59% 和 3.14%。在 >20—100 cm 土层中,2022 年拔节期表现为 W_1 高于其他处理,较 CK 高 65.88%,抽雄和灌浆期均表现为 W_1 、 W_2 高于其他处理,分别较 CK 高 40.93%、21.81% 和 41.73%、42.49%;2023 年拔节、抽雄、灌浆期的 W_1 较 CK 分别升高 36.23%、60.75%、66.50%,各生育期根重密度均呈现出 $W_1 > W_2 > W_3 > W_4 > CK$ 。

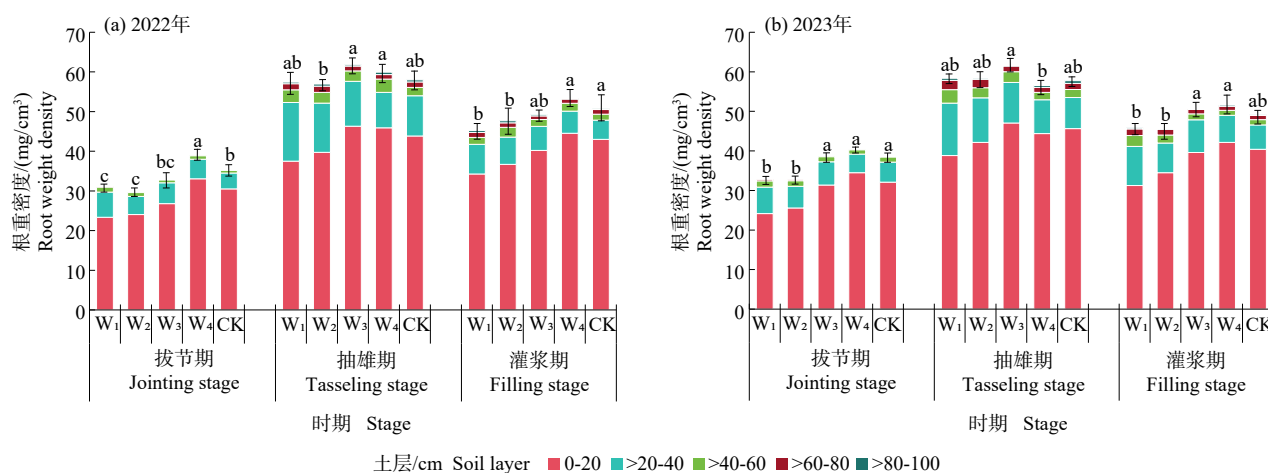


图 7 不同补灌量下玉米关键生育时期根重密度的变化

Fig. 7 Changes of root weight density in key growth period of maize under different supplemental irrigation

2.2.4 对根系伤流强度的影响

由图 8 可知,随补灌量的增加,拔节、抽雄、灌浆期的玉米根系伤流强度均呈先增加后降低的趋势,且不同处理间差异达显著水平。2 年拔节、抽雄期的玉米

根系伤流强度 W_3 较其他处理分别高 6.58%~44.34%、1.30%~37.20% (2022 年) 和 2.68%~30.89%、6.67%~29.61% (2023 年)。

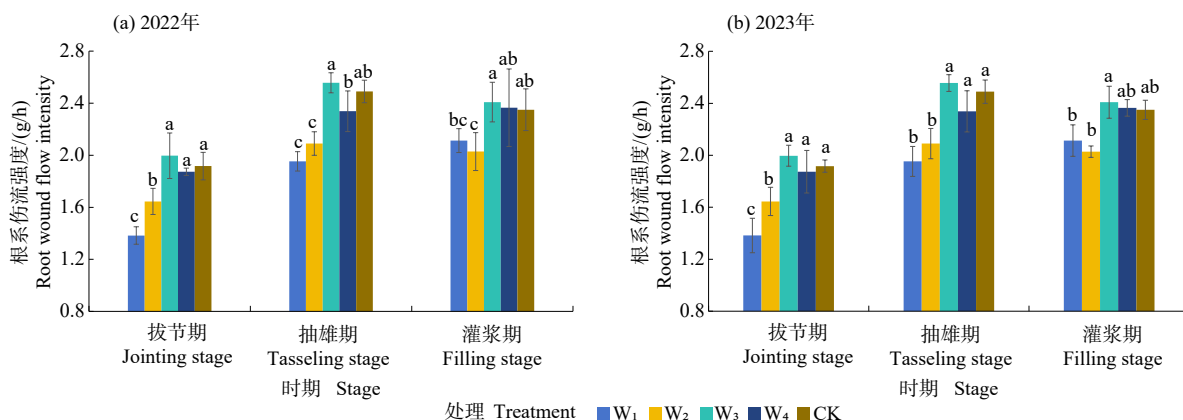


图 8 不同补灌量下玉米关键生育时期的根系伤流强度

Fig. 8 Root wound flow intensity in critical growth period of maize under different supplemental irrigation quantity

2.3 限量补灌对玉米产量构成因素及水分利用效率的影响

由表2可知,不同补灌量处理下玉米经济产量存在显著差异($P<0.05$),且补灌量对玉米经济产量的响应存在阈值效应。2022年 W_3 和CK的经济产量分别较其他处理高2.36%~31.63%和3.52%~33.11%,生物产量分别较其他处理高5.44%~14.07%和0.51%~14.66%;2023年 W_4 和CK的经济产量分别较其他处理高2.60%~28.96%和2.64%~32.37%,生物产量分别较其他处理高3.38%~9.93%和0.54%~10.52%;2年产量由高到低均为 $CK>W_3/$

$W_4>W_2>W_1$,其中2022年 $W_3>W_4$,2023年 $W_4>W_3$ 。2年的收获指数均表现为除 W_1 显著低于 W_4 外,其余处理间无显著差异。不同补灌量对玉米水分利用效率(WUE)存在显著影响,且WUE随补灌量的增加呈抛物线型变化趋势。2022年, W_3 玉米WUE较 W_1 高23.17%($P<0.05$),较 W_2 、 W_4 和CK分别高12.67%、5.14%、3.35%,各处理由高到低为 $W_3>CK>W_4>W_2>W_1$ 。2023年, W_3 较 W_1 高13.88%($P<0.05$),较 W_2 、 W_4 和CK分别高7.41%、4.61%、5.67%, W_4 较CK高1.01%,各处理由高到低为 $W_3>W_4>CK>W_2>W_1$ 。

表2 不同补灌量下玉米的产量构成因素和水分利用效率
Table 3 Yield components and water use efficiency of maize under different supplemental irrigation amount

年份 Year	处理 Treatment	千粒重/g Thousand grain weight	经济产量/(kg/hm ²) Economic yield	生物产量/(kg/hm ²) Biological yield	收获指数 Harvest index	水分利用效率/ (kg/hm ² ·mm) WUE
2022	W_1	261.90±10.17 ^b	9 167.58±495.68 ^c	2 4307.20±904.20 ^c	0.38±0.03 ^b	17.26±0.93 ^b
	W_2	279.00±18.46 ^{ab}	10 438.53±1 035.86 ^{bc}	26 103.23±222.05 ^b	0.40±0.04 ^{ab}	18.87±1.87 ^{ab}
	W_3	292.40±4.44 ^a	12 066.86±144.54 ^a	27 727.05±663.68 ^a	0.44±0.01 ^{ab}	21.26±0.25 ^a
	W_4	292.67±5.30 ^a	11 788.28±931.53 ^{ab}	26 296.50±402.75 ^b	0.45±0.05 ^a	20.22±1.60 ^a
	CK	296.40±5.77 ^a	12 202.80±818.45 ^a	27 869.61±789.17 ^a	0.44±0.04 ^{ab}	20.57±1.38 ^a
2023	W_1	264.85±1.76 ^b	9 050.45±295.40 ^c	24 513.50±769.99 ^c	0.37±0.02 ^b	34.86±1.14 ^b
	W_2	278.33±9.73 ^{ab}	10 266.77±357.15 ^{bc}	24 983.00±624.66 ^{bc}	0.41±0.01 ^{ab}	36.96±1.29 ^{ab}
	W_3	286.60±3.45 ^a	11 375.96±159.79 ^{ab}	26 067.25±817.24 ^{ab}	0.44±0.01 ^a	39.70±0.56 ^a
	W_4	292.98±12.90 ^a	11 671.56±1 084.27 ^a	26 947.50±629.49 ^a	0.43±0.05 ^a	37.95±3.53 ^{ab}
	CK	295.24±14.68 ^a	11 980.01±948.98 ^a	27 093.25±968.79 ^a	0.44±0.04 ^a	37.57±2.97 ^{ab}

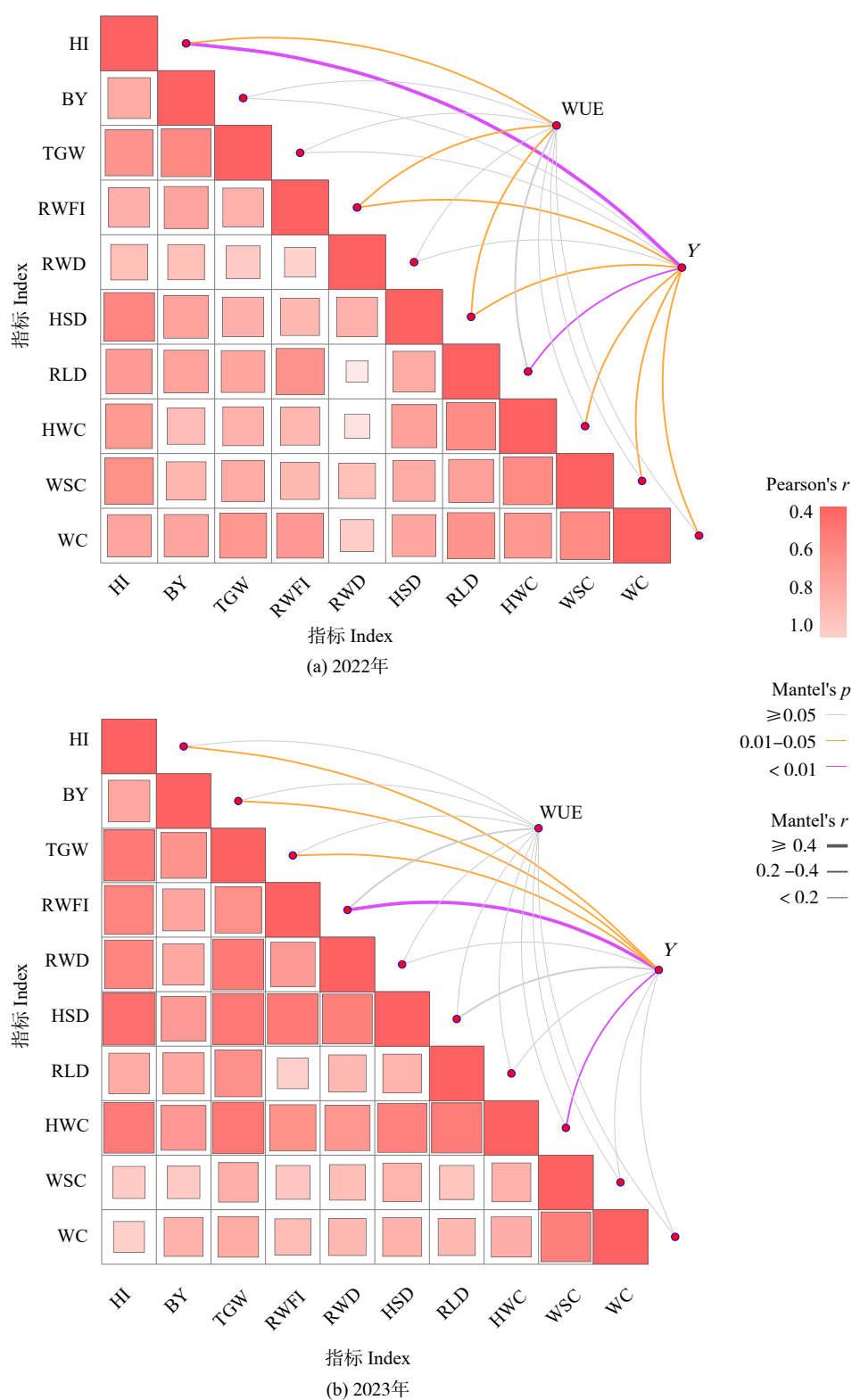
2.4 玉米经济产量和水分利用效率与土壤水分、根系和产量构成因素的相关性分析

由图9可知,2022年玉米经济产量(Y)与根长密度(RLD)、收获指数(HI)均呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤含水率(WC)、贮水量(WSC)、耗水量(HWC)、根表面积密度(HSD)和根系伤流强度(RWFI)均呈显著正相关($P<0.05$);水分利用效率(WUE)与HSD、RWFI、HI呈显著正相关($P<0.05$)。2023年 Y 与HWC、RWFI均呈极显著正相关($P<0.01$),与千粒重(TGW)、生物产量

(BY)和HI均呈显著正相关($P<0.05$);WUE与其他指标无显著相关。

2.5 玉米产量影响因素的综合分析

由图10可知,2022年,WUE、WSC、RWFI和HSD是影响玉米经济产量的关键指标,且WUE对玉米经济产量的影响达极显著水平($P<0.01$);而根长密度(RLD)与玉米经济产量呈负相关。2023年,RLD、RWFI和HSD是影响玉米经济产量的关键指标;而土壤含水率(WC)、WSC、根重密度(RWD)均与经济产量呈负相关。

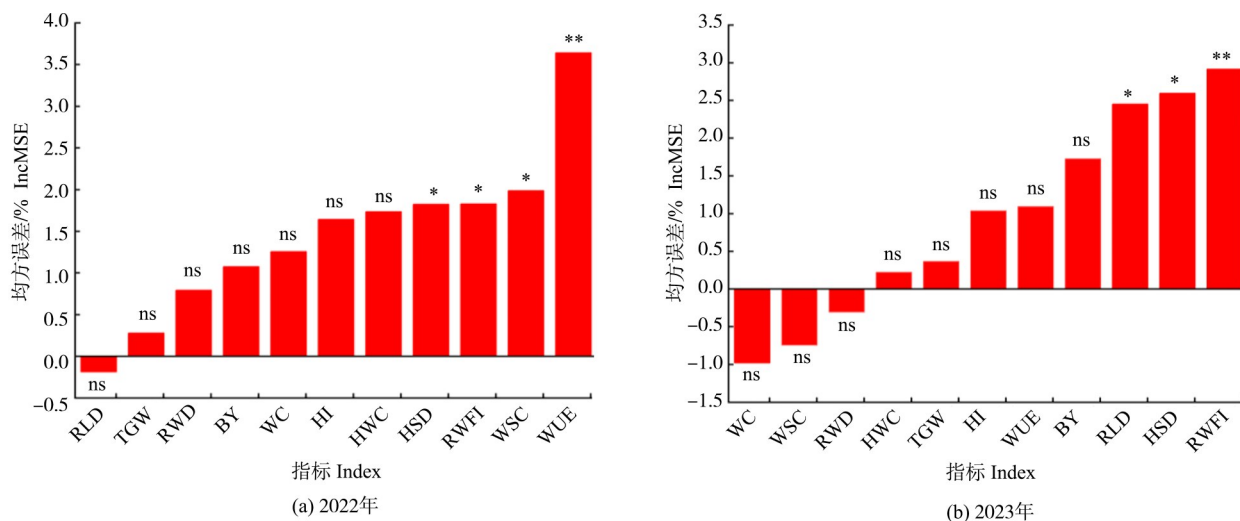


Y, 经济产量; WUE, 水分利用效率; HI, 收获指数; BY, 生物产量; TGW, 千粒重; RWFI, 根系伤流强度; RWD, 根重密度; HSD, 根表面积密度; RLD, 根长密度; HWC, 土壤耗水量; WSC, 土壤贮水量; WC, 土壤含水率。下同。

Y, economic yield; WUE, water use efficiency; HI, harvest index; BY, biological yield; TGW, 1 000-grain weight; RWF1, root wound flow intensity; RWD, root weight density; HSD, heel surface density; RLD, root length density; HWC, soil water consumption; WSC, soil water storage; WC, soil moisture content. The same below.

图9 不同补灌量下玉米产量和水分利用效率与土壤水分和根系指标的相关性

Fig. 9 Correlation of maize yield and water use efficiency with soil water and index of root under different supplementary irrigation



*和**分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。

* and ** indicate significant correlation ($P<0.05$) and highly significant correlation ($P<0.01$), respectively.

图10 不同补灌量下玉米产量影响因素的综合分析

Fig. 10 Comprehensive analysis of influencing factors of maize yield under different supplementary irrigation

3 讨论

3.1 限量补灌对土壤水分的影响

土壤水分是影响玉米生长发育的主要环境因子,对玉米根系发育、光合作用、养分吸收转运、植株水分平衡等具有重要的调控作用^[20]。充足的水分供应是植株挺立、叶片舒展的重要保证,也是促进玉米生长、获得较高经济产量的必要措施^[21]。水分作为土壤重要组成部分,其分布和含量的变化可反映植株对水分的利用情况^[22]。本研究结果表明,在整个生育时期和土层垂直分布上,土壤含水率和贮水量均随着补灌量的增加呈单峰曲线变化趋势,且部分处理间存在显著差异($P<0.05$),在抽雄期和 $>20\text{—}40\text{ cm}$ 土层达最大值。总体上来看,补灌量不同,不同土层的土壤含水率也不同,从而致使土壤贮水量和耗水量也不同,这与宇宙等^[23]研究结论一致。张昊等^[24]研究表明,膜下滴灌玉米产量与全生育期补灌量、耗水量均呈显著正相关。本研究中,随着补灌量的增加,土壤含水率、贮水量和耗水量均呈持续上升趋势,而玉米经济产量呈先增加后平稳的趋势,这也与张昊等^[24]的研究结论基本一致。本研究中, $1\,500\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 补灌量处理(CK)的 $0\text{—}60\text{ cm}$ 土层土壤含水率均高于其他处理,尤其在拔节期、抽雄期、灌浆期表现突出,这种垂直分布特征与曹永强等^[25]的研究结果有所不同,其原因在于本研究采用生育期动态补灌策略,在拔节期、抽雄

期、灌浆期分阶段分次补灌,而曹永强等^[25]的研究中采用的是均质灌溉,且本研究中CK的高补灌量可有效促进深层水分储存。姚小英等^[26]研究表明,当土壤含水量超过田间持水量时,重力驱动的渗透过程会受到饱和导水率的限制,土壤贮水量变化主要与作物吸水、蒸腾和田间蒸发有关,随着补灌量的增加土壤贮水量呈单峰变化趋势,而本研究中CK的土壤贮水量高于其他处理,首先是因为CK的补灌量最高,其次本研究 $30\text{—}60\text{ cm}$ 土层的土壤过于坚硬,导致水分下渗困难。土壤耗水量主要包括降水量、灌水量和土壤贮水消耗量^[27],本研究结果表明,玉米耗水量在苗期较低,在关键生育时期较高,而到成熟期快速降低。补灌量对整个生育期的耗水量有显著影响,在整个生育期内,随着灌水的增加,玉米的耗水量显著增加,这与李英等^[28]、刘战东等^[29]研究结果基本一致。

2023年因降水量锐减(2022和2023年8月份降水量分别为 339.60 和 57.00 mm),致使2023年处理间和纵向分布上的差异均大于2022年;而2022年灌浆期因集中降水导致补灌效应弱化,对土壤水分和作物生理机制的调控效能衰减,同时对水分空间的分布也趋于相同。梁哲军等^[30]研究表明,玉米的水分利用效率(WUE)随灌水定额的增加先迅速上升,当灌水定额增加到作物需求的阈值后WUE呈下降趋势。本研究结果表明,玉米水分利用效率随补灌量的增加表现为先升后降,其中 W_3

($1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$)的WUE均高于其他处理。整体来看,土壤贮水量和耗水量均呈现出随补灌量的增加而增大的趋势,这与作物耗水息息相关,且增加补灌量可有效提升作物经济产量,但超过一定限度则对经济产量无显著提升作用。

3.2 限量补灌对玉米根系的影响

根系是土壤-植物-大气连接体的关键部分^[31-32],也是研究水分传输和运移的主要器官,土壤水分作为玉米生长发育的关键环境因子,通过调节根系构型、叶片气孔导度和木质部导水率等生理过程均显著影响植株水分平衡状态及光合-蒸腾耦合效率^[33]。水分胁迫可促进玉米根系发育,尤其是前期进行胁迫,可提高玉米对水分和营养的高效利用,而苗期玉米对水分的需求并不高且抗旱能力也很强,所以,干旱胁迫对其生长及后期生物量积累的影响较小^[34-35]。本研究结果显示,0—20 cm土层的玉米根长密度、根表面积密度和根重密度均随着补灌量的增加而增加,>20—100 cm土层中表现为随着补灌量的增加而减小,其原因在于补灌量越大的处理土壤中含水量相对较高,根系向下深扎的必要性减小^[36],与邹海洋等^[37]研究结论相似。在不同的生育时期和不同的灌溉措施下,根系会偏向有利于生长的区域伸长,并且随着灌溉量的降低,根系的直径也会逐渐变小,这说明,水分是关联作物生长的关键因子之一,不同的灌水处理,不仅能够影响作物的生理指标,而且会使根系对生长环境进行感知并做出适应性调整;干旱对玉米根系生长的影响是一个极其复杂的过程,并且干旱程度不同对玉米根系生长的影响也不尽相同,虽然根系随土层的加深逐渐减少,但适度干旱可以促使根系向深层土壤生长,这也是玉米为满足自身生长需要对外界环境表现出的一种适应性,但过度和长期的干旱不利于根系的生长发育,容易使根系变得纤细、生命力不强^[38]。在玉米生长过程中,减少补灌量对玉米生长发育的抑制作用显著,而且随着干旱程度的加重,其抑制效果也会随之增强,因此,在适宜范围内减少补灌量对于玉米根系的深扎和扩散具有积极作用^[39]。

作物根系的生理活性与其所在区域的气温、土壤温度、水分等有很大的相关性^[40],因此,根系伤流强度是衡量根系对水分和养分吸收能力的1个重要指标^[41]。陆大克等^[42]研究认为,改善灌溉方式,增

加灌溉量对水稻根系生长具有促进作用,这是由于单位面积土壤可供作物吸收的水分是有限的,过高的灌溉量反而会抑制根系的生长发育。本研究结果与陆大克等^[42]的基本一致。本研究表明,W₃($1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$)处理根系的伤流强度显著高于CK和W₁,与W₄无显著差异,这说明W₃处理对玉米植株养分和水分的吸收、运输具有积极作用,并可以保持较高的水分和养分利用效率。

4 结 论

在玉米生育进程中,各处理土壤含水率、贮水量和耗水量均随生育进程呈单峰曲线变化,抽雄期达峰值;垂直剖面上则形成"低-高-低"分布特征,>20—40 cm土层持水能力最强。0—100 cm土层内,玉米根系的分布特征表现出层次性,主要集中在0—20 cm土层中,根系总量占比为60%~80%,且根系密度随着土层深度延伸而急剧减少;随着补灌量的增加,0—20 cm土层的根系密度呈上升趋势,而>20—100 cm反之。W₃的玉米伤流强度最高,较其他处理高1.28%~30.72%,水分利用效率较其他处理高3.37%~23.17%,且产量稳定。根据玉米产量影响因素的综合分析得出,水分利用效率和根系密度是影响玉米产量的关键指标。综上,在内蒙古黄土高原区,玉米整个生育期最佳补灌量为 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

参考文献 References

- [1] 农业农村部种植业管理司. 2023年春季主要农作物科学施肥指导意见[EB/OL]. [2023-03-20]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/202303/t20230314_6423039.htm
Plant Industry Management Department of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Guidelines for scientific fertilization of major crops in spring 2023[EB/OL]. [2023-03-20]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/202303/t20230314_6423039.htm (in Chinese)
- [2] 丰智松,曹寒冰,付浩然,张青松,李芳,赵翔翔. 我国东北地区春玉米科学施肥评价[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 52-60
Feng Z S, Cao H B, Fu H R, Zhang Q S, Li F, Zhao S X. Evaluation of scientific fertilization of spring corn in Northeast China[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(3): 52-60 (in Chinese)
- [3] 张宝庆. 黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014
Zhang B Q. Study on temporal and spatial variability of drought and potential of rainwater resource utilization in Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014 (in Chinese)
- [4] 王国帅,徐冰,汤鹏程,田德龙,张琛,任杰,李泽坤. 内蒙古黄土高原旱作区典型作物水分供需平衡分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2): 32-37

- Wang G S, Xu B, Tang P C, Tian D L, Zhang C, Ren J, Li Z K. Analysis of water supply and demand balance of typical crops in dry farming area of Loess Plateau in Inner Mongolia[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(S2): 32-37 (in Chinese)
- [5] Guanter L, Zhang YG, Jung M, Joiner J, Voigt M, Berry J A, Frankenberg C, Huete A R, Zarco-Tejada P, Lee J E, Susan Moran M, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker J M, Griffis T J. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, (2014-03-25). DOI:doi.org/10.1073/pnas.1320008111
- [6] 钟玉君, 梁小龙, 王永峰, 朱冬, 廖汉鹏, 谢柠桢, 张颖, 贾永锋. 植物根际噬菌体生态研究进展[J/OL]. *生态学杂志*, 1-11[2025-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20250211.1609.006.html>
- Zhong Y J, Liang X L, Wang Y F, Zhu D, Liao H P, Xie N H, Zhang Y, Jia Y F. Plant rhizosphere bacteriophage ecology: Scientific progress and prospects [J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 1-11[2025-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20250211.1609.006.html> (in Chinese)
- [7] 陈洁. 水杉种苗生长与土壤水分含量关系及管理策略的分析[J]. *种子世界*, 2025, (1): 195-197
- Chen J. Analysis on the relationship between seedling growth of *Metasequoia glyptostroboides* and soil moisture content and its management strategy[J]. *Seed World*, 2025, (1): 195-197 (in Chinese)
- [8] 裴胜利, 吕福泉, 邓新炜, 白振涛, 廖振棋, 李云霞, 范军亮, 尹飞虎. 果树地下滴灌技术研究进展与展望[J/OL]. *干旱地区农业研究*, 1-9[2025-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1088.s.20250413.1123.012.html>
- Pei S Z, Lv F Q, Deng X H, Bai Z T, Liao Z Q, Li Y X, Fan J L, Yin F H. Progress and prospect of subsurface drip irrigation technology for fruit trees [J/OL]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, [2025-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1088.s.20250413.1123.012.html> (in Chinese)
- [9] 薛丽华, 段俊杰, 王志敏, 王润正. 冬小麦调亏灌溉下次生根和初生根对植株生长的影响[J]. *华北农学报*, 2010, 25(3): 87-91
- Xue L H, Duan J J, Wang Z M, Wang R Z. The effect of secondary and seminal roots of winter-wheat to plant growth under regulated deficit irrigation conditions[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(3): 87-91 (in Chinese)
- [10] 郭建文, 刘海. 不同灌溉制度对玉米生长过程中水分利用的影响[J]. *山西农业科学*, 2014, 42(4): 346-348
- Guo J W, Liu H. Study on different irrigation systems water use in maize growth[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(4): 346-348 (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Jia Q M, Chen K Y, Chen Y Y, Ali S, Manzoor, Sohail A, Fahad S. Mulch covered ridges affect grain yield of maize through regulating root growth and root-bleeding sap under simulated rainfall conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 101-111
- [13] 满旭伦. 覆盖方式对旱地春玉米根系发育与水分利用效率的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024
- Man X L. The influencing mechanism of mulching patterns on the growth and development of root systems and water use efficiency of spring maize in dryland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024 (in Chinese)
- [14] 杨维, 李慧婷, 季海明. 西宁市南北山主要造林树种的土壤水分特征研究[J]. *林业调查规划*, 2024, 49(3): 124-132, 146
- Yang W, Li H T, Ji H M. Soil moisture characteristics of soil moisture of major afforestation tree species in north and south mountains of Xining City[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2024, 49(3): 124-132, 146 (in Chinese)
- [15] 杨森. 机械化耕播方式对土壤物理特性及玉米生长性状影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023
- Yang S. Effects of mechanized tillage and sowing methods on soil physical properties and maize growth traits [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [16] 刘雅杰. 秸秆还田条件下耕作方式对土壤碳组分组成特征及玉米生长发育的影响[D]. 呼和浩特市: 内蒙古大学, 2023
- Liu Y J. Effects of tillage methods on soil carbon composition characteristics and corn growth and development under the condition of straw returning to field [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023 (in Chinese)
- [17] 李斐, 边少锋, 徐晨, 赵洪祥, 宋杭霖, 王美臣, 庄妍. 坡耕地垄侧栽培对玉米生理特性及生长发育的影响[J]. *作物杂志*, 2024, (6): 120-125
- Li F, Bian S F, Xu C, Zhao H X, Song H L, Wang F C, Zhuang Y. Effects of ridge side cultivation on maize physiological characteristics and growth and development of maize in sloping arable land [J]. *Crops Magazine*, 2024, (6): 120-125 (in Chinese)
- [18] 冀晓娜. 干旱胁迫对土壤水分和玉米产量结构的影响分析[J]. *内蒙古科技与经济*, 2022(23): 103-105
- Ji X N. Effects of drought stress on soil moisture and maize yield structure [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2022(23): 103-105 (in Chinese)
- [19] 杨明达, 张素瑜, 李帅, 郑东方, 杨慎骄, 关小康, 王同朝. 不同播种灌溉方式对夏玉米出苗、干物质积累及转运和产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2024, 53(1): 22-31
- Yang M D, Zhang S Y, Li S, Zheng D F, Yang S J, Guan X K, Wang T C. Effects of different sowing and irrigation methods on seedling emergence, dry matter accumulation and transport and yield of summer maize [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(1): 22-31 (in Chinese)
- [20] 陈建忠, 肖荷霞, 胡铁欢, 刘艳涛. 灌水和施用钾肥对玉米果穗叶片光合特性及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(S2): 184-186
- Chen J Z, Xiao H X, Hu T H, Liu Y T. Influence of irrigation and K₂O on photosynthesis of corn ear leaf and yield [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(S2): 184-186 (in Chinese)
- [21] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 100-107
- Qiu Y, Fu B J, Wang J, Zhang X L, Meng Q H. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 100-107 (in Chinese)
- [22] Jin Z N, Zhuang Q L, Wang J L, Archontoulis S V, Zobel Z, Kotamarthi V R. The combined and separate impacts of climate extremes on the current and future US rainfed maize and soybean production under elevated CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2687-20704
- [23] 宇宙, 王勇, 罗迪汉. 膜下滴灌下玉米需水规律及优化灌溉制度研究[J].

- 节水灌溉, 2015(4): 10-13, 18
- Yu Z, Wang Y, Luo D H. A study on water requirement rule and optimal irrigation system for corn under drip irrigation under membrane condition [J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(4): 10-13, 18 (in Chinese)
- [24] 张昊, 郝春雷, 孟繁盛, 慈艳华, 郑伟, 张丽研, 边丽梅, 董喆, 霍剑锋. 膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米产量及土壤水分的影响[J]. 作物杂志, 2016(1): 105-109
- Zhang H, Hao C L, Meng F S, Ci Y H, Zheng W, Zhang L Y, Bian L M, Dong Z, Huo J F. Effects of different irrigation quota on yield and soil moisture of maize with drip irrigation under film mulch [J]. *Crops*, 2016(1): 105-109 (in Chinese)
- [25] 曹永强, 冯兴兴, 李玲慧, 路洁. 气候变化下辽宁省春玉米水热时空特征及干旱风险[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1092-1105
- Cao Y Q, Feng X X, Li L H, Lu J. Temporal and spatial variation of spring corn in Liaoning Province under climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1092-1105 (in Chinese)
- [26] 姚小英, 王莺, 王兴, 周忠文, 张蓓, 杨子和. 黄土高原旱塬区玉米田土壤水分变化特征及对产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 292-297
- Yao X Y, Wang Y, Wang X, Zhou Z W, Zang B, Yang Z H. Soil moisture variation characteristics of corn fields and its effect on crop yield in dryland of Loess Plateau [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(12): 292-297 (in Chinese)
- [27] 孙占祥, 李德新, 赵岩, 祝从康, 魏亚范, 于希臣. 玉米不同生育时期耗水量及抗旱性的研究[J]. 辽宁农业科学, 1996(02): 11-14
- Sun Z X, Li D X, Zhao Y, Zhu C K, Wei Y F, Yu X C. Study on water consumption and drought resistance of maize at different growth stages [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1996(2): 11-14 (in Chinese)
- [28] 李英, 王鹤龄, 蒋菊芳, 丁文魁, 刘海燕. 不同水分处理对春玉米水分动态和株高的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(27): 1-7
- Li Y, Wang H L, Jiang J F, Ding W K, Liu H Y. Effects of different water treatments on moisture dynamics and plant height of spring maize [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(27): 1-7 (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 梁哲军, 齐宏立, 王玉香, 董鹏, 张冬梅, 杨印斌, 南雪琴, 赵海祯, 席天元. 不同滴灌定额对玉米光合性能及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(36): 74-78
- Liang Z J, Qi H L, Wang Y X, Dong P, Zhang D M, Yang Y B, Nan X Q, Zhao H Z, Xi T Y. Effects of different drip irrigation quotas on photosynthetic performance and water use efficiency in maize [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(36): 74-78 (in Chinese)
- [31] 胡田田, 康绍忠. 局部灌水方式对玉米不同根区土-根系统水分传导的影响[J]. 农业工程学报, 2007(2): 11-16
- Hu T T, Kang S Z. Effects of localized irrigation model on hydraulic conductivity in soil-root system in different root zones of maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007(2): 11-16 (in Chinese)
- [32] 刘晚苟, 山仑, 邓西平. 不同土壤水分条件下土壤容重对玉米根系生长的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 107-114
- Liu W G, Shan L, Deng X P. Effects of soil bulk density on the growth of maize root system under different water condition [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(4): 107-114 (in Chinese)
- [33] 张咏梅, 胡海英, 白小明, Matthew Croy, Garcia-Favre Jviera, Ordóñez Ián Pv. 极干旱胁迫对雀麦、多年生黑麦草生长和体内水分的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3807-3818
- Zhang Y M, Hu H Y, Bai X M, Croy M, Jviera G, Pv O. The effects of extreme drought stress on growth and water in content in pasture brome and perennial ryegrass [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(12): 3807-3818 (in Chinese)
- [34] 郭相平, 康绍忠, 索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2001, 20(1): 25-27
- Guo X P, Kang S Z, Suo L S. Effects of regulated deficit irrigation on root growth in maize [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2001, 20(1): 25-27 (in Chinese)
- [35] 慕自新, 张岁岐, 郝文芳, 梁爱华, 梁宗锁. 玉米根系形态性状和空间分布对水分利用效率的调控[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2895-2900
- Mu Z X, Zhang S Q, Hao W F, Liang A H, Liang Z S. The effect of root morphological traits and spatial distribution on WUE in maize [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2895-2900 (in Chinese)
- [36] 白梓辰. 限量补灌对玉米光合特性、根系形态建成及产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024
- Bai Z C. Effects of limited supplemental irrigation on photosynthetic characteristics, root morphogenesis and yield of maize [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [37] 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 陈东峰, 陆军胜, 郑静. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 145-155
- Zhou H Y, Zhang F C, Zhang Y X, Chen D F, Lu J S, Zheng J. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 145-155 (in Chinese)
- [38] 徐宝山, 贾生海, 雒天峰, 金建新. 膜下滴灌不同灌水定额对玉米根系生长的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 272-276, 284
- Xu B S, Jia S H, Luo T F, Jin J X. Effect of different drip irrigation schedule under mulch on root distribution of maize [J]. *Research Soil and Water Conservation*, 2014, 21(5): 272-276, 284 (in Chinese)
- [39] 杜旭龙, 黄锦学, 杨智杰, 熊德成. 增温对植物叶片和细根氧化损伤与防御特征及其相互关联影响的研究进展[J]. 植物生态学报, 2024, 48(2): 135-146
- Du X L, Huang J X, Yang Z J, Xiong D C. Effects of warming on oxidative damage and defense characteristics and their correlation in leaf and fine root of plants: A review [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(2): 135-146 (in Chinese)
- [40] 安鹤轩. 青海省植被净初级生产力对气候异常事件响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024
- An H X. Response of Qinghai Province of vegetation net primary productivity to climate anomalies [D]. Yanglin: Northwest Agriculture and Forestry University, 2024 (in Chinese)
- [41] 李鑫, 崔菁菁, 徐克章, 肖金川, 张治安, 李大勇. 不同生育期人参根系伤流液质量与叶片光合的关系[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(3): 362-365
- Li X, Cui J J, Xu K Z, Xiao J C, Zhang Z A, Li D Y. Relationships between mass of root bleeding sap and photosynthesis in leaves of *Panax ginseng* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2013, 34(3): 362-365 (in Chinese)

[42] 陆大克, 段骅, 王维维, 刘明爽, 魏艳秋, 徐国伟. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1362-1372

Lu D K, Duan H, Wang W W, Liu M S, Wei Y Q, Xu G W.
Comparison of rice root development and function among different

degrees of dry-wet alternative irrigation coupled with nitrogen forms[J].
Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1362-1372 (in
Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 白梓辰, 内蒙古农业大学农学院农艺与种业专业硕士研究生。参与国家与内蒙古自治区科研项目10余项, 授权专利4件。



通讯作者简介: 任永峰, 博士毕业于中国农业大学, 博士后毕业于内蒙古大学, 现为内蒙古自治区农牧业科学院资源环境与可持续发展研究所研究员, 副所长。主要从事旱作区作物抗旱集雨栽培、旱地地力培育、作物丰产高效种植等方面的研究。主持、参与国家重点研发项目、国家科技计划项目、国家自然科学基金等国家及省部级科研项目10余项。获国家科技进步奖二等奖1项(第5位), 获内蒙古科技进步特等奖1项(第18位)、二等奖2项(均第7位), 获内蒙古农牧业丰收二等奖1项(第7位), 授权专利36件, 制定标准17项, 主编著作1部、副主编著作3部, 发表论文70余篇。