



# 不同灌水定额下缓释氮肥与尿素混掺对玉米生长和产量及水肥利用效率的影响

陈梦茹,邢英英,张帆,邵雅婷,付锦涛,张香竹,王秀康

(延安大学 生命科学学院,陕西延安 716000)

**摘要** 为旱区建立玉米种植的高效水肥管理技术提供理论依据。通过玉米盆栽试验,设置3个灌水定额(W1:2 548 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,W2:1 911 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,W3:1 433 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)和3个氮肥类型(U:尿素,UNS:尿素与缓释氮肥以纯氮含量比3:7混掺,SRF:缓释氮肥),以不施氮肥W3灌溉量为对照(CK),研究不同灌水量和氮肥类型对玉米生长指标、产量及构成、灌溉水分利用效率(IWUE)及氮素利用效率(NUE)的影响。结果表明,氮肥类型与灌水量及两者交互作用对玉米生长指标、单株干物质累积量、产量及产量构成要素、IWUE和NUE有显著影响( $P<0.05$ )。不同氮肥类型处理下,W1水平下的平均玉米株高、叶面积、叶绿素含量、净光合速率、单株干物质累积量、产量及产量构成和NUE均显著高于W2和W3。同一氮肥类型在不同的灌水量下对玉米生长的响应有所差异。W1灌溉水平下,SRF的平均产量较UNS和U分别提高2.01%和12.71%,但在W2和W3灌溉水平下,产量的整体趋势表现为UNS>SRF>U。处理W3UNS的IWUE最高,处理W1UNS的NUE最高。通过整体差异组合评价模型分析得出排名前两名的处理为W1SRF和W1UNS。综合分析,灌水量2 548 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>的前提下,缓释氮肥或缓释氮肥与尿素混掺一次性基施,可同时兼顾玉米生长、产量和水肥利用效率。

**关键词** 玉米;尿素;缓释氮肥;水肥利用效率;产量;整体差异组合评价模型

玉米(*Zea mays* L.)作为世界四大主粮作物之一,在确保全球粮食安全方面发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。陕北地区拥有广阔的地貌和独特的水热条件,是中国玉米种植的主产区之一<sup>[2]</sup>。合理的氮肥管理方式在确保作物稳产方面发挥着重要作用<sup>[3]</sup>。由于陕北地区劳动力短缺、人口老龄化等问题日趋严重,一次基施尿素成为该地区最普遍的氮肥管理方式,进而导致严重的负面环境效应,阻碍了该地区玉米产业发展<sup>[4]</sup>,因此,探索一种合理的氮肥施用方式是提高陕北地区玉米产量的关键措施。一次性缓释氮肥与尿素混掺基施技术是一种新型的氮肥施用技术,该技术广泛应用于作物生产实践中<sup>[5]</sup>。相比传统的底肥、追肥“一炮轰”的施肥方式,该技术不仅提升作物的产量和氮素利用效率,而且节约资源,减少追肥及劳动力的投入成本<sup>[6]</sup>。Guo等<sup>[7]</sup>通过大田试验研究控释尿素与普通尿素配施对玉米产量和水肥利用效率

的影响发现,相比于单施尿素或控释尿素,两者配施可有效减少NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的淋失,提升水肥利用效率,提高产量。姬景红等<sup>[8]</sup>通过研究缓释尿素和普通尿素配施对春玉米产量和光合特性的影响表明,普通尿素与控释氮肥以一定比例配施能够提高穗位叶的叶绿素浓度和净光合作用速率,延缓玉米叶片的衰老,从而提升产量。另外,灌水量对氮肥的分解速率具有显著影响。合理的土壤含水量将调节缓释氮肥的分解速率,使其释放氮素的供应量与整个生育期玉米对氮素需求量相同步,提升玉米产量和氮素吸收量,减少土壤中养分残留<sup>[9]</sup>。有研究表明,合理的水分供应将增加植株根系生长和活力,提高作物对根区土壤养分的吸收利用,增加作物产量<sup>[10]</sup>。过量灌溉不仅不能提升作物产量,而且将会导致土壤盐碱化,恶化土壤环境,降低土壤肥力<sup>[11]</sup>。因此,合理的水分供应对提升作物产量,改善水肥利用效率至关重要。

收稿日期:2023-06-25 修回日期:2023-10-07

基金项目:国家自然科学基金(52169014,42107379);延安大学研究生教育创新计划项目(YCX2023077);延安大学大学生创新计划项目(D2022004)。

第一作者:陈梦茹,女,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:1807041681@qq.com

通信作者:王秀康,男,博士,教授,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:wangxiukang@126.com

目前,主成分分析法(PCA)、隶属函数分析法(MFA)、加权的理想点技术法(DTOPSIS)和灰色关联度分析法(GRA)等单一评价模型已经广泛应用于农业生产实践的综合评价过程中。然而,在实际评价和分析过程中,由于不同评价模型的评价机理、角度和侧重点的差异加之人为因素的干扰,最终导致单一评价模型的评价结果缺乏科学性和合理性。因此,为解决单一评价模型的评价结果不一致等问题,有学者提出利用合理的算法将多个单一评价模型的结果进行综合分析,使得评价结果更具有科学性<sup>[12]</sup>。然而,这种多个单一评价模型组合的综合评价方式在农业生产实践中应用较少,尤其是在陕北旱区玉米水肥管理方面。

以往对于缓释氮肥与尿素混掺的研究主要集中于不同施用方法、施用量、施用类型等单个因素或交互效应对玉米生长发育的影响,忽视了关于缓释氮肥与尿素混掺在不同灌溉水平下对玉米生长发育以及水肥利用效率的响应研究,尤其是在中国的陕北旱区区域,同时该地区也缺乏基于玉米生长、产量和水肥利用效率下的水肥管理的多目标优化研究。因此,本研究采用盆栽试验,将普通尿素与缓释氮肥混掺同尿素和缓释氮肥单独施用作比较,研究不同的氮肥类型和灌溉量及两者的交互作用对该地区玉米生长、产量和水肥利用效率的影响,同时结合整体差异组合评价模型对该地区玉米生长、产量和水肥利用效率进行同步优化,旨在探究适合于陕北旱区玉米生长的氮肥类型以及合理的灌溉量,为该地区玉米高产高效栽培提供科学依据与理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2022年5月—10月在陕西省延安市延安大学生命科学学院试验基地(东经 $109^{\circ}11'$ ,北纬 $36^{\circ}38'$ )遮雨棚下进行。试验站属于干旱半干旱大陆性季风气候。年均气温 $8.9^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 $473\text{ mm}$ ,主要集中在6月—9月,年蒸发量 $1800\text{ mm}$ 左右。试验供试土壤为该试验站(10~40 cm土层)的土壤,土壤质地为砂壤土,土壤经过自然风干后,磨细过 $5\text{ mm}$ 筛。供试土壤基本理化性质为:pH 8.43,铵态氮 $3.88\text{ mg/kg}$ ,硝态氮 $10.13\text{ mg/kg}$ ,速效磷 $18.56\text{ mg/kg}$ ,速效钾 $110.23\text{ mg/kg}$ ,有机质 $10.66\text{ g/kg}$ ,土壤田间

持水量 $24\%$ 。采用上底直径 $40\text{ cm}$ 、下底直径 $35\text{ cm}$ 、高 $41\text{ cm}$ 的水桶进行盆栽试验。

### 1.2 试验设计

试验设灌溉量和氮肥类型两个因子。参照当地灌溉额度和前人的研究结果<sup>[13-14]</sup>,试验设置灌溉量 $2548\text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W1)、 $1911\text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W2)和 $1433\text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W3)3个灌溉定额(I);3种氮肥类型(NT):尿素(U)、尿素与缓释氮肥以纯氮含量比 $3:7$ 混掺(UNS)和缓释氮肥(SRF),以不施肥且W3灌溉量为对照(CK),共10个处理(表1)。各处理重复5次。

试验所用氮肥为尿素(含N $46\%$ )和缓释氮肥(含N $44\%$ ),磷肥为过磷酸钙(含 $\text{P}_2\text{O}_5$  $12\%$ ),钾肥为硫酸钾(含 $\text{K}_2\text{O}$  $52\%$ )。除尿素外(基追比为 $3:7$ ,追肥在拔节期进行),试验所用的其余肥料均以底肥与干土拌匀一次性施入,其中氮肥按每千克干土 $0.3\text{ g}$ 氮施入,磷肥和钾肥各按每千克干土 $0.2\text{ g P}_2\text{O}_5$ 和 $0.2\text{ g K}_2\text{O}$ 施入。每盆装风干土(过 $5\text{ mm}$ 的筛) $40\text{ kg}$ ,装土前在盆中插入两根直径为 $5\text{ cm}$ 的PVC管用于灌水,盆底铺设细砂和纱网,并保证通风正常。风干土分层压实装入盆中,将体积质量控制在 $1.3\text{ g/cm}^3$ ,最后在盆表面铺设蛭石。供试玉米品种为‘郑单958’,于2022年5月23日播种,10月2日收获。玉米在三叶期定苗,每盆留1株,在定苗后进行水分控制。根据玉米生育期,不同定额灌水量分多次灌入,使用量筒精确控制各盆灌水量,每间隔 $3\text{ d}$ 灌水1次。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 植株生长生理指标测定 分别在玉米生长的苗期(S1,25 d)、拔节期(S2,40 d)、吐丝期(S3,65 d)、灌浆期(S4,80 d)和成熟期(S5,100 d)测定株高、叶面积以及穗位叶绿素含量和穗位叶净光合作用速率(未抽穗前测定部位均为植株最上层第1片完全展开的叶片),每处理重复5次。用卷尺测定株高;用直尺测定单个叶片长和宽后,采用公式(长 $\times$ 宽 $\times 0.75$ )计算总叶面积<sup>[15]</sup>;用分光光度法测定穗位叶叶绿素含量;用CIRAS-3便携式光合作用测定系统于上午8:00—11:00测定穗位叶净光合作用速率<sup>[16]</sup>。

1.3.2 植株单株干物质积累量和产量测定 在玉米成熟期,每处理重复5次,测定单株干物质积累量和产量。用剪刀按植株茎、叶、根、穗轴+苞叶和籽粒将植株分为5部分,清洗土壤后,晾干装

档案袋,分别于 105 ℃ 的烘箱中杀青,并在 75 ℃ 下干燥至恒量,用电子天平称量各组织干物质累积量。玉米收获后记录每穗粒数和每行粒数,测量穗长、穗粗和秃尖长,风干脱粒后,最终折算成含水率为 14% 的籽粒百粒质量和产量<sup>[17]</sup>。

### 1.3.3 植株水肥利用效率计算 灌溉水分利用

效率 (IWUE, kg/m<sup>3</sup>) 和氮素利用效率 (NUE, g/g) 计算公式<sup>[18]</sup> 如下:

$$IWUE = Y/I$$

$$NUE = Y/NT$$

式中:Y 为玉米籽粒产量(g),I 为玉米生长期的灌溉量(m<sup>3</sup>),NT 为玉米全株氮素吸收量(g)。

表 1 试验处理

Table 1 Experiment treatment

处理 Treatment	灌溉量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) Irrigation amount	氮肥类型 Nitrogen fertilizer type	处理 Treatment	灌溉量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) Irrigation amount	氮肥类型 Nitrogen fertilizer type
CK	1 433	/	W2UNS	1 911	UNS
W1U	2 548	U	W2SRF	1 911	SRF
W1UNS	2 548	UNS	W3U	1 433	U
W1SRF	2 548	SRF	W3UNS	1 433	UNS
W2U	1 911	U	W3SRF	1 433	SRF

1.3.4 综合评价方法 由于单一评价方法评价角度和评价机理的侧重点不同,对于同一事物的客观事实很难作出准确的综合评价,因此评价结果存在一定的差异。为解决此类多种评价结果不一致问题,采用整体差异组合评价模型(OD-CEM)来将多种单一评价方法的结果进行整合,得到最终的评价结果,使得评价结果更加科学客观。本试验分别采用 PCA、MFA、DTOPSIS 和 GRA 4 种单一的评价方法对各处理优劣程度进行单独评价<sup>[19]</sup>。利用各单独评价方法的评价值构建原始矩阵,对原始矩阵进行归一化处理,得到标准化矩阵的实对称矩阵;计算实对称矩阵的最大特征值和对应的标准特征向量;根据标准特征向量求得组合权向量,进而求得评价对象的整体差异组合评分<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft excel 2010 对数据进行整理和绘制图形;采用 SPSS 23.0 进行方差分析,用 Duncan's 新复极差法分析显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉量和氮肥类型对玉米生长生理指标的影响

2.1.1 对玉米株高的影响 表 2 显示,随着生育期的不断推进,玉米株高明显增加,S2 到 S3 时期株高的增速最大。灌溉量和氮肥类型对整个生育期的玉米株高有极显著影响( $P < 0.01$ ),两者交互对 S4 时期的玉米株高有显著影响( $P < 0.05$ )。在整个玉米生育期,不同的氮肥类型处理

下,株高与灌溉量呈正相关关系,W1 水平下的平均株高分别比 W2 和 W3 高 6.30% 和 13.17%。S1 时期,处理 W1U 的株高最高(72.40 cm),比 CK 处理高 32.53%,但与处理 W1UNS 间无显著差异。S1 时期后,UNS 呈现出较好的促进株高提升的效果,在 S2、S3、S4 和 S5 时期,W2 和 W3 的水平下,UNS 的平均株高比 U 高 5.25%、6.34%、5.47%、5.50% 和 6.97%、5.56%、4.38%、5.52%,比 SRF 高 9.00%、2.41%、3.25%、3.35% 和 12.85%、2.47%、1.53%、1.96%,但在 S2 时期后,W1 水平下平均株高的整体趋势为 SRF > UNS > U,处理 W1SRF 的株高在 S3、S4 和 S5 时期最高,分别为 224.67、227.00 和 217.10 cm。

2.1.2 对玉米叶面积的影响 表 3 表明,灌溉量和氮肥类型对整个生育时期的玉米叶面积有极显著影响( $P < 0.01$ ),两者交互对 S1、S4 和 S5 时期的玉米叶面积有显著影响( $P < 0.05$ )。随着生育期的推进,玉米叶面积呈先增加后降低的变化趋势,在 S4 时期达最高值,另外从 S2 到 S3 时期的叶面积增速最大。与 CK 相比,各处理的叶面积有不同程度的增加。不同的氮肥类型处理下,随着灌溉量的不断增加,叶面积持续增大,W1 水平下的平均叶面积分别比 W2 和 W3 高 2.88% 和 11.81%。在 S1 时期,处理 W1U 的叶面积最大(1 094.59 cm<sup>2</sup>),相比于处理 CK 高 22.77%。在 S3、S4 和 S5 时期,W1 水平下平均叶面积的整体趋势为 SRF > UNS > U,但在 W2 和 W3 水平下平均叶面积的整体趋势为 UNS > SRF > U。处

理 W1SRF 的叶面积在 S3、S4 和 S5 时期最高,分 处理 W1UNS 间产生显著差异。  
别为 8 318. 38、8 363. 57 和 7 641. 77 cm<sup>2</sup>,但未与

表 2 不同灌溉量和氮肥类型下玉米株高

Table 2 Maize plant height under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types cm

处理 Treatment	生育时期 Growth stage				
	S1	S2	S3	S4	S5
CK	54. 63 g	91. 50 g	185. 20 e	185. 87 g	178. 83 g
W1U	72. 40 a	118. 17 b	212. 33 b	210. 33 c	206. 60 b
W1UNS	69. 37 ab	126. 77 a	221. 33 a	219. 33 b	211. 60 ab
W1SRF	64. 60 cd	117. 37 bc	224. 67 a	227. 00 a	217. 10 a
W2U	67. 60bc	112. 47 cd	200. 00 c	201. 00 de	194. 00 de
W2UNS	64. 57 cd	118. 37 b	212. 67 b	212. 00 c	204. 67 bc
W2SRF	62. 63 de	108. 60 de	207. 67 b	205. 33 cd	198. 03 cd
W3U	64. 30 cd	103. 67 e	188. 83 de	190. 33 fg	182. 33 fg
W3UNS	60. 53 ef	110. 90 d	199. 33 c	198. 67 de	192. 40 de
W3SRF	57. 43 fg	98. 27 f	194. 53 cd	195. 67 ef	188. 70 ef
显著性检验 Significant level					
I	* *	* *	* *	* *	* *
NT	* *	* *	* *	* *	* *
I×NT	ns	ns	ns	*	ns

注:同一列不同小写字母表示同一生育时期各处理间差异显著( $P < 0.05$ )。\*、\* \*、ns 分别表示效应显著( $P < 0.05$ )、极显著( $P < 0.01$ )、不显著。下同。

Note:Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at the same growth period ( $P < 0.05$ ). \*, \* \* and ns represent significant effects ( $P < 0.05$ ), extremely significant effects ( $P < 0.01$ ), and non-significant, respectively. The same below.

表 3 不同灌溉量和氮肥类型下玉米叶面积

Table 3 Maize leaf area under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types cm<sup>2</sup>

处理 Treatment	生育时期 Growth stage				
	S1	S2	S3	S4	S5
CK	891. 56 g	2 624. 74 g	6 844. 39 h	6 803. 75 h	5 992. 58 g
W1U	1 094. 59 a	3 201. 24 b	8 043. 17 c	7 996. 90 d	7 194. 73 c
W1UNS	1 073. 96 b	3 287. 68 a	8 281. 88 a	8 321. 64 ab	7 508. 13 a
W1SRF	993. 10 d	3 066. 43 cd	8 318. 38 a	8 363. 57 a	7 641. 77 a
W2U	1 032. 16 c	3 026. 43 d	7 799. 08 d	7 768. 60 e	6 981. 60 d
W2UNS	1 008. 30 d	3 129. 62 bc	8 185. 04 ab	8 185. 27 bc	7 494. 29 ab
W2SRF	960. 57 e	2 937. 44 e	8 062. 59 bc	8 111. 23 cd	7 339. 13 bc
W3U	949. 08ef	2 861. 10 ef	7 201. 93 g	7 070. 40 g	6 270. 95 f
W3UNS	932. 07 f	2 933. 23 e	7 636. 45 e	7 671. 63 e	6 887. 66 d
W3SRF	904. 67 g	2 784. 63 f	7 453. 81 f	7 346. 57 f	6 572. 33 e
显著性检验 Significant level					
I	* *	* *	* *	* *	* *
NT	* *	* *	* *	* *	* *
I×NT	* *	ns	ns	*	* *



2.1.3 对玉米叶片叶绿素含量的影响 表 4 表明,灌溉量和氮肥类型对整个生育时期的玉米叶片叶绿素含量有极显著影响( $P < 0.01$ ),两者交互对 S3、S4 和 S5 时期的玉米叶片叶绿素含量有极显著影响( $P < 0.01$ )。随着玉米生育期的推进,叶片叶绿素含量呈先增加后降低的趋势,各处理在 S3 或 S4 时期达最高值。相比于 CK,适量的灌溉和施肥均会提升叶绿素含量。在 S1 时期,相同的灌溉水平,U 水平下的平均叶绿素含量分别比 UNS 和 SRF 高 5.01% 和 15.99%。处理 W1U 的叶绿素含量在 S1 时期最高(0.910 mg/g),相较于 CK 增加 67.59%,但与处理

W1UNS 间无显著差异。在 S2 时期,不同灌溉水平下的平均叶绿素含量整体趋势表现为 UNS > U > SRF。S2 时期后,W1 水平下平均叶绿素含量整体趋势表现为 SRF > UNS > U,但在 W2 和 W3 水平下,整体趋势表现为 UNS > SRF > U。处理 W1SRF 在 S3、S4 和 S5 时期的叶绿素含量最高,相比于 CK 处理分别增加 89.60%、94.99% 和 125.35%。在整个生育期中,不同氮肥类型处理下,灌溉量与玉米叶片叶绿素含量呈正相关关系,W1 水平下的平均叶绿素含量分别较 W2 和 W3 提高 6.90% 和 39.23%。

表 4 不同灌溉量和氮肥类型下玉米叶片叶绿素含量

Table 4 Chlorophyll content in maize leaves under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types

处理 Treatment	生育时期 Growth stage					mg/g
	S1	S2	S3	S4	S5	
CK	0.543 h	1.120 h	2.020 g	2.017 h	0.426 f	
W1U	0.910 a	2.097 b	3.530 b	3.467 c	0.762 c	
W1UNS	0.873 ab	2.220 a	3.780 a	3.857 a	0.913 ab	
W1SRF	0.793 cd	1.973 cd	3.830 a	3.933 a	0.960 a	
W2U	0.860 b	1.893 d	3.267 c	3.183 d	0.663 d	
W2UNS	0.820 c	2.057 bc	3.763 a	3.847 a	0.880 b	
W2SRF	0.757 de	1.717 e	3.560 b	3.637 b	0.807 c	
W3U	0.747 e	1.473 f	2.490 f	2.310 g	0.543 e	
W3UNS	0.703 f	1.547 f	2.960 d	3.047 e	0.680 d	
W3SRF	0.620 g	1.340 g	2.703 e	2.634 f	0.550 e	
显著性检验 Significant level						
I	**	**	**	**	**	
NT	**	**	**	**	**	
I×NT	ns	ns	**	**	**	

2.1.4 对玉米净光合速率的影响 从表 5 可知,灌溉量和氮肥类型对整个生育时期的玉米净光合作用速率有极显著影响( $P < 0.01$ ),两者交互对 S3、S4 和 S5 时期的玉米净光合作用速率有极显著影响( $P < 0.01$ )。随着生育期的推进,玉米净光合速率呈先升高后降低的单峰变化趋势,各处理在 S4 时期达峰值,其中处理 W1SRF 的净光合速率最高,相比于 CK 高 23.83%。不同氮肥类型处理下,W1 水平下的平均净光合速率分别比 W2 和 W3 高 5.40% 和 13.07%。在 S1 时期,相同的灌溉水平下,U 水平的平均净光合速率分别比 UNS 和 SRF 高 2.45% 和 8.45%。处理 W1U 的净光合速率在 S1 时期最高[32.90  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ],相

比于 CK 处理高 32.13%,但与处理 W1UNS、W2U 间无显著差异。在 S2 时期,不同灌溉水平下的平均净光合速率整体趋势表现为 UNS > U > SRF。S2 时期后,W1 水平下的平均净光合速率整体趋势表现为 SRF > UNS > U,但在 W2 和 W3 水平下整体趋势表现为 UNS > SRF > U。在 S3、S4 和 S5 时期,处理 W1SRF 最高,相比于处理 CK 分别高 22.42%、23.83% 和 28.45%。

## 2.2 不同灌溉量和氮肥类型对玉米单株干物质累积量的影响

图 1 表明,灌溉量、氮肥类型以及两者交互对玉米单株干物质累积量有极显著影响( $P < 0.01$ )。各处理间单株干物质累积量有显著差异

( $P < 0.05$ )。从整体上来看,各组织器官单株干物质积累量表现为籽粒>茎>叶>穗轴+苞叶>根。处理 W1SRF 的单株干物质积累量最高,达 358.30 g,相比于 CK 高 64.03%,但与处理 W1UNS 间无显著差异。在不同氮肥类型处理下,随着灌溉量的增加,单株干物质积累量持续增

加,W1 水平下的平均单株干物质积累量分别比 W2 和 W3 高 10.18% 和 30.91%。不同灌溉水平下,同一氮肥类型对单株干物质积累量的影响表现出不同的效果,W1 水平下,平均单株干物质积累量整体趋势表现为 SRF>UNS>U,但在 W2 和 W3 水平下整体趋势表现为 UNS>SRF>U。

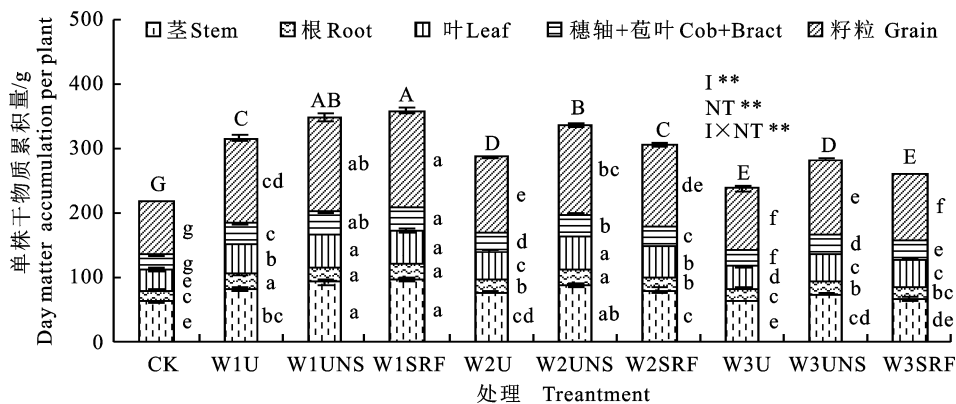
表 5 不同灌溉量和氮肥类型下玉米净光合速率

Table 5 Net photosynthetic rate of maize under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types

处理 Treatment	生育时期 Growth stage				
	S1	S2	S3	S4	S5
CK	24.90 f	28.97 f	34.53 e	34.83 e	22.60 e
W1U	32.90 a	34.60 b	39.90 b	40.43 b	27.90 ab
W1UNS	31.77 ab	36.37 a	42.20 a	42.83 a	28.83 a
W1SRF	30.20 bcd	33.10 c	42.27 a	43.13 a	29.03 a
W2U	31.40 ab	32.37 cd	38.30 cd	37.47 d	26.20 cd
W2UNS	30.80 bc	35.03 ab	41.60 a	42.23 a	28.33 a
W2SRF	29.33 cd	31.33 de	38.43 cd	38.16 cd	27.07 bc
W3U	29.00 d	30.57 e	35.15 e	35.27 e	23.37 e
W3UNS	28.50 d	31.80 cde	38.93 c	39.26 bc	26.83 bc
W3SRF	26.50 e	29.07 f	37.20 d	36.83 d	25.27 d

显著性检验 Significant level	S1	S2	S3	S4	S5
I	**	**	**	**	**
NT	**	**	**	**	**
I×NT	ns	ns	**	**	**



图柱上不同小写字母表示不同处理间各组织器官单株干物质积累量差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示不同处理间总单株干物质积累量差异显著( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters within bar graphs indicate significant differences in dry matter accumulation in various organs of plants among different treatments ( $P < 0.05$ ), and different uppercase letters on the bar graphs indicate significant differences in total dry matter accumulation per plant among different treatments ( $P < 0.05$ )

图 1 不同灌溉量和氮肥类型下玉米单株干物质积累量

Fig. 1 Dry matter accumulation of maize per plant under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types

### 2.3 不同灌溉量和氮肥类型对玉米产量及产量构成的影响

表 6 表明,除行粒数外,灌溉量和氮肥类型对产量及产量构成的各指标有极显著影响( $P < 0.01$ ),另外,灌溉量和氮肥类型两者交互对百粒质量有极显著影响( $P < 0.01$ ),对秃尖长和穗粒数有显著影响( $P < 0.05$ ),说明不同氮肥类型在不同的灌溉量下对百粒质量的影响有极显著差异,对秃尖长和穗粒数的影响有显著差异。处理 W1SRF 的产量最高,达 173.98 g,比 CK 高 78.39%,但与处理 W1UNS 间无显著差异。在不同氮肥类型处理下,随着灌溉量的增加,玉米产量不断提高,W1 水平下的平均玉米产量分别比 W2 和 W3 高 12.37%和 35.35%。从氮肥类型角度来看,同一氮肥类型在不同的灌溉量下对产量的响应有所差异,W1 水平下,SRF 的平均产量

较 UNS 和 U 分别提高 2.01%和 12.71%,但在 W2 和 W3 水平下整体趋势表现为  $UNS > SRF > U$ 。

不同灌溉量和氮肥类型下各处理的产量构成各指标存在显著差异( $P < 0.05$ ),其中处理 W1SRF 的穗粗、穗长和行粒数最高,分别为 46.12 mm、15.13 cm 和 33.67 粒,且与处理 W1UNS 和 W2UNS 间无显著差异( $P > 0.05$ )。在不同氮肥类型处理下,W1 水平下的平均百粒质量分别比 W2 和 W3 高 7.41%和 23.88%。同一氮肥类型在不同灌溉水平下对产量构成各指标有不同的响应,W1 水平下平均穗粒数整体趋势表现为  $SRF > UNS > U$ ,但在 W2 和 W3 水平下整体趋势表现为  $UNS > SRF > U$ 。另外,处理 W1SRF、W1UNS 和 W2UNS 间的秃尖长无显著差异( $P > 0.05$ )。

表 6 不同灌溉量和氮肥类型下玉米产量及产量构成

Table 6 Yield and yield components of maize under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types

处理 Treatment	穗粗/mm Eardiameter	穗长/cm Ear length	百粒质量/g 100-grain mass	秃尖长/mm Bald ear length	穗粒数 Kernel number	行粒数 Kernel number per row	单株产量/g Yield per plant
CK	38.92 f	12.3 d	25.08 f	21.02 a	321.67 h	24.67 b	97.53 g
W1U	44.71 bc	14.57 ab	33.52 bc	10.17 e	440.33 cd	32.33 a	154.35 cd
W1UNS	45.89 ab	14.93 ab	34.80 ab	5.33 f	464.01 ab	33.67 a	170.55 ab
W1SRF	46.12 a	15.13 a	35.79 a	5.02 f	480.03 a	33.67 a	173.98 a
W2U	43.85 cd	13.60 c	29.35 d	12.50 cd	392.33 e	30.01 a	135.36 e
W2UNS	45.98 ab	14.73 ab	34.44 bc	5.67 f	455.67 bc	33.33 a	161.64 bc
W2SRF	45.04 abc	14.40 b	33.15 c	10.50 de	428.33 d	32.01 a	146.95 de
W3U	41.73 e	12.50 d	26.69 e	19.01 ab	347.67 g	25.33 b	111.89 f
W3UNS	43.36 d	13.40 c	29.97 d	13.67 c	385.00 ef	29.67 a	134.97 e
W3SRF	42.89 de	13.07 c	27.39 e	17.01 b	365.33 fg	26.03 b	121.72 f

显著性检验 Significant level

I	**	**	**	**	**	**	**
NT	**	**	**	**	**	*	**
I×NT	ns	ns	**	*	*	ns	ns

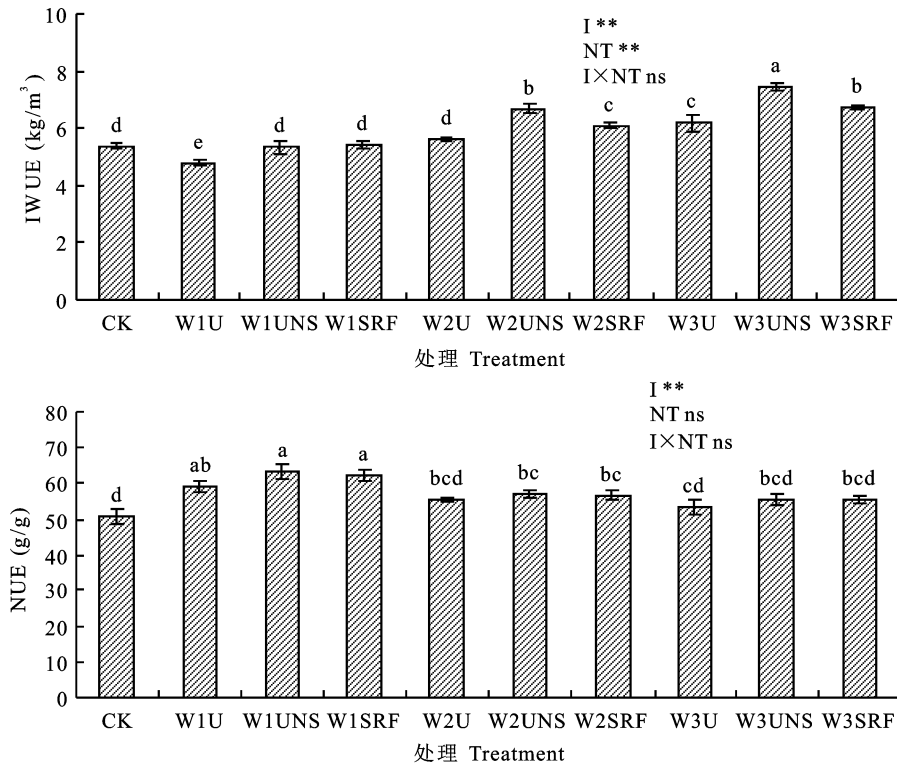
### 2.4 不同灌溉量和氮肥类型对玉米水、肥利用效率的影响

图 2 所示,各处理间 IWUE 和 NUE 存在显著差异( $P < 0.05$ )。灌溉量对 IWUE 和 NUE 有极显著影响( $P < 0.01$ )。处理 W3UNS 的 IWUE 最高,为 7.50 kg/m<sup>3</sup>,显著高于其他处理,处理 W1U 的 IWUE 最低。在不同氮肥类型处理下,随着灌溉量的增加,IWUE 呈持续降低的趋势,

W3 水平下的平均 IWUE 分别比 W1 和 W2 高 31.36%和 10.71%。不同灌溉水平下,相同氮肥类型对 IWUE 的响应有所差异,W1 水平下,平均 IWUE 整体趋势表现为  $SRF > UNS > U$ ,但在 W2 和 W3 水平下,IWUE 整体趋势表现为  $UNS > SRF > U$ 。处理 W1UNS 的 NUE 最高,为 62.992 g/g,相比于 CK 高 24.29%,但与处理 W1SRF、W1U 间无显著差异。在不同氮肥类型

处理下, W1 水平下的平均 NUE 分别比 W2 和 W3 高 9.16% 和 12.37%。相同灌溉水平下, 平

均 NUE 的整体趋势表现为 UNS>SRF>U。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ )

图 2 不同灌溉量和氮肥类型下玉米水、肥利用效率

Fig. 2 Water and fertilizer use efficiency of maize under different irrigation amount and nitrogen fertilizer types

### 2.5 各指标相关性分析

由表 7 可知, 玉米籽粒产量与玉米株高、叶面积、叶绿素含量、净光合作用速率、单株干物质累积量、NUE 呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.83~0.98, 与 IWUE 呈负相关关系。株高与叶面积、叶绿素含量、净光合作用速率、单株干物质累积量、NUE 呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.90、0.92、0.88、0.94、0.82, 与 IWUE 呈负相关关系, 相关系数为 -0.31。叶面积与叶绿素含量、净光合作用速率、单株干物质累积量呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 与 NUE 呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。叶绿素含量与净光合作用速率、单株干物质累积量呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 与 NUE 呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。净光合速率与单株干物质累积量、NUE 呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.94、0.79。单株干物质累积量与 NUE 呈极显著正相关关系 ( $P <$

0.01), 相关系数为 0.88。然而, IWUE 与各生长指标均呈负相关关系, 但均未达到显著水平。

### 2.6 基于整体差异组合评价模型的玉米水、肥管理方案优化

分别采用 PCA、MFA、DTOPSIS 和 GRA 对不同水、肥管理下玉米株高、叶面积、叶绿素含量、净光合作用速率、单株干物质累积量、穗粗、穗长、百粒质量、穗粒数、行粒数、籽粒产量、秃尖长、IWUE 和 NUE 进行分析评价, 随之结合多种单一评价方法所得到的评价结果评价价值, 构建原始矩阵, 利用 ODCM 对各处理进行综合评价, 得到各处理优劣排序。由评价结果可以看出, 利用 4 种单独评价方法获得的评价排序结果略有差异, 说明不同评价方法之间存在一定的相关性。因此, 进一步采用 ODCM 对 4 种单独模型的评价价值进行综合评价, 评价结果见表 8, 处理 W1SRF 和处理 W1UNS 在本次试验中分别排名第 1 和第 2。



表 7 各指标相关性分析

Table 7 Correlation analysis of indicators

指标 Index	株高 Plant height	叶面积 Leaf area	叶绿素含量 Chlorophyll content	净光合速率 Net photosynthetic rate	单株干物质累积量 Dry matter accumulation per plant	产量 Yield	IWUE
叶面积 Leaf area	0.90**						
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.92**	0.95**					
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.88**	0.94**	0.90**				
单株干物质累积量 Dry matter accumulation per plant	0.94**	0.96**	0.96**	0.94**			
产量 Yield	0.93**	0.95**	0.94**	0.94**	0.98**		
IWUE	-0.31	-0.13	-0.17	-0.09	-0.18	-0.14	
NUE	0.82**	0.64*	0.63*	0.79**	0.83**	0.88**	-0.16

注: \* 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著; \*\* 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

Note: \* indicates significant correlation at the 0.05 level (two-tailed); \*\* indicates significant correlation at the 0.01 level (two-tailed).

表 8 各评价模型的评价结果

Table 8 Evaluation results of each evaluation model

处理 Treatment	PCA	排名 Ranking	MFA	排名 Ranking	DTOPSIS	排名 Ranking	GRA	排名 Ranking	ODCEM	排名 Ranking
CK	-1.527	10	0.016	10	0.005	10	0.571	10	-1.483	10
W1U	0.380	4	0.691	4	0.341	4	0.791	4	0.244	4
W1UNS	0.981	2	0.887	2	0.916	2	0.920	2	1.192	2
W1SRF	1.144	1	0.938	1	0.983	1	0.967	1	1.413	1
W2U	-0.230	7	0.480	7	0.219	6	0.699	7	-0.355	7
W2UNS	0.814	3	0.834	3	0.846	3	0.880	3	0.980	3
W2SRF	0.318	5	0.672	5	0.323	5	0.780	5	0.178	5
W3U	-1.066	9	0.181	9	0.045	9	0.613	9	-1.112	9
W3UNS	-0.158	6	0.512	6	0.179	7	0.723	6	-0.289	6
W3SRF	-0.656	8	0.329	8	0.082	8	0.656	8	-0.769	8

### 3 讨论

植株生长生理状况优劣直接影响作物干物质积累和产量<sup>[21]</sup>。在本研究中,玉米籽粒产量与株高、叶面积、叶绿素含量、净光合作用速率、单株干物质累积量呈极显著正相关关系。在不同的氮肥类型处理下,W1 水平下的平均株高、叶面积、叶绿素含量和净光合速率显著提高,这与 Xing 等<sup>[22]</sup>研究结果一致,这可能是由于处于干旱胁迫环境下的作物,叶片气孔形态受损,减少 CO<sub>2</sub> 气体的扩散和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度,严重限制作物根部正常生长发育,阻碍对土壤水分和养分的吸收利用,影响作物生长。在玉米生长的早期阶段(S1 和 S2 时期),U 和 UNS 水平下的各生长生理指标高于 SRF,这主要是因为当 U 和 UNS 施入土壤后,土壤中的脲酶可将尿素迅速水解,直接提升作物

根区土壤有效氮的吸收利用,促进前期阶段玉米的生长发育<sup>[23]</sup>。另外,本研究发现在玉米生长后期(S2 时期后),W1 水平下 SRF 将更有利于玉米生长和单株干物质累积量,但在 W2 和 W3 水平下玉米生长和单株干物质累积量的整体趋势为 UNS>SRF>U,这一结果与 Guo 等<sup>[24]</sup>的研究相似,这可能是由于 UNS 的释放需要一定的时间,可向作物根际长期缓慢地持续提供氮素,同步了作物整个生育期氮素需求,从而缓解了因干旱胁迫给作物所带来的不利影响,促进作物生长和干物质质量累积,但在充分灌溉条件下,其促使 SRF 全面水解,从而在整个生育期向玉米根际周围提供充分氮素,促进作物生长<sup>[25]</sup>。

水是驱动作物产量形成的主要因素,过量和亏缺灌溉均会影响作物产量的形成<sup>[26]</sup>。在本研究中,不同氮肥类型处理下,W1 水平下的平均产

量分别比 W2 和 W3 提升了 12.37% 和 35.35%，这与 Wang 等<sup>[27]</sup> 研究结果有所差异，产生这一结果可能是由于陕北地区充足且高强度的光热条件加剧了玉米生育期中无谓的水分散失，因此需要更多的水分补给来缓解干旱所带来的不利影响，确保作物稳产。先前有研究表明，UNS 可有效缓解水分亏缺条件下对玉米产量及产量构成所造成的不利影响<sup>[28]</sup>。在本研究中，W2 和 W3 水平下 UNS 显著提升作物产量及产量构成因素。这主要是因为当施用肥料为 U 时，其被脲酶迅速水解，引起短暂的土壤肥性，但导致玉米生殖生长阶段根际氮素供应不足，造成减产<sup>[29]</sup>；在水分亏缺环境下，当施用 SRF 时，由于该类型肥料外层附着一层涂层材料，阻碍肥料水解所需的水分传输路径，造成玉米生长发育前期氮素供应不足，影响玉米前期营养生长<sup>[30]</sup>；但当施用 UNS 后，其可较好地调控根际土壤氮素供应状况，与 U 相比，UNS 可有效延长土壤肥力，增加植株氮素吸收，提升玉米产量，与 SRF 相比，UNS 可保证玉米生育早期阶段充分的氮素供应，促进植株生育早期氮素吸收，延缓植株早衰，提升生育后期氮素转运，因此，施用 UNS 可较好地同步整个生育期中根际土壤氮素供应和玉米氮素的需求，增强作物根部水分和养分吸收能力，提高产量<sup>[31]</sup>。在本研究中，处理 W1SRF 的产量最高，产生这一结果的原因主要是在较湿润的作物根区土壤环境下，SRF 缓慢持续的向作物根际供应氮素，同步了玉米整个生育期氮素需求量，有利于产量形成。因此，从农业实践应用角度考虑，SRF 可推荐于降雨量充足的区域选用。另外，灌溉量和氮肥类型两者交互对百粒质量有极显著影响 ( $P < 0.01$ )，说明氮肥类型对玉米百粒质量的响应因灌溉量不同将有所差异。

土壤中的硝态氮和铵态氮是植物可直接吸收利用的两种氮素形式，也是土壤无机氮的主要组成部分，对植物正常生长发育起着重要作用<sup>[32]</sup>。先前有研究表明，普通尿素与缓释尿素混掺可缓解水分胁迫对植株的影响，使土壤中无机氮含量维持在较高的水平，以保证作物生育后期氮素供应，提升 NUE 和产量<sup>[33-34]</sup>，这与本研究结果一致。本研究表明，在相同灌溉水平下，UNS 的平均 NUE 分别比 U 和 SRF 高 4.28% 和 0.85%，同时 UNS 的籽粒产量分别比 U 和 SRF 高 16.33% 和 5.54%。氮肥在施入土壤后经水解转

化为无机氮供植物吸收利用，因此土壤含水量水平高低直接影响根际土壤氮素供应<sup>[35]</sup>。在本研究中，灌溉量对 NUE 有极显著影响，不同氮肥处理下，W1 水平下的平均 NUE 显著高于 W2 和 W3，产生这一结果的原因主要有两个方面，首先，充分的灌水量将明显提升植株根密度和根系活力，提高对土壤中水分和养分的吸收量，提升氮素利用效率和产量；其次，在较高的灌溉水平下，氮肥的水解速率得以提升，尤其是 SRF，因此保证了生育后期充足的氮素供应，以提升产量。提高水分利用效率是实现旱区农业可持续发展的关键。在本研究中，灌溉量对 IWUE 有极显著影响，这与李森等<sup>[36]</sup> 研究结果一致。

单一处理难以同时兼顾玉米生长、高产和高水肥利用效率，而基于多个指标的综合分析与评价能有效地克服单个指标评价片面的问题，使得研究结果更具有科学性和客观性<sup>[37]</sup>。利用 PCA、TOPSIS、MFA 和 GRA 对多个目标进行综合评价已广泛应用于多个领域<sup>[38-39]</sup>。然而，单一的评价方式在农业实践过程中会对评价结果造成一定的误差，为了保证评价结果的可靠性和合理性，有必要采用多个评价模型进行综合评价。针对此类问题，有学者对独立模型间相组合的相关性和实用性进行了探讨研究，其中包括在单一评价方法的组合评价结论基础上再次进行二次组合评价，但这种方法也会增加计算和模型的复杂性。每一种单一的评价方法都有着不同的评价角度，其所评价出的结果也会产生差异，组合评价则可以克服单一评价方法的局限性，本研究在 4 种单一评价模型评价结果的基础上，进一步采用整体差异组合评价模型将 4 种单一评价模型的评价值进行二次组合综合评价，得到最终的评价结果。这种评价模型和评价结果克服了多种单一评价方法评价结果不一致的问题，极大地利用了不同评价模型结果的信息，使结果更加客观准确，可用于玉米的水肥管理决策。评价结果表明，处理 W1SRF ( $2\ 548\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  灌水量下配施 SRF) 或 W1UNS ( $2\ 548\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  灌水量下配施 UNS) 可作为最佳灌溉量和氮肥类型，但由于氮肥在土壤中分解受多种因素影响，因此还需要进一步的田间试验过程中加以优化。

## 4 结 论

在每千克干土施入 0.3 g 氮的前提条件下，

灌溉量为  $2\ 548\ \text{m}^3/\text{hm}^2$  与缓释氮肥或缓释氮肥与尿素混掺一次性基施的水肥管理组合,可同时确保盆栽玉米获得最佳的生长、产量和水肥利用效率。该研究结果可为陕北旱区玉米种植时选择最佳氮肥管理方式提供科学依据。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 闫世程,张富仓,吴悠,等.滴灌夏玉米土壤水分与蒸散量 SIMDualKc 模型估算[J].农业工程学报,2017,33(16):152-160.  
YAN SH CH, ZHANG F C, WU Y, *et al.* Estimation of drip irrigated summer maize soil water content and evapotranspiration based on SIMDualKc model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16):152-160.
- [2] LAI Z L, FAN J L, YANG R, *et al.* Interactive effects of plant density and nitrogen rate on grain yield, economic benefit, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-fertigated maize in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263:107453.
- [3] 吕伟生,肖小军,肖国滨,等.缓释肥侧位深施及用量对油菜产量和肥料利用率的影响[J].农业工程学报,2020,36(19):19-29.  
LÜ W SH, XIAO X J, XIAO G B, *et al.* Effects of lateral deep application and dosage of slow-release fertilizer on yield and fertilizer utilization efficiency of rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19):19-29.
- [4] 邹奇芳,谷晓博,李援农,等.缓释氮肥施用比例对冬小麦产量及氮肥利用效率的影响[J].水资源与水工程学报,2022,33(4):217-224.  
ZOU Q F, GU X B, LI Y N, *et al.* Effects of slow-release nitrogen fertilizer application ratio on yield and nitrogen fertilizer utilization efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2022, 33(4):217-224.
- [5] 王寅,冯国忠,张天山,等.基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥混掺比例[J].土壤学报,2015,52(5):1153-1165.  
WANG Y, FENG G ZH, ZHANG T SH, *et al.* Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic and economic benefit[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5):1153-1165.
- [6] XING Y Y, MI F Y, WANG X K. Effects of different nitrogen fertilizer types and application rates on maize yield and nitrogen use efficiency in Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(7):1938-1958.
- [7] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, *et al.* Synchronizing nitrogen supply and uptake by rainfed maize using mixed urea and slow-release nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 122(2):157-171.
- [8] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释混掺肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J].土壤通报,2015,46(3):669-675.  
JI J H, LI Y Y, LIU SH Q, *et al.* Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):669-675.
- [9] QIANG S C, ZHANG Y, ZHAO H, *et al.* Combined effects of urea type and placement depth on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rain-fed spring maize in Northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262:107442.
- [10] 王浩,梁熠,康建宏,等.旱区土壤无机氮素与春玉米根系时空分布对控释尿素输入的响应[J].玉米科学,2022,30(4):130-141.  
WANG H, LIANG Y, KANG J H, *et al.* Response of spatiotemporal distribution of soil inorganic nitrogen and spring maize roots to controlled urea input in arid area[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(4):130-141.
- [11] 张帆,李源,陈梦茹,等.西北地区马铃薯品质与土壤养分间的耦合关系[J].节水灌溉,2022(10):8-14.  
ZHANG F, LI Y, CHEN M R, *et al.* Coupling relationship between potato quality and soil nutrients in Northwest China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(10):8-14.
- [12] ZHANG F, CHEN M R, FU J T, *et al.* Coupling effects of irrigation amount and fertilization rate on yield, quality, water and fertilizer use efficiency of different potato varieties in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 287:108446.
- [13] XING Y Y, LI Z Y, WANG Y, *et al.* Exploring optimization of water and nitrogen fertilizer management for potted maize based on PCA[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2021, 53(6):6-13.
- [14] 许高平,王璞,薛绪掌,等.负压控水下不同株型玉米水分利用效率和产量的盆栽试验[J].农业工程学报,2014,30(15):148-156.  
XU G P, WANG P, XUE X ZH, *et al.* Experiment on water use efficiency and yield of different plant type of potted maize under negative pressure water control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15):148-156.
- [15] 刘云柯,李丰琇,孙飞雪,等.干旱区覆膜滴灌和施氮量对夏玉米生长发育和产量的影响[J].玉米科学,2023,31(4):140-147.  
LIU Y K, LI F X, SUN F X, *et al.* Responses of physiological indexes of drip-irrigated summer maize to different nitrogen application rates with mulch and without mulch[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(4):140-147.
- [16] ZHANG S H, FAN J L, ZHANG F C, *et al.* Optimizing irrigation amount and potassium rate to simultaneously improve tuber yield, water productivity and plant potassium

- accumulation of drip-fertigated potato in Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 264: 107493.
- [17] 吕梦, 黄明, 侯园泉, 等. 减氮配施有机肥对豫西旱区玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. *玉米科学*, 2023, 31(4): 158-164.
- LÜ M, HUANG M, HOU Y Q, *et al.* Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer application on maize yield and nitrogen use efficiency in Western Henan arid region [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(4): 158-164.
- [18] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 254-262.
- LI L J, WANG J J, WU P P, *et al.* Effect of different nitrogen application on rice yield and n uptake of white soil under wheat straw turnover [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 254-262.
- [19] 张帆, 陈梦茹, 邢英英, 等. 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, *et al.* 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.
- [20] 李瑞, 贺代伟, 刘杰成, 等. 采用综合评价模型优化樱桃番茄的灌溉与钙镁肥组合 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2): 382-392.
- LI R, HE D W, LIU J CH, *et al.* Optimizing the combination of Ca and Mg and water levels in cherry tomato production using comprehensive evaluation model [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 382-392.
- [21] 熊伟伦, 徐开未, 刘明鹏, 等. 不同氮用量对四川春玉米光合特性、氮利用效率及产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2022, 55(9): 1735-1748.
- XIONG W G, XU K W, LIU M P, *et al.* Effects of different nitrogen application levels on photosynthetic characteristics, nitrogen use efficiency and yield of spring maize in Sichuan province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(9): 1735-1748.
- [22] XING Y Y, ZHANG T, JIANG W T, *et al.* Effects of irrigation and fertilization on different potato varieties growth, yield and resources use efficiency in the Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107351.
- [23] 谢奎, 张腾, 李卓远, 等. 榆林沙土区马铃薯根层土壤因子、微生物数量及酶活性特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 192-205.
- XIE K, ZHANG T, LI ZH Y, *et al.* Characteristics of soil factors, microbial quantity and enzyme activity in potato root layer in Yulin sandy soil area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 192-205.
- [24] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, *et al.* Coupling effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer type on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-irrigated maize [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107389.
- [25] 李旭铮, 李援农, 邹奇芳, 等. 缓释肥配施对夏玉米灌浆特性的影响 [J]. *节水灌溉*, 2022(8): 84-90, 101.
- LI X ZH, LI Y N, ZOU Q F, *et al.* Effects of combined application of slow-release fertilizer on the filling characteristics of summer maize [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(8): 84-90, 101.
- [26] 蔡晨阳, 庞桂斌, 薛建文, 等. 不同水氮调控下夏玉米农田氮素运移及淋失特征分析 [J]. *节水灌溉*, 2022(4): 47-53, 59.
- CAI CH Y, PANG G B, XUE J W, *et al.* Nitrogen transport and leaching characteristics of summer maize under different water and nitrogen treatments [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(4): 47-53, 59.
- [27] WANG X K, GUO T, WANG Y, *et al.* Exploring the optimization of water and fertilizer management practices for potato production in the sandy loam soils of Northwest China based on PCA [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 237: 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106180>.
- [28] 曹兵, 倪小会, 陈延华, 等. 包膜尿素和普通尿素混施对夏玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮残留的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5): 695-701.
- CAO B, NI X H, CHEN Y H, *et al.* Impact of coated urea combined with conventional urea on the yield, nitrogen use efficiency, and soil residual nitrate of summer maize [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 695-701.
- [29] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响 [J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 699-706.
- LI W, LI X H, LI H Y, *et al.* Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 699-706.
- [30] 李丽霞, 赵现锋, 衣文平, 等. 包膜控释肥在夏玉米生产中的应用进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 217-224.
- LI L X, ZHAO X F, YI W P, *et al.* Application status of controlled-release fertilizers in summer maize production [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(5): 217-224.
- [31] 党翼, 张建军, 赵刚, 等. 控释尿素和普通尿素配施对旱地玉米产量和水氮利用效率的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(6): 156-165.
- DANG Y, ZHANG J J, ZHAO G, *et al.* Effects of mixed applying of controlled-release urea and conventional urea on yield, water and nitrogen utilization of maize in dryland [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*,



- 2022,24(6):156-165.
- [32] 任立军,赵文琪,陈松岭,等. 有机肥和土壤调理剂组合对设施土壤氮素和番茄产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021,40(12):70-77.  
REN L J,ZHAO W Q,CHEN S L,*et al.* Combing organic fertilization and soil conditioner to improve nitrogen use efficiency and yield of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2021,40(12):70-77.
- [33] 解文艳,周怀平,杨振兴,等. 控释尿素与普通尿素配施对春玉米产量、氮肥利用及经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(5):31-38.  
XIE W Y,ZHOU H P,YANG ZH X,*et al.* Effects of different ratios of controlled-release urea and common urea on yield,nitrogen utilization and economic benefit of spring maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2020,38(5):31-38.
- [34] 李玉浩,何杰,王昌全,等. 控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J]. 土壤,2018,50(3):469-475.  
LI Y H,HE J,WANG CH Q,*et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on soil inorganic nitrogen,microorganism and rice growth[J]. *Soils*,2018,50(3):469-475.
- [35] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等. 覆膜滴灌条件下氮肥运筹对玉米氮素吸收利用和土壤无机氮含量的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(9):1378-1387.  
HOU Y P,KONG L L,LI Q,*et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen absorption,utilization and soil inorganic nitrogen content under film mulch drip irrigation of maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2018,26(9):1378-1387.
- [36] 李森,王凤新,赵健宇,等. 灌水定额和施钾量对膜下滴灌马铃薯产量及水肥利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报,2022,27(10):100-110.  
LI M,WANG F X,ZHAO J Y,*et al.* Effects of irrigation quota and potassium application rate on potato yield and water and fertilizer utilization efficiency under film drip irrigation[J]. *Journal of China Agricultural University*,2022,27(10):100-110.
- [37] QIANG S C,ZHANG Y,FAN J L,*et al.* Combined effects of ridge-furrow ratio and urea type on grain yield and water productivity of rainfed winter wheat on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*,2022,261:1-9. <http://doi:10.1016/j.agwat.2021.107340>.
- [38] 马小林,王悦天,侯庆丰,等. 基于 TOPSIS 模型的甘肃省 2010—2018 年土地利用空间效益评价[J]. 生态科学,2022,41(6):146-156.  
MA X L,WANG Y T,HOU Q F,*et al.* Spatial benefit evaluation of land use in Gansu province from 2010 to 2018 based on TOPSIS mode[J]. *Ecological Science*,2022,41(6):146-156.
- [39] 石依姗,万青,汪秋兰,等. 基于熵权 TOPSIS 法和灰色关联度分析的藤茶药材等级研究[J]. 中草药,2022,53(17):5504-5512.  
SHI Y SH,WAN Q,WANG Q L,*et al.* Research on grades of vine tea based on entropy TOPSIS method and grey correlation analysis[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*,2022,53(17):5504-5512.

## Effects of Slow-release Nitrogen Fertilizer and Urea Blending on Maize Growth, Yield and Water-fertilizer Use Efficiency under Different Irrigation Levels

CHEN Mengru, XING Yingying, ZHANG Fan, SHAO Yating,  
FU Jintao, ZHANG Xiangzhu and WANG Xiukang

(College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an Shaanxi 716000, China)

**Abstract** To provide a theoretical basis for the efficient water and fertilizer management technology of maize cultivation in arid regions, maize pot experiments were conducted. Three irrigation quotas (W1: 2 548 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, W2: 1 911 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, W3: 1 433 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) and three nitrogen fertilizer types (U: urea, UNS: urea mixed with slow-release nitrogen fertilizer in a nitrogen content ratio of 3 : 7, SRF: slow-release nitrogen fertilizer) were set, the irrigation amount without nitrogen fertilizer application (W3) was used as the control (CK). The effects of different irrigation amounts and nitrogen fertilizer types on maize growth index, yield and composition, irrigation water use efficiency (IWUE) and nitrogen use efficiency (NUE) were investigated. The results showed significant effects of nitrogen fertilizer types, irrigation levels, and their interaction on maize growth index, dry matter accumulation per plant, yield and yield components, IWUE and NUE ( $P < 0.05$ ). The average maize plant height, leaf area, chlorophyll content, net photosynthetic rate, dry matter accumulation per plant, yield and yield components and NUE of W1 treatment were significantly higher than those of W2 and W3 treatments under different N fertilizer treatments. The response of the same nitrogen fertilizer type to maize growth differed under different irrigation levels. Under W1 irrigation level, the yield of SRF was 2.01% and 12.71% higher than those of UNS and U, respectively. However, under W2 and W3 irrigation levels, the overall trend of yield was showed as UNS > SRF > U. The IWUE of W3UNS treatment and the NUE of W1UNS treatment were the highest. Based on the overall difference combination evaluation model, the top two treatments were W1SRF and W1UNS. When the irrigation amount is 2 548 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, and slow-release nitrogen fertilizer or a blend of slow-release nitrogen fertilizer and urea was applied once as base fertilizer, maize growth, yield and water and fertilizer utilization efficiency can be taken into account simultaneously.

**Key words** Maize; Urea; Slow-release nitrogen fertilizer; Water-fertilizer use efficiency; Yield; Overall difference combination evaluation model

**Received** 2023-06-25

**Returned** 2023-10-07

**Foundation item** The National Natural Science Foundation of China (No. 52169014, No. 42107379); The Graduate Education Innovation Project of Yan'an University (No. YCX2023077); Innovation Program for Students of Yan'an University (No. D2022004).

**First author** CHEN Mengru, female, master student. Research area: water-saving irrigation theory and technology. E-mail: 1807041681@qq.com

**Corresponding author** WANG Xiukang, male, Ph. D, professor. Research area: water-saving irrigation theory and technology. E-mail: wangxiukang@126.com

(责任编辑: 史亚歌 Responsible editor: SHI Yage)