



苏明,杨乔乔,李月琪,张正珍,洪自强,李翻过,周甜,汪华,康建宏,吴宏亮. 基于生理-产量-品质的宁夏引黄灌区春玉米水肥耦合决策[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(12):133-148.

SU Ming, YANG Qiaqiao, LI Yueqi, ZHANG Zhengzhen, HONG Ziqiang, LI Fanguo, ZHOU Tian, WANG Hua, KANG Jianhong, WU Hongliang. Decision-making of spring maize water-fertilizer coupling based on physiology-yield-quality in Yinhuang Irrigation District of Ningxia China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 133-148.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.12

基于生理-产量-品质的宁夏引黄灌区春玉米水肥耦合决策

苏明¹ 杨乔乔¹ 李月琪¹ 张正珍^{1,2} 洪自强¹ 李翻过¹ 周甜¹
汪华¹ 康建宏¹ 吴宏亮^{1*}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021;

2. 宁夏回族自治区种子工作站, 银川 750001)

摘要 为探究不同滴灌量和施肥量对宁夏引黄灌区春玉米生理-产量-品质的影响,2019和2020年在宁夏农林科学院作物科学研究所望洪基地开展4因素3水平正交试验,设置3个滴灌量,分别为D1(2 310 m³/hm²),D2(3 300 m³/hm²)和D3(4 290 m³/hm²);3个施肥(N-P₂O₅-K₂O)水平,分别为S1(292-100-31 kg/hm²),S2(417-143-44 kg/hm²)和S3(542-186-57 kg/hm²),并设不施肥空白处理(D1S0),采用结构方程模型(Structural equation model, SEM)探究滴灌量与施肥量对玉米生长发育、生理特性、水肥利用效率及产量品质的影响,并采用熵权-TOPSIS法、主成分分析法和秩和比法系统评价宁夏引黄灌区最适施肥灌水组合。结果表明施肥量和滴灌量对玉米产量、穗粒重、茎粗、叶面积指数(LAI)、相对叶绿素含量(SPAD)、直链淀粉含量和粗蛋白含量均有显著提升作用($P<0.05$)。其中:施肥灌水组合D2S2效果最佳。与空白处理相比,D2S2处理的株高、茎粗、LAI、干物质质量、SPAD、净光合速率(P_n)、籽粒产量、直链淀粉含量、支链淀粉含量、总淀粉含量及粗蛋白含量分别增加12.46%、34.45%、71.20%、42.59%、25.70%、69.90%、63.60%、7.79%、17.83%、25.62%和3.17%。SEM结构方程表明,滴灌量与施肥量能直接显著影响到玉米的生长、生理、水肥利用效率及籽粒产量品质。通过熵权-TOPSIS法、主成分分析法和秩和比法这3种评价方法从生理-产量-品质3个方面选取14个评价指标进行综合评价,结果表明D2S2处理均是最优。因此,D2S2处理(滴灌量3 300 m³/hm²,施肥量N-P₂O₅-K₂O为417-143-44 kg/hm²)是实现宁夏引黄灌区春玉米高产-优质-增效的推荐施肥灌水组合策略。

关键词 宁夏; 引黄灌区; 春玉米; 水肥协同; 生长生理; 产量品质; 综合评价

中图分类号 S311

文章编号 1007-4333(2025)12-0133-16

文献标志码 A

Decision-making of spring maize water-fertilizer coupling based on physiology-yield-quality in Yinhuang Irrigation District of Ningxia China

SU Ming¹, YANG Qiaqiao¹, LI Yueqi¹, ZHANG Zhengzhen^{1,2}, HONG Ziqiang¹, LI Fanguo¹,
ZHOU Tian¹, WANG Hua¹, KANG Jianhong¹, WU Hongliang^{1*}

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Seed Workstation of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China)

Abstract This study aimed to investigate the effects of different drip irrigation amounts and fertilization rates on the “physiology-yield-quality” of spring maize in Yinhuang Irrigation District, Ningxia. A 4-factor and 3-level orthogonal array experiment was conducted in 2019 and 2020 at Wanghong Base, Institute of Crop Science,

收稿日期: 2025-06-04

基金项目: 宁夏高质量发展与生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-3-02);宁夏自然科学基金项目(2021AAC03072);宁夏区重点研发项目(2019BBF02003);宁夏粮食作物种质创新与生长调控科技创新团队项目(2022BSB03109)

第一作者: 苏明(ORCID:0009-0000-7480-6400),硕士研究生,E-mail:sumcakwx1208@163.com

通讯作者: 吴宏亮(ORCID:0009-0004-8064-8778),副教授,主要从事农作制度与作物生理研究,E-mail:nxuwu@163.com

Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, with three drip irrigation amounts, D1 (2 310 m³/hm²), D2 (3 300 m³/hm²), and D3 (4,290 m³/hm²), and three fertilization (N-P₂O₅-K₂O) levels of S1 (292-100-31 kg/hm²), S2 (417-143-44 kg/hm²) and S3 (542-186-57 kg/hm²) respectively, and the treatment without fertilizer application (D1S0) was taken as control. Structural equation model (SEM) was used to investigate the effects of drip irrigation amount and fertilizer application rate on maize growth, development, physiological characteristics, water and fertilizer use efficiency and yield quality. Entropy weight-TOPSIS, principal component analysis (PCA) and rank-sum ratio (RSR) were used to systematically evaluate the most suitable fertilization rate and irrigation amount combinations in Ningxia Yinhuang Irrigation District. The results showed that the fertilizer and drip irrigation significantly enhanced corn yield, ear grain weight, stem thickness, leaf area index (LAI), relative chlorophyll content (SPAD), straight-chain starch content, and crude protein content ($P<0.05$). Among all the treatments, the fertilizer-flooding combination, D2S2, showed the best effect. Compared with the blank treatment, the plant height, stem thickness, LAI, dry matter mass, SPAD, net photosynthetic rate (P_n), seed yield, straight-chain starch content, branched-chain starch content, total starch content, and crude protein content in the D2S2 treatment increased by 12.46%, 34.45%, 71.20%, 42.59%, 25.70%, 69.90%, 63.60%, 7.79%, 17.83%, 25.62% and 3.17%, respectively. The SEM structural equation showed that the drip irrigation and fertilizer application amounts directly and significantly affected the growth, physiology, water and fertilizer use efficiency and seed yield quality of maize. Finally, a total of 14 evaluation indexes were selected from three aspects of "physiology-yield-quality" for comprehensive evaluation by three evaluation methods. The evaluation results showed that the D2S2 treatment was optimal. Therefore, the D2S2 treatment (drip irrigation of 3 300 m³/hm² and fertilization of N-P₂O₅-K₂O 417-143-44 kg/hm²) is the recommended fertilization and irrigation strategy to achieve high yield, high quality and high efficiency of spring maize in the Yinhuang Irrigation District of Ningxia. It is the recommended fertilization and irrigation strategy in this study to achieve high yield, high quality and high efficiency of spring maize in the Yinhuang Irrigation District of Ningxia.

Keywords Ningxia; Yinhuang Irrigation District; spring maize; water-fertilizer synergy; growth physiology; yield quality; comprehensive evaluation

全球水资源短缺、生态环境恶化等问题严重阻碍了农业可持续发展,如何提升农作物产量与品质、优化资源利用效率,已成为农业领域亟待解决的核心问题^[1]。随着我国农业现代化进程的加速推进,玉米栽培技术不断革新,其中灌溉与施肥管理作为玉米生长发育调控及产量品质提升的关键技术环节,其重要性日益凸显^[2]。在我国西北地区,年降水量普遍偏低且降水在时间和空间上分布极为不均,同时该地区蒸发量大,致使水资源极为匮乏并长期制约着农业生产^[3]。

已有研究表明灌水量对玉米生长发育、产量形成及资源利用效率具有显著调控作用^[4-5];适度灌溉能够有效补充土壤含水量,维持土壤水势在适宜范围内,促进作物根系扩展与养分吸收,同时,充足且合理的水分供应可以保障植株叶片气孔的正常开闭,维持较高的光合速率,为干物质积累提供充足的碳水化合物,最终实现株高、叶面积及生物量的协同增长^[4-5]。张芮等^[6]研究表明,拔节期至灌浆期充足的水分供应能够增加穗粒数并显著提高千粒

重,特别是在需水临界期,玉米对水分胁迫的响应极为敏感,此时水分亏缺会导致激素平衡失调,造成雌雄花期不遇,最终导致减产。马风兰等^[7]研究表明,滴灌额度保持在4 350 m³/hm²能显著提升玉米叶片光合参数,同时产量较常规灌水量3 600 m³/hm²增加8.64%;然而,西北地区过量灌溉对玉米生长危害显著,该区域蒸发强、土壤透水性高,过量灌溉会导致氮、磷、钾等养分大量淋溶,造成肥效流失与地下水污染。同时,过饱和土壤恶化通气性,使根系缺氧,有氧呼吸受阻,无氧呼吸产生的有害物质会损伤细胞膜,削弱根系水肥吸收能力,进而破坏植株生理平衡,致使叶片光合能力下降、提前衰老,且土壤含水量过高还会导致玉米根系不稳、易倒伏,严重影响产量^[7]。刘继龙等^[8]、孙玲等^[9]和刘东华等^[10]研究指出,科学施肥是确保玉米茁壮成长、实现高产优质目标的关键举措。肥料所含的氮、磷、钾等大量元素,是构成玉米细胞结构、参与生理代谢进程的核心物质,在玉米的光合作用、呼

吸作用、物质合成与运输等关键生理活动中,发挥着不可替代的调控作用。尚洺宇等^[11]研究表明,合理的氮磷钾用量有利于提高作物产量、品质并有助于获得较好的经济效益。

降雨量少,蒸发大,水资源匮乏是我国西北旱区的主要农情,严重制约了农作物的生长发育和产量提升。该地区传统的水肥管理模式一般采用引黄河水进行漫灌,导致灌水施肥不均造成资源浪费。近年来采用浅埋滴灌水肥一体化技术,一方面提高了资源利用效率,另一方面对作物生产能力的改善具有积极作用。尽管,已有研究围绕施肥量、灌溉量单因素及水氮耦合双因素对玉米生长发育的影响开展研究^[12],但农业生产实践中,水肥协同管理对作物生理功能的调控机制及产量品质的提升潜力仍存在探索空间。

因此,为探究宁夏引黄灌区作物最佳水肥耦合决策,本研究拟以我国西北旱区春玉米为研究对象,设置 3 个滴灌量、3 个施肥量和 1 个不施肥空白处理,采用熵权-TOPSIS 法(Entropy weight-TOPSIS method)、主成分分析法(Principal component analysis,PCA)及

秩和比法(Rank-sum ratio,RSR)系统评价宁夏引黄灌区最适施肥灌水组合。以期为该地区玉米生产制定最适水肥管理决策提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验于 2019 年和 2020 年在宁夏农林科学院作物科学研究所望洪玉米试验基地进行(38°12′13.45″ N, 106°12′45.43″ E)。该地平均海拔 1 110 m;年平均降水量 202 mm,无霜期 150~170 d,年均日照 2 898 h,2 年试验地玉米生育期内月平均降雨量及气温如图 1 所示。试验田土壤类型为灌淤土,0—30 cm 土壤基础肥力见表 1。2019 年试验地前茬为麦后复种白菜,2020 年试验地前茬为玉米。供试春玉米品种为“银玉 274”,由宁夏农林科学院作物科学研究所提供。供试肥料为尿素(N≥46%,中石化宁夏石化总公司生产,中国)、磷酸一铵(P₂O₅≥61%,N≥12%,宁夏鲁西化工化肥有限公司,中国)和硫酸钾(K₂O≥52%,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司,中国)。

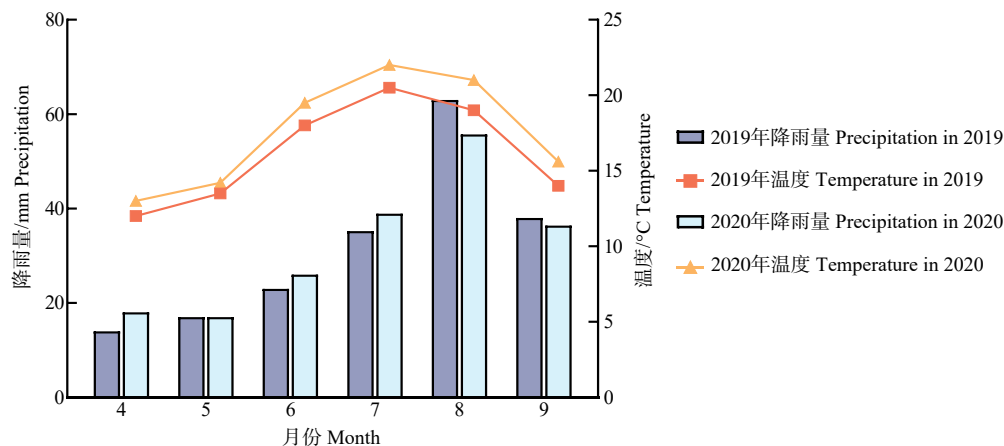


图 1 春玉米生育期内月平均降雨量及气温变化情况

Fig. 1 Monthly average precipitation and temperature changes during the reproductive period of spring maize

表 1 2019 和 2020 年试验地基础土壤背景值

Table 1 Base soil background values of the test site in 2019 and 2020

年份 Year	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	碱解氮/(mg/kg) Alkaline nitrogen decomposition	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K
2019	8.37	16.36	1.08	0.69	70.54	42.79	173.23
2020	8.48	17.08	1.15	0.78	72.72	43.85	175.44

1.2 试验设计

试验为4个因子(滴灌量、N、P和K)、3个水平的正交试验,共9个处理并设置1个不施肥空白对照处理(D1S0),详见表2。具体设计:1)设置3个滴灌水平D1(2 310 m³/hm²),D2(3 300 m³/hm²)和D3(4 290 m³/hm²);2)将N、P、K,3个因子按量依次组合固定,进而确定3个施肥(N-P₂O₅-K₂O)水平,依次为S1(292-100-31 kg/hm²),S2(417-143-44 kg/hm²)和S3

(542-186-57 kg/hm²)各处理3次重复,共30个小区。每小区长10 m,宽3.3 m,小区面积33 m²,试验区总面积950 m²。玉米种植采用宽窄行种植,宽行70 cm,窄行40 cm,玉米株距18 cm,四周设保护区,区组间设1 m宽走道。每两行铺设一根滴灌带,滴灌带铺设在宽窄行内,种植密度控制在90 000株/hm²。分别于2019年4月25日和2020年4月22日人工精量播种,2年均在9月24日收获。

表2 正交试验各处理水平组合

Table 2 Combination of each treatment level for orthogonal array

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount		施肥量 Fertilization rate	
	代码 Code	水平/(m ³ /hm ²) Level	代码 Code	N - P ₂ O ₅ - K ₂ O/(kg/hm ²)
D1S0	D1	2 310	S0	0 - 0 - 0
D1S1	D1	2 310	S1	292 - 100 - 31
D1S2	D1	2 310	S2	417 - 143 - 44
D1S3	D1	2 310	S3	542 - 186 - 57
D2S1	D2	3 300	S1	292 - 100 - 31
D2S2	D2	3 300	S2	417 - 143 - 44
D2S3	D2	3 300	S3	542 - 186 - 57
D3S1	D3	4 290	S1	292 - 100 - 31
D3S2	D3	4 290	S2	417 - 143 - 44
D3S3	D3	4 290	S3	542 - 186 - 57

注: D1、D2、D3 分别代表滴灌量 2 310、3 300、4 290 m³/hm²。S0、S1、S2、S3 分别代表 N-P₂O₅-K₂O 水平 0-0-0、292-100-31、417-143-44、542-186-57 kg/hm²。下同。

Note: D1, D2 and D3 represent drip irrigation rates of 2 310, 3 300, and 4 290 m³/hm², respectively. S0, S1, S2, and S3 represent N-P₂O₅-K₂O levels of 0-0-0, 292-100-31, 417-143-44, and 542-186-57 kg/hm², respectively. The same below.

试验不施基肥,肥料全部追施,于玉米全生育期分4次施用,具体施肥时间为玉米的苗期、拔节期、抽雄期和灌浆期,各时期肥料分配比例为1:4:1:4。采用差压罐施肥,每个罐的容量为20 L。每次施肥前一天,将固体肥料完全溶解在水中。灌水在整个玉米生长季分6次进行,具体灌水时间为播种期、苗期、拔节期、抽雄期和灌浆期,各时期水分分配比例为1:1:3:2:3。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株生长指标测定

于玉米灌浆中期,每个处理随机选取5株玉米植株,在田间初步清理后,用卷尺和游标卡尺测定玉米的株高和茎粗,随后用剪刀分解各部分器官后并装入采样袋带回实验室,采用长宽系数法^[13]测定

叶面积并计算其叶面积指数(LAI=0.75×M×Σ(a_i×b_i))式中,0.75:校正系数,M:种植密度,a、b:叶片的长、宽,i:叶片个数),于玉米成熟期,按上述步骤操作结束后,将玉米各器官晾干装档案袋,置于105℃的烘箱中杀青30 min,并在80℃下干燥至恒重。利用电子天平测定各器官重量相加等到单株干物质质量。

1.3.2 叶片生理指标测定

于玉米灌浆中期,每个处理随机选取5株玉米植株叶片使用LI-6400R便携式光合作用仪于晴天上午9:00—11:00测定其净光合速率(P_n),并利用SPAD-502plus叶绿素仪(浙江托普云农科技股份有限公司,中国)测定其相对叶绿素含量(SPAD)。

1.3.3 玉米产量及构成测定

在玉米成熟期从每个小区中挑选中间的 2 行进行田间产量测定;选取 20 穗成熟的玉米进行风干处理,并在室内考种,测定穗重、百粒重等产量构成指标,将含水量折合 14% 计算单位面积产量。

1.3.4 玉米籽粒品质测定

于玉米成熟期,每个小区随机选取 3 株具有代表性的植株用于籽粒品质测定,选用双波长法^[14]测定直链淀粉和支链淀粉含量(干基),即总淀粉含量=直链淀粉含量+支链淀粉含量,并采用考马斯亮蓝 G250 染色法^[15]测定粗蛋白含量。

1.3.5 水肥利用效率计算

灌溉水利用效率(IWUE, kg/m³)和肥料偏生产力(PFP, kg/kg)的计算公式如下^[12,15]:

$$IWUE=Y/D \quad (1)$$

$$PFP=Y/S \quad (2)$$

式中:Y 为玉米籽粒产量,kg/hm²;D 为玉米全生育期灌水量,m³/hm²;S 为玉米全生育期施用的 N、P₂O₅和 K₂O 的总量,kg/hm²。

1.3.6 基于熵权-TOPSIS 的多目标寻优

试验参照张帆等^[12]水肥耦合正交试验分析方法,将 4 个因子(滴灌量、N、P 和 K)3 个水平正交试验中 N、P、K 这 3 个因子按量依次组合固定,进而确定 3 个施肥量,随后依次与滴灌量组合并设置一个不施肥空白对照,共得出 10 个待评价组合。依据 10 个待评价组合所测的各项评价指标的离散变化程度,利用熵权法运用信息熵计算出各指标的熵权,以此对各指标原有的权重进行修正,进而得到更为客观的权重。最后,利用理想点法(TOPSIS)将评价指标解划分为正理想解与负理想解;由此,得到一个解集范围并在此范围内筛选出一个特殊的解,该解具备双重特性:一方面,与正理想解的距离达到最小,意味着最为接近;另一方面,与负理想解的距离达到最大,即最为远离。通过该种方式对所有待评价组合的解进行排序,从而能够对现有评价组合的优劣程度做出准确评价,具体参照以下步骤:

第一,建立综合评价指标体系。以试验 10 个待评价组合(n)为可行性方案,以籽粒产量(X1)、百粒重(X2)、穗粒重(X3)、P_n(X4)、LAI(X5)、SPAD(X6)、株高(X7)、茎粗(X8)、单株干物质质量(X9)、IWUE(X10)、总淀粉含量(X11)、直链淀粉

粉含量(X12)、支链淀粉含量(X13)和粗蛋白含量(X14),共 14 个评价指标为目标变量构建原始矩阵如下^[12]:

$$R=[r_{ij}]_{n \times m}$$

式中:i 是评估对象,j 为第几个指标,n 为待评价组合,m 为评价指标个数。

第二,熵权法权重确立。根据各指标的变化程度计算各指标的熵权,然后通过熵权对各指标的权重进行修正,从而得到更客观的指标权重。即先对原矩阵 $R=[r_{ij}]_{n \times m}$ 进行无量纲处理,得到矩阵 $Y=[y_{ij}]_{n \times m}$,然后确定各评价指标的熵权 V_j ,详见下式:

$$y_{ij}=\frac{r_{ij}-\min(r_j)}{\max(r_j)-\min(r_j)} \quad j=1,2,\dots,m \quad (3)$$

$$p_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

$$E_j=-\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

$$V_j=\frac{l-E_j}{m-\sum E_j} \quad (6)$$

式中,i 是评估对象,j 为第几个指标, p_{ij} 是第 i 个评估对象在第 j 个指标下所占比重; E_j 是第 j 个指标的熵值,n 为待评价组合,n=10;m 为评价指标个数,m=14; V_j 为各评价指标的权重。

第三,利用 TOPSIS 法进行多目标优化。首先对原始矩阵 $R=[r_{ij}]_{n \times m}$,进行归一化处理,得到矩阵 $F=[f_{ij}]_{n \times m}$,再乘以上述第二部分利用熵权法最终计算得到的熵权 V_j ,最后加权得到新矩阵 $Z=[z_{ij}]_{n \times m}$,然后再计算各目标值与理想点之间的欧氏距离 D_i^+ 和 D_i^- ,以及各目标的相对贴近度 C_i ,进而按照相对贴近度的大小排序, C_i 值越大,表明其越接近最优水平,以此特征得到 10 个评价组合(n)的优劣情况,形成决策依据,具体计算步骤如下:

$$f_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}} \quad j=1,2,\dots,m \quad (7)$$

$$z_{ij}=V_j \times f_{ij} \quad (8)$$

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij}-z_j^+)^2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (11)$$

1.3.7 基于主成分分析(PCA)的多目标寻优

利用主成分分析法对上述14个指标进行降维分析,参照汪楚博等^[17]方法提取第一、二主成分,计算综合得分,并由此进行排序得到最佳处理。

1.3.8 基于秩和比法(RSR)的多目标寻优

参照汪楚博等^[17]利用SPSSAU计算14个待评价指标的秩值进而排序得到分档等级。

1.4 数据处理

以Microsoft Excel 2019对数据进行初步处理,使用IBM SPSS Statistics 27.0.1对数据进行统计分析,采用GraphPad Prism 9.5.1绘图,以LSD法进行差异显著性检验,使用SPSSAU线上平台(<https://spssau.com/index.html>)建立熵权-TOPSIS、PCA和RSR法的多目标综合评价体系,同时,构建

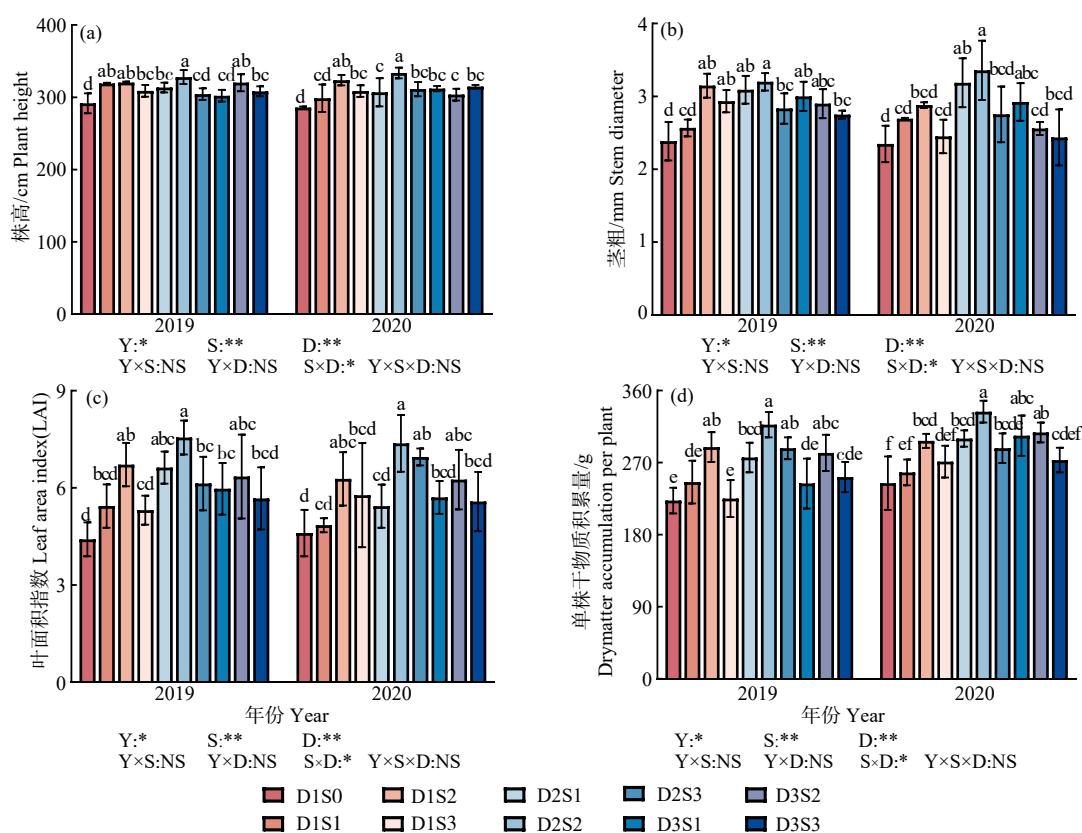
结构方程模型(SEM)。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌量和施肥量处理对玉米不同生长指标的影响

不同滴灌量和施肥量处理下玉米株高、茎粗、叶面积指数和单株干物质质量的测定结果见图2。由图2(a)可见施肥量能显著提高玉米的株高,而滴灌量、年份和施肥与灌水交互对其影响不显著。以2019年为例:施肥灌水组合D2S2的株高最高达到328 cm,较对照处理D1S0高出12.46%;D1水平下的平均株高较D2和D3高出0.81 cm和5.88 cm。各滴灌水平下,随着施肥量的增加玉米株高整体呈现先增后降的趋势,于S2水平达到最高值,S2水平下的平均株高较S1和S3增加了3.64%和5.11%。说明合理的滴灌量与施肥量能显著提高玉米的株高。

由图2(b)可见滴灌量与施肥量均能显著提升



Y, 年份; S, 施肥量; D, 滴灌量。图中小写字母表示在0.05水平上差异显著。*和**分别表示在0.05和0.01水平差异显著; NS表示差异不显著。下同。

Y, year; S, fertilization rate; D, drip irrigation amount. Lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability level, respectively; NS: no significant difference. The same below.

图2 滴灌量和施肥量对玉米不同生长指标的影响

Fig. 2 Effect of drip irrigation amounts and fertilization rates on different growth indices of maize

玉米的茎粗且年际间差异显著,施肥与灌水交互效应显著。其中:2019年施肥灌水组合D2S2的茎粗最高,达3.04 cm较D1S0增加34.45%;D2水平下的平均茎粗较D1和D3高出0.16 cm和0.16 cm。各滴灌水平下,随着施肥量的增加玉米茎粗整体呈现先增后降的趋势,于S2水平达到最高值,S2水平下的平均茎粗较S1和S3增加了6.57%和8.45%。2020年D2S2处理的茎粗也是最高达到3.36 cm,较D1S0增加42.98%。D2水平下的平均茎粗较D1和D3高出0.43 cm和0.46 cm。合理的滴灌量与施肥量有利于玉米茎粗的提升。

如图2(c)所示,滴灌量、施肥量且两者交互均能显著提升玉米的叶面积指数(LAI),年际间无明显差异。以2019年数据为例:即施肥灌水组合D2S2的LAI最高,达到7.55较对照处理D1S0高出71.20%;D2水平下的平均LAI较D1和D3高出16.32%和12.83%。各滴灌水平下,玉米LAI均随着施肥量的增加,整体呈现先增后降的趋势,于S2水平达到最高值,S2水平下的平均LAI较S1和S3增加了14.31%和20.32%。合理的滴灌量与施肥量有利于玉米LAI的提升。

图2(d)可见滴灌量、施肥量且两者交互均能显著影响玉米的单株干物质质量,同时年际间差异显著。其中:2019年施肥灌水组合D2S2的干物质质量最高,达到317.21 g较对照处理D1S0高出42.59%;D2水平下平均干物质质量较D1和D3高出15.96%和13.31%。各滴灌水平下,玉米干物质

质量均随着施肥量的增加,整体呈现单峰趋势,于S2水平达到最高值,即为S2水平下的平均干物质质量较S1和S3增加了16.05%和16.20%。而2020年D2S2处理的干物质质量同样最高达到333.51 g较对照处理D1S0高出36.54%。D2水平下平均干物质质量较D1和D3高出11.56%和4.21%,同时S2水平下的平均干物质质量较S1和S3增加了8.94%和12.75%。说明合理的滴灌量与施肥量有利于玉米干物质积累。

2.2 不同滴灌量和施肥量处理对玉米不同生理指标的影响

不同滴灌量和施肥量处理下玉米相对叶绿素含量和净光合速率的测定结果见图3。由图3(a)可见年份、滴灌量与施肥量均能显著影响玉米叶片的相对叶绿素含量(SPAD)。其中:2019年施肥灌水组合D2S2的SPAD最高,达到59.33较对照处理D1S0高出25.70%;D2水平下的平均SPAD较D1和D3高出4.17%和5.20%。各滴灌水平下,玉米SPAD均随着施肥量的增加,整体呈现先增后下降的趋势,于S2水平达到最高值,即S2水平下的平均SPAD较S1和S3增加了6.08%和13.16%。而2020年D2S2处理的SPAD同样最高达到66.63较对照处理D1S0高出38.73%。D2水平下平均SPAD较D1和D3高出6.43%和9.64%,同时S2水平下的平均SPAD较S1和S3增加了19.91%和13.55%。合理的滴灌量与施肥量有利于玉米叶片SPAD的提升。

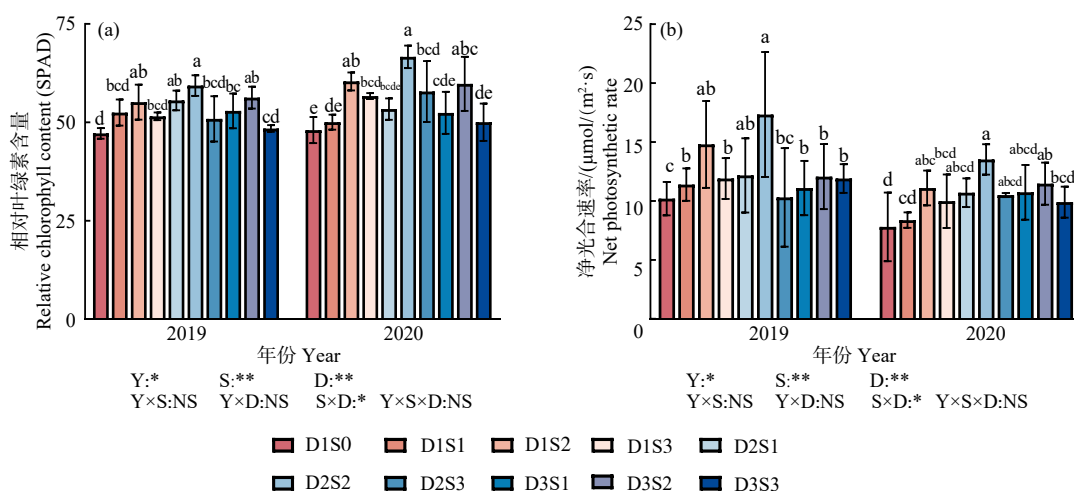


图3 滴灌量和施肥量对玉米不同生理指标的影响

Fig. 3 Effect of drip irrigation amounts and fertilization rates on different physiological indices of maize

图3(b)可见施肥量、滴灌量与施肥量交互能显著影响玉米叶片的净光合速率(P_n),而年份和滴灌量对其影响不显著。以2019年数据为例:施肥灌水组合D2S2的 P_n 最高,达到 $17.33\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})$ 较对照处理D1S0高出69.90%;D2水平下平均 P_n 较D1和D3高出6.76%和13.52%。各滴灌水平下,玉米叶片 P_n 均随着施肥量的增加,整体呈现单峰趋势,于S2水平达到最高值,S2水平下的平均 P_n 较S1和S3增加了30.47%和29.55%。说明合理的滴灌量与施肥量有

利于玉米叶片 P_n 的提升。
2.3 不同滴灌量和施肥量处理对玉米产量及构成的影响

不同滴灌量和施肥量处理下玉米产量及其构成的测定结果见表3。可见:滴灌量与施肥量能显著影响玉米籽粒产量及其部分构成,同时滴灌量与施肥量交互对籽粒产量和百粒重影响显著;除穗粒重年际间差异显著外,其他各项指标年际间无显著性差异。以2019年数据为例:施肥灌水组合D2S2

表3 滴灌量和施肥量对玉米产量及构成的影响
Table 3 Effects of drip irrigation amounts and fertilization rates on maize yield and composition

年份 Year	处理 Treatment	穗行数 Number of rows per ear	行粒数 Number of particles per row	穗粒重/g Spike grain weight	秃尖长度/cm Bald tip length	百粒重/g 100-grain weight	籽粒产量/(kg/hm ²) Grain yield
2019	D1S0	13.20±1.99b	27.20±3.16b	91.12±42.53d	2.65±1.14a	25.38±4.02c	8402.42±897.76d
	D1S1	17.80±2.02a	31.70±5.36b	163.30±34.75c	1.67±1.01b	28.94±4.16b	11980.22±1434.63cd
	D1S2	18.80±1.03a	36.00±3.74a	256.44±38.09b	1.32±0.75bc	37.89±2.84a	13067.92±917.42bcd
	D1S3	17.60±1.26a	35.40±6.04a	236.19±46.44b	1.35±0.73bc	37.91±2.81a	14092.29±1171.95abc
	D2S1	18.80±1.69a	35.90±4.12a	247.36±42.67b	0.67±0.83d	36.65±1.92a	14590.00±841.41ab
	D2S2	19.00±1.70a	38.30±2.83	278.35±23.95a	0.54±0.60d	38.25±4.11a	15472.48±1003.93a
	D2S3	18.60±1.65a	34.80±7.44a	239.30±64.63ab	0.35±0.47d	36.97±2.94a	14100.48±458.99abc
	D3S1	18.70±1.64a	36.40±5.97a	254.17±44.28b	0.54±0.49d	37.34±3.60a	13172.68±1151.25bcd
	D3S2	18.40±1.58a	36.20±3.16a	241.99±38.18b	0.86±0.36cd	36.33±2.39a	15178.67±498.35a
2020	D3S3	18.00±1.33a	34.70±6.48a	239.16±65.74b	0.73±0.56cd	38.29±4.03a	14712.30±528.83ab
	D1S0	11.60±1.58d	32.20±6.05b	93.75±48.87e	2.19±0.94a	25.10±5.07d	8916.62±585.00e
	D1S1	13.80±1.75c	35.20±6.71ab	148.64±50.23d	1.30±0.88b	30.60±4.01c	11671.38±826.02d
	D1S2	15.60±0.84ab	37.40±4.90ab	189.62±55.79c	1.17±0.47b	32.50±7.07bc	13546.62±1230.74abc
	D1S3	15.40±1.65ab	35.30±6.33ab	188.64±97.34c	0.99±0.62b	34.70±6.63abc	13430.45±1353.33bc
	D2S1	15.60±1.26ab	36.50±8.00ab	199.29±72.83c	1.35±0.63b	35.00±7.39abc	12860.94±508.89cd
	D2S2	16.80±1.69a	40.10±6.12a	264.82±32.71a	0.88±0.43b	39.31±3.47a	14809.00±864.99a
	D2S3	15.20±1.69bc	34.40±6.54ab	197.54±77.23c	1.12±1.06b	37.78±3.49a	13474.23±935.89bc
	D3S1	16.00±1.63ab	35.60±10.59ab	206.20±38.40b	0.90±0.57b	36.20±7.89ab	14305.60±619.49ab
方差分析	D3S2	15.00±1.70bc	39.90±5.51a	226.65±54.02b	1.02±0.88b	37.87±3.11a	13701.58±417.20abc
	D3S3	15.20±1.40bc	38.30±6.13a	209.69±71.90b	1.04±0.72b	36.02±4.79ab	14060.79±919.68abc
	Y	NS	NS	*	NS	NS	NS
	S	NS	*	*	NS	**	*
	D	*	NS	*	**	**	**
	AN	Y×S	NS	NS	NS	NS	*
OVA	Y×D	NS	NS	NS	**	NS	NS
	S×D	*	NS	NS	NS	*	**
	Y×S×D	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注:表中小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著。
Note: The lowercase letters in the table indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

的籽粒产量为最高,达到 15 472.48 kg/hm²,较对照处理 D1S0 高出 63.60%;D2 水平下的平均籽粒产量较 D1 和 D3 高出 12.83% 和 7.55%。各滴灌水平下,玉米籽粒产量及构成因素均随着施肥量的增加呈现先增后下降的趋势,整体上 S2 水平达到最高值,S2 水平下的玉米平均籽粒产量较 S1 和 S3 增加 11.70% 和 6.88%。从年际角度考虑,2020 年与 2019 年玉米产量及其构成因素基本一致,无明显差异。说明适量的灌溉和施肥有利于作物产量形成,过量和少量灌溉与施肥均不利于作物生长以及产量建成。

2.4 不同滴灌量和施肥量处理对玉米籽粒品质及水肥利用效率的影响

不同滴灌量和施肥量处理下玉米籽粒直链淀粉含量、支链淀粉含量、总淀粉含量、粗蛋白含量、滴灌水分利用效率及肥料偏生产力的测定结果见图 4。如图 4(a)和(b)所示,滴灌量与施肥量均能显著影响玉米籽粒直链、支链淀粉含量。以 2019 年数据为例:施肥灌水组合 D2S2 的直链、支链淀粉含量均最高,达到 16.63% 和 61.78%,较对照处理 D1S0 分别高出 7.79% 和 17.83%。D2 水平的直链淀粉含量较 D1 和 D3 分别显著提高 1.61% 和 1.26%

($P<0.05$),支链淀粉含量分别增加 5.33% 和 6.01%($P<0.01$)。各滴灌水平下,玉米直链、支链淀粉含量均随着施肥量的增加整体呈现先增后下降的趋势,于 S2 水平达到最高值,S2 水平下的平均直链淀粉含量较 S1 和 S3 增加 1.64% 和 3.18%,支链淀粉分别增加 4.22% 和 1.06%。说明适量的灌溉和施肥有利于玉米籽粒直链淀粉含量和支链淀粉含量的增加。

由图 4(c)和(d)可见:滴灌量、施肥量及两者交互效应均能显著影响玉米籽粒总淀粉含量;同时,滴灌量、施肥量对籽粒粗蛋白含量也有着显著影响,但年际间差异表现均不显著。以 2019 年数据为例:施肥灌水组合 D2S2 的总淀粉和粗蛋白含量均最高达到 78.41% 和 8.42%,较对照处理 D1S0 分别高出 25.62% 和 3.17%;D2 水平下的平均总淀粉含量较 D1 和 D3 高出 6.95% 和 7.31%($P<0.01$),粗蛋白含量分别增加 1.37% 和 0.72%。各滴灌水平下,玉米总淀粉含量和粗蛋白含量均随着施肥量的增加,整体呈现先增后下降的趋势,于 S2 水平达到最高值,即为 S2 水平下的平均总淀粉含量较 S1 和 S3 增加了 5.89% 和 4.24%($P<0.01$),粗蛋白含量分别增加 0.08% 和 0.72%。2020 年与 2019 年品

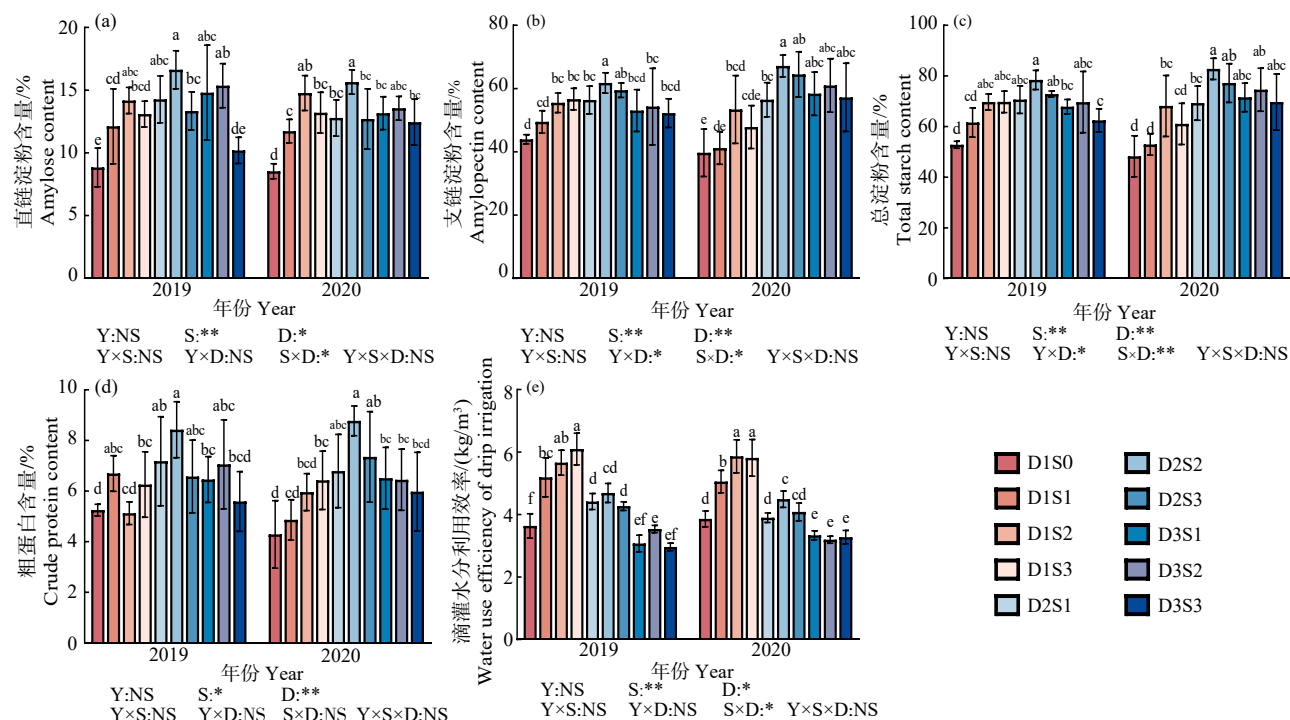


图 4 滴灌量和施肥量对玉米籽粒不同品质及水分利用效率的影响

Fig. 4 Effect of drip irrigation amounts and fertilization rates on different quality and water use efficiency of maize kernels

质指标基本一致,无明显差异。说明适量的灌溉和施肥有利于玉米籽粒总淀粉和粗蛋白含量的增加。

由图4(e)可见滴灌量、施肥量及两者交互效应均能显著提升玉米滴灌水分利用效率(IWUE)。以2019年数据为例:D1水平下的IWUE均表现最高,平均较对照处理D1S0高出55.22%;同时,平均IWUE比D2和D3高出26.68%和77.12%。由图5

可见:滴灌量、施肥量及两者交互效应均显著提升肥料偏生产力(PFP);施肥灌水组合D2S1的PFP最高,达34.49 kg/kg;D2水平下的平均PFP较D1和D3高出14.93%和7.74%;S1水平下的平均PFP均表现最高且较S2、S3高出36.68%和89.87%。说明适量的灌溉和施肥有利于提升玉米的水肥利用效率。

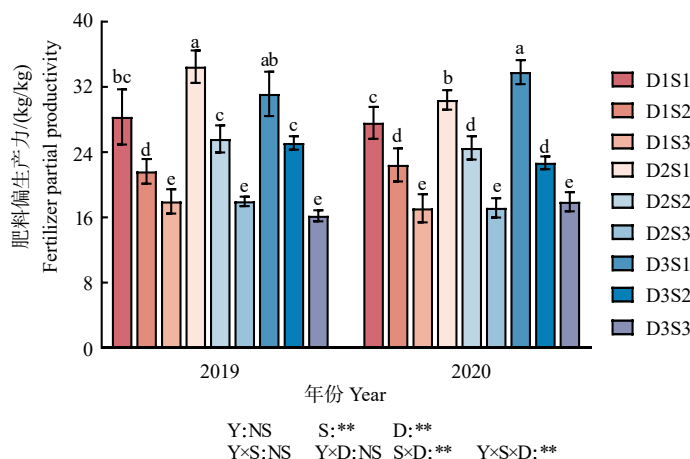


图5 滴灌量和施肥量对玉米肥料利用效率的影响

Fig. 5 Effect of drip irrigation amounts and fertilization rates on fertilizer use efficiency in maize

2.5 不同滴灌量和施肥量处理对玉米各项指标的SEM结构方程分析

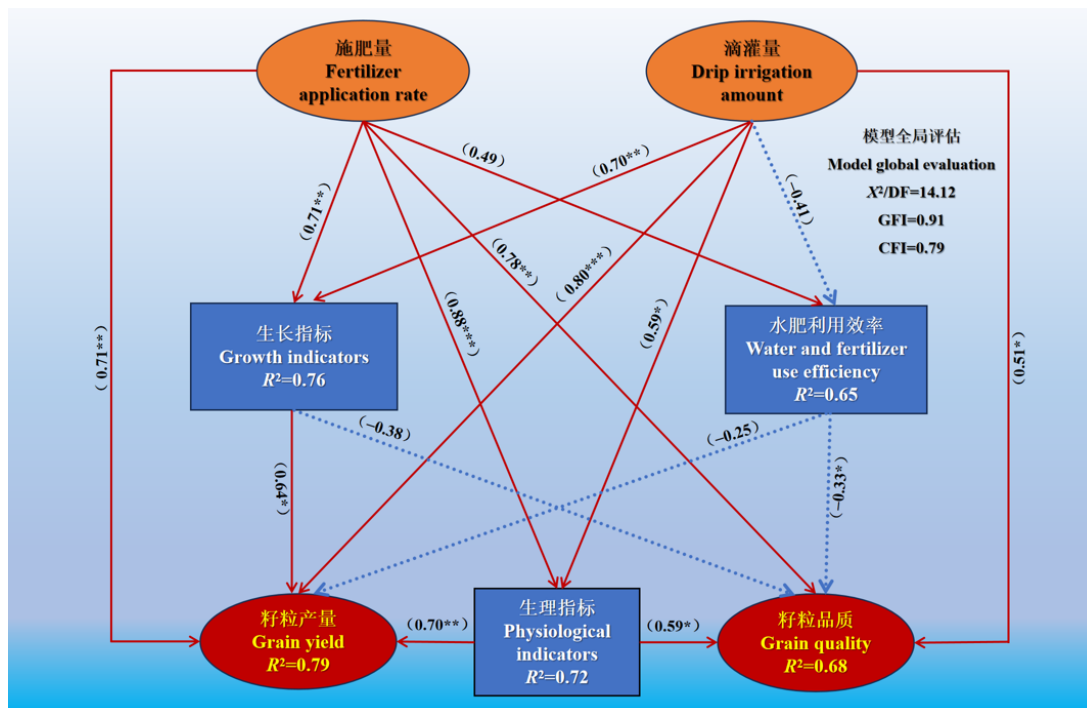
基于作物生产中生长、生理、水肥利用及品质产量的底层逻辑,本研究构建了不同滴灌量和施肥量处理对玉米生理-产量-品质的结构方程模型(SEM)分析结果如图6。模型结果表明:滴灌量与施肥量能直接显著影响到玉米的生长、生理、水肥利用效率及产量品质;滴灌量与施肥量还可以通过玉米的生长指标、生理指标及水肥利用效率间接显著影响到籽粒产量与品质。其中:滴灌量直接显著影响到玉米的生长、生理及产量、品质指标,标准化回归系数分别达到0.70、0.59、0.80和0.51呈现正相关,而与水肥利用效率呈现负相关;施肥量直接显著影响到玉米的生长、生理及产量、品质,标准化回归系数分别达0.71、0.88、0.71和0.78呈现正相关。玉米生长指标能直接显著影响到籽粒产量,而与籽粒品质呈直接负相关;生理指标能直接显著影响籽粒产量和品质;水肥利用效率对籽粒产量品质的影响呈现显著负相关。说明,精准的水肥调控直接有利于作物生长、生理指标及产量品质的提升,

而通过优化前期的生长、生理指标来间接提升作物品质的途径是相对缓慢且困难的,但对作物产量的提升效果显著。

2.6 基于玉米生长-产量-品质的施肥灌水组合寻优

本研究以玉米生理-产量-品质协同为主要目的,将14个评价指标分别进行熵值-TOPSIS、PCA和RSR共3种综合评价。评价结果见表4~6。具体结果如下:

1)利用熵值-TOPSIS法以14个待评价指标为目标构建原始矩阵,因对照处理D1S0是不施肥处理,故不考虑将指标PFP纳入评价指标,构建原始矩阵。随后,利用式(3)~(6)对原始矩阵正向化并标准化后计算权重,再利用式(7)~(11)计算正负理想解的距离及相对贴近度(C_i);最终得到熵权-TOPSIS综合评价结果,如表4所示。2019年各处理的相对贴近度由大到小排序为D2S2>D3S2>D2S1>D2S3>D1S3>D3S1>D1S2>D3S3>D1S1>D1S0,2020年则表现为D2S2>D3S2>D3S3>D3S1>D1S2>D2S3>D1S3>D2S1>D1S1>D1S0。2年结果均显示D2S2施肥灌水组合 C_i 最大,其次是D3S2。



红色实线箭头表示正相关;蓝色虚线箭头表示负相关,与箭头相关联的值表示标准化回归系数。与响应变量相关的 R^2 值表示通过与其他变量的关系解释变异比例。模型的统计信息如下: χ^2/DF :卡方与自由度比值,GFI:为拟合优度指数,CFI:比较拟合指数,*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,***表示 $P<0.001$ 。

Solid red arrows indicate positive correlations; dashed blue arrows indicate negative correlations, and values associated with the arrows indicate standardized regression coefficients. The R^2 value associated with the response variable indicates the proportion of variance explained through the relationship with other variables. The statistical information of the model is as follows: χ^2/DF : chi-square to degrees of freedom ratio, GFI: is the goodness of fit index, CFI: comparative fit index, * denotes $P<0.05$, ** denotes $P<0.01$, and *** denotes $P<0.001$.

图 6 滴灌和施肥对玉米各项指标的结构方程(SEM)分析结果

Fig. 6 Results of structural equation (SEM) analysis of drip irrigation and fertilizer application on various indicators of maize

表 4 基于熵权-TOPSIS综合评价的玉米水肥优化

Table 4 Optimization of maize water and fertilizer based on entropy weight-TOPSIS comprehensive evaluation

处理 Treatment	2019 年				2020 年			
	D_i^+	D_i^-	C_i	排序 Ranking	D_i^+	D_i^-	C_i	排序 Ranking
D1S0	611.43	0.14	0.00	10	350.04	0.12	0.00	10
D1S1	302.02	309.43	0.51	9	186.44	163.62	0.47	9
D1S2	207.94	403.49	0.66	7	75.04	275.02	0.79	5
D1S3	119.44	492.06	0.81	5	81.98	268.11	0.77	7
D2S1	76.34	535.11	0.88	3	115.75	234.30	0.67	8
D2S2	0.40	611.43	1.00	1	0.24	350.04	1.00	1
D2S3	118.67	492.77	0.81	4	79.36	270.71	0.77	6
D3S1	198.91	412.55	0.68	6	30.01	320.10	0.81	4
D3S2	25.51	586.00	0.96	2	65.80	284.25	0.91	2
D3S3	238.72	372.72	0.61	8	44.63	305.53	0.87	3

注: D_i^+ :正理想距离; D_i^- :负理想距离和 C_i :相对贴近度。

Note: D_i^+ : distance to the positive ideal solution; D_i^- : distance to the negative ideal solution; C_i : relative closeness.

2)如表5所示,利用主成分分析对14个指标进行降维分析,提取第一、二主成分,计算综合得分。

排序结果表明:2019年和2020年水肥优化最佳组合均是D2S2,其次是D1S2。

表5 基于主成分综合评价的玉米水肥优化

Table 5 Optimization of water and fertilizer for maize based on comprehensive evaluation of principal components

处理 Treatment	2019年				2020年			
	PC1	PC2	得分 Score	排序 Ranking	PC1	PC2	得分 Score	排序 Ranking
D1S0	-6.899	0.783	-4.838	10	-6.526	-0.334	-5.029	10
D1S1	-1.746	1.344	-1.127	8	-3.605	0.973	-2.651	9
D1S2	1.716	1.437	1.342	2	1.174	2.140	1.132	2
D1S3	-0.069	0.122	-0.038	6	-0.670	1.544	-0.344	7
D2S1	1.865	0.327	1.298	3	0.346	-0.500	0.210	6
D2S2	5.191	0.890	3.766	1	5.754	0.605	4.468	1
D2S3	0.452	-1.280	0.212	5	1.504	-0.719	1.072	3
D3S1	-0.156	-1.513	-0.240	7	0.982	-1.105	0.631	5
D3S2	1.458	-0.311	1.010	4	1.511	-1.271	1.017	4
D3S3	-1.811	-1.145	-1.385	9	-0.470	-1.335	-0.505	8

注:PC1:第一主成分;PC2:第二主成分。
Note: PC1: the first principal component; PC2: the second principal component.

3)如表6所示,利用秩和比法计算14个指标的RSR值和RSR拟合值。根据RSR值的大小判断各施肥灌水组合的优劣情况,RSR值越大说明该施肥灌水组合最优,本研究中D2S2处理的RSR值2年均为最大,平均达到0.972。再根据RSR拟合值对各处理所得RSR

值进行分级,将10个待评价组合分级得出,2年D2S2处理均处在最高级3级。综上所述,3种评价方法(熵权-TOPSIS、PCA、RSR)得出的最优解一致,均为D2S2处理。说明该处理对宁夏引黄灌区春玉米生长发育及产量品质具有显著提升作用。

表6 基于秩和比法的玉米水肥优化

Table 6 Optimization of water and fertilizer for maize based on rank-sum ratio method

处理 Treatment	2019年				2020年			
	RSR值 RSR value	RSR排名 RSR ranking	RSR拟合值 RSR fitted value	分档等级 Level	RSR值 RSR value	RSR排名 RSR ranking	RSR拟合值 RSR fitted value	分档等级 Level
D1S0	0.121	10	0.211	1	0.121	10	0.207	1
D1S1	0.393	8	0.385	2	0.268	9	0.309	2
D1S2	0.707	3	0.698	2	0.664	4	0.626	2
D1S3	0.546	5	0.563	2	0.486	7	0.446	2
D2S1	0.729	4	0.799	3	0.536	6	0.504	2
D2S2	0.964	1	0.955	3	0.979	1	0.960	3
D2S3	0.536	6	0.505	2	0.650	5	0.563	2
D3S1	0.493	7	0.447	2	0.664	3	0.700	2
D3S2	0.650	2	0.625	2	0.686	2	0.802	3
D3S3	0.361	9	0.312	2	0.446	8	0.383	2

3 讨 论

3.1 不同滴灌量和施肥量处理对玉米生长、生理指标及水肥利用效率的影响

研究表明,滴灌量与施肥量对玉米生长、生理指标及水肥利用效率的影响显著^[5,18-19]。肥料中的氮、磷、钾等元素是构成植物细胞结构、参与代谢过程的关键物质,其中,氮素对蛋白质合成和叶片生长的影响尤为突出^[20]。当滴灌量不足时,玉米生长会受到水分胁迫的抑制,即便施肥充足,肥料也难以充分溶解与运输,无法被植株有效吸收利用,进而限制光合物质积累;而过量滴灌则会导致土壤养分淋失,同样不利于玉米生长^[21]。已有研究表明,合理的滴灌量与施肥量能促进玉米植株的生长发育进程,具体表现为株高、茎粗增加及叶面积扩大^[4,8,11]。刘凡等^[22]和戚迎龙等^[24]研究表明,在适宜的水肥条件下,玉米叶片叶绿素含量较高,光合速率增强,能够高效固定二氧化碳,为植株生长和产量形成积累充足的光合产物。本研究发现,D2S2(滴灌量:3 300 m³/hm², N-P₂O₅-K₂O: 417-143-44 kg/hm²)两措施协同能够提高玉米的株高、茎粗、LAI、SAPD、P_n和干物质质量,有效促进了光合物质的生产积累、转运,提高了玉米干物质质量,最终促进玉米的产量形成。原因可能如下:1)适宜的滴灌量可避免水分胁迫或养分淋失,确保肥料充分溶解与运输,为植株吸收利用创造条件;2)合理的施肥量能提供充足氮、磷、钾等元素,尤其氮素可促进蛋白质合成与叶片生长;3)合理的水肥供应可使玉米在面临逆境时,抗氧化酶维持较高活性,有效清除体内过多的活性氧,减轻氧化损伤,维持细胞正常生理功能,有利于叶绿素的合成,提高光合速率,增加玉米光合产物积累^[25]。除此之外,合理调控滴灌量,能够优化土壤水分状况,提高肥料在土壤中的有效性与空间分布均匀性,促进作物根系对养分的吸收,从而提升水肥利用效率;同时,合理地控制化肥用量能增加土壤养分,促进土壤内部养分循环,有利于提高肥料利用效率;两者协同,更加有利于作物对养分的吸收利用^[26,29]。

3.2 不同滴灌量和施肥量处理对玉米籽粒产量、品质的影响

滴灌量与施肥量在作物产量及品质形成过程中发挥着核心作用^[28-29]。刘丽平等^[4]研究表明,合

理的滴灌量能促进产量提升,滴灌量不足会造成玉米减产;而过度滴灌会引发土壤养分淋溶损失,肥料利用率显著降低,从而对产量产生不利影响。另有研究表明^[9-10],施肥量匮乏时,玉米植株会因必需营养元素的供应不足,导致光合产物的合成过程受到显著抑制,难以生成足够数量的光合产物来满足籽粒形成阶段的物质需求;而施肥量超过合理范围时,一方面会导致根系发育异常或茎秆机械组织强度下降,引发玉米倒伏;另一方面,会加剧病虫害的发生程度,过量的养分可能改变植株体内的生理代谢平衡,不利于产量的提升。本研究发现,D2S2(滴灌量:3 300 m³/hm², N-P₂O₅-K₂O: 417-143-44 kg/hm²)两措施协同下玉米的籽粒产量达到最高。具体原因可能是合理的水肥效应优化了玉米植株光合物质生产—分配过程、协调了营养生长与生殖生长平衡、提升了根系养分吸收效率,进而提高了玉米产量。另有研究表明,适宜的水分与肥料供给,有助于提升玉米籽粒中蛋白质、淀粉以及脂肪的含量,改善籽粒口感与加工性能,优化玉米的营养品质^[28,30];而不合理水肥供应,会致使籽粒发育不良、干瘪瘦小,蛋白质、淀粉等关键成分含量降低,品质变劣^[31-32]。本研究表明,D2S2处理(滴灌量:3 300 m³/hm², N-P₂O₅-K₂O: 417-143-44 kg/hm²)下玉米籽粒淀粉含量及粗蛋白含量较其他处理均达到最高。具体原因如下:1)适宜的滴灌量为玉米生长提供适宜水分,既保障了光合作用充分进行,为淀粉合成提供充足前体,又维持了植株体内水分平衡,促进矿质元素与光合产物向籽粒运输;2)氮素充足为蛋白质合成提供基础,磷素能够促进能量代谢与根系吸收,钾素激活了淀粉及蛋白合成关键酶活性,进而有利于玉米淀粉的合成和粗蛋白积累;3)滴灌与肥料的协同作用减少了养分流失,促进了淀粉、蛋白质的积累,避免了水肥配比不当导致的籽粒发育不良和品质下降,最终实现玉米营养品质的提升。

3.3 综合评价指标

李池等^[33]在北疆地区选用玉米生长、产量和节水指标作为评价指标,结合耗水规律和指标显著性进行分析,并采用熵权-TOPSIS综合评价法,优选适宜于北疆地区滴灌春玉米的灌水定额,具有很好的推荐价值;说明该方法能够得出客观的评价结论。马凤兰等^[7]研究表明,在盐碱地条件下,将玉米

叶片光合参数与产量进行主成分分析,将互相关联的8个单项指标进行降维,获得2个相互独立的综合指标,筛选出最优灌水处理,具有良好的生产实践价值。汪楚博等^[17]以RSR从产量、品质、碳排放、经济效益四方面,选取12个评价指标综合评估显示:3 800 m³/hm²灌水水平下,采用微纳米加气灌溉结合0.5%腐殖酸施加量,是加工番茄实现高产、优质、减排、增效的推荐灌溉策略。实践中,该策略可显著提升产量与品质,降低碳排放,提高经济效益。而本研究结合熵权-TOPSIS法、主成分分析法和秩和比法3种综合评价方法对玉米籽粒产量、品质、水肥利用效率和生长、生理特性进行了全面客观评价。3种综合评价法寻优结果均显示D2S2处理(滴灌量:3 300 m³/hm², N-P₂O₅-K₂O:417-143-44 kg/hm²)对玉米生理-产量-品质协同具有积极意义。因此,D2S2处理可以作为宁夏引黄灌区春玉米种植的最佳施肥和灌水模式。但3种评价方法的次优解存在一定的不同,熵权-TOPSIS、RSR法得出D3S2处理为次优解,而PCA法得出D1S2为次优解。可能的原因是PCA法受到高度自相关的指标太多,影响到最终评价结果。

4 结 论

筛选节水节肥、环境友好型的高产高效型施肥灌水组合的研究,以宁夏引黄灌区春玉米为研究对象,基于熵权-TOPSIS法、PCA法和RSR法共3种综合评价方法,探究不同施肥灌水组合对春玉米生理-产量-品质指标的影响,并筛选最佳水肥组合策略为研究内容。主要结论如下:

1)合理的水肥供应对春玉米生理-产量-品质具有显著协同增效作用。与D1S0处理相比,D2S2处理(滴灌量:3 300 m³/hm², N-P₂O₅-K₂O:417-143-44 kg/hm²)下,春玉米的株高、茎粗、LAI、干物质质量及叶片P_n、SAPD等生长生理指标均显著提高;并显著增加了玉米的籽粒产量和百粒重;同时,籽粒支链淀粉含量、直链淀粉含量及粗蛋白含量也显著增加。

2)经熵权-TOPSIS、PCA和RSR法对10个水肥组合进行综合评价得出,D2S2处理在3种评价方法中均是最佳施肥灌水组合。因此,可将滴灌量为3 300 m³/hm²以及N-P₂O₅-K₂O施肥水平为417-143-44 kg/hm²组合作为宁夏引黄灌区春玉米高产、

优质、增效的最佳水肥组合策略。

参考文献 References

- [1] “中国农业领域工程科技未来20年发展战略研究”项目综合组. 面向2040年我国农业领域工程科技发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 15-23
Comprehensive Group of the Project Research on the Development Strategy of Engineering Science and Technology in the Agricultural Field of China in the Next 20 Years. Development strategies of engineering science and technologies in the agricultural field of China toward 2040[J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(5): 15-23 (in Chinese)
- [2] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 赵明, 李潮海, 崔彦宏, 刘永红, 高聚林, 薛吉全, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959
Li S K, Zhao J R, Dong S T, Zhao M, Li C H, Cui Y H, Liu Y H, Gao J L, Xue J Q, Wang L C, Wang P, Lu W P, Wang J H, Yang Q F, Wang Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959 (in Chinese)
- [3] 姜珊, 王建华, 刘合, 朱永楠, 何国华, 李激, 黄洪伟. 黄河上中游地区水-粮食-能源协同发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 180-190
Jiang S, Wang J H, Liu H, Zhu Y N, He G H, Li W, Huang H W. Coordinated development of water, food, and energy in upper and middle reaches of the Yellow River[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(4): 180-190 (in Chinese)
- [4] 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(1): 1-13
Liu L P, Zhang K H, Tong L, Wang S F, Dai Y H. 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(1): 1-13 (in Chinese)
- [5] 王岩, 白春生, 李波, 范虹, 何蔚, 杨莉莉, 曹悦, 赵财. 覆膜免耕和灌水量对西北绿洲灌区玉米产量及光合特性的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(03): 755-770
Wang Y, Bai C S, Li B, Fan H, He W, Yang L L, Cao Y, Zhao C. Effects of no-tillage with plastic film and the amount of irrigation water on yield and photosynthetic characteristics of maize in oasis irrigation area of Northwest China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(3): 755-770 (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 马凤兰, 苏泽晖, 刘威帆, 刘昊, 马小英, 黄霖锋, 万猛虎, 李涛, 刘吉利, 吴娜. 灌水定额对不同程度盐碱地玉米光合特性及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(5): 28-41
Ma F L, Su Z H, Liu W F, Liu H, Ma X Y, Huang L F, Wan M H, Li T, Liu J L, Wu N. Effects of irrigation quota on yield formation and photosynthetic characteristics of maize in saline and alkaline land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(5): 28-41 (in Chinese)
- [8] 刘继龙, 陈俊丰, 曹晓强, 李济桢, 吴耀宇. 黑土区玉米生理生长特性及产量对不同秸秆覆盖与施肥量的响应[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 627-632
Liu J L, Chen J F, Cao X Q, Li J Z, Wu Y Y. Physiological growth characteristics and yield of maize in black soil areas in response to different straw mulches and fertilizer application rates[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(6): 627-632 (in Chinese)

- [9] 孙玲, 孙志旭, 尤迪, 于双成, 朱健非, 刘振刚, 王年一. 吉林省西部玉米氮、磷、钾肥施用效果及养分吸收利用特征[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 85-91
Sun L, Sun Z X, You D, Yu S C, Zhu J F, Liu Z G, Wang N Y. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application and characteristics of nutrient absorption and utilization of maize in western of Jilin Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4): 85-91 (in Chinese)
- [10] 刘东华. 覆膜方式和施肥量对旱作区春玉米生长及土壤水肥环境的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023
Liu D H. Effects of film mulching methods and fertilization amount on the growth of spring maize and soil water and fertilizer environment in dry farming area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023 (in Chinese)
- [11] 尚洛宇. 浅埋滴灌下氮磷钾减量分施对春玉米养分利用及效益的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024
Shang M Y. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium reduction and separate application on nutrient utilization and benefit of spring maize under shallow drip irrigation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [12] 张帆, 陈梦茹, 邢英英, 党菲菲, 李源, 王秀康. 基于熵权法和 TOPSIS 对马铃薯施肥和滴灌量组合的优化[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(4): 732-744
Zhang F, Chen M R, Xing Y Y, Dang F F, Li Y, Wang X K. Optimization of fertilizer and drip irrigation levels for efficient potato production based on entropy weight method and TOPSIS[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4): 732-744 (in Chinese)
- [13] 洪自强, 张正珍, 王佳, 周甜, 李翻过, 苏明, 吴宏亮, 康建宏. 宁夏灌区春玉米产量、光合特性及荧光参数对磷素用量的响应[J]. 华北农学报, 2024, 39(6): 163-175
Hong Z Q, Zhang Z Z, Wang J, Zhou T, Li F G, Su M, Wu H L, Kang J H. Response pattern of spring maize yield, photosynthetic characteristics and fluorescence parameters to phosphorus dosage in Ningxia irrigation area[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(6): 163-175 (in Chinese)
- [14] 苏明, 吴佳瑞, 洪自强, 李翻过, 周甜, 吴宏亮, 康建宏. 西北半干旱区马铃薯块茎淀粉形成及产量对磷肥减量的响应[J]. 作物学报, 2025, 51(3): 713-727
Su M, Wu J R, Hong Z Q, Li F G, Zhou T, Wu H L, Kang J H. Response of potato Tuber starch formation and yield to phosphorus fertilizer reduction in the semi-arid region of Northwest China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(3): 713-727 (in Chinese)
- [15] 麦合穆提·拜合提, 丁峰, 李彦, 党龙鑫. 基于熵权-TOPSIS 综合评价法的苜蓿最适灌溉方式研究[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(1): 249-256
Meihemuti B H T, Ding F, Li Y, Dang L X. Research on the most suitable irrigation method for alfalfa based on entropy weight-TOPSIS[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(1): 249-256 (in Chinese)
- [16] 孙鑫, 张富仓, 杨玲, 张少辉, 王海东, 强生才, 郭金金. 基于熵权法和 TOPSIS 法优化马铃薯钾肥种类和滴灌量组合[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 279-290
Sun X, Zhang F C, Yang L, Zhang S H, Wang H D, Qiang S C, Guo J J. Optimal combination of potassium fertilizer and drip irrigation for potato production based on entropy weight method and TOPSIS analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(2): 279-290 (in Chinese)
- [17] 汪楚博, 朱艳, 王振华, 马嘉莹, 王靖程, 宋利兵, 郑继亮. 基于产量-品质-碳排放的加工番茄适宜水肥气滴灌耦合模式[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 107-118
Wang C B, Zhu Y, Wang Z H, Ma J Y, Wang J C, Song L B, Zheng J L. Suitable water-fertilizer-gas coupling model under drip irrigation for processing tomato based on yield, quality and carbon emission [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(1): 107-118 (in Chinese)
- [18] 要家威, 齐永青, 李怀辉, 沈彦俊. 地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1502-1511
Yao J W, Qi Y Q, Li H H, Shen Y J. Effects of the irrigation quota and drip irrigation pipes spacing on growth and development of summer maize with subsurface drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1502-1511 (in Chinese)
- [19] 杜君, 杨占平, 魏义长, 杨竹青, 雷宏军, 张运红, 和爱玲. 北方夏玉米滴灌施肥一体化技术应用效果[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 621-628
Du J, Yang Z P, Wei Y C, Yang Z Q, Lei H J, Zhang Y H, He A L. Application effect of integrated drip irrigation and fertilization technology for summer maize in northern China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(3): 621-628 (in Chinese)
- [20] 苏明, 柳强娟, 张正珍, 周甜, 洪自强, 李翻过, 康建宏, 吴宏亮. 施氮量对宁夏南部山区旱地马铃薯叶片抗氧化特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(8): 1341-1354
Su M, Liu Q J, Zhang Z Z, Zhou T, Hong Z Q, Li F G, Kang J H, Wu H L. The impact of nitrogen application on antioxidant characteristics of dryland potato leaves and yield in the mountainous region of southern Ningxia, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(8): 1341-1354 (in Chinese)
- [21] 张家桦, 杨恒山, 张玉芹, 李从锋, 张瑞富, 郇继承, 周阳晨. 不同滴灌模式对东北春播玉米籽粒淀粉积累及淀粉相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(7): 1332-1345
Zhang J H, Yang H S, Zhang Y Q, Li C F, Zhang R F, Tai J C, Zhou Y C. Effects of different drip irrigation modes on starch accumulation and activities of starch synthesis-related enzymes of spring maize grain in Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(7): 1332-1345 (in Chinese)
- [22] 刘凡, 刘斌祥, 郭宗翔, 崔世磊, 刘举, 杨云飞, 李小龙, 孔凡磊, 袁继超. 滴灌减氮对四川盆地玉米吐丝后叶片衰老和物质积累的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 179-185, 194
Liu F, Liu B X, Guo Z X, Cui S L, Liu J, Yang Y F, Li X L, Kong F L, Yuan J C. Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on leaf senescence and matter accumulation of maize after silking in Sichuan Basin [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 179-185, 194 (in Chinese)
- [23] 王广兴, 刘祖贵, 吴海卿, 冯绍元, 黄冠华, 詹卫华. 套播夏玉米滴灌条件下的适宜水肥调配[J]. 灌溉排水, 1999, 18(3): 17-20
Wang G X, Liu Z G, Wu H Q, Feng S Y, Huang G H, Zhan W H. Suitable combination of water and fertilizers for interplanted summer corn under drip irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 1999, 18(3): 17-20 (in Chinese)
- [24] 戚迎龙, 宁小莉, 孙贵芳, 李敏, 史海滨. 水氮耦合对滴灌玉米光合特性及产量的调控效应[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(3): 10-20
Qi Y L, Ning X L, Sun G F, Li M, Shi H B. Regulatory effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics and yield of drip-irrigated maize[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(3): 10-20 (in Chinese)
- [25] 谢幸华, 郭书亚, 张艳, 尚赏, 卢广远. 水肥管理对夏玉米叶片衰老及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2017(1): 93-96
Xie X H, Guo S Y, Zhang Y, Shang S, Lu G Y. Effects of water and fertilizer management on leaf senescence and yield of summer maize [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2017(1): 93-96 (in Chinese)
- [26] 张钊, 黄超, 樊宜, 郭翔, 顾松华, 车红兵, 陈海情, 刘翔辰, 刘战东. 滴灌量对北疆春小麦生长发育、产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,

- 2024, 43(4): 22-27
- Zhang Z, Huang C, Fan Y, Guo X, Gu S H, Che H B, Chen H Q, Liu X C, Liu Z D. Effect of drip irrigation amount on growth, yield and water use efficiency of spring wheat in northern Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(4): 22-27 (in Chinese)
- [27] 萨仁娜, 谢香文, 米力夏提·米那多拉, 罗幼洋. 北疆典型盐碱地棉花滴灌灌水技术参数的优化[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(6): 1396-1404
- Sa R N, Xie X W, Milixiati M N D L, Luo Y Y. Optimization of cotton drip irrigation technical parameters in typical saline-alkali land in northern Xinjiang, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(6): 1396-1404 (in Chinese)
- [28] 徐得甲. 半干旱风沙区滴灌玉米水肥高效利用研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022
- Xu D J. Study on efficient utilization of water and fertilizer in drip irrigation maize in semi-arid sandstorm area [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022 (in Chinese)
- [29] 杨乔乔. 滴灌水肥协同对玉米籽粒淀粉形成和产量的影响机理[D]. 银川: 宁夏大学, 2021
- Yang Q Q. Mechanism of synergistic effect of drip irrigation with water and fertilizer on the formation and yield of corn grain starch [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021 (in Chinese)
- [30] 刘铭, 刘秀霞, 刘文成, 马瑞霞, 王景顺, 杨金良. 氮磷钾配施对高淀粉玉米产量和品质的影响[J]. 东北农业科学, 2022, 47(2): 1-3, 15
- Liu M, Liu X X, Liu W C, Ma R X, Wang J S, Yang J L. Effect of NPK cooperating applications on yield and quality of high starch maize[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, 47(2): 1-3, 15 (in Chinese)
- [31] 胡曼, 张子学, 王长进, 余海兵. 氮磷钾运筹模式对玉米部分生理特性、产量及品质性状的影响[J]. 安徽科技学院学报, 2015, 29(1): 14-18
- Hu M, Zhang Z X, Wang C J, Yu H B. Effects of N, P, K managements mode on physiological properties, yield and quality traits of maize[J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2015, 29(1): 14-18 (in Chinese)
- [32] 李波, 史文璐. 氮磷钾配比对玉米干物质积累、产量、品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(2): 85-89
- Li B, Shi W L. Effects of N, P and K ratio on dry matter accumulation, yield and quality of maize[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(2): 85-89 (in Chinese)
- [33] 李池, 陈刚, 梁国成, 杨继革, 曹伟, 赵经华, 马明杰. 基于熵权-TOPSIS的滴灌春玉米灌水定额研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(2): 216-224
- Li C, Chen G, Liang G C, Yang J G, Cao W, Zhao J H, Ma M J. Irrigation quota of drip-irrigated spring maize based on entropy weight-TOPSIS[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(2): 216-224 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 苏明, 硕士研究生, 现就读于宁夏大学农学院。本科毕业于安徽科技学院农学院; 攻读硕士期间获得2次校三等学业奖学金, 1次国家奖学金。研究方向为作物生理生态及抗逆栽培研究。先后参加国家自然科学基金项目(31860336)、宁夏自然科学基金项目(2021AAC03072)。参加中国作物学会第十二次会员代表大会暨第二十一届中国作物学会学术年会。硕士期间以第一作者在《作物学报》《中国农业科学》《植物营养与肥料学报》《中国生态农业学报(中英文)》《农业资源与环境学报》等期刊发表论文共计7篇。



通讯作者简介: 吴宏亮, 中国农业大学博士, 现任宁夏大学农学院副教授, 硕士生导师, 主要从事区域农作制度与粮食安全、作物生理生态与农作制度、农业产业发展规划等领域的教学与研究。主讲作物科学研究方法、现代农业创新与乡村振兴、农业推广学、农业生态学等课程。现任中国耕作制度研究会常务理事, 宁夏作物学会常务理事。主持国家自然科学基金项目1项、宁夏回族自治区项目6项。培养硕士研究生20余人, 发表研究论文40余篇, 出版专著(副主编)2部, 参编专著3部、教材1部。相关研究成果曾获宁夏回族自治区科技进步二等奖(第2), 内蒙古自治区科技进步二等奖(第6)。