



河西绿洲灌区膜下滴灌水稻氮素平衡及氮肥投入阈值研究

唐文雪, 马忠明, 罗双龙, 段誉

引用本文:

唐文雪, 马忠明, 罗双龙, 段誉. 河西绿洲灌区膜下滴灌水稻氮素平衡及氮肥投入阈值研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 763-771.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于产量和环境友好的黄土高原半干旱区玉米氮肥投入阈值研究

唐文雪, 马忠明, 王景才

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 726-733 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0162>

氮肥施用对四川紫色土矿质态氮淋失特征及春玉米产量的影响

刘明鹏, 徐开未, 肖华, 陈晓辉, 彭丹丹, 卢俊宇, 陈远学

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 88-98 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0655>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545-555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响

任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 王慧颖, 许发辉, 卢昌艾, 段英华

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 716-725 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0380>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118-128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

唐文雪, 马忠明, 罗双龙, 等. 河西绿洲灌区膜下滴灌水稻氮素平衡及氮肥投入阈值研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 763-771.

TANG W X, MA Z M, LUO S L, et al. Research on nitrogen equilibrium and nitrogen fertilizer input threshold in rice soil with drip irrigation in the Hexi Oasis irrigation area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 763-771.

# 河西绿洲灌区膜下滴灌水稻氮素平衡及氮肥投入阈值研究

唐文雪<sup>1</sup>, 马忠明<sup>2\*</sup>, 罗双龙<sup>1</sup>, 段誉<sup>2</sup>

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院, 兰州 730070)

**摘要:**为确定河西绿洲灌区膜下滴灌条件下基于产量及环境安全的水稻氮肥投入阈值,于2020、2021年在张掖节水农业试验站开展水稻膜下滴灌栽培田间试验,研究不同施氮水平(纯氮0、135、225、315、405 kg·hm<sup>-2</sup>)对水稻产量、土壤矿质氮累积及土壤氮素平衡的影响。结果表明,水稻产量与施氮量呈显著的二次抛物线关系,最佳经济效益氮肥用量为222 kg·hm<sup>-2</sup>,对应水稻产量为5 684 kg·hm<sup>-2</sup>(最高产量的99.7%)。土壤矿质氮累积量与施氮量呈显著的指数相关关系,施氮量为225 kg·hm<sup>-2</sup>时,矿质氮累积量为119 kg·hm<sup>-2</sup>,与135 kg·hm<sup>-2</sup>施氮量处理差异不显著,施氮量达到315 kg·hm<sup>-2</sup>时,矿质氮累积量显著增加,并且出现由浅层向深层迁移的趋势;氮表观平衡值与施氮量呈显著线性正相关,土壤氮素达到表观平衡时,对应的施氮量为171 kg·hm<sup>-2</sup>。综合考虑产量、矿质氮累积量、土壤氮盈余与施氮量的关系,得出河西绿洲灌区膜下滴灌水稻合理氮肥投入阈值为171~222 kg·hm<sup>-2</sup>。该施氮量比最高产量氮肥用量降低10.8%~31.3%,既保证了水稻高产稳产,又有效降低了氮素在土壤中的盈余与淋失风险,为该区域水稻减氮高产高效栽培提供了理论依据。

**关键词:**施氮量;产量;矿质氮累积量;土壤氮素平衡值;氮阈值;膜下滴灌;水稻

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)04-0763-09

doi: 10.13254/j.jare.2023.0048

## Research on nitrogen equilibrium and nitrogen fertilizer input threshold in rice soil with drip irrigation in the Hexi Oasis irrigation area

TANG Wenxue<sup>1</sup>, MA Zhongming<sup>2\*</sup>, LUO Shuanglong<sup>1</sup>, DUAN Yu<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to determine the nitrogen fertilizer input threshold of rice based on yield and environmental safety under drip irrigation in the Hexi Oasis irrigation area, field tests on rice drip irrigation were conducted at the Zhangye Water-Saving Agricultural Pilot Station in 2020 and 2021. Five nitrogen application levels of 0, 135, 225, 315 kg·hm<sup>-2</sup>, and 405 kg·hm<sup>-2</sup> were set and labeled as N0, N1, N2, N3, and N4, respectively. Then, the impacts of the nitrogen application levels on the rice yield, accumulative mineral nitrogen, and nitrogen balance in soil were studied. The results showed that nitrogen application significantly increased the rice yield and formed a significant quadratic parabolic curve together with the rice yield and the amount of nitrogen applied. The rice yield reached the value of 5 684 kg·hm<sup>-2</sup> (99.7% of the maximum yield) when 222 kg·hm<sup>-2</sup> of nitrogen was applied. There was a significant exponential correlation between the cumulative amount of mineral nitrogen in soil and the amount of nitrogen applied. When the amount of nitrogen applied was 315 kg·hm<sup>-2</sup>, the

收稿日期: 2023-02-06 录用日期: 2023-05-05

作者简介: 唐文雪(1967—), 女, 甘肃临夏人, 本科, 研究员, 主要从事农业面源污染防控与节水农业研究。E-mail: gstwx@163.com

\*通信作者: 马忠明 E-mail: mazhming@163.com

基金项目: 甘肃省科技计划项目(21YF5NA145, 21ZD4NF044-4); 甘肃省农业科学院科技创新专项(2019GAAS12)

Project supported: Science and Technology Plan of Gansu Province (21YF5NA145, 21ZD4NF044-4); Scientific and Technological Innovation Project of Gansu Academy of Agricultural Science (2019GAAS12)

cumulative amount of mineral nitrogen was  $151 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , which was significantly higher than the levels of  $119 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  when the amount of nitrogen applied was  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Additionally, when the amount of nitrogen applied reached  $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the mineral nitrogen moved from the shallow to deep layers, following a trend of aggregation. There was a significant linear correlation between the nitrogen apparent balance value and the amount of nitrogen applied. The amount of nitrogen applied was  $171 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  when the nitrogen apparent balance value of nitrogen was 0. When the amount of nitrogen applied ranged from  $171$  to  $222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the rice yield was  $5\,551$  to  $5\,684 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the cumulative amount of mineral nitrogen in soil was  $104 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  to  $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the nitrogen balance value was  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  to  $44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . By considering the relationship among the yield, accumulative amount of mineral nitrogen, soil nitrogen surplus, and the amount of nitrogen applied, the proposed rational nitrogen fertilizer input threshold for rice under drip irrigation in the Hexi Oasis irrigation area is  $171 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  to  $222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Under this nitrogen application condition, the rice yield is high, the input and output of nitrogen in soil reach equilibrium, and the cumulative amount of mineral nitrogen is low, ensuring a high and stable rice yield and reducing environmental risks.

**Keywords:** nitrogen application; yield; accumulation of soil mineral nitrogen; soil nitrogen balance; nitrogen threshold; drip irrigation with plastic film mulching; rice

水稻是我国重要的粮食作物,确保水稻高产稳产对我国粮食安全具有十分重要的作用。水稻膜下滴灌技术是近年来研发的一种创新型的栽培技术,该技术比传统栽培方式节水60%以上,在新疆、宁夏、内蒙古等地区推广应用迅速,具有产量高、品质优、收益高的特点,具有很强的市场竞争力<sup>[1]</sup>。氮素是营养元素中影响水稻生长发育和产量最敏感的因素,合理施氮是水稻高产优质的关键措施。盲目过量施氮不仅会降低氮肥增产效率和肥料利用率,还会造成土壤质量退化、地表和地下水硝酸盐含量超标等一系列环境问题<sup>[2-4]</sup>。确定合理施氮量是获得较高目标产量、维持土壤肥力和降低施氮引起的环境污染的关键。

用什么指标来衡量不同尺度或生产体系氮素管理的优劣,是提高氮素管理水平的核心问题<sup>[5]</sup>。世界各地学者在水稻氮肥适宜投入量、评价指标、阈值推荐方法等方面进行了广泛研究。宫亮等<sup>[6]</sup>将水稻目标产量临界值与最佳经济施氮量的范围确定为氮肥施用阈值,较农民习惯施氮量低5.8%~19.2%。侯云鹏等<sup>[7]</sup>研究认为与最高产量氮肥用量相比,采用最佳经济氮肥用量在保证产量基本不降低的条件下(最高产量的99%~100%),可节约氮肥4.6%~5.2%。施泽升等<sup>[8]</sup>以氮肥效应为基础,在洱海北部地区以水稻籽粒产量和土壤氮素表观盈余率等环境指标确定氮肥投入阈值。李波等<sup>[9]</sup>在综合考虑水稻目标产量、经济效益、氮肥利用率及土壤氮素平衡等因素的基础上,提出了辽河三角洲单季稻区氮肥投入阈值。Ding等<sup>[10]</sup>研究以氮素表观平衡为评价指标的稻田氮肥限量新方法,综合考虑氮素损失和产量,提出全国不同种植区域水稻类型的化学氮肥投入上限阈值。以往研究提出的产量指标及氮素盈余、氮素平衡等环境指

标既有其自身的理论依据,又可满足产量安全及生态环境安全的需求,是确定最佳施氮量常用且有效的指标<sup>[11]</sup>,为水稻生产合理施用氮肥、控制面源污染提供了重要的理论及技术依据。

甘肃省河西走廊地处我国西北干旱区,主要作物是春小麦、啤酒大麦、制种玉米和玉米。该区玉米年制种面积及产量分别占我国玉米制种面积和总产量的55%和60%。但该区连作问题严重,局部地区甚至已连作30年,严重影响制种业持续发展<sup>[12]</sup>。张掖市甘州区生产的稻米品质优良,有“乌江贡米”美誉,但因为耗水量大,种植面积逐年萎缩。引进和推广水稻膜下滴灌栽培技术对河西灌区优化种植结构、促进区域经济发展意义重大。目前,有关该区域水稻膜下滴灌技术合理施氮的农学效应、环境效应的研究还鲜见报道,影响了该技术的推广应用。本研究通过两年试验,系统研究不同施氮水平对水稻产量、矿质氮累积、土壤氮素平衡的影响,以期确定河西绿洲灌区膜下滴灌水稻适宜的氮肥投入阈值,从而实现农业生产和环境保护的双赢。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地与材料

试验于2020、2021年在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站进行。试验站(北纬 $38^{\circ}56'$ ,东经 $100^{\circ}26'$ )地处甘肃省河西走廊中段、黑河中上游,海拔 $1\,570 \text{ m}$ 。该区域干旱少雨,日照充足,无霜期 $153 \text{ d}$ ,日照时数 $2\,932\sim 3\,085 \text{ h}$ ,年均气温 $7.48 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 $1\,837\sim 2\,870 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。膜下滴灌水稻生育期气温、降水量见图1。

试验于2020年5月13日播种,9月30日收获;

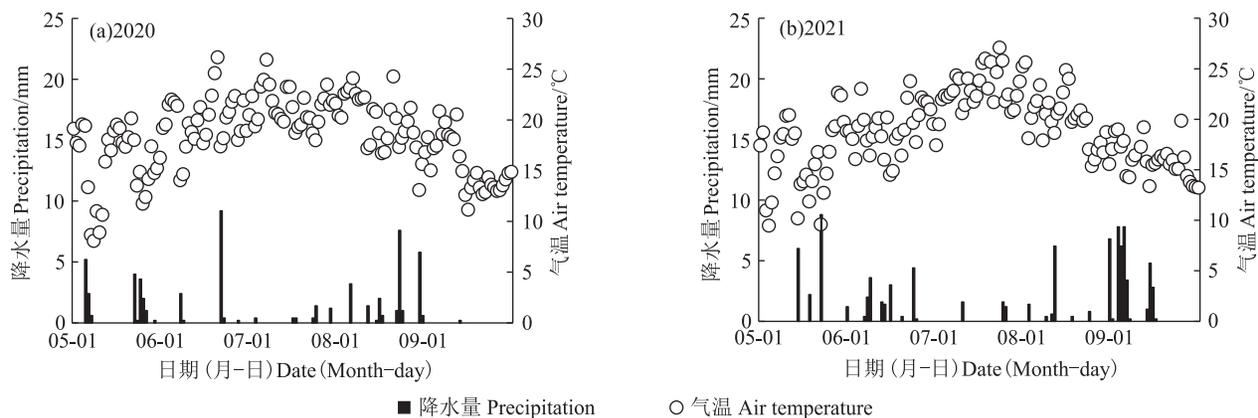


图1 膜下滴灌水稻生育期降水量和气温

Figure 1 Precipitation and temperature during rice growth period under film drip irrigation

2021年5月5日播种,9月28日收获。两年试验在邻近地块进行,前茬作物均为春玉米。试验地土壤类型为轻壤土,0~40 cm土壤理化性状见表1。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设0(N0)、135(N1)、225(N2)、315(N3)、405 kg·hm<sup>-2</sup>(N4) 5个施氮量水平,3次重复。小区长16 m,宽3.3 m,小区面积52.8 m<sup>2</sup>。试验氮肥分基肥和追肥施入,追肥随水滴施,其中分蘖肥和穗肥分2次施入,粒肥1次施入。基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥分配比例为15%、30%、40%、15%。磷肥、钾肥施用量为120 kg·hm<sup>-2</sup>,均作基肥。

供试水稻品种为张掖农业科学研究院提供的乌

江黑芒稻,生育期135 d。氮肥为尿素(N 46.4%)、磷肥为普通过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>O 50%)。膜下滴灌水稻各生育期施氮量及施氮时间见表2。

### 1.3 栽培模式及灌水量

水稻栽培采用一膜两管八行模式,即覆盖1幅地膜(膜宽145 cm),铺设滴灌带2条,种植水稻8行。带幅为165 cm,宽窄行种植。采用专用播种机一次完成铺管、覆膜、播种、覆土作业。穴距10 cm,播种密度45万穴·hm<sup>-2</sup>,每穴播6~8粒种子,播深2.5~3.0 cm。播种后及时灌出苗水。生育期灌水量9 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,苗期、分蘖期、拔节期、抽穗扬花期、灌浆期、成熟期灌

表1 土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

土层深度 Soil depth/cm	pH		有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )		全盐 Total salt/ (g·kg <sup>-1</sup> )		全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )		硝态氮 NO <sub>3</sub> -N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )		速效磷 Available P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )		速效钾 Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
0~20	8.4	8.22	7.71	7.90	1.95	1.74	0.64	0.77	15.35	17.36	22.12	24.77	106.48	82.00
20~40	8.3	8.09	5.69	6.21	1.46	1.53	0.55	0.68	9.54	8.55	25.41	26.52	73.45	69.29

表2 膜下滴灌水稻各生育时期施氮量

Table 2 N application rate for drip irrigation under plastic film mulching at different growth stages

处理 Treatment	施氮总量 Total N application rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	基肥 Base fertilizer		分蘖肥 Tillering fertilizer		穗肥 Ear fertilizer		粒肥 Granulated fertilizer
		5月上旬	6月中旬	6月下旬	7月中旬	7月下旬	8月中旬	
N0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	135	20.25	20.25	20.25	27	27	20.25	
N2	225	33.75	33.75	33.75	45	45	33.75	
N3	315	47.25	47.25	47.25	63	63	47.25	
N4	405	60.75	60.75	60.75	81	81	60.75	
施肥方式		播前旋地施入		随灌水分2次施入		随灌水分2次施入		随灌水1次施入

水量分别为160、195、235、85、145、80 mm。灌水采用滴灌方式,拔节前每3~4 d灌水1次,之后每2 d灌1次,收获前20 d停止灌水。

#### 1.4 测定项目与方法

##### 1.4.1 土壤铵态氮及硝态氮测定

试验播种前和收获后,以对角线法确定采样位置。每小区在滴头下,距滴灌带15、25 cm的种植行,两根滴灌带间,两幅膜间各测定1个点。用土钻采集0~100 cm土壤样品,分为0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 6个土层。相同土层5个点土样混合后迅速放入-4℃冰柜中保存,用于测定土壤铵态氮及硝态氮含量。土壤水分用烘干法测定,土壤铵态氮、硝态氮用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl浸提,采用靛酚蓝比色法及紫外分光光度计法测定。

##### 1.4.2 植株全氮测定

从测产样品中随机选取3穴植株,测定秸秆、籽粒干物质质量,然后粉碎过2 mm筛备用。植株样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后采用凯氏定氮法测定全氮。

##### 1.4.3 测产和考种

收获前随机取样测产,测产面积为 $16.5\text{ m}^2$ ,单收单打测定籽粒产量、秸秆产量。同时每小区随机选取连续10穴,测定穴穗数、有效穗数、穗粒数、实粒数及千粒重等指标。

#### 1.5 计算方法

氮素相关指标采用下列方法计算<sup>[13]</sup>。

(1)植株氮素吸收量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=籽粒含氮量×籽粒产量+秸秆含氮量×秸秆产量

(2)土壤矿质氮累积量为土壤硝态氮累积量与土壤铵态氮累积量之和。其中:

土壤硝态氮累积量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )×土层厚度(cm)×土壤硝态氮含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )/10

土壤铵态氮累积量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )×土层厚度(cm)×土壤铵态氮含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )/10

(3)氮表观矿化量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=不施氮区地上部分吸氮量+收获后土壤残留矿质氮量-播前土壤初始矿质氮量-灌溉水氮量

(4)N素表观平衡值( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=施N量-植株N素吸收量

(5)氮素表观损失量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=(施氮量+播前土壤初始矿质氮量+灌溉水氮量+氮素表观矿化量)-(施氮区地上部分吸氮量+收获后土壤残留矿质氮量)

#### 1.6 数据处理与分析方法

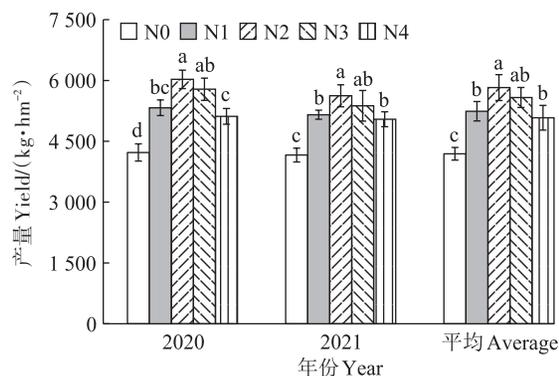
研究数据用SPSS和Excel软件进行处理与统计

分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对膜下滴灌水稻产量的影响

施氮量对水稻产量的影响结果(图2)表明,2020、2021年N2处理产量最高,分别为 $6\ 028$ 、 $5\ 623\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与N3处理差异不显著,但显著高于N1和N4处理。2020、2021年施氮处理较N0处理分别显著增产 $21.1\%\sim 42.7\%$ 、 $21.2\%\sim 35.1\%$ ,施氮可显著提高水稻产量。2020、2021年土壤基础地力产量为 $4\ 224$ 、 $4\ 161\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,氮肥处理增产量分别为 $891\sim 1\ 804$ 、 $884\sim 1\ 462\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从两年平均结果看,土壤基础地力对产量的贡献率为 $72.0\%\sim 82.5\%$ ,肥料贡献率为 $18.5\%\sim 28.0\%$ 。



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。Different small letters indicate a significant difference among treatments at the 0.05 level.

图2 施氮量对玉米产量的影响

Figure 2 Effects of N application rates on maize yield

### 2.2 施氮量对土壤矿质氮空间分布及累积的影响

图3、图4为水稻收获后不同施氮水平下,0~100 cm土层土壤矿质氮剖面分布及矿质氮累积状况。2020、2021年土壤矿质氮空间分布特征相似。矿质氮在0~10、10~20 cm耕层土壤含量最高,随土层深度的增加,矿质氮含量逐渐降低。在同一土层,矿质氮含量大小依次为 $\text{N4}>\text{N3}>\text{N2}>\text{N1}>\text{N0}$ 。土壤矿质氮年际间累积量差异不明显。矿质氮主要累积在0~40 cm土层,占0~100 cm土层累积量的 $47.0\%\sim 58.8\%$ ,表明施氮量对矿质氮累积的影响范围主要在0~40 cm土层,对40~100 cm土层影响减小。施氮量为 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮累积量为 $69\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施氮量为 $135$ 、 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮累积量平均为 $98$ 、 $104\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,两者差异不显著。在施氮量达到 $315$ 、 $405\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮累积量平均为 $104$ 、 $104\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,两者差异不显著。

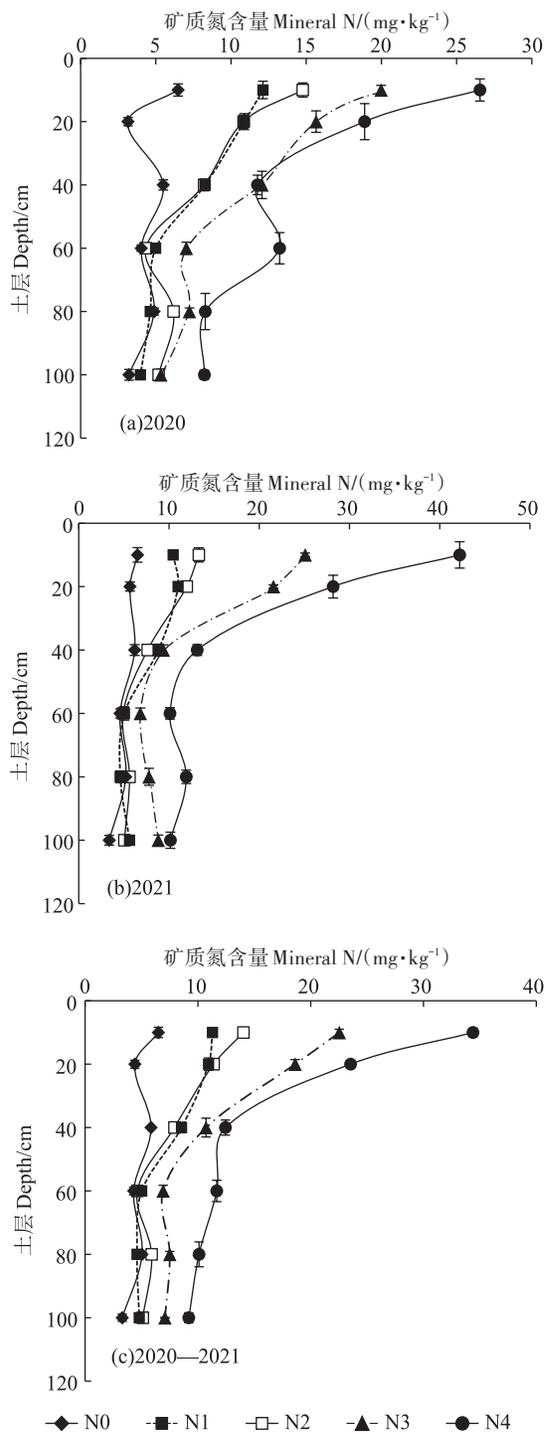


图3 不同施氮量下土壤剖面矿质氮含量

Figure 3 Effects of different N application rates on mineral N content in soil

$\text{hm}^{-2}$ 后,矿质氮累积量急剧上升至151、207  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,显著高于225  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量处理。研究说明,在合理施氮范围内,无机氮库在作物播种前和收获后的变化不大,只是在施氮量偏低或偏高的条件下,由于消耗或增加了土壤矿质氮才引起较大变化。

### 2.3 施氮量对土壤氮素平衡的影响

水稻氮素平衡结果(表3)显示,施氮是氮素总输入量的主要来源,对氮素输出量也有显著影响。在施氮量为225  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,作物吸氮量达到最大,为204  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与N3处理差异不显著,但显著高于N1、N4处理。该施氮水平下,矿质氮累积量仅比N1处理提高6.2%,但比N3和N4处理显著降低31.1%、49.7%,且氮表观损失量也显著低于N3和N4处理,降幅高达32.3%、47.1%。

从氮素输出量构成看,作物吸氮量占氮输出量的47.3%,矿质氮累积量占32.0%,氮表观损失量占20.7%。随施氮量的增加,作物吸氮量占比逐渐减小,而矿质氮累积量和表观损失量所占比例持续增加。与N2处理相比,N4处理作物吸氮量平均减少了11.7%,而矿质氮累积量增加了98.8%,表观损失量增加了89.1%。

土壤氮表观平衡值结果表明,施氮量少于135  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的条件下,氮表观平衡值低于-44  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,表示土壤氮处于亏缺状态,因而影响了水稻产量提高。施氮量为225  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮表观平衡值为21  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,土壤氮收支基本平衡,既维持了土壤氮肥力,又可获得最高的水稻产量,且氮素损失量显著低于N3、N4处理。当施氮量超过315  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮素盈余超过122  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,氮表观损失量急剧增加,矿质氮累积量比试验前增加40%以上,既提高了环境风险,又使作物产量下降。

### 2.4 水稻产量与矿质氮累积量的关系

从图5看出,水稻产量与矿质氮累积量呈二次曲线关系。分析2020、2021年及2年平均效应方程得出,在水稻产量最高时矿质氮累积量分别为134、162、148  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,分析矿质氮累积量与施氮量关系(表3)发现,不同年份矿质氮累积量对应的施氮量与N3处理施氮量(315  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )相近。

### 2.5 基于产量和环境友好的氮肥投入阈值确定

考虑到2020、2021年水稻产量、土壤矿质氮累积量及氮平衡值年际间无显著差异,故用2年平均投入和平均产出反映氮肥的施肥效应。如图6所示,水稻产量与施氮量呈极显著的二次曲线关系,效应方程为 $y_1 = -0.025x^2 + 12.433x + 4156.8$  ( $R^2 = 0.9749$ )。研究区近2年稻谷价格为3.20元 $\cdot\text{kg}^{-1}$ ,尿素为2000元 $\cdot\text{t}^{-1}$ ,折合纯氮4.31元 $\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据产量效应方程与稻谷及氮肥价格计算得出,最高产量施氮量为249  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,最佳经济效益施氮量为222  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,对应产量

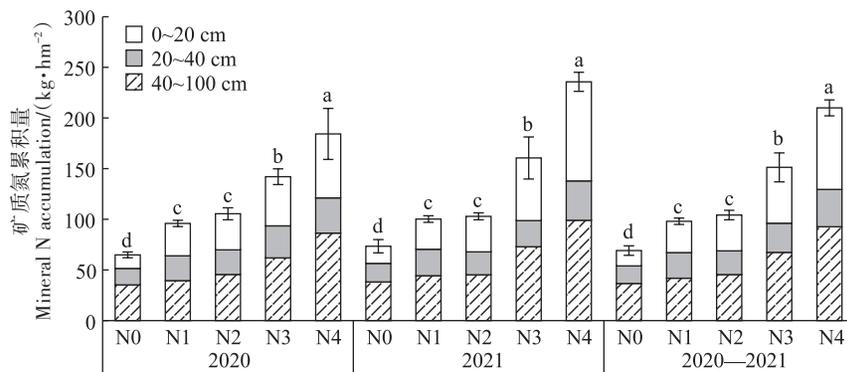


图4 不同施氮量下土壤矿质氮累积量

Figure 4 Accumulation of soil mineral nitrogen under different N application rates

表3 不同施氮量对土壤-作物系统氮素平衡的影响(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 3 Effects of different N application rates on nitrogen balance in soil-crop system(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	年份 Year	氮输入 N input					氮输出 N output			氮表观平衡 N balance
		施氮量 N application	灌溉 Irrigation	起始无机氮 Initial inorganic N	氮矿化 N mineralization	总输入量 Total input	作物吸收 Crop uptake	矿质氮累积 Mineral N accumulation	氮表观损失 Apparent N loss	
N0	2020	0	17.42	103.82	72.74	193.98e	129.13±6.39c	64.85±2.82d	0	-129.13±6.39e
	2021	0	17.42	112.17	69.12	198.71e	125.31±8.09c	73.40±6.55d	0	-125.31±8.09e
	平均	0	17.42	108.00	71.43	196.85e	127.22±7.24c	69.13±4.68d	0	-127.72±7.24e
N1	2020	135	17.42	103.82	72.74	328.98d	187.32±6.43b	95.88±3.08c	45.78±9.51d	-52.32±6.43d
	2021	135	17.42	112.17	69.12	333.71d	171.60±9.16b	100.23±3.21c	61.88±12.37d	-36.60±9.16d
	平均	135	17.42	108.00	71.43	321.35d	179.46±7.80b	98.06±3.15c	53.83±10.94d	-44.46±7.80d
N2	2020	225	17.42	103.82	72.74	418.98c	211.08±7.94a	105.43±5.96c	102.47±1.98c	13.92±7.94c
	2021	225	17.42	112.17	69.12	423.71c	196.88±7.24a	102.93±3.45c	123.90±5.79c	28.12±7.24c
	平均	225	17.42	108.00	71.43	421.35c	203.98±7.59a	104.18±4.71c	113.19±2.89c	21.02±7.59c
N3	2020	315	17.42	103.82	72.74	508.98b	195.04±9.23ab	142.05±7.82b	171.89±17.05b	119.96±9.23b
	2021	315	17.42	112.17	69.12	513.71b	190.72±10.24a	160.54±20.75b	162.45±30.99b	124.28±10.24b
	平均	315	17.42	108.00	71.43	511.35b	192.88±9.74a	151.30±14.28b	167.17±24.02b	122.12±9.74b
N4	2020	405	17.42	103.82	72.74	598.98a	180.96±6.69b	184.28±25.20a	233.74±31.88a	224.04±6.69a
	2021	405	17.42	112.17	69.12	603.71a	179.29±6.18b	229.99±9.39a	194.43±13.21a	225.71±6.18a
	平均	405	17.42	108.00	71.43	601.35a	180.13±6.44b	207.14±7.90a	214.08±14.33a	224.88±6.44a

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

Note: Different letters in a column indicate the significant differences (P<0.05).

为 5 684 kg·hm<sup>-2</sup>(最高产量的 99.7%),与最高产量差异不显著,但比最高产量对应的施氮量降低 10.8%。因此,222 kg·hm<sup>-2</sup>是水稻获得高产高收益的施氮量阈值。

100 cm 土层矿质氮累积量与施氮量呈显著指数相关关系(图 6),效应方程为  $y_2=66.352e^{0.0026x}$  ( $R^2=0.9648$ )。施氮量为 225 kg·hm<sup>-2</sup>时,矿质氮累积量为 119 kg·hm<sup>-2</sup>,与 135 kg·hm<sup>-2</sup>施氮量处理差异不显著。施氮量为 315 kg·hm<sup>-2</sup>时,矿质氮累积量为 151 kg·hm<sup>-2</sup>,显著高于 N2 处理,且氮素表观损失量急剧增

加,环境风险增大。另外,分析产量与矿质氮累积量二次曲线关系(图 5)可知,矿质氮平均值为 148 kg·hm<sup>-2</sup>时,水稻产量最高,该点对应的氮投入量为 310 kg·hm<sup>-2</sup>。以上 2 种评价方法得出的环境安全施氮量相近,可以相互印证。因此,研究确定氮素投入量的环境安全上限为 310 kg·hm<sup>-2</sup>。

氮素表观平衡值与施氮量呈显著线性正相关(图 6),效应方程为  $y_3=0.8689x-148.41$  ( $R^2=0.9768$ ),土壤氮收支平衡对应施氮量为 171 kg·hm<sup>-2</sup>。该施氮条件下,水稻产量较高,与最高产量差异不显著,但施氮量

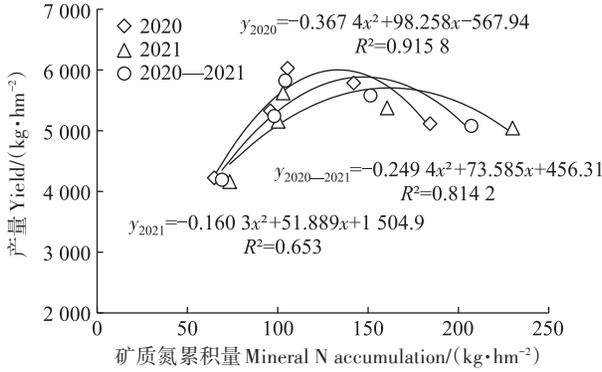


图5 2020—2021年产量与矿质氮累积量关系

Figure 5 Relationship between yield and mineral N accumulation from 2020 to 2021

比最高产量对应的施肥量显著降低31.3%,并且矿质氮累积量与135、225 kg·hm<sup>-2</sup>施氮量处理差异不显著。

将以上效应方程联立并采用内插法计算分析,施氮量为171~222 kg·hm<sup>-2</sup>时,水稻产量较高,为5 551~5 684 kg·hm<sup>-2</sup>,矿质氮累积量为104~118 kg·hm<sup>-2</sup>,氮素表现平衡值为0~44 kg·hm<sup>-2</sup>。综合分析提出,基于产量及环境安全的氮肥投入阈值为171~222 kg·hm<sup>-2</sup>。

### 3 讨论

研究表明,氮肥施用仅在一定用量范围内具有增产作用,过量施氮会导致产量增加不明显甚至减产<sup>[14-15]</sup>。这主要是由于茎蘖数在一定施氮量范围内氮肥用量的增加而增加,达到一定水平后增施氮肥不会引起茎蘖数的增加,反而有可能使之降低<sup>[16-18]</sup>,而水稻有效分蘖数、有效穗数是影响产量的主要因子。为确定水稻适宜施氮量,宫亮等<sup>[6]</sup>、侯云鹏等<sup>[7]</sup>采用最佳经济氮肥用量确定辽河三角洲地区水稻氮肥施用阈值为210~245 kg·hm<sup>-2</sup>、东北地区为193~220 kg·hm<sup>-2</sup>。本研究中水稻产量与施氮量呈二次曲线关系,通过分析效应方程得出,施氮量为222 kg·hm<sup>-2</sup>是水稻获得高产高收益的经济施氮量,比最高产量氮肥用量降低10.8%,通过边际分析得到的最佳经济施氮量受水稻和氮肥价格影响有一定的波动,因此仅可作为估算氮肥施用上限的依据。

通常认为累积在根层(一般为0~100 cm)的土壤NO<sub>3</sub>-N具有一定的生物有效性,但根层外(>100 cm)的NO<sub>3</sub>-N则很难被作物利用。Cui等<sup>[19]</sup>在华北小麦-玉米轮作区开展田间试验得出,在优化氮素管理条件下,收获后0~90 cm根层硝态氮维持在90~100 kg·hm<sup>-2</sup>(以N计)的临界范围内,既可以维持较高目标产

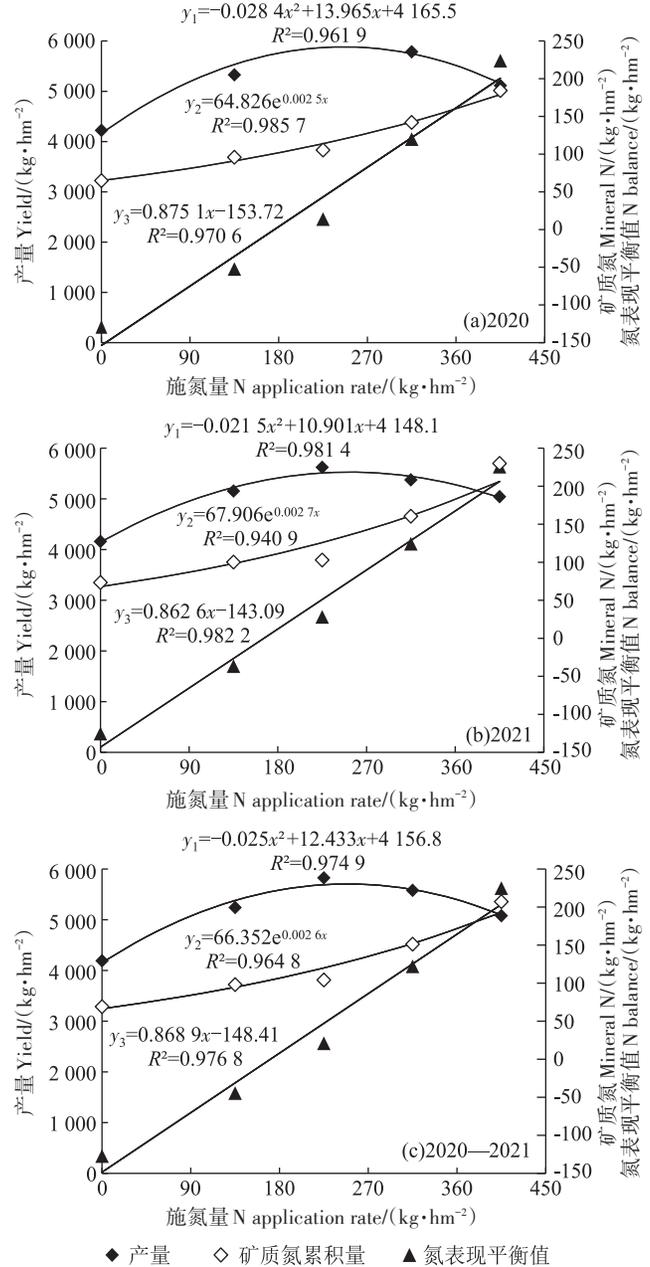


Figure 6 The relationship between N application rate and yield, mineral N accumulation and N balance from 2020 to 2021

Figure 6 2020—2021年施氮量与产量、矿质氮累积量、氮表现平衡值关系

Figure 6 The relationship between N application rate and yield, mineral N accumulation and N balance from 2020 to 2021

量,又可以降低环境风险。本研究发现膜下滴灌水稻土壤矿质氮主要累积在0~40 cm浅层土壤中,占0~100 cm土层累积量的47.0%~58.8%。施氮量在225 kg·hm<sup>-2</sup>时,水稻产量较高,矿质氮累积量为119 kg·hm<sup>-2</sup>,与水稻播种前累积量相近,但施氮量增加到315、405 kg·hm<sup>-2</sup>时,矿质氮累积量急剧增加,并且有

向下迁移的倾向,增加了环境风险。

考虑到环境风险及不可避免的氮素损失,2003年荷兰MINAS(Minerals Accounting System)整合了政策、农业经济和环境状况因素,将砂壤和黏壤耕地氮素盈余参考指标分别设为 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [20]。Ding等[10]基于水稻田间试验数据,确定基于氮挥发、增产率的土壤氮素表现盈余上限是 $44 \sim 91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $53 \sim 112 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究中,氮肥用量与土壤氮素盈余呈线性正相关关系( $R^2=0.9664$ )。当施氮量为 $171 \sim 222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,水稻产量较高,收获后矿质氮累积量与播前相近,氮收支基本平衡。该施氮范围内氮素盈余为 $0 \sim 44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,低于以往的研究结果,这可能是由于输入氮中仅考虑了氮肥输入及灌溉水氮素输入,未考虑大气沉降及种子带入等来源。由于氮素盈余指标反映的是输入与输出的差值,随生产能力提升,输入氮也需要相应增加。

土壤氮肥投入阈值的确定要依据供氮量、植株吸氮量和土壤氮库三者间的平衡关系。本研究结果表明,在施氮量 $171 \sim 222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,水稻产量为 $5551 \sim 5684 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , $100 \text{ cm}$ 土壤矿质氮累积量较试验前初始量增加 $5 \sim 10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,氮表现平衡值为 $0 \sim 44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施氮量低于 $171 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮素盈余为负值,长期持续会造成土壤肥力下降,影响水稻的稳产高产。施氮量超过 $222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,经济效益不升反降,并且 $100 \text{ cm}$ 土壤矿质氮累积量大幅提升,对地下水环境造成威胁。因此,依据2020、2021年两年平均产量、矿质氮累积量及土壤氮素平衡值,确定河西绿洲灌区膜下滴灌水稻的氮肥投入阈值为 $171 \sim 222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 4 结论

(1)适宜的氮肥用量可显著提高水稻产量,土壤基础地力对水稻产量形成的贡献率在70%以上。基于产量效应曲线与稻谷及氮肥价格,研究提出河西绿洲灌区膜下滴灌水稻的最佳经济施氮量为 $222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,对应产量为最高产量的99.7%,但氮肥用量比最高产量施氮量降低10.8%。

(2)施氮量为 $171 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮素盈余为0,土壤氮素收支达到平衡。施氮量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层矿质氮累积量 $104 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与播前初始量相近。施氮量达到 $310 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮累积量急剧增加。考虑土壤氮素平衡及矿质氮累积量指标,该地区施氮安全范围为 $171 \sim 310 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)综合分析产量、矿质氮累积量、土壤氮盈余与施氮量的关系,研究确定河西绿洲灌区膜下滴灌水稻氮肥投入阈值为 $171 \sim 222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。该施氮量条件下,水稻产量和经济收益高,土壤氮素收支平衡,且土壤矿质氮累积量与播前相近,环境风险较低。

## 参考文献:

- [1] 银永安. 膜下滴灌水稻水肥一体化技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2019:183-193. YIN Y A. Integrated technology of water and fertilizer for rice under film drip irrigation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2019:183-193.
- [2] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] QIU J L, SHEN Z Y, CHEN L, et al. Quantifying effects of conservation practices on non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191: 1-21.
- [4] BOURAOUI F, GRIZZETTI B. Modelling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468: 1267-1277.
- [5] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296. JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 281-296.
- [6] 宫亮, 曲航, 刘艳, 等. 辽河三角洲地区高产水稻氮肥投入阈值及利用率[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 23-28. GONG L, QU H, LIU Y, et al. Nitrogen threshold and nitrogen use efficiency of high yield rice in the Liaohe River Delta[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 23-28.
- [7] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845. HOU Y P, HAN L G, KONG L L, et al. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 836-845.
- [8] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区水稻氮肥投入阈值研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 462-470. SHI Z S, XU Y B, LEI B K, et al. Threshold of nitrogen application in paddy soils in the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(2): 462-470.
- [9] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐阈值的方法研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 179-185. LI B, GONG L, QU H, et al. Optimal nitrogen fertilizer application rate for single-cropping paddy rice in Liaohe Delta[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 179-185.
- [10] DING W C, XU X P, ZHANG J J, et al. Nitrogen balance acts an indicator for estimating thresholds of nitrogen input in rice paddies of China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 118091.
- [11] 张亦涛. 基于农学效应和环境效益的华北平原主要粮食作物合理施氮量确定方法研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2018: 51-54. ZHANG Y T. Study on determination method of reasonable nitrogen

- application of major grain crops in North China Plain based on agroeconomic effect and environmental benefit[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018:51-54.
- [12] 种业商务网. 撑起中国玉米制种“半壁江山”的河西走廊“前世今生”[EB/OL]. (2022-12-17) [2023-01-15]. <https://m.163.com/dy/article/HOQGTMP05325BXL.html>. Seed Business Network. Hexi Corridor “past and present life” supporting “half of China’s corn seed production”[EB/OL]. (2022-12-17) [2023-01-15]. <https://m.163.com/dy/article/HOQGTMP05325BXL.html>.
- [13] 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): 1361-1368. JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [14] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122-130. LI P C, DONG H L, LIU A Z, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 122-130.
- [15] 张鹏飞, 张翼飞, 王玉凤, 等. 膜下滴灌氮肥分期追施量对玉米氮效率及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 915-926. ZHANG P F, ZHANG Y F, WANG Y F, et al. Effects of nitrogen topdressing amount at various stages on nitrogen efficiency of maize and soil nitrogen balance under mulched drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 915-926.
- [16] 朱齐超, 危常州, 李美宁, 等. 氮肥运筹对膜下滴灌水稻生长和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(4): 440-446. ZHU Q C, WEI C Z, LI M N, et al. Effects of nitrogen management on growth and grain yield of rice under drip irrigation with plastic film mulching[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(4): 440-446.
- [17] 田广丽, 周毅, 孙博, 等. 氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 896-904. TIAN G L, ZHOU Y, SUN B, et al. Effects of nitrogen and transplanting density on the mechanisms of tillering dynamic of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 896-904.
- [18] 俞双恩, 张梦婷, 陈凯文, 等. 灌排模式和施氮水平对水稻株高与茎蘖生长动态的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 210-218. YU S E, ZHANG M T, CHEN K W, et al. Effects of irrigation and drainage modes and nitrogen levels on rice plant height and tiller growth dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 210-218.
- [19] CUI Z, CHEN X, ZHANG F. Development of regional nitrogen rate guidelines for intensive cropping systems in China[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(5): 1411-1416.
- [20] OENEMA O, KROS H, DE VRIES W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2): 3-16.