

地下水埋深与施氮水平对夏玉米生长及硝态氮量的影响

余映军^{1,2}, 李平³, 白芳芳^{1,2,4}, 杜臻杰¹, 梁志杰¹, 齐学斌^{1,3*}

(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院 研究生院, 北京 100081; 3.农业农村部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室, 河南 新乡 453002; 4.中国农业科学院 河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002)

摘要:【目的】探讨华北地区夏玉米-冬小麦轮作体系下氮肥减施与地下水埋深的交互作用。【方法】借助大型地中渗透仪和 Logistic 作物生长模型, 采用二因素完全随机区组设计: 地下水埋深 (G1:2.0 m、G2:3.0 m、G3:4.0 m), 施氮量 (N1: 减氮 20%、N2: 常规施氮), 以及不施氮不控水作为对照 (WN), 研究了华北地区地下水埋深和施氮水平组合对夏玉米生长、干物质量积累和硝态氮量的影响。【结果】所有处理夏玉米叶面积指数 (LAI) 在灌浆期最大, 成熟期相同施氮水平, G1 处理 LAI 显著高于 G2、G3 处理; N2 水平下, G1 处理玉米株高快速生长期较 G2、G3 处理分别增加了 3.99%、12.91%, 但最大增长速率相对降低了 9.69%、14.65%; N1 水平下, G1 处理籽粒干物质量显著高于 G2 和 G3 处理, N2 水平下, G3 处理籽粒干物质量显著高于 G1 和 G2 处理; N2 水平下, G1 处理硝态氮增量显著高于 G2、G3 处理, 0~20 cm 分别高出 75.92%、90.03%, 20~40 cm 分别高出 30.56%、130.95%。同一地下水埋深下, 成熟期 LAI 表现为 N2 处理显著高于 N1 处理; 0~20 cm 与 20~40 cm 土层 N2 处理下硝态氮增量是 N1 处理的 1.4~5.3 倍和 2.4~11.2 倍; 在 G1 水平下, N2 处理株高快速生长期较 N1 处理增加了 7.52%, 而 N1 处理单株籽粒干物质量显著高于 N2 处理, 高出 9.13%; Person 相关性分析表明, N2 水平下, 随着地下水埋深变化, 0~40 cm 土层硝态氮增量与产量显著负相关, R^2 为 0.827~0.883。【结论】高氮与较浅地下水埋深组合促进了玉米营养生长, 不利于玉米生殖生长和产量形成; 低氮与浅地下水埋深组合有利于产量形成和减氮增效。

关键词: 地下水埋深; 减氮; 干物质量; 硝态氮; Logistic 曲线模型; 产量

中图分类号: S147.22; S273.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020204

OSID:



余映军, 李平, 白芳芳, 等. 地下水埋深与施氮水平对夏玉米生长及硝态氮量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 22-28.

SHE Yingjun, LI Ping, BAI Fangfang, et al. The Combined Effects of Groundwater Depth and Nitrogen Fertilization on Yield of Summer Maize and Nitrate Distribution in Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 22-28.

0 引言

【研究意义】我国是世界上化肥施用量最多的国家^[1-2], 农田氮素持续投入与氮盈余量年际累积, 人工合成氮肥过量施用, 氮肥当季利用率低^[3], 增肥不增产, 多余氮肥通过挥发损失、淋洗等造成大气、地下水环境污染^[2]。水氮作为限制农作物生长的主要因子, 特别是浅层地下水作为作物生长的重要水源之一, 显著影响作物的生理形态和产量^[4]。因此研究地下水埋深与适宜施氮对作物生长性状和耕层土壤氮素的影响, 对于华北农田氮肥管理和生态环境保护具有重要意义。【研究进展】施氮是影响作物生长和产量的关键因子, 常规施氮量大, 适宜施氮量能促进作物生

长, 增加产量。宁芳^[5]发现 270 kg/hm² 施氮量下玉米不同生育期株高、茎粗和叶面积指数整体上高于 360 kg/hm² 施氮量; 王丽娟等^[6]研究发现水肥减量 20% 番茄减产最小, 但可以小幅度改善其品质和口味; 尚文彬等^[7]研究表明, 250 kg/hm² 施氮量下玉米产量和干物质量显著高于 300 kg/hm² 施氮量; 周加森等^[8]也发现传统畦灌下, 推荐施氮肥 (240 kg/hm²) 小麦干物质积累量高于传统施氮量 (300 kg/hm²)。除此之外, 结合配套灌水施肥制度^[9]、有效农艺措施^[10]以及合理种植体系^[11]等, 减施氮肥能够显著改善作物穗部性状, 提高作物全生育期干物质量积累和产量^[9-11]。

地下水常以潜水蒸发的形式补给土壤水分, 与土壤水、植物水和大气水构成完整的田间土壤水分连续系统, 是作物维持正常生长所需的重要水源之一, 显著影响作物的生长发育、干物质量积累、水分利用和产量形成等。如孙仕军等^[12]发现地下水埋深 1.0~2.5 m 有助于缩短玉米生育进程和增加叶面积指数; 亢连强等^[13]发现地下水埋深 2.0 m 对作物生长的影响大于埋深 3.0 m 和 4.0 m; Zhang 等^[14]发现测桶冬小麦在地

收稿日期: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679241, 51779260); 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-FIRI-03); 河南省科技攻关计划项目 (192102110051); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (FIRI2016-10)

作者简介: 余映军 (1995-), 男。硕士研究生, 主要从事农业水资源安全利用研究。E-mail: 2472035699@qq.com

通信作者: 齐学斌 (1963-), 男。研究员, 主要从事农业水资源优化配置研究。E-mail: qxb6301@sina.cn

下水埋深 1.8~1.9 m 和 2.2~2.3 m 地上部生物量在各生育阶段较大。地下水埋深过浅过深都会影响作物的株高和干物质量,从而影响产量。刘战东等^[15]发现地下水埋深 3.0 m 条件下冬小麦产量最高,Wang 等^[16]研究发现浅地下水埋深(0~80 cm)条件下,作物氮素利用效率随施氮量增加而显著降低;Shen 等^[17]研究得出地下水埋深较浅的长三角地区,常规施氮量的 60%可满足集约化蔬菜生产;MORARI 等^[18]发现淋洗到地下水中 59%的硝态氮能借助土壤毛细作用运移至作物根区。【切入点】前人针对氮肥减施、优化配施及结合种植体系对作物生长特征、干物质量积累等做了大量深入研究,同样针对浅地下水埋深对作物生理形态、生长性状、干物质量积累和产量及其构成要素也做了较多研究。但在浅地下水埋深区应如何减氮控氮,以及减氮控氮与地下水埋深组合对作物生长、干物质量积累和根层土壤硝态氮量等的影响研究较少。【拟解决的关键问题】本试验借助大型地中渗透

仪和 Logistic 作物生长模型,研究不同浅地下水埋深与施氮水平处理下,夏玉米叶面积指数、株高、地上部分干物质量和根层土壤硝态氮量的差异,以期为我国地下水浅埋深地区减施氮肥,合理控制施氮量,维持和提高作物产量,减轻环境氮负荷提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站大型地中渗透仪(35°19'N、113°53'E,海拔 73.2 m)进行。测坑最大深度分别为 2.8、4.8、5.3 m,面积 3 m×3 m,测坑为带底钢筋混凝土结构。试验地多年平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时间 2 398.8 h,多年平均降水量 588.8 mm,多年平均蒸发量 2 000 mm。试验土壤为粉砂壤土,主要理化性状详见表 1。

表 1 供试土壤理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of test soil

土层深度/cm	土壤机械组成/%			体积质量/ (g cm ⁻³)	有机质量/ (g kg ⁻¹)	TN/ (g kg ⁻¹)	TP/ (g kg ⁻¹)	速效钾量/ (g kg ⁻¹)	EC/ (μS cm ⁻¹)	pH 值
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2.0 mm							
0~20	6.85	52.61	40.54	1.42	17.03	0.44	0.71	0.17	447.33	9.42
20~40	7.49	53.47	39.04	1.47	15.86	0.30	0.55	0.24	520.67	9.31

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计

试验共设 6 个处理,分别为 G1N1、G2N1、G3N1、G1N2、G2N2、G3N2,和不施氮不控水(WN)对照处理,采用完全随机区组设计,每处理重复 2 次;地下水埋深设 3 个水平,分别为 2.0 m(G1)、3.0 m(G2)、4.0 m(G3),主要依据土壤毛管水上升高度以及实际地下水埋藏深度变化确定,施氮量设 2 个水平,分别为减氮 20%(240 kg/hm²,N1)、常规施氮(300 kg/hm²,按当地施肥习惯,N2);地下水位通过马氏瓶控制。

表 2 各处理组合各生育期灌水量

Table 2 Irrigation amount of each treatment

in each growth period					mm
苗期	拔节期	大喇叭口期	灌浆成熟期	全生育期	
48.89	44.44	37.78	60.00	191.11	

1.2.2 施肥灌溉

供试作物为夏玉米(*Zea mays* L.),品种为“怀玉 208”。2019 年 6 月 8 日播种,9 月 24 日收获,全生育期 108 d。试验用肥采用尿素(含 N 46.3%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、硫酸钾(含 K₂O 50%),氮肥的底肥和追肥比例为 4:6,追肥于大喇叭口期施入,磷、钾肥作为底肥一次性施入,种植密度为 66 667 株/hm²。埋设 RS-XAJ-100 探头(山东仁科测控技术有限公司,中国)在线监测土壤水分,结合水分示数,视地面干旱和作物植株叶片的缺水情况进行灌水,灌水量及灌水日期见表 2,所有处理的其他田间管理措

施参照当地实际情况执行。

1.3 测试项目及方法

1) 玉米生长性状。每个测坑选取 2 株玉米挂牌标记,分别在大喇叭口期(7 月 30 日)、抽雄开花期(8 月 7 日)、灌浆期(8 月 27 日)、成熟期(9 月 24 日)选取展开叶片,测定叶长、最大叶宽、株高等生长指标,叶面积计算时折减系数为 0.75^[19]。

2) 干物质量。于作物大喇叭口期、成熟期,取测坑中植株 2 株,105℃杀青 30 min 后,80℃烘干至恒质量,测定地上部干物质量。

3) 考种及测产。于成熟期选取植株 5 株进行考种,以测坑为单元收获后自然风干,称质量测产。

1.4 数据计算与处理

利用 MATLAB 拟合数据,Excel 作图和 SPSS 进行数据处理(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同处理下夏玉米生长指标的变化特征

2.1.1 不同处理下夏玉米叶面积指数

随着夏玉米生育进程的推进,整体上夏玉米 LAI 呈先增大再减小的趋势(图 1)。在各施氮控水处理下,LAI 在灌浆期最大,WN 处理在抽雄开花期最大,各生育期施氮控水处理显著高于 WN 处理,增加率介于 16.79%~72.52%之间。

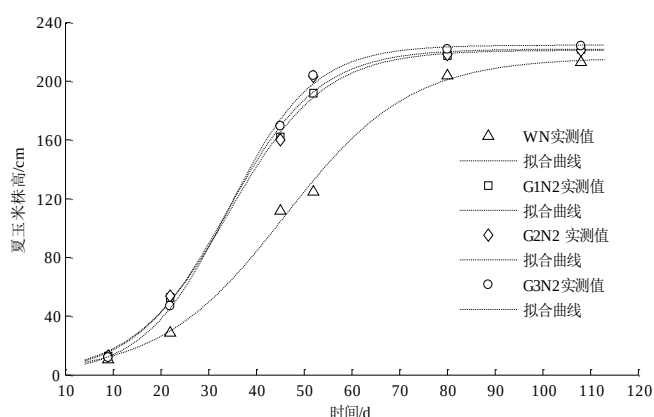
各生育期 LAI 在 G1 处理下较高,尤其是成熟期与 G2、G3 处理差异显著,N2 处理下分别高出 7.66%

和 6.09%, N1 处理下分别高出 12.98%和 16.37%, G2 和 G3 处理间差异很小, 其余生育期 LAI 随地下水埋深增加多呈“V”形。

成熟期, 各地下水埋深条件下 N2 处理 LAI 高于 N1 处理, 增幅在 2.94%~12.91%之间。其他生育期在 G1、G3 处理条件下, N1 处理高于 N2 处理, 增幅在 1.29%~12.43%之间, 而在 G2 处理条件下, N2 处理高于 N1 处理, 增幅在 6.28%~9.56%之间。

2.1.2 夏玉米株高 Logistic 模型

利用 Logistic 函数^[20]拟合夏玉米株高生长, 结果见图 2。各处理组合下模型曲线均为“S”形, R^2 均在 0.98 以上, RMSE 介于 2.97~8.43 cm 之间, 与实测结果相符。



(a) 常规施氮处理

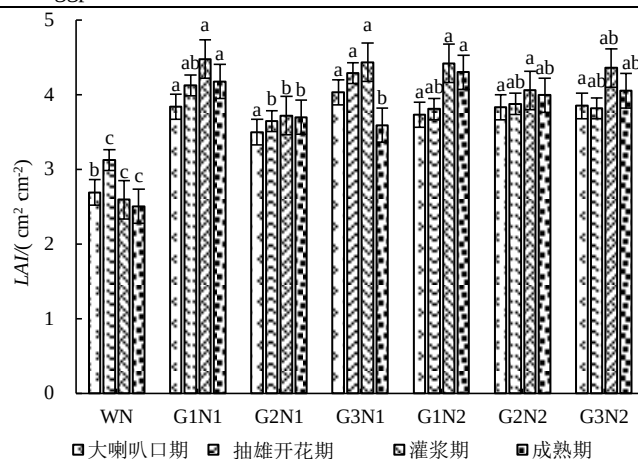
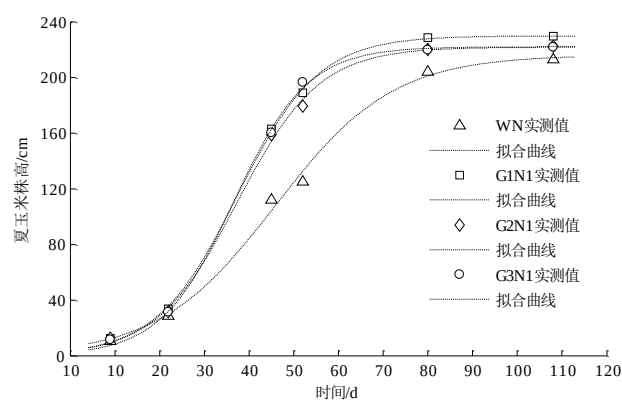


图 1 不同处理下夏玉米叶面积指数

Fig.1 Leaf area index of summer maize under different treatments



(b) 减氮 20%处理

图 2 不同处理下株高实测值与预测值的拟合

Fig.2 Relationship between measured and predicted values of plant height under different treatments

表 3 不同处理夏玉米株高 Logistic 指标值

Table 3 Plant height logistic index of summer maize under different treatments

处理	k	a	b	t_0/d	t_1/d	t_2/d	$v_{max}/(cm\ d^{-1})$
WN	216.0	32.98	0.076	45.93	28.63	63.24	4.11
G1N1	229.8	61.27	0.110	37.38	25.42	49.34	6.33
G2N1	221.7	60.08	0.109	37.51	25.45	49.57	6.05
G3N1	221.9	86.03	0.122	36.63	25.80	47.46	6.77
G1N2	221.1	30.83	0.100	34.25	21.09	47.41	5.53
G2N2	221.9	33.79	0.104	33.82	21.16	46.47	5.78
G3N2	224.5	47.18	0.113	34.11	22.45	45.76	6.34

由表 3 可见, 相较于 WN 处理, N1 处理与 N2 处理平均分别提前 3.07 d 和 7.06 d 进入快速生长阶段, 平均分别提前 14.45 d 和 16.69 d 结束快速生长阶段, 说明施氮控水处理会缩短玉米快速生长期, 且 N2 处理平均比 N1 处理分别提前 3.99、2.24 d 进入和结束快速生长期, 快速生长期增加了 7.52%, 而 G1 处理平均比 G2、G3 处理分别提前 0.05、0.87 d 进入快速生长期, 以及滞后 0.36、1.77 d 结束, 尤其是 N2 条

件下, G1 处理株高快速生长天数较 G2、G3 处理分别增加 3.99%、12.91%, 说明施氮量越大, 对作物生育进程的影响越大, G1 处理相较于 G2 和 G3 处理会延长玉米快速生长天数, 但施氮处理对夏玉米生长的影响效应强于地下水埋深处理。

除此之外, 在夏玉米株高生长达到最大速率时间上, N2 处理平均比 N1 处理提前 3.11 d, 比不施氮处理提前 11.87 d。最大增长速率方面, N1 处理比 N2 处理平均增加 8.50%, 比不施氮平均增加 55.31%; N2 水平下, G3 处理比 G2、G1 处理分别增加 9.69%、14.65%。

2.2 不同处理下夏玉米干物质质量的变化特征

不同地下水埋深施氮水平对夏玉米干物质质量的影响如表 4 所示。各处理籽粒干物质质量最高, 叶最低; 施氮控水处理茎、叶和籽粒干物质质量显著高于 WN 处理, 增加率在 31.84%~256.81%之间。

大喇叭口期, 茎干物质质量随地下水埋深增加而增加, 其中 G3 处理显著高于 G1 处理, N2 处理与 N1 处理分别高出 33.76%、15.98%, 而同一施氮水平下各地下水埋深处理间叶干物质质量无显著差异, 成熟期茎、叶干物质质量随地下水埋深变化呈“V”形。N2

处理下，成熟期籽粒干物质质量在 G3 处理时显著高于 G1 和 G2 处理，分别高出 15.48% 和 10.90%，而 N1 条件下，G1 处理显著高于 G2 处理和 G3 处理，分别高出 6.54% 和 5.55%。

表 4 不同处理夏玉米大喇叭口期、成熟期器官干物质积累量
Table 4 Summer maize organ dry matter accumulation at the mature stage and flare opening under different treatments g/株

处理	茎		叶		籽粒
	大喇叭口期	成熟期	大喇叭口期	成熟期	成熟期
WN	16.88 ^d	54.76 ^c	17.40 ^b	29.03 ^c	93.87 ^c
G1N1	44.46 ^c	89.28 ^b	35.89 ^a	42.92 ^b	135.06 ^a
G2N1	47.17 ^{bc}	79.04 ^b	33.63 ^a	41.43 ^b	126.77 ^b
G3N1	59.47 ^{ab}	91.94 ^b	39.32 ^a	52.60 ^a	127.96 ^b
G1N2	51.93 ^{bc}	120.92 ^a	36.87 ^a	57.22 ^a	123.76 ^b
G2N2	54.41 ^{ab}	97.55 ^{ab}	33.87 ^a	45.84 ^b	128.87 ^b
G3N2	60.23 ^a	106.12 ^{ab}	38.16 ^a	50.18 ^{ab}	142.92 ^a
G	11.645 ^{**}	2.060	2.696	5.292 [*]	1.778
F N	6.196	9.808 [*]	0.000	6.812 [*]	0.303
G*N	1.128	0.588	0.127	5.431 [*]	4.742 [*]

注 不同小写字母、*表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，**表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)，下同。

表 5 不同处理 0~40 cm 土层硝态氮增量

Table 5 0~40 cm soil layer nitrate increment under different treatments

土层/cm	WN	G1N1	G2N1	G3N1	G1N2	G2N2	G3N2
0~20	3.77c	5.17c	10.73bc	7.29c	27.25a	15.49b	14.34bc
20~40	1.13d	5.57d	19.70cd	9.10d	62.38a	47.78b	27.01c

表 6 N2 处理下 0~40 cm 土层硝态氮增量、产量及其构成要素 Person 相关性分析结果

Table 6 Person correlation analysis of incremental of nitrate, yield and its component in 0~40 cm soil layer under N2 treatment

指标	穗长	穗粗	秃尖长	百粒质量	穗质量	穗粒数	产量	0~20 cm NO ₃ ⁻ -N	20~40 cm NO ₃ ⁻ -N
穗长	1	0.841 [*]	-0.817 [*]	0.776	0.874 [*]	.900 [*]	0.773	-0.564	-0.890 [*]
穗粗		1	-0.815 [*]	0.831 [*]	0.872 [*]	.943 ^{**}	0.705	-0.270	-0.795
秃尖长			1	-0.873 [*]	-0.899 [*]	-.924 ^{**}	-0.883 [*]	0.681	0.828 [*]
百粒质量				1	0.904 [*]	.950 ^{**}	0.919 ^{**}	-0.566	-0.762
穗质量					1	.940 ^{**}	0.947 ^{**}	-0.686	-0.962 ^{**}
穗粒数						1	0.870 [*]	-0.514	-0.847 [*]
产量							1	-0.827 [*]	-0.883 [*]
0~20 cm NO ₃ ⁻ -N								1	0.729
20~40 cm NO ₃ ⁻ -N									1

2.4 常规施氮处理条件下表土硝态氮、产量及其构成要素 Person 相关性分析

常规施氮量大，易引发土壤氮素积累^[21]。选取常规施氮 N2 处理条件下，0~40 cm 土层硝态氮增量、产量及其构成要素做 Person 相关性分析，结果见表 6。由表 6 可知，N2 处理下，0~20 cm 硝态氮增量与产量构成要素相关性不显著，而 20~40 cm 硝态氮增量与穗长、穗质量和穗粒数显著负相关，与秃尖长显著正相关；产量与百粒质量、穗质量和穗粒数显著正相关，与秃尖长、0~20 cm 和 20~40 cm 土层硝态氮量

G1 条件下，成熟期 N2 处理茎、叶干物质质量显著高于 N1 处理，分别高出 35.44%、33.32%，大喇叭口期差异不显著，而 N1 处理籽粒干物质质量显著高于 N2 处理，高出 9.13%，说明地下水埋深 2.00 m 条件下，施氮可能主要通过影响作物物质转运来影响产量；G3 条件下，N2 处理籽粒干物质质量显著高于 N1 处理，高出 11.69%，而大喇叭口期、成熟期茎、叶无显著差异，说明地下水埋深 4.00 m 条件下，施氮可能通过影响作物物质转运与干物质积累影响产量。

2.3 不同处理下 0~40 cm 土层硝态氮增量

由表 5 可见，除对照 WN 处理外，各处理 0~20 cm 土层硝态氮增量低于 20~40 cm；N1 处理下，0~20、20~40 cm 土层硝态氮增量无显著差异；N2 条件下，硝态氮增量随着地下水埋深增加逐渐减小，差异显著，其中 G1 处理硝态氮增量最高，显著高于 G2、G3 处理，0~20 cm 土层分别高出 75.92%、90.03%，20~40 cm 分别高出 30.56%、130.95%。而同一地下水埋深下，N2 处理下 0~20 cm 土层硝态氮增量是 N1 处理的 1.4~5.3 倍，20~40 cm 则为 2.4~11.2 倍，差异显著，尤其是 G1 水平下，N2 处理硝态氮增量极显著地高于 N1 处理。

显著负相关。说明常规施氮条件下，地下水浅埋深地区，氮素可能受作物蒸腾拉力及表土蒸发作用向上运移，增加作物主要根系层硝态氮量，从而影响产量构成要素，进而作用产量，且地下水埋深越浅作用效应越明显，但这不利于产量形成。

3 讨论

在地下水浅埋区，地下水主要通过土壤孔隙毛管力、作物蒸发蒸腾等作用^[22]上升补给土壤水，土壤水分状况与作物生长状况相互制约，能诱发作物从形态

到生理的反应,影响作物生长发育^[23]。已有研究表明,地下水埋深对 *LAI* 影响显著^[12,15,24], *LAI* 随地下水埋深增加而降低,灌浆期最大,而对株高影响不显著^[25]。在本试验中, *LAI* 随地下水埋深增加而减小,埋深 3.0、4.0 m 差异小,表明当地下水埋深 ≥ 3.0 m 时,地下水对作物生长的贡献小^[24],与前人研究结果相近^[12,15]。

Logistic 拟合方程表明,变量参数 *a*、*b* 随施氮量增加而减小,施氮量大能延长作物快速生长期,这与前人研究相近^[26];而不施氮不控水处理快速生长期较长,主要是因为作物生长期缺少水肥,根系生长力弱^[27],随着生育进程推进,根系生长能力变强,逐渐下扎^[28],能够汲取更多的水分和养分,延长了快速生长期。地下水埋深 2.0 m 较其他埋深处理延长了快速生长期,主要是因为埋深 2.0 m 较浅,地下水供应充足,更有利于夏玉米生长,与前人研究不同^[12],可能是本研究相对前人研究埋深 2.0 m 设置仍较深,且受施氮影响;常规施氮处理下,埋深 2.0 m 玉米生长速率最大值低于埋深 3.0 m 和 4.0 m,可能是由于埋深 2.0 m 较浅,氮素随水分向上运移多^[17,18],加之常规施氮量大,造成主根系层氮素量累积量多(表 5),抑制作物生长。

前人研究表明,干物质质量受水肥影响,随地下水埋深增加先减小后增加^[29],本试验结果与之一致,茎、叶随地下水埋深增加先减小后增加,主要因为地下水埋深较深向上补水路径加长,增加了灌溉降雨在土壤中的蓄积,促进了玉米根系生长发育及干旱胁迫的抗逆能力^[24]。

基于硝态氮增量、产量及其构成要素 Person 相关性分析表明,常规施氮条件下,地下水主要通过影响百粒质量、穗质量、穗粒数和秃尖长以及 0~40 cm 土层硝态氮增量作用产量,与前人研究相近^[12,15]。其中,硝态氮增量与产量呈显著负相关关系,除受多余灌溉水分在包气带中存储影响外^[30],主要因为常规施氮处理提高了土壤硝态氮量^[21],产量可能出现“报酬递减”现象^[31],且试验设置地下水埋深处理,水分在空间上的运移较表层灌水更为复杂,且不涉及灌水处理,水分向下迁移能力相对较弱。地下水埋深浅,在土壤毛管吸力和作物蒸腾拉力作用下,土壤水分运移活跃,对作物主根区养分形成顶托效应^[32],不仅阻止了上层水分和氮素向下运移^[16],同时地下水或深层氮素也可能向上迁移^[18],造成作物主根区氮素交换量变大、累积量变多,根系养分吸收功能降低^[33],影响作物生长,造成作物减产。此外,综合产量、株高等指标随地下水埋深演变特征,地下水埋深与施氮水平组合对作物产量的贡献存在水氮耦合效应,还需进一步研究。

4 结 论

1) 地下水埋深 2.0 m 条件下, 300 kg/hm² 施氮量

促进了夏玉米营养生长和 0~40 cm 土层氮素残留,不利于玉米生殖生长和产量形成。

2) 地下水埋深 2.0 m 和 240 kg/hm² 施氮组合及埋深 4.0 m、300 kg/hm² 施氮组合下夏玉米叶面积指数、株高等生长指标以及干物质累积量均较其他组合增幅明显。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2018.
National bureau of statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China statistics press, 2006—2018.
- [2] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] GHOBADI M E, GHOBADI M, ZEBARJADI A. Effect of waterlogging at different growth stages on some morphological traits of wheat varieties[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(4): 635-645.
- [5] 宁芳. 施氮量对渭北旱地春玉米田土壤水肥利用、玉米生长和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
NING Fang. Effects of nitrogen application rates on soil water and fertilizer utilization, growth and yield of spring maize in Weibei dryland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [6] 王丽娟, 孙嘉星, 韩卫华, 等. 水肥减量对土壤硝态氮和番茄产量品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 1-7.
WANG Lijuan, SUN Jiaxing, HAN Weihua, et al. The effects of reducing irrigation and fertilization on soil nitrate, yield and quality of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 1-7.
- [7] 尚文彬, 张忠学, 郑恩楠, 等. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(01): 49-55.
SHANG Wenbin, ZHANG Zhongxue, ZHENG En'nan, et al. Nitrogen-water coupling affects nitrogen utilization and yield of film-mulched maize under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(1): 49-55.
- [8] 周加森, 马阳, 吴敏, 等. 不同水肥措施下的冬小麦水氮利用和生物效应研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9): 36-41.
ZHOU Jiasen, MA Yang, WU Min, et al. Water and nitrogen utilization and biological effects of winter wheat under different water and fertilizer measures[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(9): 36-41.
- [9] 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 En'nan, 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.
- [10] 刘斌祥, 王兴龙, 周芳, 等. 减氮配施不同种类有机肥对玉米物质分配、转运与产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 130-138.
LIU Binxiang, WANG Xinglong, ZHOU Fang, et al. Effects of reducing nitrogen combined with application of different types of organic fertilizers on dry matter allocation, transport, and yield of maize[J].

- Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 130-138.
- [11] DU Q, ZHOU L, CHEN P, et al. Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input [J]. The Crop Journal, 2020, 8(1): 140-152.
- [12] 孙仕军, 张岐, 陈伟, 等. 地下水埋深对辽宁中部地区膜下滴灌玉米生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 170-175, 182.
- SUN Shijun, ZHANG Qi, CHEN Wei, et al. Effects of groundwater depth on growth and yield of maize under mulched drip irrigation in the middle area of Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 170-175, 182.
- [13] 亢连强, 齐学斌, 马耀光, 等. 不同地下水埋深条件下再生水灌溉对冬小麦生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 95-100.
- KANG Lianqiang, QI Xuebin, MA Yaoguang, et al. Effects of reclaimed water irrigation on winter wheat growth under different groundwater tables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(6): 95-100.
- [14] ZHANG H, LI Y, MENG Y L, et al. The effects of soil moisture and salinity as functions of groundwater depth on wheat growth and yield in coastal saline soils[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(11): 2 472-2 482.
- [15] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624.
- LIU Zhandong, LIU Zugui, YU Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617-624.
- [16] WANG A H, GALLARDO M, ZHAO W, et al. Yield, nitrogen uptake and nitrogen leaching of tunnel greenhouse grown cucumber in a shallow groundwater region[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 73-80.
- [17] SHEN W S, LIN X G, SHI W M, et al. Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1/2): 137-150.
- [18] MORARI F, LUGATO E, POLESE R, et al. Nitrate concentrations in groundwater under contrasting agricultural management practices in the low Plains of Italy[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 147: 47-56.
- [19] 李霞, 任佰朝, 范霞, 等. 冬小麦-夏玉米生产体系中播前耕作对夏玉米产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1 074-1 083.
- LI Xia, REN Baizhao, FAN Xia, et al. Effects of tillage before sowing of winter wheat and summer maize on yield formation of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(6): 1 074-1 083.
- [20] SEPASKHAH A R, FAHANDEZH-SAADI S, ZAND-PARSA S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 51-57.
- [21] 张嫒. 减氮适墒对冬小麦土壤生物活性与氮素分布及吸收利用的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- ZHANG Man. Effects of Nitrogen-Reducing and Suitable Soil Moisture on Soil Biological Characteristics, Nitrogen Distribution in Soil and Nitrogen Utilization in Winter Wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017.
- [22] LIU Z Y, CHEN H, HUO Z L, et al. Analysis of the contribution of groundwater to evapotranspiration in an arid irrigation district with shallow water table[J]. Agricultural Water Management, 2016, 171: 131-141.
- [23] 杨建锋, 万书勤. 地下水对作物生长影响研究[J]. 节水灌溉, 2002(2): 36-38.
- YANG Jianfeng, WAN Shuqin. Effects of groundwater on crop growth [J]. Water Saving Irrigation, 2002(2): 36-38.
- [24] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 44-48.
- KONG Fanrui, QU Zhongyi, LIU Yajun, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water, salinity and crop growth[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(5): 44-48.
- [25] 王晓红, 侯浩波. 浅地下水对作物生长规律的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 13-16, 20.
- WANG Xiaohong, HOU Haobo. The influence of shallow groundwater on crops growth laws[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(3): 13-16, 20.
- [26] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 32-38.
- QIAO Jia, ZHU Jincheng, ZHAO Jiao, et al. Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(5): 32-38.
- [27] 翟超, 周和平, 赵健. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2 769-2 780.
- ZHAI Chao, ZHOU Heping, ZHAO Jian. Experimental study on inter-annual water requirement and water consumption of drip irrigation maize in north of Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(14): 2 769-2 780.
- [28] 韩秀君, 杨青, 孙晓巍, 等. 辽宁西部地区玉米作物生长季降水特征及对作物的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 77-81.
- HAN Xiujun, YANG Qing, SUN Xiaowei, et al. Precipitation characteristics of maize growing season and its influence on maize crops in western Liaoning Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(1): 77-81.
- [29] 亢连强. 不同地下水埋深条件下再生水灌溉的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- KANG Lianqiang. Experiment research on reclaimed water irrigation under the conditons of different groundwater depths[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.
- [30] 巴比江, 郑大玮, 卡热玛 哈木提, 等. 地下水埋深对春玉米田土壤水分及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 57-60, 65.
- BA Bijiang, ZHENG Dawei, KERIME Hamut, et al. Influence of water table on spring maize soil water and crop yield[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(3): 57-60, 65.
- [31] 王海瑞, 吕志远, 汤鹏程, 等. 喷灌条件下不同灌溉施肥对玉米耗水和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 72-77, 107.
- WANG Hairui, LYU Zhiyuan, TANG Pengcheng, et al. Effect of different irrigation and fertilization on water consumption and yield of corn under the condition of sprinkler irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 72-77, 107.
- [32] 齐学斌, 李平, 亢连强, 等. 变饱和带条件下污水灌溉对土壤氮素运移和冬小麦生长的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1 635-1 645.
- QI Xuebin, LI Ping, KANG Lianqiang, et al. Impact of depth of groundwater table on nitrogen dynamics in soil under sewage irrigation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1 635-1 645.
- [33] SINCLAIR T R, VADEZ V. Physiological traits for crop yield improvement in low N and P environments [J]. Plant and Soil, 2002, 245(1): 1-15.

The Combined Effects of Groundwater Depth and Nitrogen Fertilization on Yield of Summer Maize and Nitrate Distribution in Soil

SHE Yingjun^{1,2}, LI Ping³, BAI Fangfang^{1,2,4}, DU Zhenjie¹, LIANG Zhijie¹, QI Xuebin^{1,3*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China; 4. Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: 【Objective】 Soil water and nutrients combine to impact crop growth and nitrogen cycling. The objective of this paper is to study how groundwater depth and nitrogen fertilization modulate yield and nitrogen use efficiency of summer maize, as well as its consequent impact on nitrate dynamics. 【Method】 The experiments were conducted in lysimeters under different combinations of groundwater depth and nitrogen application. We compared three groundwater depths: 2.0 m (G1), 3.0 m (G2) and 4.0 m (G3); on top of these were two nitrogen treatments: conventional nitrogen fertilization used by local farmers (N2), and reducing it by 20% (N1), with no nitrogen fertilization and water control as control (WN). During the experiment, we measured the growth traits of the summer maize and nitrate dynamics in soil in each treatment. 【Result】 The leaf area index (*LAI*) was affected by groundwater depth but peaked at the grouting stage in all treatments. When nitrogen application was the same, *LAI* in G1 at mature stage was higher than that in G2 and G3 at a significant level. When groundwater depth was the same, increasing nitrogen application boosted *LAI* at mature stage. When nitrogen was applied at conventional level, the number of days that maize saw a rapid growth in G1 was 3.99% and 12.91% longer than that in G2 and G3, while its associated growth rate reduced by 9.69% and 14.65% respectively; G3 gave the highest yield. Reducing nitrogen application reduced the yield in G2 and G3 more significantly than in G1 due to the reduction in rapid-growth duration. Keeping nitrogen application at conventional level in G1 increased soil NO_3^- in top 20 cm of soil by 75.92% and 90.03%, and in 20~40 cm of soil by 30.56% and 130.95%, respectively, compared with that in G2 and G3. Reducing nitrogen application by 20% increased the grain yield per plant by 9.13% at significant level. Pearson correlation analysis showed that when nitrogen was applied at the conventional level, nitrate in 0~40 cm of soil varied with groundwater depth and was negatively correlated with the yield with R^2 varying from 0.827 to 0.883. 【Conclusion】 High nitrogen fertilization and shallow groundwater facilitated vegetative growth, but was unfavorable for reproductive growth thereby reducing the yield of the summer maize. Reducing nitrogen application coupled with shallowing the groundwater will benefit both yield and nitrogen use efficiency.

Key words: groundwater table depth; nitrogen application reduction; dry biomass matter; nitrate; Logistic; yield

责任编辑: 陆红飞