文章编号:1000-7601(2025)06-0129-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.13

关键生育期补灌量对陕北春玉米产量和水氮利用的影响

王玉明[1,2],杜娅丹[1,2],胡笑涛[1,2],曹红霞[1,2],
李田田[1,2],李晓雁[1,2],延廷霖[1,2],谷晓博[1,2]

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为明确春玉米关键生育时期补充灌溉对其产量和水氮利用的影响,提出有利于陕北旱区春玉米节水节肥保产的适宜补灌量,以'榆单 896'为试验材料,在膜下滴灌条件下,设置 0 mm(I0)、75 mm(I1)、150 mm(I2)、225 mm(I3)和 300 mm(I4)5 个补灌处理(施氮量均为 240 kg·hm^{-2}),以当地充分灌溉 300 mm 和施氮 300 kg·hm^{-2}作为对照(CK),研究不同补灌水量对春玉米生长、叶绿素含量(SPAD)、地上部干物质累积量、产量和水氮利用效率的影响。结果表明:相同施氮量下,关键生育期补灌春玉米株高、茎粗、叶面积指数和 SPAD 分别提高 5.63%~24.56%、4.44%~17.68%、11.73%~35.55%和 2.32%~29.38%;2023 年和 2024 年地上部干物质累积量分别为 I3 和 I4 处理最大,其快速累积持续时间较其它处理分别增加了 1~8 d 和 4~12 d。产量和氮肥偏生产力(*NPFP*)随补灌量的增加而增大,2023 年和 2024 年分别为 I3、I4 处理最大,分别为 11 076.34 kg·hm^{-2}、51.80 kg·kg^{-1}和 12 156.95 kg·hm^{-2}、50.65 kg·kg^{-1},而 I3 与 I4 差异不显著(P>0.05)。2023 年和 2024 年水分利用效率(*WUE*)均随补灌量增加呈先增大后减小趋势,I3 处理 *WUE* 最高,两年分别为 30.29 kg·hm^{-2}·d^{-1}和 28.06 kg·hm^{-2}·d^{-1}。综合考虑产量和水氮利用效率,利用熵权法对各指标权重进行计算,并对各处理进行综合评价打分,排序为 CK>I3>I4>I2>I1>I0,但 I3 处理两年 *WUE* 和 *NPFP* 分别较 CK 处理平均增加 3.81%和 5.77%。由于当地水资源极度匮乏,CK 处理经济投入较大,不符合节水节肥高产的要求。因此,推荐补灌量和施氮量分别为 225 mm 和 240 kg·hm^{-2}(I3)为陕北春玉米节水高效生产的最优管理措施。

关键词:春玉米;补灌水量;干物质累积;产量;水氮利用效率

中图分类号:S274.1;S513 **文献标志码**:A

Effects of supplemental irrigation at critical fertility periods on yield and water and nitrogen utilization of spring maize in northern Shaanxi Province

WANG Yuming[1,2], DU Yadan[1,2], HU Xiaotao[1,2], CAO Hongxia[1,2],
LI Tiantian[1,2], LI Xiaoyan[1,2], YAN Tinglin[1,2], GU Xiaobo[1,2]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To clarify the effects of supplemental irrigation during key growth stages on spring maize yield and the utilization efficiency of water and nitrogen, this study aimed to determine an optimal irrigation amount that ensures water-saving, nitrogen-saving, and yield stability in the arid regions of northern Shaanxi. Using the spring maize variety 'Yudan 896' under drip irrigation beneath plastic mulch, five supplemental irrigation levels were set: 0 mm (I0), 75 mm (I1), 150 mm (I2), 225 mm (I3), and 300 mm (I4), all with a nitrogen application

收稿日期:2025-03-10 **修回日期**:2025-05-08

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-46)

作者简介:王玉明(2000-),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为农业水肥资源高效利用。E-mail:wym10232022@163.com

通信作者:杜娅丹(1991-),女,河南周口人,副教授,主要从事农业水肥资源高效利用研究。E-mail:dyd123027@163.com

rate of 240 kg · hm^{-2}. A local conventional practice with full irrigation of 300 mm and nitrogen application of 300 kg · hm^{-2} served as the control (CK). The effects of different irrigation levels on plant growth, chlorophyll content (SPAD), aboveground dry matter accumulation, yield, and water and nitrogen use efficiencies were investigated. The results showed that under the same nitrogen input, supplemental irrigation during key growth stages significantly promoted plant height, stem diameter, leaf area index, and SPAD values, increasing by 5.63%~24.56%, 4.44%~17.68%, 11.73%~35.55%, and 2.32%~29.38%, respectively. In 2023 and 2024, the maximum aboveground dry matter accumulation occurred in the I3 and I4 treatments, respectively, with the rapid accumulation period extended by 1~8 days and 4~12 days compared to other treatments. Grain yield and nitrogen partial factor productivity (*NPFP*) increased with the irrigation amount, peaking at I3 in 2023 (11 076.34 kg · hm^{-2} and 51.80 kg · kg^{-1}) and at I4 in 2024 (12 156.95 kg · hm^{-2} and 50.65 kg · kg^{-1}), though no significant differences were observed between I3 and I4 (P>0.05). Water use efficiency (*WUE*) showed a trend of first increasing and then decreasing with increasing irrigation. The highest *WUE* was observed under I3 treatment, with 30.29 kg · hm^{-2} · d^{-1} in 2023 and 28.06 kg · hm^{-2} · d^{-1} in 2024. Considering both yield and resource use efficiency, the entropy weight method was applied to calculate the weight of each indicator and to conduct a comprehensive evaluation. The treatment rankings were CK>I3>I4>I2>I1>I0. However, I3 treatment outperformed CK in terms of average *WUE* and *NPFP* over the two years, increasing by 3.81% and 5.77%, respectively. Given the region's severe water scarcity and the high economic cost of CK, the CK treatment does not align with the study's goals of water- and nitrogen-saving with high yield. Therefore, the I3 treatment — with 225 mm irrigation and 240 kg · hm^{-2} nitrogen application — is recommended as the optimal water-efficient management practice for spring maize production in northern Shaanxi.

Keywords: spring maize; supplemental irrigation amount; dry matter accumulation; yield; water-nitrogen use efficiency

玉米作为我国第一大粮食作物,种植面积和产量分别占全国粮食作物总面积和总产量的33.6%和36.1%[1],提高玉米产量是保障粮食安全的重要途经。在陕北半干旱地区,春玉米种植面积约占粮食作物总面积的57%,提高玉米产量对当地经济增长和人民生活水平的提高至关重要[2]。然而陕北地区年均降水量不到400 mm,且时空分配不均,春玉米生育期中降雨不足,使玉米产量减少15%~30%,严重制约了春玉米产量的提高[3]。此外,当地农民普遍过量补灌施肥,补灌量和施氮量分别高达300 mm和350 kg · hm^{-2}。过量补灌施氮会导致作物营养生殖旺盛,降低作物水分利用效率且浪费水资源,引发大量土壤硝酸盐淋溶损失,造成严重的环境污染[4-5]。为缓解当地水资源匮乏对春玉米产量的抑制作用,在玉米关键生育期进行补充灌溉以满足其用水需求[6-7],对陕北半干旱地区春玉米节水保产增效具有重要意义。

前人针对关键生育期补灌对作物生长发育的影响已有大量研究。春玉米生育期内遭遇干旱胁迫会降低产量和水肥利用效率[8],而充分灌溉会保证高产但增加耗水量,大幅降低作物水分利用效率。有研究发现,关键生育期补充灌溉能够有效节约水资源,增加作物产量和水分利用效率[9]。Yin等[10]对东北农业区玉米的研究表明,在播种期和开花期进行灌溉相较于其他关键生育期能更有效地缓解干旱胁迫,提高玉米产量。高震等[11]对华北春玉米研究发现,在玉米拔节期、大喇叭口、抽雄期和吐丝期每次补灌75 mm,可显著提高玉米氮收获指数28.8%~139.3%。前人针对关键生育期补灌对作物生长的研究结果不尽一致,且针对作物关键生育期补灌的研究多集中在东北、华北等地区,而关于陕北地区关键生育期补灌对作物产量和水氮利用效率影响的研究较少。

黄土高原旱作区建设了大量的集雨窖、塘坝、涝池等集雨工程,用来收集降雨用于作物需水关键期补充灌溉,可解决水资源匮乏导致作物低产的问题[12],然而雨水集蓄工程可利用补灌的水量极其有限,明确适宜补灌量能够有效节约雨水资源并提高作物产量和水氮利用效率。以往关于陕北半干旱地区关键生育期补充灌溉的研究多集中在马铃薯[13]和谷子[14]等粮食作物,而关键生育期补灌对陕北春玉米的影响鲜有报道。本研究以春玉米为研究对象,针对陕北半干旱地区季节性干旱严重、水资源匮乏的现状,系统研究膜下滴灌条件下关键

生育期补灌量对春玉米生长生理、产量以及水氮利用效率的影响,提出春玉米节水节肥高产的最优补灌量,优化膜下滴灌春玉米适宜生育期补灌管理制度,以期为陕北半干旱地区春玉米的生产种植提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2023—2024 年在陕西省榆林市国家现代农业产业园区试验站(38°16′N,109°45′E)开展。该地属于温带大陆性季风气候,为黄土高原与毛乌素沙地过渡带的典型风沙草滩地貌类型,也是主要的旱作农业区。此区年平均降水量 370 mm,年蒸发量 1 900 mm,年降水分布不均,主要集中在 7—9 月,年日照时数 2 900 h,年均气温 8.6℃,≥10℃积温为 3 000~3 300℃,无霜期 167 d。在玉米生长季节(5 月 10 日—9 月 25 日),由试验地一体化气象站(HOBO,美国)记录气象数据(图 1),两年间春玉米生育期日平均温度为 15.6~23.6℃,总降水量分别为 168.0 mm 和 187.3 mm。试验地土壤类型为黄绵土,田间持水率为 19.35%,土壤容重为 1.47 g·cm^{-3}。播种前耕作土层取 0~20 cm 土壤,土壤含水率为 11.85%,pH 值为 8.5,有机质为 6.77 mg·kg^{-1}、速效氮 43.25 mg·kg^{-1}、速效磷16.87 mg·kg^{-1}、速效钾 98.64 mg·kg^{-1}。

1.2　试验设计

供试作物为当地种植的制种玉米,品种为'榆单 896',2023 年和 2024 年均为 5 月 10 日播种、9 月 25 日收获。试验采用宽窄行种植,宽行间距为 80 cm,窄行间距为 40 cm,株距为 25 cm,种植密度为 66 700 株·hm^{-2},滴灌带采用一管两行布设。2023 年试验设置 4 个补充灌溉水平(施氮均为 240 kg·hm^{-2}),分别为 I0:0 mm、I1:75 mm、I2:150 mm、I3:225 mm;并以当地充分补灌 300 mm 和施氮 300 kg·hm^{-2}作为对照处理(CK)(表 1)。2024 年在 2023 年补充灌溉处理的基础上增加一个补灌水平 300 mm(I4)。为促进玉米出苗,播种后每个处理均灌水 15 mm(后续统计出苗率达 95%以上)。玉米生育期内每隔 7~10 d 灌溉一次,进行灌溉的生育期分别为苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期和成熟期,I4、I3、I2 和 I1 四个优化补灌处理生育期内均补灌 7 次(四个补灌处理每次补灌量分别为 42.86、32.14、21.43 mm 和 10.71 mm),对照组 CK 处理补灌 10 次(每次补灌量为 30 mm),采用滴灌施肥方式,

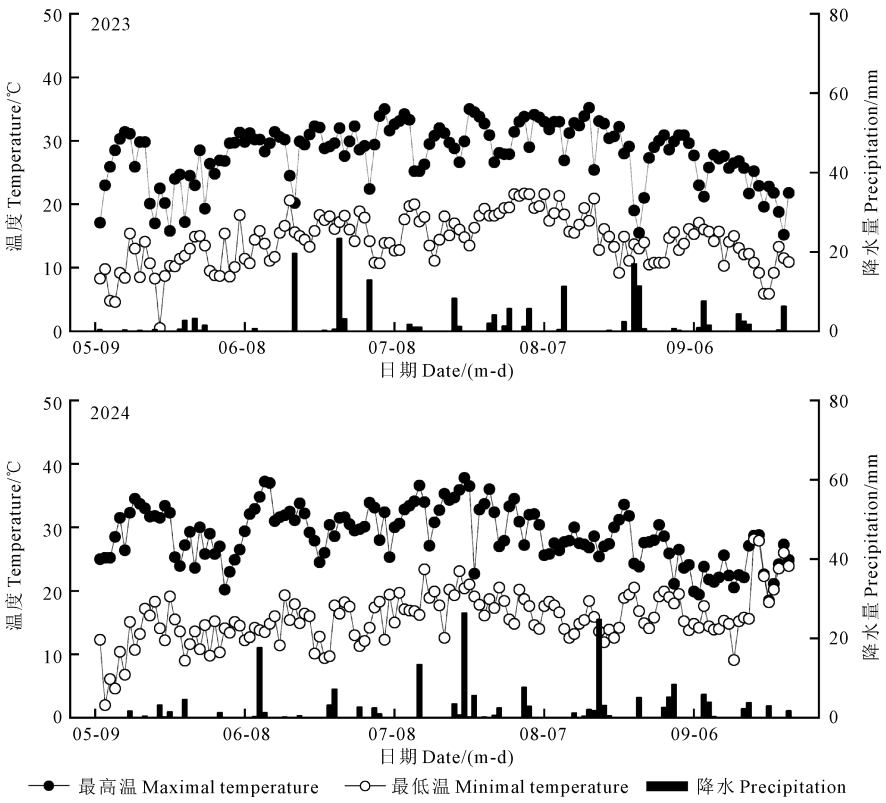


图 1　2023—2024 年试验区春玉米生育期内气象数据

Fig.1　Meteorological data during the growth period of spring maize in the experimental area in 2023-2024

具体补灌水平和日期见图 2(2023 年和 2024 年一致),其中氮肥 24 kg·hm^{-2}、磷肥 150 kg·hm^{-2}和钾肥 158 kg·hm^{-2}作为基肥一次性施入。试验所用的氮、磷和钾肥分别为尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P_2O_5≥16%)和农业用硫酸钾(K_2O≥51%)。其他田间管理,如除草、病虫害防治等与周边农田一致。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 生长指标 分别于春玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期最后一次灌水后的第 5 天进行取样,在各试验小区随机选取 3 株长势一致且具有代表性的植株,测定其株高、茎粗和叶面积指数。

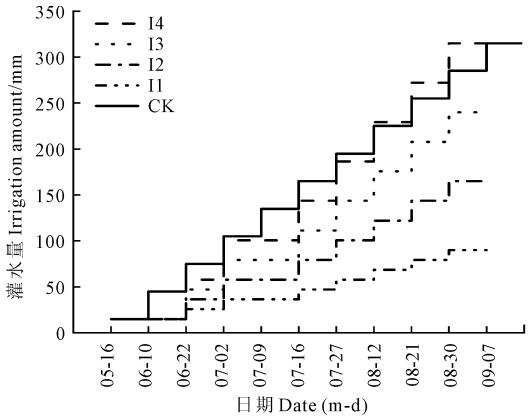


图 2 2023 年和 2024 年不同处理补灌时间和补灌量

Fig.2 Different supplemental irrigation dates in 2023 and 2024

表 1 不同处理补灌施氮试验方案

Table 1 Experimental program of nitrogen supplemental irrigation for different treatments

处理 Treatment	补灌施氮生育期 Fertility period of nitrogen supplemental irrigation	补灌日期 Irrigation date (m-d)	补灌总量 Irrigation amount /mm	施氮量 Nitrogen supply /(kg·hm^{-2})
I4	J、B、H、F	06-22;07-02;07-16;07-27;08-12;08-21;08-30	300	240
I3	J、B、H、F	06-22;07-02;07-16;07-27;08-12;08-21;08-30	225	240
I2	J、B、H、F	06-22;07-02;07-16;07-27;08-12;08-21;08-30	150	240
I1	J、B、H、F	06-22;07-02;07-16;07-27;08-12;08-21;08-30	75	240
I0	J、B、H、F	06-22;07-02;07-16;07-27;08-12;08-21;08-30	0	240
CK	S、J、B、H、F、M	06-10;06-22;07-02;07-09;07-16;07-27;08-12;08-21;08-30;09-07	300	300

注:S、J、B、H、F、M 分别代表苗期、拔节期、大喇叭口期、抽穗期、灌浆期、成熟期。

Note: S, J, B, H, F, and M represents the seedling stage, jointing stage, belltop stage, heading stage, filling stage, and maturity stage, respectively.

1.3.2 SPAD 值 每个小区随机选取 3 棵植株,利用 SPAD-502 叶绿素仪测量玉米的 SPAD,每株测量所有叶片,每片叶测定 3 次并取平均值。

1.3.3 植株干物质 在春玉米苗期、拔节、抽雄、灌浆和成熟期取 3 株长势一致的玉米植株,按茎、叶、穗分装,置于 105℃烘箱杀青 30 min,而后 75℃烘干至恒重并用电子天平称重。

1.3.4 地上部干物质累积量模型 以播种后天数为自变量,利用 Logistic 方程对春玉米地上部干物质动态累积变化建立模型[15]:

$$Z = Y_{max}/(1 + ae^{-kt}) \quad (3)$$

式中,Z 为 t 时间相应的地上部干物质累积量(kg·hm^{-2});Y_{max} 为最大干物质累积量(kg·hm^{-2});a 表示基础状态参数,为截距系数;k 为增长速率系数;t 为播种后天数(d)。

对 Logistic 方程进行推导得到地上部干物质累积速率(V,kg·hm^{-2}·d^{-1}):

$$V(t) = \frac{dZ}{dt} = Y_{max}ake^{-kt}/(1 + e^{a-kt})^2 \quad (4)$$

对式(4)求一阶导数,可得:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{Y_{max}ake^{-kt}(ake^{-kt} - k)}{(1 + e^{a-kt})^4} \quad (5)$$

当式(5)等于 0 时,求得地上干物质达到最大生长速率时的天数,即 $T_2 = \frac{\ln a}{k}$,代入式(4)即可求得干物质最大累积速率 V_{max}:

$$V_{max} = kY_{max}/4 \quad (6)$$

对式(5)求一阶导数,并令其等于 0,可求得曲线上的两个拐点 T_1 和 T_3:

$$T_1 = (\ln a - 1.317)/k \quad (7)$$

$$T_3 = (\ln a + 1.317)/k \quad (8)$$

其中平均单株总叶面积为:

$$\bar{S} = 0.75\sum LB \quad (1)$$

叶面积指数(LAI)计算公式为:

$$LAI = \frac{\bar{S} \cdot D}{A} \quad (2)$$

式中,$\bar{S}$ 为平均单株总叶面积(m^2);L 为春玉米完全伸展叶的最大叶长(m);B 为最大叶宽(m);LAI 为叶面积指数;D 为种植密度,本研究中该值为 66700 株·hm^{-1};A 为小区总面积(m^2)。

$$\Delta T = T_3 - T_1 \quad (9)$$

式中,T_1 为干物质量快速累积开始时间(d);a 表示基础状态参数,为截距系数;k 为增长速率系数;T_3 为干物质量快速累积结束时间(d);ΔT 为干物质快速累积持续时间(d)。根据以上的时间划分,可将 Logistic 曲线拟合的干物质累积过程划分为渐增期(0~ T_1)、快增期(T_1~ T_3)、缓增期(T_3~ ∞)。

1.3.5　*产量*　于成熟期后期,随机选取各小区具有代表性的 10 株玉米测定产量。

1.3.6　*春玉米水氮利用*　分别在春玉米播前和五个关键生育期取得 0~100 cm 土样,使用土钻分别取得每个土层土样(40 cm 深度以上间隔 10 cm,40 cm 深度以下间隔 20 cm),使用烘干法测定土壤含水率,然后求得土壤储水量:

$$\theta = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100\% \quad (10)$$

$$W = \theta \cdot \gamma \cdot h \quad (11)$$

式中,θ 为土壤质量含水率(%);m_1 为湿土重(g);m_2 为干土重(g);W 为土壤储水量(mm);γ 为土壤平均干容重($g \cdot cm^{-3}$);h 为土层厚度(mm)。

根据不同关键生育期的土壤储水量可求得不同阶段 0~100 cm 土壤水分变化量 ΔW:

$$\Delta W = W_{后一生育期} - W_{前一生育期} \quad (12)$$

采用水量平衡法[16]计算春玉米的耗水量,公式如下:

$$ET = P_r + I + U - R - D - \Delta W \quad (13)$$

式中,ET 为耗水量(mm);P_r 为有效降雨量(mm);I 为灌水量(mm);U 为地下水补给量(mm);R 为径流量(mm);D 为深层渗漏量(mm)。对于滴灌,每次灌水量较少,地下水位较深(>50 m),故 U、R 和 D 均忽略不计。则上式简化为:

$$ET = P_r + I - \Delta W \quad (14)$$

水分利用效率计算公式为:

$$WUE = Y/ET \quad (15)$$

式中,WUE 为水分利用效率($kg \cdot m^{-3}$);Y 为春玉米产量($kg \cdot m^{-2}$)。

灌溉水利用效率计算公式为:

$$IWUE = Y/I \quad (16)$$

式中,$IWUE$ 为灌溉水利用效率($kg \cdot m^{-3}$);I 为全生育期灌水总量(mm)。

氮肥偏生产力计算公式为:

$$NPFP = Y/F \quad (17)$$

式中,$NPFP$ 为氮肥偏生产力($kg \cdot kg^{-1}$);F 为投入 N 的总质量($kg \cdot m^{-3}$)。

1.3.7　*主成分分析法*　为对春玉米各处理在产量、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力($NPFP$)三个指标上进行综合评价,采用主成分分析法[17]对多指标数据进行降维与加权处理,进而构建综合得分模型以筛选出表现最优的处理。

1.3.8　*数据处理与分析*　使用 Microsoft Excel 2019 对数据进行分析计算;使用 SPSS 26.0 对数据进行分析处理;使用 Origin 2018 作图。

2　结果与分析

2.1　株高、茎粗和叶面积指数

2023 年和 2024 年春玉米株高均表现为苗期植株矮小,拔节至抽雄期快速增长,于抽雄期之后不再变化。茎粗和叶面积指数随生育期推进均呈先增大后减小趋势,在抽雄期达到峰值(图 3)。不同处理间春玉米株高整体上表现为 CK>I4>I3>I2>I1>I0,茎粗和叶面积指数整体上均表现为 I4>CK>I3>I2>I1。相同施氮量下,株高、茎粗和叶面积指数随补灌量增加而增大,2023 年和 2024 年分别为 I3 和 I4 处理达到最大值。I3 处理株高、茎粗和叶面积指数较 I2、I1 和 I0 处理分别平均提高 7.66%~24.56%、8.24%~17.68%和 11.73%~35.55,但较 I4 处理分别降低了 5.63%、4.44%和 20.39%。相同补灌量下,过量施氮反而降低了玉米茎粗和叶面积指数,CK 处理较 I4 分别平均降低 1.34%和 4.31%。

2.2　叶绿素含量

2023 年和 2024 年各处理春玉米叶绿素含量随着植株高度的变化呈现先增加后下降趋势,拔节期、抽雄期和灌浆期叶片 SPAD 值分别在第 7 片叶、第 8 片和第 10 片叶子达到最大值。相同施氮量下,叶片 SPAD 值随补灌量的增加而增大(图 4)。2023 年和 2024 年拔节、抽雄和灌浆期 SPAD 值分别在 I3 和 I4 处理达到最大,较 I0、I1 和 I2 处理分别平均提高 20.27%~39.38%、5.37%~23.26%和 2.32%~11.53%,且 I4 大于 I3,但较 I3 处理仅提高了 1.36%~3.39%。相同补灌量下,增加施氮量提高了叶片 SPAD 值,CK 处理较 I4 处理生育期内平均提高 3.03%~6.35%。

2.3　地上部干物质积累和分配

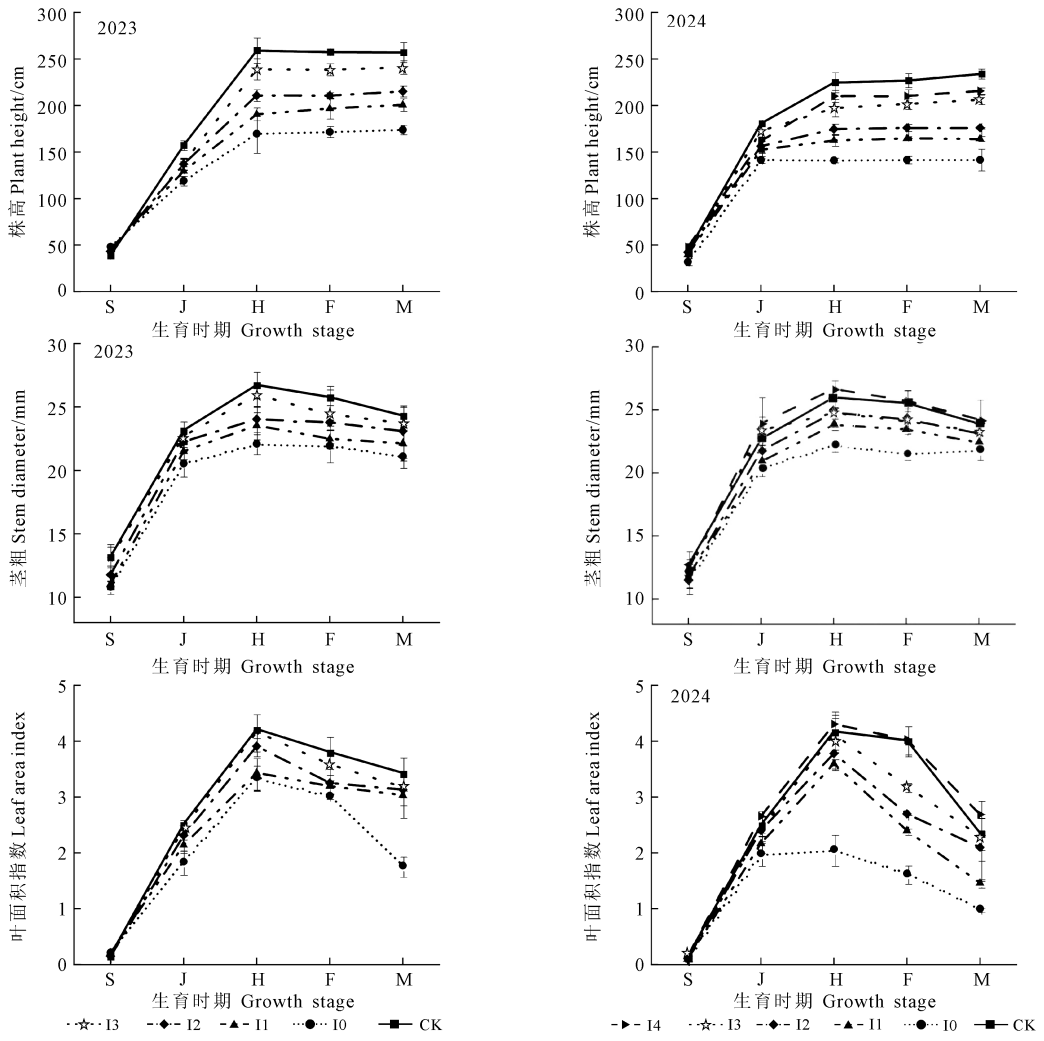
2023 年和 2024 年地上部干物质累积量随生育期的推进持续增加,呈现“S”型曲线变化,拔节期之前累积缓慢,拔节至灌浆期进入快速生长阶段,灌浆期到成熟期增长缓慢(图 5)。对不同处理进行 Logistic 拟合发现(表 2),相同施氮量下,随着补灌水平的增加,2023 年和 2024 年最大干物质累积量分别为 I3 和 I4 处理达到最大,较 I2、I1 和 I0 处理分

别提高 25.30%～47.54%、75.08%～138.48%和 170.20%～226.08%，2024 年 I4 较 I3 处理仅提高了 0.92%；最大干物质累积速率均在 I3 处理达到最大值，分别为 409.71 kg·hm^{-2}·d^{-1}和 516.2 kg·hm^{-2}·d^{-1}，较其它处理分别提高 20.35%～102.12%和 28.19%～175.97%。提高补灌量增加了玉米快速累积持续时间，两年中快速累积持续时间分别为 I3 和 I4 处理达到最大，较其它处理分别延长 1～8 d 和 4～12 d。相同补灌量下，提高施氮量能够提高最大干物质累积量和干物质累积速率，CK 处理较 I4 处理分别提高了9.99%和 7.48%。

2.4 产量、水分利用效率和氮肥偏生产力

相同施氮量下，产量随补灌量的增加而增大（表 3），2023 年在 I3 处理达到最大，为 11 076.34 kg·hm^{-2}，较 I0、I1、I2 处理分别提高 933.24%、97.18%、29.11%；2024 年 I4 处理达到最大值，但 I3 与 I4 无显著性差异（$P>0.05$）。相同施氮量下，过量补灌反而会抑制穗粒数、百粒质量等构成因素的增加，2023 年和 2024 年 I3 较 I4 处理百粒质量提升 7.89%，其它产量构成因素差异并不显著（$P>0.05$）。

补灌量对春玉米耗水量、水分利用效率（*WUE*）和氮肥偏生产力（*NPFP*）有显著影响（$P<0.05$）（表 4）。相同施氮量下，春玉米的耗水量和 *NPFP* 随补灌量的增加而增加，2023—2024 年分别为 I3 和 I4 处理达到最大，耗水量分别较其它处理显著增加 18.20%～90.92%和 19.77%～140.14%，*NPFP* 较其它处理分别增加 44.89%～1058.84%和 1.73%～414.74%，但 I4 和 I3 处理差异不显著（$P>0.05$）。2023 和 2024 年 *WUE* 随补灌量的增加呈先增大后减



注：S、J、H、F、M 分别代表苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期。

Note: S, J, H, F, and M represents the seedling stage, jointing stage, heading stage, filling stage, and maturity stage, respectively.

图 3 不同处理春玉米株高、茎粗和叶面积指数

Fig.3 Spring maize plant height, stem diameter and leaf area index for different treatments

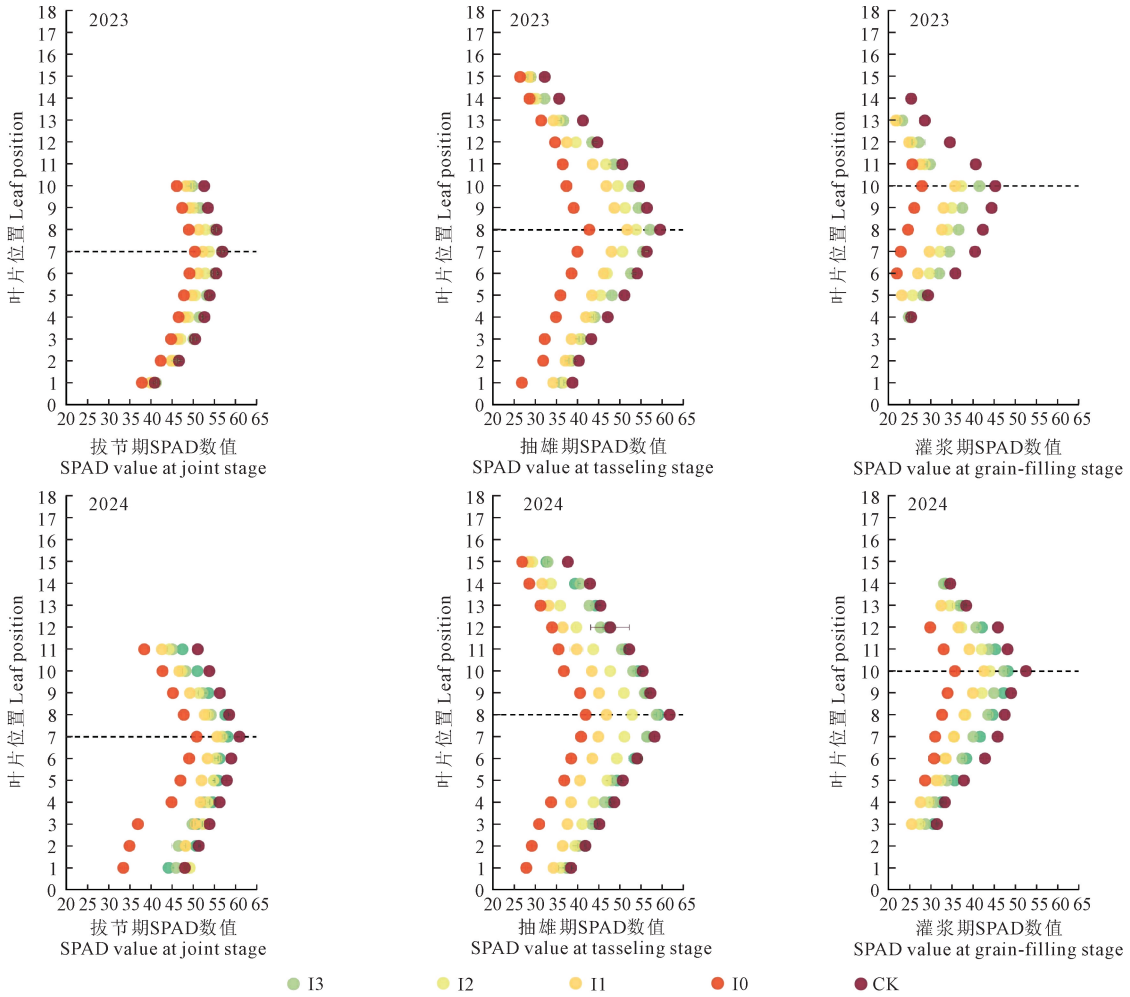


图 4　不同处理植株叶片 SPAD 值变化趋势

Fig.4　Trends of SPAD values of plant leaves for different treatments

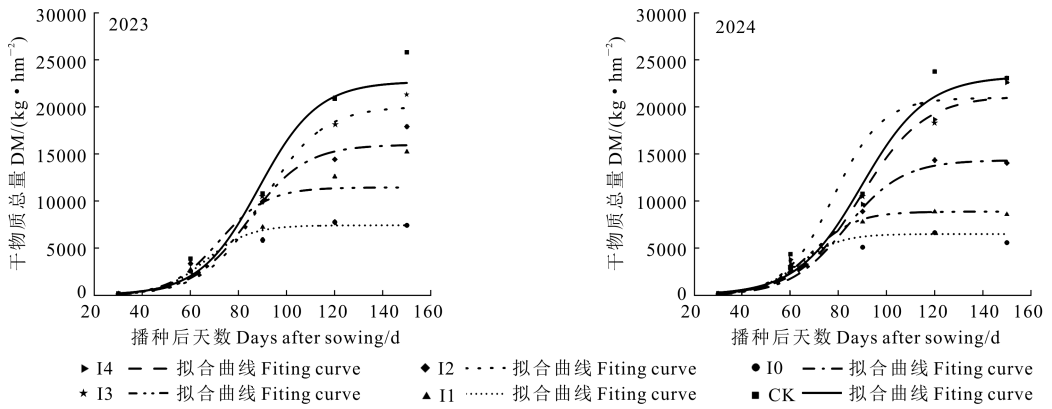


图 5　不同处理春玉米地上部干物质累积量的干物质 Logistic 拟合曲线

Fig.5　Logistic fitting curves of dry matter for aboveground dry matter accumulation of spring corn for different treatments

小趋势,均在 I3 处理处达到最大值,分别为28.73 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 27.41 kg·hm^{-2}·mm^{-1},较其他处理分别提高了 22.62% ~ 507.40% 和 14.78% ~ 152.39%。相同补灌量下,增加施氮量提高了产量和 *WUE*,但降低了 *NPFP*。

2.5　基于主成分分析法的春玉米产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的综合评价

主成分分析法是将原始特征转换为一组正交的主成分,这些主成分按方差贡献从大到小排序,从而实现数据压缩和特征提取,并对评价对象进行

综合打分评价。采用主成分分析法对两年内 6 个处理的产量、*WUE* 和 *NPFP* 三个指标进行分析(表 5)。表明第 1、2、3 主成分的方差贡献率分别为 95.48%、3.31%、1.21%,累积方差贡献率分别为 95.48%、98.80%、100%,提取第 1 个主成分可代表各指标的综合影响($P<0.01$)。各处理的综合评价线性函数为:

$$Z = 0.9548y_1 \quad (18)$$

$$y_1 = 0.5779x_1 + 0.5714x_2 + 0.5826x_3 \quad (19)$$

式中,Z 为综合评价得分;y_1 为第 1 主成分得分。x_1、x_2 和 x_3 分别为各处理对应产量、*WUE* 和 *NPFP* 三个指标标准化后的值。

将各处理指标的进行标准化处理后的值带入上式可得各处理综合得分和排名(表 6)。经过分析计算可知综合排名顺序依次为 CK>I3>I4>I2>I1>I0。I3 产量较 CK 处理平均降低16.46%,但是优化补灌量下 I3 处理两年 *WUE* 和 *NPFP* 分别较 CK 处理平均增加 3.81%和 5.77%,且 CK 处理水肥等各项经济投入较大,结合当地春玉米生育期内水资源极度匮乏的情况,故推荐优化补灌量 I3 作为最优处理。

表 2 不同处理春玉米地上部干物质累积量 Logistic 模型参数

Table 2 Parameters of logistic model for dry matter accumulation in the upper part of spring corn field for different treatments

年份 Year	处理 Treatment	Y_{max} /(kg·hm^{-2})	V_{max} /(kg·hm^{-2}·d^{-1})	T_1/d	T_2/d	T_3/d	ΔT/d	R^2
2023	I3	20027	409.71	74	90	106	32	0.975
	I2	15983	340.44	69	84	100	31	0.994
	I1	11439	286.48	59	72	85	26	0.956
	I0	7412	202.71	54	66	78	24	0.999
	CK	22690	463.05	72	88	104	32	0.945
2024	I4	21153	402.69	72	89	107	35	0.960
	I3	20961	516.20	65	78	91	27	0.949
	I2	14337	306.17	68	83	98	31	0.975
	I1	8870	234.79	56	68	81	25	0.997
	I0	6487	187.05	52	63	74	23	0.990
	CK	23267	432.82	72	90	107	35	0.988

注:Y_{max},最大累积量;$T1$,快速累积开始时间;$T2$,最大累积速率对应时间;$T3$,快速累积结束时间;ΔT,快速累积持续时间;V_{max},最大累积速率。

Note: Y_{max}, maximum accumulation; $T1$, rapid accumulation start time; $T2$, the time corresponding to maximum accumulation rate; $T3$, rapid accumulation end time; ΔT, rapid accumulation duration; V_{max}, maximum accumulation rate.

表 3 不同补灌水平下各处理春玉米产量及构成因素

Table 3 Spring corn yield and components of each treatment under different levels of supplemental irrigation

年份 Year	处理 Treatment	穗长 Ear length /cm	穗粗 Ear diameter /mm	穗粒数/粒 Number of kernels per ear	百粒质量 100-kernel weight/g	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm^{-2})
2023	I3	17.2±0.05ab	59.4±2.07b	479.9±12.52a	32.5±0.24b	11076.34±219.67b
	I2	16.8±0.05b	50.8±0.52c	408.3±1.45b	30.8±0.19c	8579.10±13.11c
	I1	14.1±0.14c	44.2±1.29d	277.6±7.41c	29.9±0.33c	5617.31±93.16d
	I0	12.7±0.30d	37.7±0.42e	112.0±16.76d	26.1±0.17d	1072.00±131.22e
	CK	18.6±0.09a	63.3±1.46a	515.6±5.89a	36.3±0.09a	13826.02±12.94a
2024	I4	17.87±0.11b	58.0±0.54b	574.4±6.79b	35.5±0.27c	12156.95±20.52b
	I3	17.65±0.12b	58.3±1.67b	553.5±8.79bc	38.3±0.03b	11949.79±222.05b
	I2	15.72±0.12c	52.7±0.49c	501.1±9.00c	34.2±0.10d	8769.86±63.91c
	I1	13.43±0.22d	49.0±0.50d	426.9±3.11d	32.2±0.11e	6563.43±79.40d
	I0	11.85±0.17e	37.7±0.42e	321.6±5.28e	29.8±0.33f	2361.36±66.22e
	CK	18.85±0.13a	59.6±1.20a	592.4±5.05a	38.8±0.23a	13748.74±101.46a

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($P\leqslant0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P\leqslant0.05$). The same below.

表 4　不同补灌水平下春玉米水氮利用效率

Table 4　Water and nitrogen use efficiency of spring corn under different levels of supplemental irrigation

年份 Year	处理 Treatment	补灌量 Irrigation /mm	施肥量 Nitrogen supply /(kg·hm^{-2})	耗水量 *ET* /mm	水分利用效率 *WUE* /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	灌溉水利用效率 *IWUE* /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	氮肥偏生产力 *NPFP* /(kg·kg^{-1})
2023	I3	225	240	432.73	28.73±1.18a	55.25±0.98c	51.80±0.92a
	I2	150	240	366.10	23.43±0.11b	57.19±0.09b	35.75±0.05c
	I1	75	240	303.34	18.52±0.92c	74.90±1.24a	23.41±0.39d
	I0	0	240	226.65	4.73±1.74d		4.47±0.55e
	CK	300	300	486.70	28.41±0.08a	46.09±0.04d	46.00±0.04b
2024	I4	300	240	522.06	23.29±0.12bc	40.52±0.07e	50.65±0.09a
	I3	225	240	435.90	27.41±1.53a	53.11±0.99c	49.79±0.93a
	I2	150	240	367.21	23.88±0.52c	58.47±0.43b	36.54±0.27c
	I1	75	240	282.75	23.21±0.84c	87.51±1.06a	27.35±0.33d
	I0	0	240	217.40	10.86±0.91d		9.84±0.28e
	CK	300	300	534.16	25.74±0.57ab	45.83±0.34d	45.83±0.34b

表 5　2023 年和 2024 年各处理产量、*WUE* 和 *NPFP*

Table 5　Yields, *WUE*, and *NPFP* of each treatment in 2023 and 2024

处理 Treatment	年份 Year	产量 Yield /(kg·hm^{-2})	水分利用效率 *WUE* /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	氮肥偏生产力 *NPFP* /(kg·kg^{-1})
I4	2024	12156.95	23.29	50.65
I3	2023	11076.34	28.73	51.80
I3	2024	11949.79	27.41	49.79
I2	2023	8579.10	23.43	35.75
I2	2024	8769.86	23.88	36.54
I1	2023	5617.31	18.52	23.41
I1	2024	6563.43	23.21	27.35
I0	2023	1072.00	4.73	4.47
I0	2024	2361.36	10.86	9.84
CK	2023	13826.02	28.41	46.00
CK	2024	13748.74	25.74	45.83

表 6　基于 PCA 不同处理下的综合得分与排名

Table 6　PCA-based composite scores and rankings for different treatments

处理 Treatment	年份 Year	综合得分 Comprehensive score	平均得分 Average score	综合排序 Comprehensive ranking
I4	2024	1.09	1.09	3
I3	2023	1.38	1.36	2
I3	2024	1.33		
I2	2023	0.15	0.19	4
I2	2024	0.23		
I1	2023	−0.99	−0.70	5
I1	2024	−0.40		
I0	2023	−3.20	−2.80	6
I0	2024	−2.41		
CK	2023	1.51	1.41	1
CK	2024	1.30		

3　讨　论

3.1　关键生育期补灌对春玉米生长、叶绿素含量和地上部干物质累积的影响

SPAD 值被广泛用于表征植株叶片叶绿素的相对含量[18]。光照和水氮施用均会影响叶片叶绿素的合成,进而影响 SPAD 值。前人针对玉米冠层叶片的研究发现,在吐丝期后,中部冠层叶片表现出较强的光合作用能力[19]。本研究显示,叶片 SPAD 最大值出现在中部叶片,即穗位叶及其附近的叶片(图 4),最小值出现在底部叶片,这可能由于穗位附近的叶片能够拦截更多的光,具有较高的光能利用效率,从而进一步促进植株叶绿素的合成[20];而底部叶片最早进入衰老状态,抑制叶绿素合成,因而 SPAD 值较小[21]。相同施氮量下,提高补灌量能够有效提高植株中部及下部叶片 SPAD 值[22]。本研究中,生育期内补灌较未补灌处理的 SPAD 值显著提高 4.26%~39.38%,同时,提高施氮量也能促进整体 SPAD 值的提高[23]。本研究中,CK 较 I4 处理的 SPAD 值提高了 3.03%~6.35%。因此,在田间试验管理中,首先要考虑的是穗位叶片如何拦截更多的光能、提高叶片的叶绿素含量,其次是限制上部和下部叶片 SPAD 值的下降,这可以延缓叶片的衰老,从而维持冠层保持较高的光合作用。然而关于如何调节补灌和施氮量配比来达到作物叶绿素含量的这种变化,还需要进一步开展试验研究。

株高、茎粗和叶面积指数(*LAI*)是反映作物生长状况的重要表型指标,与植株干物质累积密切相关。较大的株高和茎粗能够为干物质提供更大的储存空间并调节植株冠层结构,提高 *LAI* 扩展速率[24]。*LAI* 是评估植株光截获能力的关键指标,较高的 *LAI* 能够使叶片拦截更多的光能,从而提高光

合效率,进而促进植株干物质累积[25]。本研究中,相同施氮量下,补灌量的提高有效促进了玉米株高的持续增长,这是因为补灌能够延长玉米的生长阶段,推迟了干物质累积进入快增期并增加了快速累积持续的时间[26];而茎粗和 *LAI* 却呈先增大后减小趋势,在抽雄期达到峰值后显著下降,这可能是因为补灌促进了玉米开花后干物质从茎秆向生殖器官的转运[27]。在相同补灌量下,提高施氮量并没有促进玉米茎粗和 *LAI* 的增加,这是因为过量施氮导致根系生长受到抑制,降低了玉米对水肥的吸收利用,进而降低了植株茎粗和 *LAI*[28]。因此,优化水氮管理可以促进作物生长、优化冠层结构、促进干物质累积。本研究中优化补灌处理下,2023 年和 2024 年分别在 I3 和 I4 处理处获得较大的株高、茎粗、*LAI* 和干物质累积量。I3 和 I4 处理最大干物质累积量较其它处理分别提高了 25.30%~170.20%和0.92%~226.08%,快速累积持续时间分别延长了 1~8 d 和 4~12 d。

3.2 关键生育期补灌对春玉米产量、*WUE* 和 *NPFP* 的影响

相同的施肥条件下,增加灌水量能够显著提高玉米产量和 *WUE*[29]。Xia 等[30]研究表明,在作物开花期和灌浆期补灌,产量和氮肥利用效率分别提高 20.1%和 52.4%。张经廷等[31]指出,在作物拔节期补灌 75 mm 可使作物 *WUE* 提升 20.30%。Hu 等[32]研究发现,相同补灌量下减量施氮 50 kg·hm^{-2}(由 300 kg·hm^{-2}减至 250 kg·hm^{-2})显著提高了作物产量、*NPFP* 和 *WUE*。本研究中,优化施氮量下,玉米产量和 *NPFP* 随补灌量的增加而增加,2023 年和 2024 年分别在 I3 和 I4 处理达到最大,较未补灌处理分别提高 424.00%~933.24%和 423.71%~1058.84%,且优化施氮量(由 300 kg·hm^{-2}减至 240 kg·hm^{-2})促进春玉米 *NPFP* 提高 10.52%。这可能是由于补充灌溉改善了土壤水分状况,促进了作物对土壤水肥的吸收利用,进而提高了产量和氮肥利用[33];而过量施氮又会造成氮肥过剩而降低作物 *NPFP*。此外,过量补灌会大幅降低作物 *WUE*[33]。本研究中,*WUE* 随补灌量的增加而降低,2023 年和 2024 年 *WUE* 均在 I3 处理处达到最大,较 I4 处理提高 17.69%,且两者间产量和 *NPFP* 无显著性差异(P>0.05)。基于主成分分析法对不同处理间玉米产量、*WUE* 和 *NPFP* 进行综合评价打分,大小排序为 CK>I3>I4>I2>I1>I0。虽然 CK 处理得分最高,但是优化补灌量下 I3 处理两年 *WUE* 和 *NPFP* 分别较 CK 处理平均增加 3.81%和 5.77%,考虑当地水资源极度匮乏,CK 处理作为当地补灌施氮田间管理措施,不符合本研究节水节肥高产的目标,所以最终选择优化补灌处理 I3 为本研究最优处理。由于本研究设置补灌方式为定额补灌,而定额补灌可能难以精确匹配生育期内作物需水量,从而影响最终的节水效果[34]。同时,每年的降雨量存在差异,不同年份的气象差异可能会使试验结果和优化补灌量有所差异,因此如何实现按需补灌并根据降雨优化补灌水平还需要进一步田间试验进行验证。

4 结 论

1)相同施氮量下,株高、茎粗、叶面积指数、SPAD 和地上部干物质量均随补灌量增加而增大,2023 年和 2024 年分别在 I3 和 I4 处理下达到最大值,但两处理间差异不显著(除茎粗和叶面积指数);并且 I3 和 I4 处理快速累积持续时间较其它时期分别延长了 1~8 d 和 4~12 d。

2)相同施氮量下,补灌提高了玉米产量和 *NPFP*,2023 年和 2024 年分别在 I3 和 I4 处理达到最大值,产量分别为 11 076.34 kg·hm^{-2}和 12 156.95 kg·hm^{-2};*NPFP* 分别为 51.80 kg·kg^{-1}和 50.65 kg·kg^{-1},但两处理间差异不显著(P>0.05);*WUE* 随补灌量的增加呈先增大后降低趋势,2023 和 2024 年均在 I3 处理下达到最大值,平均为 28.07 kg·hm^{-2}·mm^{-2}。

3)综合考虑产量和水氮利用效率对补灌量和施氮量的响应,利用主成分分析法对各指标权重进行计算,并对各处理进行综合评价打分,不同处理得分排序为 CK>I3>I4>I2>I1>I0。虽然 CK 处理得分最高,但 I3 处理两年 *WUE* 和 *NPFP* 分别较 CK 处理平均增加 3.81%和 5.77%,考虑到当地水资源极度匮乏,CK 处理不但经济投入较大且不符合节水节肥高产的研究目的,故最终选择优化补灌处理 I3 为本研究最优处理。因此,推荐补灌量 225 mm 和施氮量 240 kg·hm^{-2}为陕北春玉米节水节肥高效生产的最优管理措施。

参 考 文 献:

[1] 张丽娜, 陈志, 杨敏丽, 等. 我国玉米生产效率时空特征分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 183-193.
ZHANG L N, CHEN Z, YANG M L, et al. Spatio-temporal feature of maize production efficiency in main producing provinces of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 183-193.

[2] 曾雪梅, 白清俊, 马丽娜, 等. 陕北榆林滴灌春玉米不同生育期适宜土壤水分控制界限研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(S01): 77-84.

ZENG X M, BAI Q J, MA L N, et al. Study on suitable soil water control limit of spring maize under drip irrigation in Yulin of northern Shaanxi[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(S01): 77-84.

[3] CHEN S, JIANG T C, MA H J, et al. Dynamic within-season irrigation scheduling for maize production in northwest China: a method based on weather data fusion and yield prediction by DSSAT[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 285-286: 107928.

[4] 叶优良, 李隆, 张福锁, 等. 灌溉对大麦/玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 105-109.
YE Y L, LI L, ZHANG F S, et al. Effect of irrigation on soil NO_3^--N accumulation and leaching in maize/barley intercropping field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(5): 105-109.

[5] 徐昭, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同程度盐渍化农田下玉米产量对水氮调控的响应[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 334-343.
XU Z, SHI H B, LI X Y, et al. Response of maize yield to irrigation and nitrogen rate in different salinization farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 334-343.

[6] XIAO G J, ZHANG Q, XIONG Y C, et al. Integrating rainwater harvesting with supplemental irrigation into rain-fed spring wheat farming[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 429-437.

[7] DE COSTA W A J M. SHANMUGATHASAN K N. Effects of irrigation at different growth stages on vegetative growth of mung bean, *Vigna Radiate* (L.) *Wilczek*, in dry and intermediate zones of Sri Lanka[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1999, 183(2): 137-143.

[8] LI Z Z, SUN Z H. Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the corn belt of northeast China[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 75: 12-24.

[9] LIU S K, LIN X, WANG W Y, et al. Supplemental irrigation increases grain yield, water productivity, and nitrogen utilization efficiency by improving nitrogen nutrition status in winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2022, 264: 107505.

[10] YIN X G, JABLOUN M, OLESEN J E, et al. Effects of climatic factors, drought risk and irrigation requirement on maize yield in the Northeast farming region of China[J]. The Journal of Agricultural Science, 2016, 154(7): 1171-1189.

[11] 高震, 吕新月, 王佳慧, 等. 不同时期补灌对春玉米植株氮再分配及氮素利用特性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊 1): 11-16.
GAO Z, LV X Y, WANG J H, et al. Effects of supplemental irrigation at different periods on nitrogen redistribution and nitrogen utilization characteristics of spring maize plants[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(S1): 11-16.

[12] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3187-3194.
ZHAO X N, WU P T, FENG H, et al. Advance in research of supplemental irrigation of collected rain water foreco-agriculture in semi-arid loess plateau of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3187-3194.

[13] 曹正鹏, 刘玉汇, 张小静, 等. 亏缺灌溉对马铃薯生长产量及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 114-123.
CAO Z P, LIU Y H, ZHANG X J, et al. Effects of deficit irrigation on growth, yield and water use of potato plants[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 114-123.

[14] 高亮, 张维宏, 杜雄, 等. 覆膜和补灌对杂交谷子产量形成与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(1): 122-132.
GAO L, ZHANG W H, DU X, et al. Effects of plastic-film mulching and supplementary irrigation on yield formation and water use efficiency of hybrid millet[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(1): 122-132.

[15] 谷晓博, 宋慧, 白东萍, 等. 优化缓释氮肥与尿素配施比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 56-65.
GU X B, SONG H, BAI D P, et al. Combined the application of slow-release N fertilizer and urea to improve the yield and N use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(11): 56-65.

[16] ALLAN R, PEREIRA L, SMITH M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.

[17] LEVER J, KRZYWINSKI M, ALTMAN N. Principal component analysis[J]. Nature Methods, 2017, 14(7): 641-642.

[18] 雷祥祥, 赵静, 刘厚诚, 等. 基于 PROSPECT 模型的蔬菜叶片叶绿素含量和 SPAD 值反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(10): 3256-3260.
LEI X X, ZHAO J, LIU H C, et al. Inversion of chlorophyll content and SPAD value of vegetable leaves based on PROSPECT model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(10): 3256-3260.

[19] SONG H, LI Y B, ZHOU L, et al. Maize leaf functional responses to drought episode and rewatering[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 57-70.

[20] YANG H W, CHAI Q, YIN W, et al. Yield photosynthesis and leaf anatomy of maize in inter- and mono-cropping systems at varying plant densities[J]. The Crop Journal, 2022, 10(3): 893-903.

[21] LI R F, LIU P, DONG S T, et al. Increased maize plant population induced leaf senescence, suppressed root growth, nitrogen uptake, and grain yield[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(4): 1581-1591.

[22] 石小虎, 蔡焕杰. 基于叶片 SPAD 估算不同水氮处理下温室番茄氮营养指数[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 116-126.
SHI X H, CAI H J. Estimation of nitrogen nutrition index of greenhouse tomato under different water and nitrogen fertilizer treatments based on leaf SPAD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 116-126.

[23] 马永鑫, 王西娜, 韦广源, 等. 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, et al. 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.

[24] 李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 195-202.
LI Z P, SONG M D, FENG H. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 195-202.

[25] ZHANG P, GU S C, WANG Y Y, et al. The relationships between maize (*Zea mays* L.) lodging resistance and yield formation depend on dry matter allocation to ear and stem[J]. The Crop Journal, 2023, 11(1): 258-268.

(下转第 205 页)