

水氮耦合对地下滴灌冬小麦和夏玉米 水氮利用效率影响研究

甄玉月, 徐立荣*, 高海威
(济南大学 水利与环境学院, 济南 250022)

摘 要:【目的】探索冬小麦、夏玉米地下滴灌条件下最佳灌水施氮制度。【方法】采用田间试验方法, 分别设置 4 种灌水水平, 冬小麦: W1: 2 580 m³/hm²、W2: 2 240 m³/hm²、W3: 2 020 m³/hm²、W4: 1 560 m³/hm², 夏玉米: W1: 1 306 m³/hm²、W2: 1 088 m³/hm²、W3: 814 m³/hm²、W4: 650 m³/hm², 2 种施氮水平, 冬小麦、夏玉米均为: F1: 180 kg/hm²、F2: 100 kg/hm², 研究水氮耦合对冬小麦、夏玉米水氮利用效率及产量影响。【结果】W2F1 处理冬小麦产量最大, 继续增加灌水量冬小麦产量并未增加, 而夏玉米产量随灌水量增加而增加; 土壤氮素残留量均表现为 F1 处理>F2 处理, 且冬小麦氮素残留量随灌水量增加先减少后增加, W1 处理夏玉米氮素残留量最大, 冬小麦、夏玉米氮肥偏生产力均与产量变化趋势一致; 冬小麦、夏玉米耗水量均随灌水量增加而增加, 水分利用效率均随灌水量增加呈先增大后减小趋势。【结论】拟合优化表明, 冬小麦的适宜灌水量为 214 mm, 适宜施氮量 100 kg/hm²; 夏玉米适宜灌水量为 103 mm, 适宜施氮量 100 kg/hm²。

关键词: 冬小麦; 夏玉米; 水氮利用效率; 地下滴灌; 产量

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023432

甄玉月, 徐立荣, 高海威. 水氮耦合对地下滴灌冬小麦和夏玉米水氮利用效率影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 41-49.

ZHEN Yuyue, XU Lirong, GAO Haiwei. Effect of water-nitrogen coupling on water and nitrogen use efficiency of rotated winter wheat and summer maize under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 41-49.

0 引言

【研究意义】华北平原是我国重要的粮食产区, 冬小麦播种面积和产量均居我国首位, 夏玉米播种面积占全国的 27%~29%, 产量约占全国的 30%, 是我国经济、政治发展比较迅速的地区, 但也面临人口密集、水资源短缺等问题^[1-3]。地下水可持续利用是华北平原社会发展中的关键问题^[4], 灌水量对作物产量的影响是地下水超采的华北平原地区亟待回答的科学问题^[5]。华北平原冬小麦、夏玉米轮作体系年氮肥投入量为 588 kg/hm², 远高于其他国家氮肥施用量^[6]。长期过量不合理施氮, 会导致地下水中含氮量升高, 进而严重危害人体健康^[7], 也会对生态系统健康造成不利影响, 造成生态系统富营养化问题, 严重危害水生动物的生存^[8]。地下滴灌是用水效率极高的节水灌

溉技术, 可将作物需要的水分和养分均匀输送到根区, 对作物产量及水分利用效果影响显著^[9]。因此, 在华北平原大田试验应用地下滴灌技术有利于科学制定冬小麦、夏玉米灌水施氮策略, 实现冬小麦、夏玉米节水增产。【研究进展】适宜的灌水施氮对作物的产量及氮素利用效率都有明显的互作效应^[10-11]。首先, 国内外一些学者^[12-15]研究发现, 地下滴灌可不同程度提高玉米的水氮利用效率, 如 Patra 等^[12]对比了印度-恒河平原玉米在传统沟灌和地下滴灌条件下的水氮利用效率, 结果表明地下滴灌在节水 54%的同时水分利用效率提高 2 倍, 氮素利用效率提高 8%~19%; 要家威等^[13]研究地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响, 提出与地面灌溉处理相比, 地下灌溉处理可在减少 22%灌水量条件下保证作物产量无显著下降; 袁江杰等^[14]比较了不同灌水量条件下地下滴灌和膜下滴灌对玉米耗水、生长和产量的影响, 结果表明地下滴灌最佳灌水量为膜下滴灌的 85%时, 可以获得较好的水分利用效率及产量; 郑文生等^[15]研究地下滴灌条件下氮肥调控对土壤氮素运移及吸收的影响, 结果表明分次施氮促进玉米对氮素的吸收, 适宜施氮量为 120 kg/hm²。此外, 也有学者^[16-18]针对地下

收稿日期: 2023-09-14 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021ME145); 济南大学 2023 年学科交叉会聚建设项目(XKJC-202305)

作者简介: 甄玉月(1998-), 女。硕士研究生, 主要研究方向为水文学及水资源。E-mail: 1784111743@qq.com

通信作者: 徐立荣(1976-), 女。教授, 博士, 主要研究方向为水文学及水资源。E-mail: stu_xulr@ujn.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

滴灌对冬小麦水氮利用的影响开展相关研究,如杨明达等^[16]研究发现,地下滴灌适度亏缺灌溉 ($0.8ET_c$) 可以增强深层土壤根系吸水能力,提高冬小麦产量和水分利用效率;孙章浩等^[17]研究地下滴灌灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长发育的影响时发现,在田间持水率的 80% 灌水量条件下可以促进冬小麦产量增加;Dianna 等^[18]研究认为,与地表灌溉相比,地下滴灌在小麦-大豆-玉米种植制度中可使灌溉总量减少 58.5%,肥料需求减少 20%。【切入点】综上所述,国外应用地下滴灌技术在提高冬小麦、夏玉米水氮利用效率方面得到较好的试验结果;国内研究主要集中于不同灌水量或不同施氮量在地下滴灌条件下的影响,尚缺乏在华北平原地下滴灌条件下冬小麦、夏玉米水氮协同调控对水氮利用效率的影响研究。【拟解

决的关键问题】为此,采用地下滴灌技术,研究不同水氮管理对冬小麦、夏玉米生长及水氮利用效率的影响,提出滴灌条件下冬小麦、夏玉米高效灌水施肥策略,为华北平原地下滴灌技术的推广提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在山东省济南市章丘区某生态园内 ($117^{\circ}40' E$, $36^{\circ}64' N$) 进行,试验区属温带季风气候,平均海拔为 166 m。冬小麦、夏玉米生育期气温、降水量见图 1,冬小麦生育期有效降水量为 199.51 mm,夏玉米生育期有效降水量为 343.69 mm。试验区冬小麦为黑麦 35-5、红麦 35-7 混种,夏玉米为先玉 335。试验区各土层土壤基础理化性状见表 1。

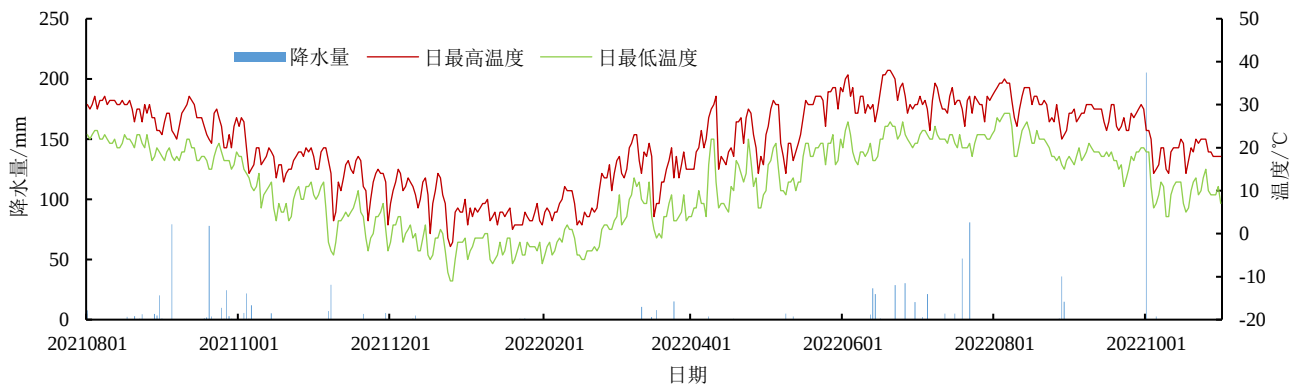


图 1 试验区日最高温度、日最低温度和降水量

Fig.1 Daily maximum temperature values, daily minimum temperature values and precipitation in the test area

表 1 土壤基础理化性状

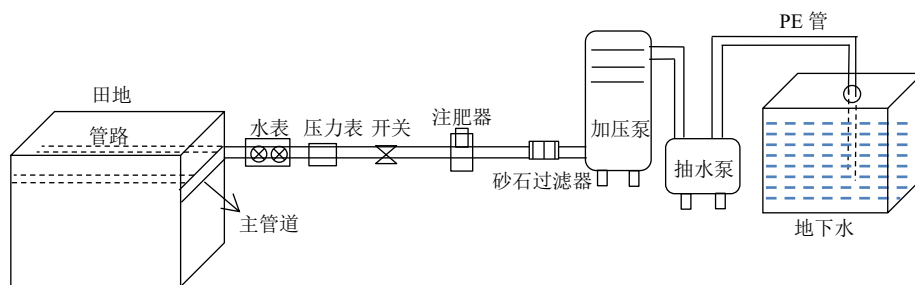
Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil

土层深度/cm	田间持水率/%	土壤体积质量/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤含水率%	pH 值	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	$NO_3^- - N$ /($mg \cdot kg^{-1}$)	$NH_4^+ - N$ /($mg \cdot kg^{-1}$)
0~20	27.4	1.52	9.98	8.17	15.13	14.20	2.09
20~40	30.5	1.66	9.47	8.32	9.15	23.26	2.06
40~80	26.4	1.47	13.23	8.41	6.28	6.17	1.97
80~100	30.1	1.53	16.58	8.27	4.86	5.60	1.93

1.2 试验设计

田间试验于 2021 年 10 月—2022 年 10 月进行,试验区面积 0.46 hm^2 ,采用冬小麦、夏玉米轮作的种植制度,播种方式为机械播种。灌溉方式为地下滴灌,试验田内铺设相同规格的滴灌带,每条滴灌带相距

30 cm,埋深 20 cm,滴灌带长约 100 m,与主管道相连,取 2 条 1 组,在 2 组中间取样,减少其他试验组干扰,各组均设对照,试验田灌溉水源采用地下水,水表控制灌溉量。试验装置见图 2。



(a) 灌溉系统布设

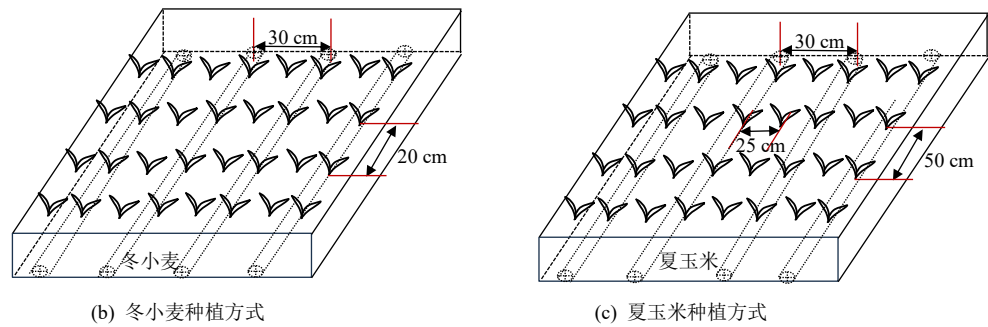


图 2 灌溉系统布设与冬小麦、夏玉米种植方式

Fig.2 Sketch of irrigation system layout and winter wheat, summer maize cropping pattern

冬小麦于 2021 年 10 月—2022 年 6 月进行。试验共设置 8 个处理，详见表 2。冬小麦生育期分 3 次灌水，灌水时间为 2021 年 10 月 27 日（出苗期）、2022 年 3 月 27 日（拔节期）、2022 年 5 月 6 日（灌浆期），灌水量基于山东省农业用水定额计算^[19]。施肥方式设置：复合肥（ $\omega(\text{N}) : \omega(\text{P}_2\text{O}_5) : \omega(\text{K}_2\text{O}) = 23 : 10 : 7$ ）底施 40 kg/hm^2 （纯 N），剩余用水溶肥（ $\omega(\text{N}) : \omega(\text{P}_2\text{O}_5) : \omega(\text{K}_2\text{O}) = 20 : 20 : 20$ ），在拔节、灌浆期随水施肥。

表 2 冬小麦灌水施肥方案

Tab.2 Fertilization program for winter wheat

处理	灌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥量(纯N)/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			总施氮量
		底肥	追肥	追肥	
		(2021年 10月15日)	(2022年 3月27日)	(2022年 5月6日)	
W1F1	2 580	40	70	70	180
W2F1	2 240	40	70	70	180
W3F1	2 020	40	70	70	180
W4F1	1 560	40	70	70	180
W1F2	2 580	40	30	30	100
W2F2	2 240	40	30	30	100
W3F2	2 020	40	30	30	100
W4F2	1 560	40	30	30	100

夏玉米试验于 2022 年 6 月—10 月进行。试验共设置 8 个处理，详见表 3。夏玉米生育期分 2 次灌水，灌水时间为 2022 年 7 月 27 日（拔节期）和 2022 年 8 月 16 日（吐丝期），灌水量详见表 3。夏玉米不施底肥，氮肥分 2 次施加，在拔节期和抽雄吐丝期以 1 : 1 水溶肥通过灌水施肥。

表 3 夏玉米灌水施肥方案

Tab.3 Irrigation and fertilization program for summer maize

处理	灌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥量(纯 N)/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		总施氮量
		拔节期追肥	吐丝期追肥	
		(2022 年 7 月 27 日)	(2022 年 8 月 16 日)	
W1F1	1 306	90	90	180
W2F1	1 088	90	90	180
W3F1	814	90	90	180
W4F1	650	90	90	180
W1F2	1 306	50	50	100
W2F2	1 088	50	50	100
W3F2	814	50	50	100
W4F2	650	50	50	100

1.3 观测项目及方法

1) 土壤含水率。采集 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层土壤，通过烘干法测定各土层土壤含水率。

2) 农艺性状测定。冬小麦、夏玉米不同生育阶段，选择有代表性的植株 10 株，使用卷尺测量株高。冬小麦、夏玉米不同生育阶段，选择有代表性植株 5 株，使用 CI-203 手持式激光叶面积仪测量。成熟期，选择代表性植株 5 株，将地上部植株和根系分开，在实验室清洗晾干地上部分，分离不同器官后，105 ℃ 中杀青烘干后，装入纸袋，称量各器官的干物质量。考种测产：在冬小麦、夏玉米收获期测定各试验组的有效穗数、穗粒数、冬小麦千粒质量、夏玉米百粒质量和产量。

3) 土壤水分利用效率计算。作物收获后，根据 0~100 cm 土层水量平衡原理，计算整个生育期耗水量，土壤水分利用效率为产量与耗水量的比值（ $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ）。

4) 氮素测定及氮肥偏生产力。选取冬小麦、夏玉米完熟期土壤，采集 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层土壤。新鲜土壤在塑料密封袋中冷藏存放，取样后 7 d 内检测土壤硝态氮和土壤铵态氮。氮肥偏生产力为产量与施氮量的比值，单位为 kg/kg 。

1.4 数据处理

采用 Office 与 SPSS 分析处理数据，采用 ANOVA 与 LSD（0.05 显著水平）对数据进行方差分析和多重检验。采用 Office、Origin 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对冬小麦、夏玉米株高与叶面积指数的影响

不同处理冬小麦株高和叶面积指数如图 3 所示。由图 3（a）可知，冬小麦株高随生育期推进呈现“S”型曲线，返青—拔节期株高迅速增加，灌浆—收获期株高趋于平缓。同一灌水量条件下，株高表现为 F1 处理>F2 处理；同一施氮量条件下，株高随灌水量增

加而增大。由图 3 (b) 可知, 冬小麦叶面积指数随生育期推进表现为先增加后减小趋势, 抽穗期增加至最大, 为 $6.21\sim 6.76\text{ cm}^2/\text{cm}^2$ 。整个生育期来看, 同一灌

水量条件下, 叶面积指数表现为 F1 处理>F2 处理; 同一施氮量条件下, 叶面积指数随灌水量增加而增加。

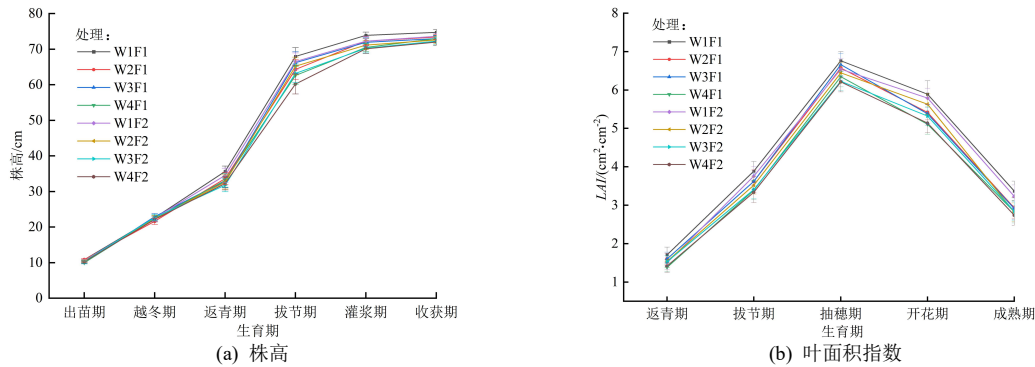


图 3 不同处理冬小麦株高和叶面积指数

Fig.3 Plant height and leaf area index of winter wheat in different treatments

不同处理夏玉米株高和叶面积指数如图 4 所示。由图 4 (a) 可知, 夏玉米株高随生育期推进呈增加趋势, 三叶期一开花期株高增加迅速, 灌浆期株高最大, 并趋于稳定。同一灌水量条件下, 夏玉米株高表现为 F1 处理>F2 处理; 同一施氮量条件下, 夏玉米株高随灌水量增大表现为先增加后减小趋势, W2 处理株高最大。由图 4 (b) 可知, 夏玉米叶面积指数随生育

期推进, 表现为增长缓慢-增加迅速-增长趋缓, 拔节期一抽丝期为夏玉米叶面积指数增长迅速阶段。整个生育期来看, 同一灌水量条件下, 叶面积指数表现为 F1 处理>F2 处理; 同一施氮量条件下, 叶面积指数随灌水量增加表现为先增加后减小趋势, W2 处理叶面积指数最大。

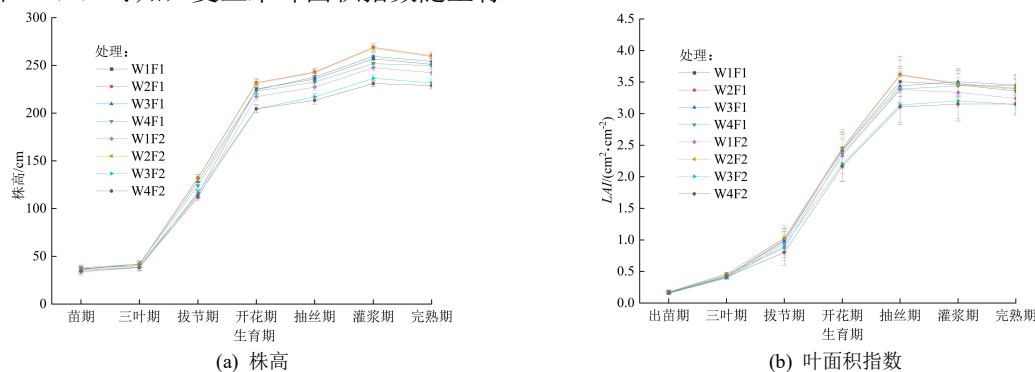


图 4 不同处理夏玉米株高和叶面积指数

Fig.4 Plant height and leaf area index of summer maize in different treatments

2.2 不同处理对冬小麦、夏玉米产量及地上干物质量的影响

不同处理冬小麦产量及产量构成因素如表 4 所示。由表 4 可知, 冬小麦穗数、穗粒数、千粒质量与产量均随灌水量增加呈先增加后减少趋势。单株地上干物质量随灌水量增加呈增加趋势, 且各处理之间差异不显著。同一施氮量条件下, W2F1 处理冬小麦产量较 W1F1、W3F1、W4F1 处理分别增加 7.57%、

12.23%、35.28%; W2F2 处理冬小麦产量较 W1F2、W3F2、W4F2 处理分别增加 9.82%、3.58%、31.13%。相同灌水量下, W1F1、W2F1 处理较 W1F2、W2F2 处理产量增加, 说明在 W1、W2 处理灌水条件下增加施氮量有助于增加冬小麦产量; 但在 W3、W4 处理灌水量条件下, 随着施氮量增加冬小麦产量未增加, 且有减少趋势。

表 4 不同处理冬小麦地上干物质量、产量及其构成因素

Tab.4 Shoot dry matter mass, yield and components of winter wheat in different treatments

处理	穗数/(穗·m ²)	穗粒数/粒	千粒质量/g	单株地上干物质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
W1F1	501±4.2b	38.82±0.3b	45.87±0.03a	3.33±0.03a	8 789.64±236.75ab
W2F1	518±3.5a	39.73±0.6a	46.21±0.04a	3.11±0.03a	9 455.23±298.74a
W3F1	521±6.8a	37.11±0.4b	43.62±0.02b	3.00±0.03a	8 425.19±226.36b
W4F1	490±3.6c	36.02±0.2c	40.11±0.01c	2.95±0.02ab	6 989.53±227.24cd
W1F2	512±4.0a	37.26±0.5b	44.43±0.03a	3.09±0.03a	8 465.23±301.21b
W2F2	514±4.1a	39.15±0.8a	45.12±0.04a	2.93±0.03a	9 296.45±298.16a
W3F2	510±3.8a	36.47±0.3bc	43.13±0.03b	2.87±0.02ab	8 975.42±312.56ab
W4F2	504±2.9b	36.15±0.2bc	41.62±0.02c	2.91±0.02ab	7 089.53±221.45c

注 同列不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

不同处理夏玉米产量及其构成因素如表 5 所示。由表 5 可知，同一施氮量下，夏玉米穗行数、穗粒数随灌水量增加呈先增加后减小趋势；百粒质量、单株干物质质量和产量随灌水量增加呈增加趋势，W1 处理的百粒质量和产量与 W2、W3、W4 处理差异显著，F1 处理下，W3、W4 处理单株干物质与 W1、W2 处理差异不显著。F2 处理下，W3、W4 处理单株干物质与 W1、W2 处理差异显著。同一灌水量下，

百粒质量和产量随施氮量增加而增加。从产量增长幅度来看，W3F1 处理较 W4F1 处理增加 12.01%，W2F1 处理较 W3F1 处理增加 10.84%，W1F1 处理较 W2F1 处理增加 1.13%；W3F2 处理较 W4F2 处理增加 16.22%，W2F2 处理较 W3F2 处理增加 5.61%，W1F2 处理较 W2F2 处理增加 1.08%，随着灌水量增加产量增长幅度逐渐变小。

表 5 不同处理夏玉米地上干物质质量及产量

Tab.5 Shoot dry matter mass and yield of summer maize in different treatments

处理	穗行数/行	穗粒数/粒	百粒质量/g	单株干物质质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
W1F1	17.00±1.00ab	483.67±5.03a	43.37±3.77a	16.52±1.12a	9 487.47±452.36a
W2F1	17.67±1.53a	481.67±6.66a	37.89±0.71b	16.44±0.98a	9 381.25±402.41ab
W3F1	18.33±2.52a	491.00±8.00a	36.35±2.55bc	15.66±0.75ab	8 463.76±358.29bc
W4F1	17.33±1.15ab	473.67±12.66b	37.21±1.14bc	15.54±0.84ab	7 556.52±221.34c
W1F2	17.33±1.53ab	484.33±10.21a	40.45±1.34 ab	15.93±1.22a	9 356.51±356.16ab
W2F2	17.37±1.53ab	489.00±19.08a	39.56±2.35b	16.38±1.03a	9 256.22±431.76b
W3F2	17.43±1.53a	467.00±27.40bc	38.26±1.40b	14.28±0.96b	8 764.35±369.24bc
W4F2	16.52±0.58b	453.33±13.05bc	38.18±2.79b	14.25±0.87b	7 541.48±293.27c

2.3 不同处理对土壤氮素残留量及作物氮肥偏生产力的影响

不同处理冬小麦、夏玉米连作 0~100 cm 土层土壤氮素残留量及氮肥偏生产力分别见图 5、图 6。冬小麦、夏玉米连作土壤氮素残留量均表现为 F1 处理>F2 处理，且残留以硝态氮为主，氨态氮残留较少。同一施氮量条件下，随着灌水量增加，冬小麦季土壤氮素残留量呈先减少后增加趋势，W1 处理夏玉米季土壤氮肥残留量最大，其余随灌水量变化不明显。冬小麦氮肥偏生产力随灌水量增加呈先增大后减小趋势，W2 处理灌水量最大，夏玉米氮肥偏生产力随灌水量增加而增大，氮肥偏生产力均表现为低肥处理大于高肥处理。

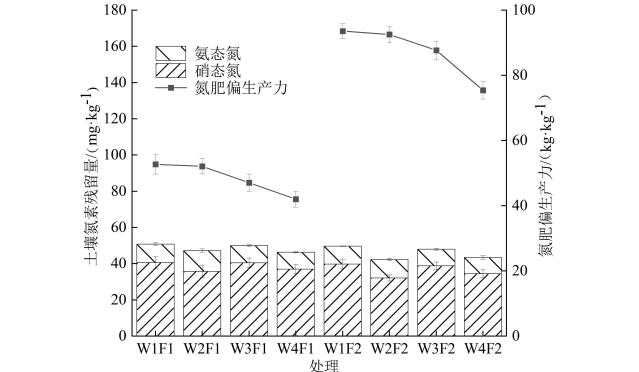


图 6 夏玉米 0~100 cm 土层土壤氮素残留量及氮肥偏生产力
Fig.6 Nitrogen residue and nitrogen fertilizer bias productivity

2.4 不同处理对冬小麦、夏玉米水分利用效率的影响

不同处理冬小麦耗水量及水分利用效率如图 7 所示。由图 7 可知，同一施氮量条件下，冬小麦耗水量随灌水量增加而增大，水分利用效率随灌水量增加呈先增大后减小趋势；同一灌水量条件下，施氮量增加有助于增加耗水量，但水分利用效率减小，说明过量施氮作物水分利用效率不会增加。

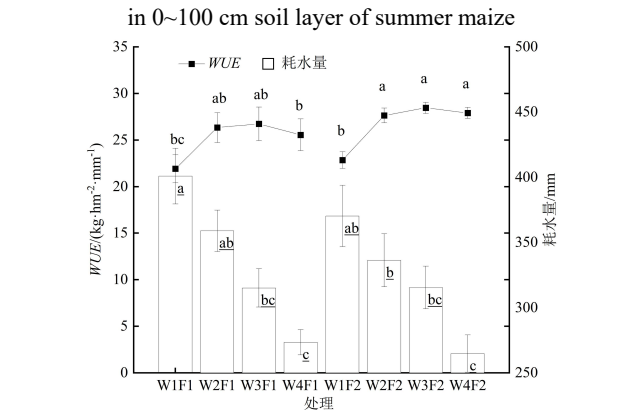


图 7 冬小麦耗水量及水分利用效率
Fig.7 Water consumption and water use efficiency of winter wheat

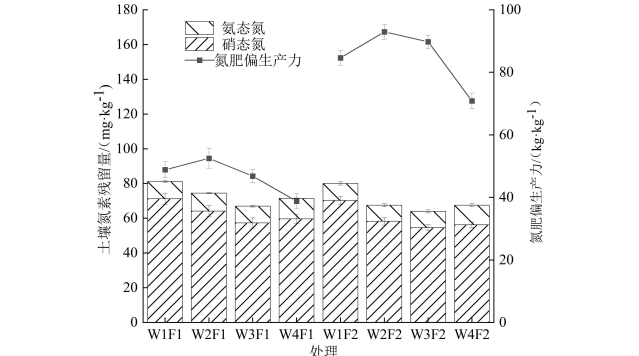


图 5 冬小麦 0~100 cm 土层土壤氮素残留量及氮肥偏生产力
Fig.5 Nitrogen residue and nitrogen fertilizer bias productivity
in 0~100 cm soil layer of winter wheat

不同处理对夏玉米耗水量及水分利用效率 WUE 影响如图 8 所示。同一施氮量条件下，夏玉米耗水量随灌水量增大而增大，W1F1、W2F1 处理与 W4F1 处理差异显著，W1F1、W2F1、W3F1 处理之间无显著差异；W1F2、W2F2、W4F2 处理之间差异显著，W1F2 处理与 W3F2 处理差异显著。不同施氮量条件下，仅 W3F2 处理 WUE 与 W3F1 处理差异显著，且

各处理 WUE 均随灌水量增加先增大后降低；不同灌水量条件下，W1F1、W2F1、W3F1、W4F1 处理之间 WUE 差异不显著，W1F2、W3F2、W4F2 处理之间差异显著，W2F2 处理与其他各处理差异不显著。

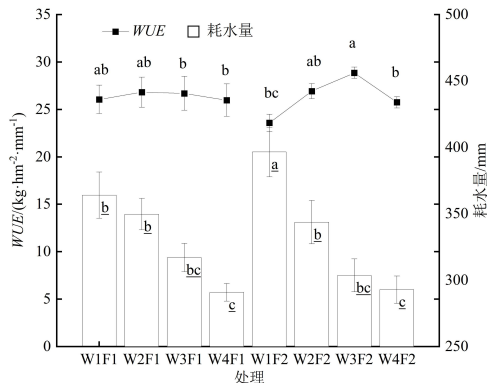


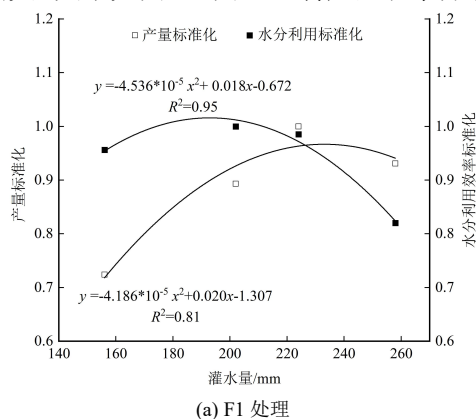
图 8 夏玉米耗水量及水分利用效率

Fig.8 Water consumption and water use efficiency of summer maize

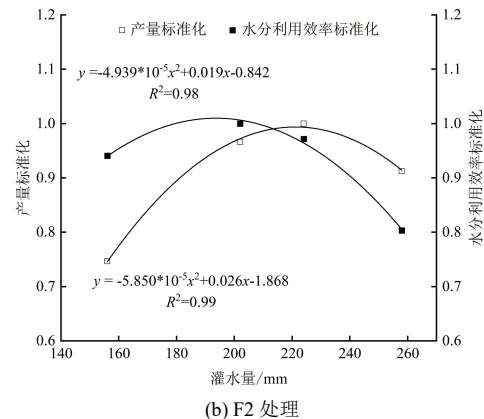
2.5 地下滴灌冬小麦、夏玉米适宜灌水策略

冬小麦、夏玉米产量及水分利用效率与灌水量、耗水量的拟合关系见图 9、图 10。将产量和水分利用

效率标准化后与灌水量、耗水量进行拟合，拟合效果较好。标准化后的结果呈二次抛物线关系，且存在交点。2 条标准化拟合曲线的交点横坐标冬小麦 F1、F2 处理灌水量分别为 226.64、213.79 mm，夏玉米 F1、F2 处理灌水量为 113.42、102.98 mm，交点是同时兼顾产量和水分利用效率的最优点，所代表冬小麦 F1、F2 处理产量分别为 9 116.79、9 226.53 kg/hm²，夏玉米 F1、F2 处理产量分别为 9 450.29、9 326.39 kg/hm²；所代表冬小麦 F1、F2 处理水分利用效率分别为 25.77、28.24 kg/(hm²·mm)，夏玉米 F1、F2 处理水分利用效率分别为 26.64、28.42 kg/(hm²·mm)，分别取 F1、F2 处理标准化拟合曲线的交点横坐标值，得到冬小麦灌水量为 213.79~226.64 mm，夏玉米灌水量为 102.98~113.42 mm，在此范围内可获得较好的产量及水分利用效率。当灌水量相同时，冬小麦 F1、F2 处理产量无显著差异，且 F2 处理水分利用效率较 F1 处理高；灌水量相同时夏玉米 F1、F2 处理产量和水分利用效率变化规律与冬小麦相同。



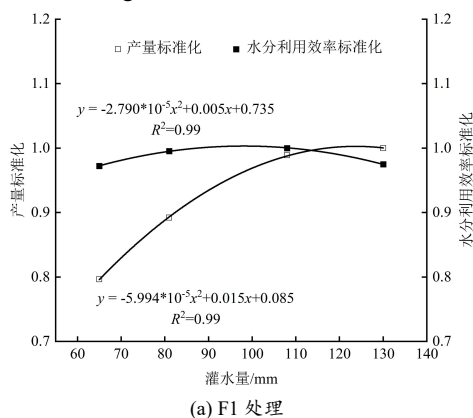
(a) F1 处理



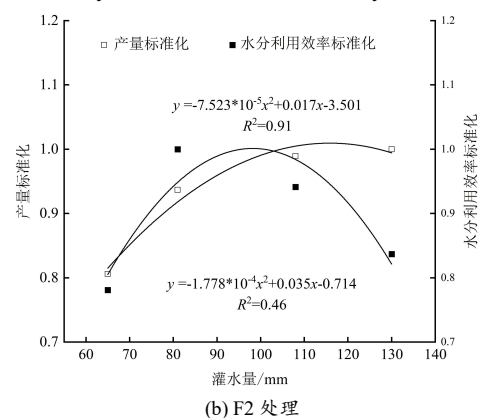
(b) F2 处理

图 9 冬小麦灌水量与产量、水分利用效率拟合曲线

Fig.9 Fitted curves of winter wheat irrigation volume with yield and water use efficiency



(a) F1 处理



(b) F2 处理

图 10 夏玉米灌水量与产量、水分利用效率拟合曲线

Fig.10 Fitted curves of summer maize irrigation volume with yield and water use efficiency

3 讨论

本研究表明，冬小麦产量随灌水量增加先增大后

减小，灌水量为 214~227 mm 时内获得较高产量，杨明达等^[16]在灌水量 154 mm（作物蒸散量的 80%）时获得比本文更高的产量，可能因为其施肥量为 750

kg/hm² (纯 N 量为 112.5 kg/hm²) 显著高于本文总施氮量(施氮量为 180 kg/hm²、纯 N 量为 37.2 kg/hm²)。孙章浩等^[17]研究表明, 在灌水量 223 mm (灌水下限 80%) 时冬小麦产量最高。表明合理灌水不仅达到节约用水的效果而且可以提高产量。F1 处理冬小麦氮素残留量大于 F2 处理, 且以硝态氮为主^[20], 冬小麦产量在 W1、W2 处理下随施氮量增加不显著, 且 W3、W4 处理条件下增施氮肥产量无显著升高, 可能是因为土壤水分亏缺会限制氮肥肥效的发挥^[21], 影响根对氮素的吸收和硝酸还原酶的活性^[22], 进而增产效果微弱。

灌水量相似条件下, 张明达等^[23]研究所获夏玉米产量显著高于本文, 且高灌水量夏玉米产量增加效果明显, 这是因为灌溉施肥次数的增加及施肥量的增加更能满足夏玉米的水肥需求规律^[23]。杨明达等^[24]在土壤水分维持在田间持水率的 80%~90% (夏玉米生育期所获得水量与本文相似) 时, 其产量与本文相近。施氮量增加时, 土壤氮素残留量增加, F1 处理夏玉米氮素残留量大于 F2 处理, 氮肥偏生产力减小^[25], 这是因为在华北平原旱作条件下, 土壤硝化能力较强, 未被作物吸收利用的氮素在集中降水或者灌溉时被淋洗, 导致大部分氮素无法被作物吸收利用^[26-27], 因此 F1 处理施氮条件下产量不会大幅增加, 氮肥偏生产力也会降低。灌水量大于夏玉米需水量时会降低夏玉米光合性能, 不利于光合产物的转运, 进而影响产量^[28], 本试验中, 随着灌水量增加, 夏玉米产量增幅减小, 说明灌水对夏玉米的增产效果随灌水量增加而降低, 这与 Ahmad 等^[29]结论相似。

马建琴等^[30]研究中冬小麦灌水量高于本文所设灌水量, 但本文冬小麦水分利用效率及作物产量均高于其所得结论, 说明地下滴灌水分利用效率较高。要家威等^[13]研究灌溉量对单季夏玉米的影响结果显示, 在显著高于本文灌水量及施氮量水平下, 本研究中夏玉米产量与其相近, 且 2 个试验区环境条件相似, 本研究表明, 冬小麦季氮素残留量显著高于夏玉米季氮素残留量, 说明冬小麦季灌水和施氮后土壤氮素残留量较多, 残留的氮素有利于下一季夏玉米生长。

4 结 论

1) 兼顾冬小麦产量和水分利用效率的适宜灌水量为 214~227 mm, 可获得的产量为 9 116.79~9 245.19 kg/hm², 水分利用效率为 25.77~28.24 kg/(hm²·mm)。

2) 兼顾夏玉米产量和水分利用效率的适宜灌水量为 103~113 mm, 可获得的产量为 8 995.80~9 450.29 kg/hm², 水分利用效率为 26.48~28.42 kg/(hm²·mm)。

3) 综合灌水量、施氮量、产量、氮素残留量及

水分利用效率, 得出冬小麦适宜灌水量为 214 mm, 施氮量 100 kg/hm², 夏玉米适宜灌水量为 103 mm, 施氮量 100 kg/hm²。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 孙爽, 杨晓光, 张镇涛, 等. 华北平原不同等级干旱对冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 69-78.
SUN Shuang, YANG Xiaoguang, ZHANG Zhentao, et al. Impacts of different grades of drought on winter wheat yield in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 69-78.
- [2] 陆伟婷, 于欢, 曹胜男, 等. 近 20 年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3 132-3 145.
LU Weiting, YU Huan, CAO Shengnan, et al. Effects of climate warming on growth process and yield of summer maize in Huang-Huai-Hai plain in last 20 years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(16): 3 132-3 145.
- [3] 张钧茹. 基于系统动力学的京津冀地区水资源承载力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
ZHANG Junru. Research on water resources carrying capacity of Beijing, Tianjin and Hebei Province based on system dynamics[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [4] 秦欢欢, 孙占学, 高柏, 等. 气候变化影响下华北平原地下水可持续利用研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 106-114.
QIN Huanhuan, SUN Zhanxue, GAO Bai, et al. Simulating dynamics of groundwater in North China plain under uncertain climate change[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 106-114.
- [5] 丁蓓蓓, 张雪靓, 赵振庭, 等. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 7-17.
DING Beibei, ZHANG Xueliang, ZHAO Zhengting, et al. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in North China Plain: A meta-analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 7-17.
- [6] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science, 2009, 324(5934): 1 519-1 520.
- [7] 赵婉宁, 崔纪京, 白利勇, 等. 流域水环境硝酸盐源解析方法研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(8): 286-294.
ZHAO Wanning, CUI Jijing, BAI Liyong, et al. Research progress on nitrate source analysis methods for water environment in watersheds[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(8): 286-294.
- [8] TAYEFEH M, SADEGHI S M, ALI NOORHOSSEINI S, et al. Environmental impact of rice production based on nitrogen fertilizer use[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(16): 15 885-15 895.
- [9] 要家威, 齐永青, 李怀辉, 等. 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1 076-1 084.
YAO Jiawei, QI Yongqing, LI Huaihui, et al. Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1 076-1 084.
- [10] 宁东峰, 秦安振, 刘战东, 等. 滴灌施肥下水氮供应对夏玉米产量、硝态氮和水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 28-35.
NING Dongfeng, QIN Anzhen, LIU Zhandong, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water and N use efficiency of drip-fertigation summer maize in the North China Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 28-35.
- [11] 刘秀花, 卢杰, 齐燕, 等. 水氮耦合对作物氮素吸收利用与迁移转化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 1-12.

- LIU Xiuhua, LU Jie, QI Yan, et al. The effects of water-nitrogen coupling on uptake and transformation of nitrogen in soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(4): 1-12.
- [12] PATRA K, PARIHAR C M, NAYAK H S, et al. Appraisal of complementarity of subsurface drip fertigation and conservation agriculture for physiological performance and water economy of maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 283: 108 308.
- [13] 要家威, 齐永青, 李怀辉, 等. 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): 1 502-1 511.
- YAO Jiawei, QI Yongqing, LI Huaihui, et al. 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): 1 502-1 511.
- [14] 袁江杰, 李光永, 袁子程. 膜下滴灌和地下滴灌条件下玉米耗水、生长和产量对比[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(12): 93-98.
- YUAN Jiangjie, LI Guangyong, YUAN Zicheng. Effects of mulched drip irrigation and subsurface drip irrigation on corn water consumption, growth and yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(12): 93-98.
- [15] 郑文生, 孟岩, 李芳花, 等. 地下滴灌条件下氮肥调控对氮运移规律的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(8): 15-21.
- ZHENG Wensheng, MENG Yan, LI Fanghua, et al. Regulating fertilizer application to control nitrogen migration under subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8): 15-21.
- [16] 杨明达, 张素瑜, 杨慎骄, 等. 地下滴灌对冬小麦-夏玉米根系吸水特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(2): 469-479.
- YANG Mingda, ZHANG Suyu, YANG Shenjiao, et al. Effects of subsurface drip irrigation on root water uptake of winter wheat and summer maize[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(2): 469-479.
- [17] 孙章浩, 黄令淼, 杨培岭, 等. 地下滴灌灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长发育的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(11): 41-50.
- SUN Zhanghao, HUANG Lingmiao, YANG Peiling, et al. Effect of lower irrigation limit and emitter flow on winter wheat growth under subsurface drip irrigation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(11): 41-50.
- [18] DIANNA Dhayal, KHANNA Lal, MANOJ Khanna, et al. Performance of surface and subsurface drip fertigated wheat-moongbean-maize cropping system under different irrigation schedules and nutrient doses[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 284: 108 338.
- [19] 山东省市场监督管理局. 山东省农业用水定额: DB37/T 3772-2019[S]. 济南: 山东省水利厅, 2019.
- [20] 郭晓平, 谢建华, 肖娟. 黄河水滴灌不同水肥处理对冬小麦生长及水肥利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2023(2): 12-19.
- GUO Xiaoping, XIE Jianhua, XIAO Juan. Effects of different water and fertilizer treatments on growth and water and fertilizer utilization of winter wheat under drip irrigation with Yellow River water[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(2): 12-19.
- [21] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(6): 924-936.
- LUO Wenhe, SHI Zujiao, WANG Xumin, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(6): 924-936.
- [22] SADRAS V O, HAYMAN P T, RODRIGUEZ D, et al. Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: Physiological, agronomic, economic, breeding and modelling perspectives[J]. *Crop and Pasture Science*, 2016, 67(10): 1 019-1 053.
- [23] 张明达, 张国强, 王克如, 等. 种植密度和灌溉量对西辽河平原春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(1): 116-125.
- ZHANG Mingda, ZHANG Guoqiang, WANG Keru, et al. Effects of planting density and irrigation amount on yield and water use efficiency of spring maize in the West Liaoh Plain[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(1): 116-125.
- [24] 杨明达, 关小康, 刘影, 等. 滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(3): 443-459.
- YANG Mingda, GUAN Xiaokang, LIU Ying, et al. Effects of drip irrigation pattern and water regulation on the accumulation and allocation of dry matter and nitrogen, and water use efficiency in summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(3): 443-459.
- [25] 刘明, 张忠学, 郑恩楠, 等. 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(12): 27-34.
- LIU Ming, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Photosynthesis, water and nitrogen use efficiency of maize as impacted by different combinations of water and nitrogen applications[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 27-34.
- [26] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1 361-1 368.
- JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZHANG Fusuo. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1 361-1 368.
- [27] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 684-697.
- ZHAO Rongfang, CHEN Xinping, ZHANG Fusuo. Nitrogen cycling and balance in winter-wheat-summer-maize rotation system in Northern China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 684-697.
- [28] 吕宁, 石磊, 王国栋, 等. 不同滴灌定额对玉米生长及土壤盐分运移的影响[J]. *新疆农垦科技*, 2019, 42(9): 3-8.
- [29] AHMAD I, WAJID S A, AHMAD A, et al. Optimizing irrigation and nitrogen requirements for maize through empirical modeling in semi-arid environment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1 227-1 237.
- [30] 马建琴, 张雅琪, 郝秀平. 引黄灌区夏玉米-冬小麦连作实时灌溉制度研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(7): 120-124, 156.
- MA Jianqin, ZHANG Yaqi, HAO Xiuping. Study on real-time irrigation system of continuous cropping of summer maize and winter wheat in Yellow River irrigation area[J]. *Yellow River*, 2023, 45(7): 120-124, 156.

Effect of water-nitrogen coupling on water and nitrogen use efficiency of rotated winter wheat and summer maize under subsurface drip irrigation

ZHEN Yuyue, XU Lirong*, GAO Haiwei

(School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: 【Objective】 Root acquisitions of water and nutrients and their subsequent translocation and consequences for crop growth are complex processes interactively influenced by a myriad of biotic and abiotic processes. This paper aims to experimentally find the optimal irrigation and nitrogen fertilization for rotated winter wheat and

summer maize under subsurface drip irrigation. **【Method】** The experiment was conducted in a wheat-maize rotation field. The irrigation treatments for the winter wheat were 2 580 m³/hm² (W1), 2 240 m³/hm² (W2), 2 020 m³/hm² (W3), 1 560 m³/hm² (W4). For the summer maize, the irrigation treatments were 1 306 m³/hm² (W1), 1 088 m³/hm² (W2), 814 m³/hm² (W3), 650 m³/hm² (W4). For each irrigation treatment, there were two nitrogen fertilizations for the two crops: 180 kg/hm² (F1) and 100 kg/hm² (F2). During the experiment, we measured soil moisture, nitrogen content, dry mass of the shoots and grain yield of the two crops at different growth stages. We also calculated water consumption, water use efficiency, partial nitrogen fertilizer productivity of the two crops to assess the impact of water-nitrogen coupling on these traits. **【Result】** For winter wheat, the W2F1 was the optimal water-nitrogen coupling which gave the highest grain yield. For summer maize, its grain yield increased with irrigation amount for both fertilization treatment. Soil nitrogen residual content was higher in F1 than in F2. With the increase in irrigation amount in the winter wheat field, residual nitrogen content decreased first followed by an increase. In contrast, residual nitrogen content in the maize field peaked in W1 treatment. The partial productivity of nitrogen fertilizer mirrored the yield of both crops. Water consumption of both crops increased with irrigation amount, yet their water use efficiency increased with irrigation amount initially and then declined when irrigation amount exceeded a threshold value. **【Conclusion】** Analysis of irrigation amount, yield and water use efficiency of the two crops indicates that the optimal irrigation amount and nitrogen fertilization for winter wheat and summer maize were 214 mm and 100 kg/hm², and 103 mm and 100 kg/hm² respectively. They can be used as an improved irrigation and fertilization for maize production in the studied region.

Key words: winter wheat; summer maize; water and nitrogen use efficiency; subsurface drip irrigation; yield

责任编辑: 白芳芳

(上接第 33 页)

Predictive models for reference evapotranspiration in Gaoyou irrigation district

LIU Meng¹, QIU Jinxian², ZHANG Liyuan³, WANG Jie⁴, DING Dianyuan², LIU Bo^{2*}

(1. Yangzhou Survey, Design and Research Institute Co. Ltd, Yangzhou 225002, China; 2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 4. Yangzhou Water Conservancy Bureau, Yangzhou 225009, China)

Abstract: **【Objective】** Gaoyou irrigation district is located at the low reaches of the Yangtze River in northern Jiangsu province, China. To improve its irrigation management, we compared four models for predicting the reference evapotranspiration (ET_0) in the district. **【Method】** The analysis was based on meteorological data measured from 2003 to 2017 and the temperature forecasted from 2016 to 2017 in the district, from which we calculated the ET_0 using the Penman-Monteith (PM) formula recommended by FAO-56. Using these calculated ET_0 , we forecasted its change using the Blaney-Criddle (BC), Hargreaves-Samani (HS), McCloud (MC) and reduced PM (PMT) model, respectively. **【Result】** For forecasting ET_0 1 to 7 days in advance, the average root mean square error of the BC, HS, MC and PMP model was 1.07, 1.00, 1.16, 0.99 mm/d, respectively; their associated average mean absolute error was 0.85, 0.74, 0.94, 0.75 mm/d, respectively; their associated average correlation coefficient with measured data was 0.79, 0.81, 0.76, 0.81, respectively. Overall, the results of HS and PMT model are comparable and both models are superior to other models for forecasting the ET_0 up to 7 days in advance. **【Conclusion】** Among the four models we compared, the HS and PMT models are more accurate for predicting ET_0 change 1-7 days in advance for the Gaoyou irrigation district.

Key words: reference evapotranspiration; temperature forecast; irrigation

责任编辑: 韩 洋