

# 地下水埋深与控肥对夏玉米氮素吸收和产量的影响

余映军<sup>1,2</sup>, 李平<sup>1</sup>, 杜臻杰<sup>1</sup>, 白芳芳<sup>1,2,4</sup>,

郭魏<sup>1</sup>, 梁志杰<sup>1</sup>, 崔嘉欣<sup>1,2</sup>, 马灿灿<sup>1,2</sup>, 齐学斌<sup>1,3</sup>

(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:**为探明地下水埋深与减施氮肥对夏玉米氮素吸收利用及产量的影响,基于大型地中渗透仪,研究了地下水埋深和施氮量对夏玉米氮素利用效率、植株氮素积累量、产量及其形成要素的影响,其中地下水埋深设2 m(G1),3 m(G2)和4 m(G3)3个水平,施氮量设减氮20%处理(240 kg/hm<sup>2</sup>, N1)、常规施氮处理(300 kg/hm<sup>2</sup>, N2)2个水平,不控水不施氮处理(G0N0)作为对照,共计7个处理。结果表明:(1)减氮20%条件下,夏玉米产量随地下水埋深增加呈减小趋势,氮素收获指数在埋深2 m下显著高于埋深3~4 m,分别增加5.71%,7.22%;(2)常规施氮条件下,埋深2 m处理茎、叶吸氮量显著高于埋深3~4 m处理,增幅为19.52%~50.31%,但产量、籽粒吸氮量和氮素收获指数埋深2 m处理显著低于埋深3~4 m处理,降幅为17.28%~29.28%;(3)地下水埋深2 m下,产量、氮肥农学效率、氮肥生理利用率、籽粒氮肥吸收利用率和氮素收获指数减氮20%处理均显著高于常规施氮处理,增幅为22.18%~115.35%。地下水埋深2 m条件下,施氮240 kg/hm<sup>2</sup>显著提升氮肥的增产效果,以及施氮后氮素转化为产量和干物质的效率,同时还增强氮素向籽粒的转移率,从而保持产量不致降低,因此埋深2 m条件下减氮20%有一定可行性。研究结果可为地下水浅埋地区控施氮肥提供理论参考依据。

**关键词:**地下水埋深;施氮;产量;吸氮量;氮肥利用

中图分类号:S273.4; S513

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)02-0309-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.041

## Effects of Different Groundwater Depth and Fertilizer Controlling on Nitrogen Uptake and Yield of Summer Maize

SHE Yingjun<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, DU Zhenjie<sup>1</sup>, BAI Fangfang<sup>1,2,4</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>,

LIANG Zhijie<sup>1</sup>, CUI Jiaxin<sup>1,2</sup>, MA Cancan<sup>1,2</sup>, QI Xuebin<sup>1,3</sup>

(1.Farmland Irrigation Research Institute, CAAS, Xinxiang, Henan 453002; 2.Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3.Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang, Henan 453002;  
4.Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang, CAAS, Xinxiang, Henan 453002)

**Abstract:** In order to explore the effects of groundwater depth and nitrogen reduction on summer maize nitrogen uptake, utilization and yield, based on large lysimeters, the effects of groundwater depth and nitrogen application rate on summer maize nitrogen utilization efficiency, plant nitrogen accumulation, yield and its component factors were studied. Among them, the groundwater depth was set at 3 levels of 2 m (G1), 3 m (G2) and 4 m (G3); the nitrogen application amount was set at 2 levels of conventional nitrogen application (300 kg/hm<sup>2</sup>, N2), nitrogen reduction treatment by 20% (240 kg/hm<sup>2</sup>, N1), and no groundwater depth with no nitrogen application (G0N0) as the control group, where a total of 7 treatments were used. The results showed that: (1) Under N1 treatment, the yield of summer maize decreased with the increases of groundwater, the nitrogen harvest index at G1 was significantly higher than that at G2 and G3, with an increase of 5.71% and 7.22% respectively. (2) The nitrogen uptakes of stem and leaf treated with N2 at G1 were significantly

收稿日期:2020-08-25

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800403);国家自然科学基金项目(51679241);中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-FIRI-03);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(FIRI2016-10)

第一作者:余映军(1995—),男,在读博士,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

higher than those at G2~G3, with the increases of 19.52%~50.31%. But the nitrogen uptake, nitrogen harvest index and grain yield at G1 were significantly lower than those at G2~G3, with the decreases of 17.28%~29.28%. (3) At the depth of G1, the yield, agronomic efficiency, physiological utilization rate, grain N uptake utilization rate of N fertilizer and N harvest index under N1 were significantly higher than those under N2, with the increases between 22.18% and 115.35%. Under the condition of 2 m groundwater depth, the nitrogen application rate of 240 kg/hm<sup>2</sup> could be beneficial to improve the yield increasing effect of nitrogen fertilizer, increase the efficiency of nitrogen conversion into yield and dry matter after nitrogen application, enhance the transfer rate of nitrogen to grain and maintain yield not to decrease. So, it was feasible to reduce nitrogen by 20% under this groundwater depth. The results could provide theoretical reference for nitrogen fertilizer control in shallow groundwater area.

**Keywords:** groundwater depth; nitrogen application rate; yield; nitrogen fertilizer absorption amount; nitrogen fertilizer utilization

施用氮肥是提高作物产量的主要措施,在施氮量较低条件下,随施肥量增加作物籽粒产量、品质和氮肥利用效率均逐渐增加<sup>[1]</sup>,但当施氮量超出一定阈值后,尤其是农户为追求高产,大量增施氮肥,不仅不会增加作物产量,反而降低作物产量和氮素利用率,引起土壤氮素积累、土壤酸化和地下水氮污染等环境问题<sup>[2-3]</sup>。张邦喜等<sup>[4]</sup>研究表明,玉米小麦间套作体系施氮0~236.25 kg/hm<sup>2</sup>,植株氮素积累量、籽粒产量随施氮量增加而增加,超过236.25 kg/hm<sup>2</sup>施氮量呈下降趋势;而Dai等<sup>[5]</sup>试验发现,262 kg/hm<sup>2</sup>施氮量下作物产量最高,其后产量不再增加;Yin等<sup>[5]</sup>研究认为,无论是传统施氮与控施尿素,高施氮量240 kg/hm<sup>2</sup>玉米农学利用效率、氮素利用效率均显著降低;王宜伦等<sup>[6]</sup>研究表明,300 kg/hm<sup>2</sup>施氮量有助于促进氮素吸收积累,维持土壤硝态氮平衡和提高氮肥利用率和农学效率。为降低氮肥施用量,增加氮素利用率和缓解环境氮负荷,不少学者结合土壤水分含量、作物栽培模式、种植密度等对施氮量做了大量深入研究,Li等<sup>[7]</sup>研究表明,轻度水分胁迫与水分充足下控释尿素施肥量210 kg/hm<sup>2</sup>与315 kg/hm<sup>2</sup>玉米产量无显著差异;吉艳芝等<sup>[8]</sup>认为,水肥高效管理(施氮量150~375 kg/hm<sup>2</sup>)是培育高产的理想施肥模式;李广浩等<sup>[9]</sup>研究表明,高密度条件下,施氮270,360 kg/hm<sup>2</sup>籽粒产量差异不显著,低密度条件下施氮270 kg/hm<sup>2</sup>产量最高。

水分是影响作物生产、氮素吸收的又一重要因素<sup>[10]</sup>,地下水作为作物生长所需水分的主要来源之一,通过影响作物根系生长环境显著影响作物产量形成和氮素利用<sup>[11]</sup>。孙仕军等<sup>[12]</sup>研究表明,地下水埋深1.0~1.5 m玉米产量显著高于埋深2.0~3.0 m,埋深2.0~3.0 m间产量差异不显著;亢连强等<sup>[13]</sup>研究发现,地下水埋深对产量的影响与地表灌水量相关,低水处理地下水埋深2 m产量最大,而高水处理则埋深3 m最高。地下水埋深过浅过深都会影响作

物产量,Gao等<sup>[14]</sup>考虑产量和节水效应认为,地下水埋深宜控制在2.5~3.0 m;Karimov等<sup>[15]</sup>认为,将地下水位从埋深3 m提高到1.5 m可以使雨养条件下的小麦增产31%,而在完全灌溉条件下则不增产。浅层地下水通过毛管水上升补给土壤,影响土壤氮素分布迁移及作物氮素利用,Morari等<sup>[16]</sup>估测认为,平均59%的淋洗硝态氮在地下水影响下,借助土壤毛细作用能反运移至作物根区;Wang等<sup>[17]</sup>研究发现,浅地下水埋深(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;Zhang等<sup>[18]</sup>研究认为,地下水埋深与施肥量间存在显著交互作用,产量最大时所对应的地下水埋深随施肥量增加而增加。

前人针对减施氮肥、传统地表灌水与施氮互作条件下,作物产量、土壤氮素积累及氮素利用效率的演变特征,以及地下水埋深对作物产量、氮素利用的影响进行了大量深入研究,但在地下水埋深变化条件下,如何减施氮肥以及施氮条件下,地下水埋深对作物氮素利用和产量的影响效应如何等研究较少。鉴于此,研究了不同地下水埋深与减施氮肥组合处理对夏玉米产量及其构成要素、作物器官吸氮量以及氮素利用效率的影响机理,为地下水埋深变化条件下优化施氮、提高农业生产能力和减轻环境氮负荷提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

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)进行,海拔73.2 m。测坑最大深度分别为2.8,4.8,5.3 m,测坑面积3×3 m<sup>2</sup>,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,试验期间日平均气温及日平均降雨量见图1。试验土壤为粉砂壤土,耕层0—40 cm土壤pH为9.37,有机质含量16.45 g/kg,全氮含量0.37 g/kg,全磷含量0.63 g/kg,速效

钾含量 0.21 g/kg, 土壤容重 1.45 g/cm<sup>3</sup>。

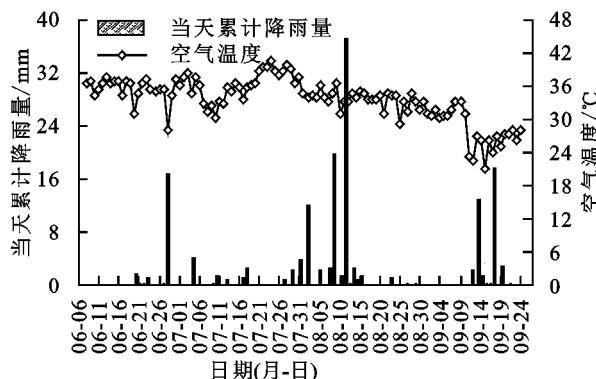


图 1 试验区夏玉米全生育期日降雨量与日平均气温

## 1.2 试验设计

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天。试验采用完全随机设计,设地下水埋深与施氮两因素试验处理,其中地下水埋深设3水平,分别为2 m(G1),3 m(G2),4 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水平,分别为减氮20%(240 kg/hm<sup>2</sup>,N1,简称减氮处理)、常规施氮(300 kg/hm<sup>2</sup>,N2,按当地施肥习惯);试验共计7个处理,分别为G1N1、G2N1、G3N1、G1N2、G2N2、G3N2,不控水不施氮(G0N0)作为对照处理,每处理重复2次;地下水位通过马氏瓶(Mariotte)控制。试验用肥采用尿素(含氮46.3%)、过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 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,施用量分别为150,120 kg/hm<sup>2</sup>,种植密度为6.7万株/hm<sup>2</sup>。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,以水分示数为参考,视地面干旱和作物植株叶片缺水情况进行灌水,方式为地面灌溉,各处理灌水量保持一致,具体灌水量为苗期48.89 mm,拔节期44.44 mm,大喇叭口期37.78 mm,灌浆成熟期60.00 mm,全生育期191.11 mm。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 测定指标与方法

植物吸氮量:成熟期每测坑选取长势均匀、有代表性的玉米2株,地上部分按照叶片(含苞叶)、茎秆(含雄穗、叶鞘、穗轴)、籽粒分开,于105℃下杀青30 min,再于80℃下烘干至恒重。植株全氮采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>联合消煮后,采用连续流动分析仪测定(Auto Analyzer 3型,德国BRANLUEBBE,灵敏度0.001 AUFS)。植株吸氮量,根据相关公式<sup>[19]</sup>计算:

$$\text{叶片吸氮量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{叶片干物质重} \times \text{叶片含氮量}$$

$$\text{秸秆吸氮量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{秸秆干物质重} \times \text{秸秆含氮量}$$

$$\text{籽粒吸氮量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{籽粒产量} \times \text{籽粒含氮量}$$

植株吸氮量(kg/hm<sup>2</sup>)=叶片吸氮量+秸秆吸氮量+

籽粒吸氮量

玉米氮肥利用相关指标,根据公式<sup>[20]</sup>计算:

$$\text{氮肥利用率}(\text{nitrogen fertilizer utilization efficiency}, \text{NFUE}, \%) = (\text{施氮区吸氮量} - \text{不施氮区吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

$$\text{氮肥农学效率}(\text{nitrogen agronomic efficiency}, \text{NAE}, \text{kg}/\text{kg}) = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥生理利用率}(\text{nitrogen fertilizer physiological efficiency}, \text{NFPE}, \text{kg}/\text{kg}) = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / (\text{施氮区地上部吸氮量} - \text{不施氮区地上部吸氮量})$$

$$\text{氮素收获指数}(\text{nitrogen harvest index}, \text{NHI}) = \text{籽粒吸氮量} / \text{植株地上部吸氮量}$$

$$\text{籽粒氮肥吸收利用率}(\text{grain nitrogen absorption and utilization efficiency}, \text{GNAUE}, \%) = (\text{施氮区籽粒氮积累量} - \text{不施氮区籽粒氮积累量}) \times 100\% / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥偏生产力}(\text{partial factor productivity of nitrogen}, \text{PFPN}, \text{kg}/\text{kg}) = \text{产量} / \text{施氮量}$$

产量及其构成要素:于成熟期选取5个有代表性果穗进行室内考种,测定穗长、穗粗、秃尖长、百粒重、穗重等指标,以测坑为单元收获后自然风干,称重测产。

## 1.4 数据处理

采用Excel 2016进行数据处理及作图,利用SPSS 23.0软件进行方差分析,LSD显著性检验(显著性水平设为 $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水埋深与控肥对夏玉米产量及其构成要素的影响

2.1.1 地下水埋深与控肥处理下夏玉米穗部性状变化分析 不同地下水埋深与施肥处理对夏玉米穗长、穗粗、百粒重的影响整体上未达到显著性差异(表1),但显著影响了穗重和秃尖长。常规施氮条件下穗重随地下水埋深增加而增加,差异显著,埋深4 m处理分别比埋深3,2 m处理高出11.21%,29.05%;而减氮处理条件下随地下水埋深增加而减小,差异不显著。秃尖长在一定程度上反映了玉米水肥的供应状况及是否受到盐分胁迫。以对照处理为参考,秃尖长在减氮处理下随地下水埋深增加而增加,对应地下水埋深2,3,4 m处理分别降低200.00%,174.29%和152.63%,而在常规施氮处理下随地下水埋深增加而减小,对应地下水埋深2,3,4 m处理分别降低140.00%,200.00%和284.00%。地下水埋深2 m条件下,减氮处理穗重显著高于常规施氮处理,增加19.25%,而埋深3,4 m条件下,常规施氮处理穗重显著高于减氮处理,分别增加4.94%,15.51%。

**2.1.2 地下水埋深与控肥处理下夏玉米产量变化分析** 由表 1 可知, 不同地下水埋深与施氮处理产量显著高于对照处理 G0N0, 且高于华北地区夏玉米潜在产量<sup>[21]</sup>, 与对照处理相比, 产量增加率为 49.26%~111.05%。减氮处理下夏玉米产量与氮肥偏生产力 (PFPN) 均随地下水埋深增加而减少, 差异不显著, 而常规施氮处理下产量与 PFPN 随地下水埋深增加而增加, 产量在地下水埋深 3, 4 m 下显著高于埋深 2 m 处理, 分别高出 34.39%, 41.39%, PFPN 相应高出 34.41%, 41.41%。但在地下水埋深 2 m 条件下, 减氮处

理产量、PFPN 均显著高于常规施氮处理, 分别增加 22.18%, 52.72%; 在地下水埋深 4 m 条件下, 常规施氮产量显著高于减氮处理, 高出 17.80%, 而 PFPN 低于减氮处理。G3N2 产量最高, 与其他处理组合相比增幅为 5.21%~41.39%。除此, 由表 1 可见, 地下水埋深显著影响夏玉米产量 ( $P < 0.05$ ), 而施氮作用不显著; 且施氮 ( $P < 0.01$ ) 对作物氮肥偏生产力 (PFPN) 的影响强于地下水埋深 ( $P < 0.05$ ), 常规施氮处理下各地下水埋深 PFPN 普遍偏低, 说明在地下水浅埋深条件下减氮 20% 有一定可行性。

表 1 地下水埋深与控肥处理夏玉米穗部性状及产量构成要素

处理	穗长/cm	穗粗/cm	秃尖长/cm	百粒重/g	穗重/g	产量/		PFPN/
						(kg · hm <sup>-2</sup> )	(kg · kg <sup>-1</sup> )	
G0N0	14.18±0.66b	4.32±0.04c	0.96±0.04a	26.83±0.50c	122.60±1.36d	4795.59±20.03d	—	
G1N1	17.47±0.45a	4.57±0.04b	0.32±0.02bc	35.97±1.22ab	206.21±5.00ab	8745.97±227.17b	36.44±0.95a	
G2N1	17.09±0.65a	4.67±0.07ab	0.35±0b	34.04±0.39ab	191.22±1.77bc	8689.75±461.58b	36.21±1.92a	
G3N1	17.41±0.48a	4.66±0.03ab	0.38±0.02b	35.04±0.46ab	193.18±7.92b	8591.93±406.59b	35.80±1.69a	
G1N2	16.68±0.15a	4.59±0.11b	0.40±0b	33.57±0.62b	172.92±5.74c	7158.07±82.08c	23.86±0.27b	
G2N2	17.12±0.48a	4.66±0.05ab	0.32±0.02bc	35.82±0.38ab	200.66±7.81b	9620.02±308.89ab	32.07±1.03a	
G3N2	18.02±0.54a	4.88±0.13a	0.25±0.05c	36.13±1.07a	223.15±7.10a	10121.06±354.98a	33.74±1.18a	
G	1.116	2.865	10.515*	0.636	4.559	10.515*	7.522*	
F 值	0.016	1.483	1.154	0.064	0.159	1.154	35.287**	
G * N	1.047	1.309	12.472**	4.280	13.296**	12.472**	9.310*	

注: 表中数据为平均值±土标准差; 不同小写字母及 \* 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。

## 2.2 地下水埋深与控肥处理对作物器官吸氮量的影响

由图 2 可知, 各处理夏玉米器官吸氮量均表现为籽粒 > 茎 > 叶, 茎、叶差异小。施氮控水处理下夏玉米器官吸氮量是不施氮不控水处理的 1.44~5.31 倍, 差异显著。减氮处理下, 茎、叶和籽粒吸氮量均随地下水埋深增加而增加, 茎、叶在地下水埋深 3, 4 m 处理下显著高于埋深 2 m 处理, 增幅为 24.43%~27.21% 和 12.09%~20.03%, 籽粒吸氮量随地下水埋深增加有降低趋势, 但差异不显著; 常规施氮处理条件下, 茎、叶吸氮量均随地下水埋深增加而减小, 地下水埋深 2 m 处理显著高于埋深 3, 4 m 处理, 茎、叶分别增加 27.54%~50.31%, 19.52%~23.59%, 而籽粒吸氮量在埋深 2 m 处理时显著低于埋深 3, 4 m 处理, 分别降低 23.06% 和 22.09%。

相同地下水埋深条件下, 常规施氮处理的茎、叶吸氮量显著高于减氮处理, 分别平均增加 33.77% 和 27.24%; 籽粒吸氮量在埋深 3, 4 m 水平下, 常规施氮处理显著高于减氮处理, 分别增加 18.34% 和 17.01%。特别是埋深 2 m 条件下, 常规施氮处理较减氮处理, 茎、叶吸氮量分别增加 92.04%, 59.72%, 而籽粒吸氮量降低 8.99%, 说明地下水埋深 2 m 条件下, 常规施氮处理不利于茎叶氮素向籽粒转移, 而减氮处理相对有利。

对夏玉米器官吸氮量及地上部分总吸氮量进行方差分析表明, 地下水埋深、施氮处理及二者交互作

用对夏玉米器官吸氮量影响显著 ( $P < 0.01$ ), 其中地下水埋深、二者交互作用对夏玉米地上部分总吸氮量影响不显著, 而施氮量显著影响夏玉米地上部分总吸氮量 ( $P < 0.01$ ), 说明施氮量对作物吸氮的作用效应强于地下水埋深。

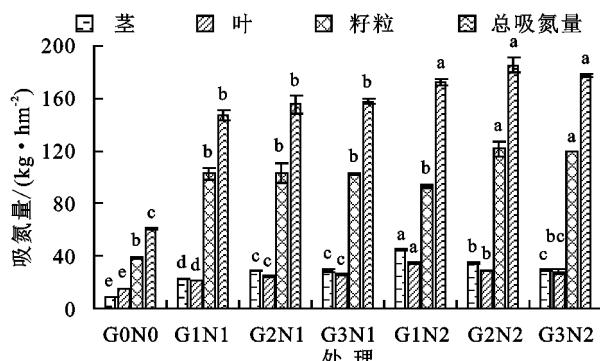


图 2 地下水埋深与控肥处理的夏玉米器官及总吸氮量

## 2.3 地下水埋深与控肥处理下夏玉米的氮肥利用率

氮肥利用率表述为对氮肥的利用情况。从表 2 可以看出, 地下水埋深与施氮量及其交互作用对氮肥利用率的影响均不显著; 减氮处理条件下, 氮肥利用率随地下水埋深增加呈增大趋势, 但整体上各处理氮肥利用率差异不显著。说明在浅地下水埋深条件下, 减少 20% 施氮量不会降低作物氮肥利用率, 对其影响较小。

氮肥农学效率可以用来评价氮肥的增产效果, 氮肥生理利用率指因施氮增加的氮量转化为产量或干物质的效率。从表 2 可以看出, 地下水埋深 2 m 条件下, 常

规施氮处理氮肥农学效率与氮肥生理利用率分别为7.94, 21.30 kg/kg, 显著低于其他处理。说明在地下水埋深2 m条件下, 高施氮量不仅不会提高氮肥的增产效果, 反而可能降低氮素转化为产量或干物质的效率。

氮素收获指数反映氮素向籽粒转移的效率。由表2可以看出, 施氮控水处理显著影响氮素收获指数, 减氮条件下, 地下水埋深2 m处理显著高于埋深3, 4 m, 分别增加5.71%, 7.22%, 常规施氮条件下则表现相反, 分别降低17.28%, 19.80%; 且在地下水埋深2 m条件下, 减氮处理显著高于常规施氮处理, 增加28.42%。说明浅地下水埋深2 m条件下, 减氮处理有助于提高氮素向籽粒

的转移效率, 而埋深超过3 m后, 地下水对氮素向籽粒的转运作用效应相应减弱。

籽粒氮肥吸收利用率是籽粒氮的积累量增值, 反映了氮肥对籽粒氮积累的贡献, 其值的高低不仅与籽粒产量有关, 还与植株吸氮能力及氮素在植株体内的分布相关。由表2可知, 各施氮控水处理下籽粒氮肥吸收利用率在18.51%~27.85%变化, 地下水埋深2 m条件下, 减氮处理显著高于常规施氮处理, 增加45.76%, 说明该埋深条件下, 在常规施氮基础上减少20%施氮量有助于增加氮肥对籽粒氮积累的贡献和提升植株的吸氮能力。

表2 地下水埋深与控肥处理夏玉米的氮肥利用

处理	氮肥利用率 NUE/%	氮肥农学效率 NAE/(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥生理利用率 NPE/(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮素收获 指数 NHI	籽粒氮肥吸收利用率 GNAUE/%
G1N1	35.88±1.60b	16.46±0.86a	45.87±0.08a	69.63±0.95a	26.98±1.52a
G2N1	39.30±2.78ab	16.23±1.84a	41.17±1.53a	65.87±1.89b	26.97±2.88a
G3N1	40.24±0.62ab	15.82±1.61a	39.38±4.61a	64.94±0.47b	26.92±0.09a
G1N2	37.01±0.84ab	7.94±0.27b	21.30±1.04b	54.22±0.01c	18.51±0.31b
G2N2	41.30±1.75a	16.15±1.03a	38.89±1.01a	65.55±0.86b	27.85±1.53a
G3N2	38.71±0.15ab	17.82±1.18a	45.87±3.06a	67.61±0.26ab	27.34±0.19a
G	3.419	8.124**	7.426**	12.236**	6.259*
F值	N	0.177	4.698	11.813*	31.075**
G*N	0.703	10.055*	21.940**	51.286**	6.372*

### 3 讨论

地下水通过土壤毛细作用补给作物根系区, 以满足土壤蒸发和作物蒸腾耗水, 进而影响产量形成<sup>[22]</sup>。地下水埋深越浅, 水分对包气带补水越充足, 越有利于产量形成, 但会受到其他因素的限制<sup>[15, 23]</sup>。本研究发现, 地下水显著影响作物穗重、秃尖长, 而对作物穗长、穗粗和百粒重影响不显著, 研究结果与前人<sup>[12, 24]</sup>研究相近, 可能是地下水埋深因施氮量的变化而影响土壤中水分含量和氮素分布<sup>[12, 22]</sup>, 从而作用夏玉米穗部性状; 减氮处理下, 产量随着地下水埋深增加而呈降低趋势, 与Karimov等<sup>[15]</sup>研究结果一致, 但差异不显著, 这可能与灌溉降雨有关<sup>[15]</sup>; 而在常规施氮处理条件下, 产量随地下水埋深增加而增加, 这与Kahlown等<sup>[23]</sup>研究结果一致。除此, 本研究还发现, 产量在地下水埋深2 m条件下常规施氮处理显著低于减氮处理, 这主要与包气带厚度及地下水水分运移两方面相关: 一方面, 地下水埋深较深的处理, 灌溉降雨后, 包气带蓄水能力较强, 多余水分储存在包气带中, 土壤水分充足<sup>[12]</sup>, 能够满足作物需水要求; 另一方面, 常规施氮量大, 地下水埋深越浅, 包气带含有的及施加的氮素等溶质受蒸发作用随水分向上运移越强烈, 引发作物根系区氮素累积量变大、交换量增多<sup>[16]</sup>, 不利于产量形成。

地下水位与施肥水平是作物生长的重要作用因子, 显著影响作物氮素吸收量和利用率<sup>[7, 18]</sup>。本研究

发现, 夏玉米茎、叶及地上部分总吸氮量随施氮量增加而显著增加, 籽粒吸氮量高于茎, 茎高于叶<sup>[19]</sup>, 与杨荣等<sup>[25]</sup>、张忠学等<sup>[26]</sup>研究结果相近, 而籽粒吸氮量差异不显著, 可能是浅地下水埋深作用条件下, 引起了水肥互作效应<sup>[26]</sup>。适宜施氮能够促进作物氮素吸收, 有利于茎、叶氮素向籽粒转运, 增加作物氮素吸收利用率, 但过量施氮并未进一步提高氮素吸收量和氮肥利用效率<sup>[7]</sup>。本研究还发现, 地下水埋深2~3 m条件下, 常规施氮处理氮肥利用率并未进一步提高, 氮肥农学效率、氮肥生理利用率以及氮素收获指数反而均低于减氮处理, 而茎、叶器官吸氮量却高于减氮处理, 因此浅地下水埋深条件下, 高施氮量不利于氮素向籽粒转运, 研究结果与前人<sup>[17-18]</sup>研究相近。本试验仅为1年研究, 施氮量与地下水埋深对氮素在地下水—土壤—作物系统中的分布、转化机理存在明显的耦合效应, 还需进一步研究。

### 4 结论

(1) 减氮处理下, 夏玉米产量、氮肥偏生产力、籽粒吸氮量随地下水埋深增加呈减少趋势, 氮素收获指数在埋深2 m下显著高于埋深3, 4 m, 分别增加5.71%, 7.22%。

(2) 常规施氮处理下, 地下水埋深2 m显著高于埋深3, 4 m, 茎、叶分别增加27.54%~50.31%, 19.52%~23.59%, 而产量、籽粒吸氮量和氮素收获指数相应降低25.59%~29.28%, 22.09%~23.06%和17.28%~19.80%, 差异显著。

(3)地下水埋深2 m条件下,减氮处理产量、氮肥农学效率、氮肥生理利用率、氮素收获指数和籽粒氮肥吸收利用率均显著高于常规施氮处理,增加率为22.18%~115.35%,可见,减氮处理不仅有助于提高氮肥增产效果和提升施氮后氮素转化为产量及干物质的效率,还能增强氮素向籽粒的转移率,因此埋深2 m条件下,减氮20%是可行的。

#### 参考文献:

- [1] 李莎莎,马耕,刘卫星,等.大田长期水氮处理对土壤氮素及小麦籽粒淀粉糊化特性的影响[J].作物学报,2018,44(7):1067-1076.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science (American Association for the Advancement of Science), 2010, 327 (5968):1008-1010.
- [3] Dai J, Wang Z H, Li F C, et al. Optimizing nitrogen input by balancing winter wheat yield and residual nitrate-N in soil in a long-term dryland field experiment in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2015, 181:32-41.
- [4] 张邦喜,范成五,李国学,等.氮肥运筹对黄壤坡耕地作物产量和土壤无机氮累积量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(1):1-9.
- [5] Yin M H, Li Y N, Xu Y B. Comparative effects of nitrogen application on growth and nitrogen use in a winter wheat/summer maize rotation system[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 9(16):2062-2072.
- [6] 王宜伦,刘天学,赵鹏,等.施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2483-2491.
- [7] Li G H, Zhao B, Dong S T, et al. Controlled-release urea combining with optimal irrigation improved grain yield, nitrogen uptake, and growth of maize[J]. Agricultural Water Management, 2020, 227:105834.
- [8] 吉艳芝,冯万忠,郝晓然,等.不同施肥模式对华北平原小麦—玉米轮作体系产量及土壤硝态氮的影响[J].生态环境学报,2014,23(11):1725-1731.
- [9] 李广浩,刘娟,董树亭,等.密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2247-2258.
- [10] Jia X C, Shao L J, Liu P, et al. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions [J]. Agricultural Water Management, 2014, 137:92-103.
- [11] 孙仕军,隋文华,陈伟,等.地下水埋深对辽宁中部地区玉米根系和干物质积累的影响[J].生态学杂志,2020,39(2):497-506.
- [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.
- [13] 兮连强,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.
- [14] Gao X Y, Huo Z L, Xu X, et al. Shallow groundwater plays an important role in enhancing irrigation water productivity in an arid area: The perspective from a regional agricultural hydrology simulation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208:43-58.
- [15] Karimov A K, Šimunek J, Hanjra M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia)[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131:57-69.
- [16] 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 and Environment, 2012, 147:47-56.
- [17] 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.
- [18] Zhang W C, Zhu J Q, Zhou X G, et al. Effects of shallow groundwater table and fertilization level on soil physic-chemical properties, enzyme activities, and winter wheat yield [J]. Agricultural Water Management, 2018, 208:307-317.
- [19] 曹胜彪,张吉旺,董树亭,等.施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1343-1353.
- [20] 石德杨,张海艳,董树亭.土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):37-44.
- [21] 江铭诺,刘朝顺,高炜.华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应[J].中国生态农业学报,2018,26(6):865-876.
- [22] Ayars J E, Christen E W, Soppe R W, et al. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: A review[J]. Irrigation Science, 2006, 24(3):147-160.
- [23] Kahloon M A, Ashraf M, Zia-ul-Haq. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1):24-35.
- [24] 肖俊夫,刘战东,刘祖贵,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):618-624.
- [25] 杨荣,苏永中.水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J].生态学报,2009,29(3):1459-1469.
- [26] 张忠学,刘明,齐智娟.不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J].农业机械学报,2020,51(2):284-291.