



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

减氮增密提高寒地水稻产量与氮素吸收利用

尹彩侠, 刘志全, 孔丽丽, 李前, 张磊, 侯云鹏, 郝彩环

引用本文:

尹彩侠, 刘志全, 孔丽丽, 李前, 张磊, 侯云鹏, 郝彩环. 减氮增密提高寒地水稻产量与氮素吸收利用[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1124–1132.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 夏颖, 张志毅, 程子珍, 吴茂前, 高红兵, 毛波, 孔祥琼

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 858–866 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0171>

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

农业资源与环境学报. 2015(6): 559–564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对——以宁夏引黄灌区为例

张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯

农业资源与环境学报. 2015(2): 175–184 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

尹彩侠, 刘志全, 孔丽丽, 等. 减氮增密提高寒地水稻产量与氮素吸收利用[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1124–1132.

YIN C X, LIU Z Q, KONG L L, et al. Reducing nitrogen and increasing rice transplanting density in a cold region of China can improve rice yield, nitrogen absorption, and nitrogen utilization[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1124–1132.



开放科学 OSID

减氮增密提高寒地水稻产量与氮素吸收利用

尹彩侠¹, 刘志全¹, 孔丽丽¹, 李前¹, 张磊¹, 侯云鹏^{1*}, 郝彩环^{2*}

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部东北植物营养与农业环境重点实验室, 长春 130033; 2. 吉林省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 长春 130033)

摘要:针对水稻氮肥过量施用和移栽密度过低的问题,研究减氮增密对水稻产量与氮素利用效率的影响,以期为东北寒区水稻生产提供科学依据。于2019—2020年在吉林省前郭县红光农场进行田间试验,共设4个处理,分别为不施氮肥+移栽密度 1.80×10^5 穴 $\cdot$ hm⁻²(N0)、传统施氮(氮肥用量 $235 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)+移栽密度 1.80×10^5 穴 $\cdot$ hm⁻²(FP)、较传统施氮减量20%(氮肥用量 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)+移栽密度 2.40×10^5 穴 $\cdot$ hm⁻²(SNHD1)、较传统施氮减量20%(氮肥用量 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)+移栽密度 3.00×10^5 穴 $\cdot$ hm⁻²(SNHD2)。对水稻产量、地上部干物质积累与分配、氮素积累与分配以及氮素利用效率进行测定分析。结果表明:SNHD1和SNHD2处理相较于FP处理显著增加了水稻有效穗数,提高了水稻产量,其中SNHD1处理水稻产量增幅达显著水平,两年平均增幅为7.8%。减氮增密提高了水稻各生育时期干物质积累量和氮素积累量,以及水稻齐穗后干物质积累量与氮素积累量占总生育期积累量的比例,且均为SNHD1处理最高。SNHD1和SNHD2处理较FP处理显著提高了氮素吸收率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率,且均为SNHD1处理最高,较FP处理两年平均分别提高0.3、6.2、14.4 kg $\cdot$ kg⁻¹和16.4个百分点。氮素表观平衡结果显示,FP、SNHD1和SNHD2处理两年平均表现为盈余,其中SNHD1处理氮盈余量最低。水稻齐穗前、后的干物质积累量和氮素积累量与水稻产量均呈显著正相关,其中水稻齐穗后干物质积累量和氮素积累量的相关性高于齐穗前。综上所述,合理的氮肥用量与移栽密度提高了水稻整个生育期干物质积累量和氮素积累量,并提高齐穗后积累比例,进而提高水稻产量和氮素利用效率,综合水稻产量、氮素吸收利用等因素,东北寒地稻区适宜的水稻栽培模式为氮肥用量 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、移栽密度 2.40×10^5 穴 $\cdot$ hm⁻²。

关键词:水稻;移栽密度;产量;氮素吸收;氮素利用

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1124-09

doi: 10.13254/j.jare.2022.0110

Reducing nitrogen and increasing rice transplanting density in a cold region of China can improve rice yield, nitrogen absorption, and nitrogen utilization

YIN Caixia¹, LIU Zhiquan¹, KONG Lili¹, LI Qian¹, ZHANG Lei¹, HOU Yunpeng^{1*}, HAO Caihuan^{2*}

(1. Agricultural Resources and Environment Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033, China; 2. Institute of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To address the issues related to the excessive use of nitrogen fertilizer and the low transplanting density in rice, the effects of reduced or increased nitrogen density on rice yield and nitrogen use efficiency were investigated, so as to provide a scientific basis for optimizing the production of rice in the cold region of northeast China. A field experiment was conducted during 2019 to 2020 to evaluate the effects of four cultivation management strategies on rice yield, shoot dry matter, nitrogen (N) accumulation and distribution, and N use efficiency at Hongguang farm, Qianqiao County, Jilin Province. The strategies were as follows: no N fertilizer and transplanting density of

收稿日期:2022-03-09 录用日期:2022-04-28

作者简介:尹彩侠(1978—),女,吉林公主岭人,硕士,副研究员,从事植物营养与施肥研究。E-mail:yincaixia11@163.com

*通信作者:侯云鹏 E-mail:excdfhvfa@163.com; 郝彩环 E-mail:haocaihuan@126.com

基金项目:吉林省重点研发项目(20210202013NC)

Project supported: Jilin Province Key Research and Development Project(20210202013NC)

<http://www.aed.org.cn>

1.80×10⁵ hole·hm⁻²(N0), application of 235 kg·hm⁻² N and transplanting density of 1.80×10⁵ hole·hm⁻²(FP), application of 188 kg·hm⁻² N and transplanting density of 2.40×10⁵ hole·hm⁻²(SNHD1), and application of 188 kg·hm⁻² N and transplanting density of 3.00×10⁵ hole·hm⁻²(SNHD2). Compared with FP, SNHD1 and SNHD2 treatment led to significant increase in the number of effective panicles and the overall rice yield. In particular, SNHD1 led to an increase in yield by 7.8% on average over two years. Accumulation of dry matter and N in each growth stage of rice including after full heading were promoted by N reduction and transplanting densification. SNHD1 led to better results than SNHD2. Nonetheless, absorption efficiency, agronomic use efficiency, partial productivity, and nitrogen fertilizer use efficiency of N all increased significantly in both cases compared with the FP treatment. For SNHD1, in particular, increases by 0.3, 6.2, 14.4 kg·kg⁻¹, and 16.4 percent points were evaluated, respectively. FP, SNHD1, and SNHD2 all led to a surplus in the apparent N balance in both years, with the lowest value evaluated for SNHD1. A significant positive correlation among dry matter and N accumulation before and after full heading and grain yield was observed. Moreover, the correlation between dry matter and N accumulation after full heading was higher than that before full heading. The use of reasonable N application rate and transplanting density led to an increase in dry matter and N accumulations during the entire growth period of rice, as well as to an increase in the accumulation ratio after full heading, enhanced yield, and N use efficiency. Overall consideration of rice yield, N uptake and N utilization, the use of 188 kg·hm⁻² of N fertilizer and a 2.40×10⁵ hole·hm⁻² transplanting density represent the optimal cultivation conditions in the cold region of northeast China.

Keywords: rice; transplanting density; yield; nitrogen absorption; nitrogen utilization

水稻是我国主要的粮食作物,其种植面积约为3 007.6万hm²,占粮食种植面积的25.8%^[1],水稻作为60%人口的口粮,对国家的生存和发展具有重要作用。随着我国人口数量持续增加和耕地资源日益紧张,水稻产量必须逐年提高才能满足我国对稻米的需求,并且面对农业生产中日趋严峻的环境问题,更需要提高养分资源利用效率,减少化肥对环境的影响。

适宜增加移栽密度、加强养分管理是实现水稻高产及养分资源高效利用的关键^[2-3],大量研究表明,移栽密度对水稻的分蘖、群体光合能力和产量均有显著影响^[4-6],科学的群体密度可以提高光合利用效率,发挥群体的增产潜力^[7];移栽密度过大,会增加群体内部个体的竞争,导致个体产量下降,从而增加病虫害和倒伏风险,造成不增产,甚至减产的后果^[8-9]。氮是影响水稻生长发育的主要营养元素,参与碳氮代谢、蛋白质合成,更是植物激素、氨基酸和叶绿体的重要组成成分^[10-11],施用氮肥可以促进水稻根系生长^[12],增加冠层面积,提高光合作用^[11],从而增加水稻有效穗数、穗粒数和籽粒质量,提高水稻产量^[12]。但若氮素供应过量,不仅不会提高水稻产量^[13],而且会造成氮素资源浪费,并产生环境风险^[14-15]。

吉林省是我国粮食主产省,水稻作为该区域第二大粮食作物,产量较高,稻米品质优良,水稻产业在保障省域农业发展及农民增收中发挥了重要作用^[16]。但是吉林省在水稻栽培中存在着施肥过量和养分不平衡等问题,特别是氮肥用量远高于当前产量水平对氮素的需求量(213~270 kg·hm⁻²,平均235 kg·hm⁻²)。

在水稻移栽时,农户普遍试图通过增施氮肥来增强水稻的分蘖能力,而忽略了通过提高移栽密度调控水稻分蘖的措施,致使移栽密度过低,当地农户的移栽密度在1.60×10⁵~2.00×10⁵穴·hm⁻²,平均密度仅为1.80×10⁵穴·hm⁻²。因此,研究水稻合理的施氮量与适宜的移栽密度,对提高水稻产量与氮肥利用效率具有重要意义。前人研究中虽然已较多关注移栽密度与氮肥用量对水稻产量、光合特性、根系生长和养分吸收的影响,但这些研究多在南方稻区开展,而针对东北寒地减施氮肥结合密度变化对水稻产量和氮素吸收利用的研究相对较少。因此,本研究探讨在吉林省当地传统栽培模式下,减施氮肥20%的同时增加水稻移栽密度对水稻产量、干物质积累与分配特征、氮素吸收利用的影响,为寒地水稻合理密植与减氮增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于2019—2020年在吉林省前郭县白依拉嘎乡红光农场村(123°08′32″E,44°38′16″N)开展田间试验,该区域位于吉林省中西部,年均日照时数为2 879 h,年积温约为3 100℃,无霜期130~140 d,2019—2020年水稻生育期气象数据(平均温度、降雨量)通过试验点气象站自动获取(图1)。试验区为水稻连作区,土壤类型为草甸土,2019年和2020年0~20 cm土壤的基础养分状况:水解性氮135.2 mg·kg⁻¹和143.6 mg·kg⁻¹,有效磷29.4 mg·kg⁻¹和30.1 mg·kg⁻¹,速效钾113.5 mg·kg⁻¹和115.7 mg·kg⁻¹,有机质29.1 g·kg⁻¹和

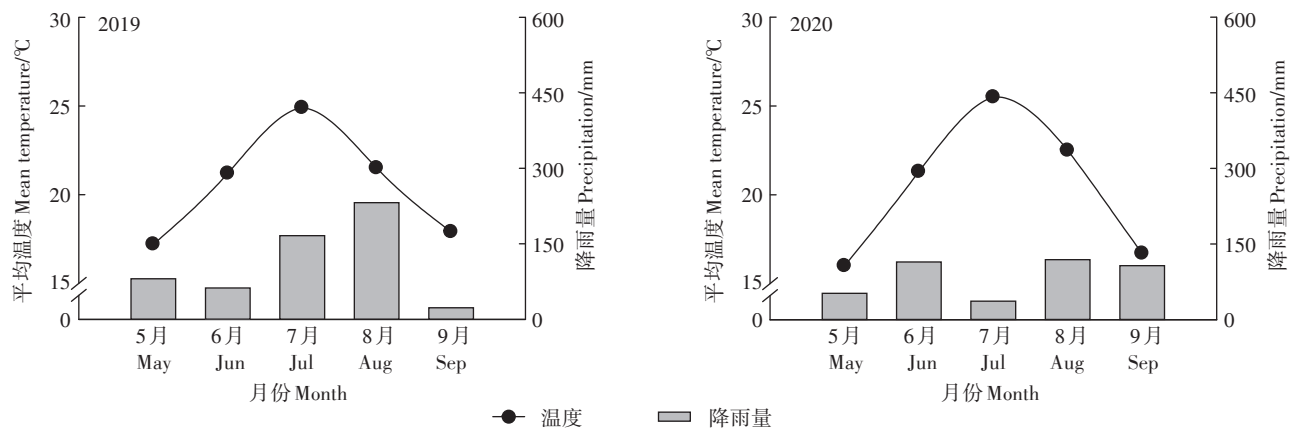


图1 水稻生育期平均气温及降雨量

Figure 1 Average temperature and rainfall during rice growth period

29.4 g·kg⁻¹, pH 为 7.2 和 7.1。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理:①不施氮肥,移栽密度为 1.80×10^5 穴·hm⁻²(N0);②当地传统施氮,氮肥用量 235 kg·hm⁻²,移栽密度为 1.80×10^5 穴·hm⁻²(FP);③氮肥较当地传统施氮减量 20%,氮肥用量 188 kg·hm⁻²,移栽密度为 2.40×10^5 穴·hm⁻²(SNHD1);④氮肥较当地传统施氮减量 20%,氮肥用量 188 kg·hm⁻²,移栽密度为 3.00×10^5 穴·hm⁻²(SNHD2)。各处理的磷肥和钾肥用量相同,分别为 90 kg·hm⁻² 和 110 kg·hm⁻²。试验小区所用的氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。氮肥分 4 次施入(基肥:返青:分蘖:抽穗=30%:10%:45%:15%);磷肥作为基肥一次性施入;钾肥分 2 次施入(基肥:穗肥=70%:30%)。其中基肥施用方法为在水稻移栽前将肥料施于地面,通过旋耕机作业将肥料翻埋于地下 10~15 cm;追肥采用抛撒方式施用。供试水稻品种为吉粳 302,水稻移栽日期分别为 2019 年 5 月 16 日和 2020 年 5 月 18 日,收获日期分别为 9 月 27 日和 9 月 30 日。小区面积 40 m²,重复 3 次,随机排列。各小区间用 45 cm 高的塑料挡板隔断,塑料挡板埋地深度 15 cm,防止各小区间串水串肥。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 水稻干物质积累与植株全氮测定

水稻在返青、分蘖、齐穗、灌浆和成熟 5 个时期分别采集植株样品,每个试验小区采集有代表性的水稻 3 穴(返青期 20 穴),于 105 °C 烘干箱中杀青 30 min,再用 80 °C 烘干至质量恒定,测定干物质质量,再将烘干后的样品粉碎,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,凯氏定氮法测定植株全氮含量。具体计算公式^[13,17]如下:

氮肥农学利用率(AEN, kg·kg⁻¹)=(施氮处理籽粒产量-不施氮处理籽粒产量)/施氮量 (1)

氮肥吸收利用率(REN, %)=(施氮处理地上部总吸氮量-不施氮处理地上部总吸氮量)/施氮量×100 (2)

氮肥偏生产力(PFPN, kg·kg⁻¹)=施氮处理产量/施氮量 (3)

氮素吸收率(UPEN, kg·kg⁻¹)=植株地上部氮素积累量/施氮量 (4)

土壤氮素表观盈亏量(kg·hm⁻²)=投入氮素总量-作物吸收氮素总量 (5)

氮素盈余率(%)=(投入氮素总量-作物吸收氮素总量)/作物吸收氮素总量×100 (6)

1.3.2 产量及产量构成

成熟期在每个试验小区内收获 5 m² 水稻进行测产,按 14.5% 的含水量计算水稻产量。每个试验小区选取 10 穴水稻用于调查有效穗数、穗粒数、实粒数与千粒重。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 整理汇总,年份与处理的主效应及两因素间交互作用应用 SPSS 19.0 软件一般线性模型(GLM)多因素方差分析检验,处理间差异采用 Duncan 多重比较法检验,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。用 Sigma Plot 14.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻产量与构成因素

表 1 结果表明,不同处理对水稻产量、有效穗数、每穗粒数、千粒重和结实率影响达显著水平,年份对水稻产量和每穗粒数影响显著,但有效穗数、千粒重

表1 不同处理水稻产量与产量构成因素

Table 1 Rice yield and its components under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	有效穗数 Panicles/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed-setting rate/%	千粒重 1 000-grain weight/g
2019	N0	7 178±222.7c	345.9±7.7d	95.0±4.2b	94.5±3.3a	23.6±1.2a
	FP	9 472±378.5b	375.1±8.5c	116.2±6.1a	91.0±4.1b	22.2±0.8b
	SNHD1	10 189±241.4a	398.5±6.2b	122.3±5.5a	94.1±3.6a	23.5±1.1a
	SNHD2	9 794±378.6ab	415.2±5.3a	115.4±7.5a	90.9±3.9b	21.2±1.1c
2020	N0	8 271±293.4c	353.8±5.6c	101.3±3.6b	94.1±2.8a	24.0±0.9a
	FP	9 968±368.5b	386.8±8.2b	120.0±5.2a	92.2±3.2ab	23.0±0.7ab
	SNHD1	10 765±283.1a	406.3±7.1b	122.5±6.9a	93.5±4.3a	23.9±1.0a
	SNHD2	10 340±204.7ab	427.1±7.5a	117.8±6.7a	90.9±4.5b	21.9±1.2b
方差分析(ANOVA)						
年份 Year(Y)		**	NS	**	NS	NS
处理 Treatment(T)		**	**	**	**	**
年份×处理(Y×T)		NS	NS	NS	NS	NS

注: NS表示差异不显著, **表示差异极显著($P<0.01$); 同列数值后不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: NS indicates no significance, ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$); Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments in the same year ($P<0.05$). The same below.

和结实率未达到显著水平, 年份和处理间的交互作用未达显著水平。施氮处理的水稻产量较不施氮处理均有显著提高。SNHD1和SNHD2处理水稻产量均高于FP处理, 两年平均增幅分别为7.8%和3.6%, 造成产量差异的主要原因是SNHD1和SNHD2处理有效穗数均高于FP处理, 两年平均增幅分别为5.6%和10.6%, 其中SNHD2处理的增幅达显著水平, 虽然SNHD2有效穗数较SNHD1平均提高4.7%, 但是其穗粒数、结实率和千粒重均低于SNHD1处理, 降幅分别为5.0%、3.2%和9.7%, 使其产量低于SNHD1处理。

2.2 不同处理水稻干物质积累特征

2.2.1 水稻干物质积累动态

各处理水稻的地上部干物质积累量随着生育进程的延续呈增加趋势(图2)。与N0处理相比, 施氮各处理在不同生育时期的干物质积累量增幅均达显著水平。在不同施氮处理中, SNHD1和SNHD2处理在返青期、分蘖期、齐穗期、灌浆期和成熟期的两年平均干物质质量较FP处理分别提高4.5%、21.6%、8.3%、10.8%、13.1%和3.6%、11.2%、4.3%、6.1%、6.1%。其中SNHD1处理水稻各生育时期干物质积累量与FP处理差异达显著水平。

2.2.2 水稻齐穗前后干物质分配比例

图3为各处理水稻齐穗前和齐穗后的干物质质量占整个植株干物质总量的比例。相较于N0处理, 施

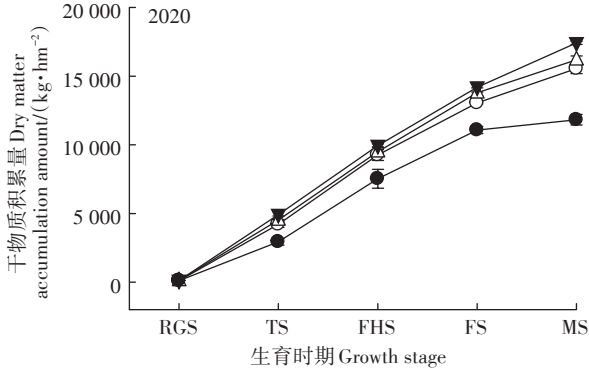
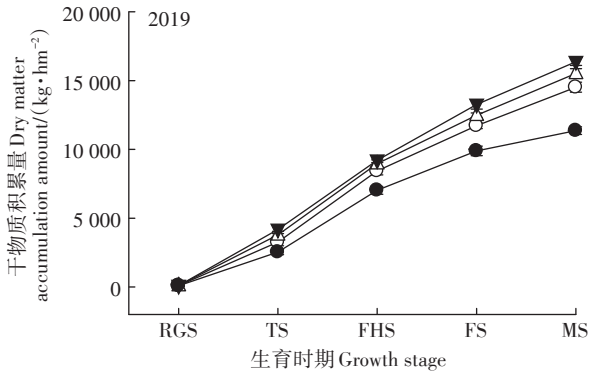
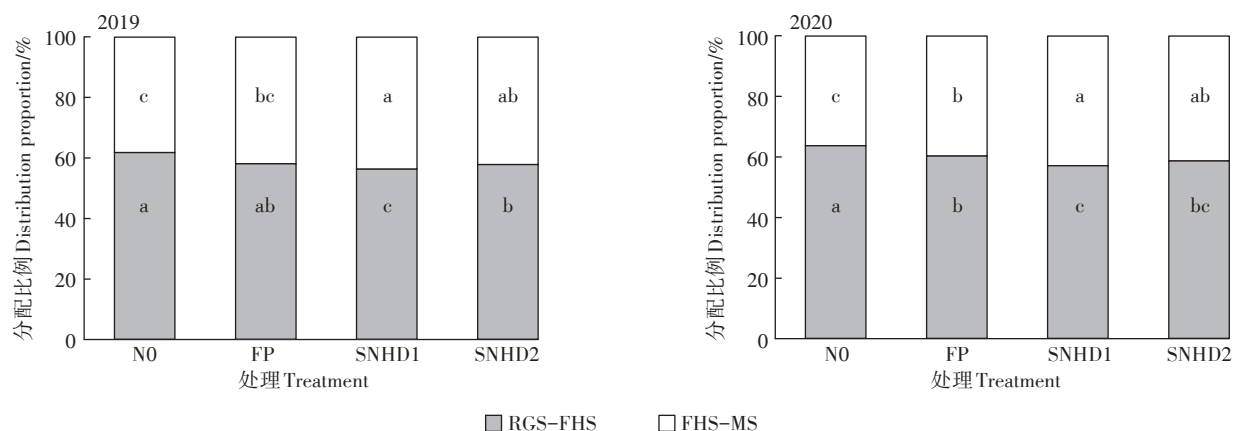


图2 不同处理水稻各生育时期地上部干物质积累量动态变化
Figure 2 Dynamic change of shoot dry matter accumulation amount at each growth stage of rice under different treatments



RGS-FHS表示返青期至齐穗期,FHS-MS表示齐穗期至成熟期。不同小写字母表示同一生长时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
RGS-FHS represents the period from green to full heading, and FHS-MS represents the period from full heading to maturity. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments in the same growing period ($P<0.05$). The same below

图3 不同处理水稻齐穗前后干物质分配比例

Figure 3 Distribution proportion of dry matter before and after full heading of rice under different treatments

氮各处理水稻齐穗后的干物质分配比例均有所提高;在不同施氮处理中,SNHD1处理水稻齐穗后的干物质分配比例较FP处理两年平均提高6.1%,达显著水平,SNHD2处理水稻齐穗后的干物质分配比例较FP处理两年平均提高2.5%。

2.3 不同处理水稻氮素积累特征

2.3.1 水稻各生育期氮素积累动态

不同处理水稻各生育期氮素积累动态与干物质积累动态趋势相一致(图4),除返青期外,SNHD1和SNHD2处理的水稻氮素积累量在整个生育期均显著高于FP处理,水稻在分蘖期、齐穗期、灌浆期和成熟期,SNHD1处理两年平均氮素积累量较FP处理增加9.1%、15.7%、12.5%和12.4%,SNHD2处理两年平均氮素积累量较FP处理增加6.3%、6.1%、9.9%和7.4%。

2.3.2 水稻齐穗前后氮素分配比例

不同处理水稻齐穗前和齐穗后的氮素积累占整个植株氮素积累结果(图5)表明,与N0处理相比,施氮各处理水稻齐穗后的氮素分配比例均显著提高;在不同施氮处理中,SNHD1和SNHD2处理水稻齐穗后氮素分配比例均高于FP处理,两年平均提高15.2%和6.7%,其中SNHD1处理齐穗后氮素分配比例与FP处理差异达显著水平。

2.4 水稻产量与齐穗前后的干物质积累量和氮素积累量的相关性

水稻齐穗前、齐穗后的地上部干物质质量和氮素积累量与产量的回归分析(图6)表明,水稻齐穗前、齐穗后的干物质积累量和氮素积累量与产量间均呈显著的正相关,但水稻齐穗后干物质积累和氮素积累量线性方程的相关系数($R^2=0.6657$ 、 $R^2=0.7735$, $P<0.01$)高于齐穗前($R^2=0.4803$ 、 $R^2=0.7381$, $P<0.01$),说

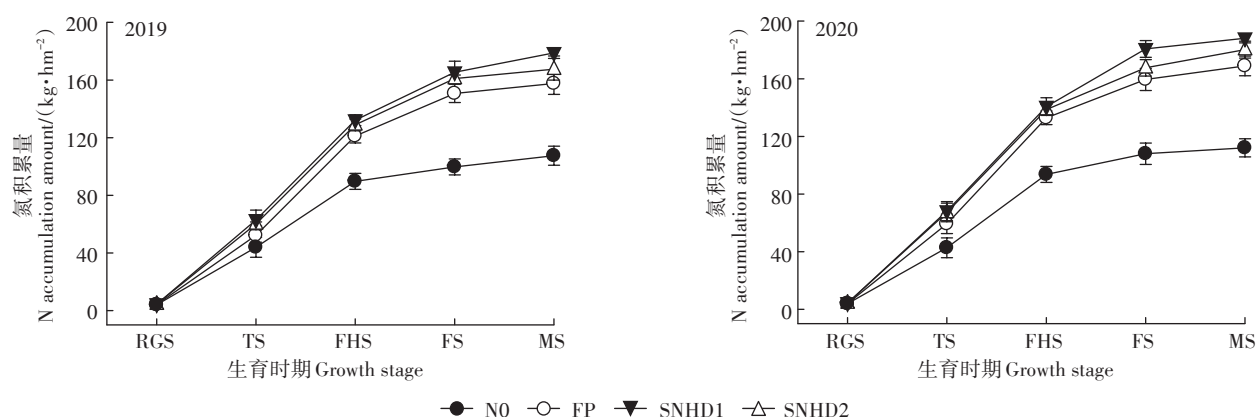


图4 不同处理水稻各生育时期地上部氮积累量动态变化

Figure 4 Dynamic changes of aboveground nitrogen accumulation amount of rice under different treatments at each growth stage

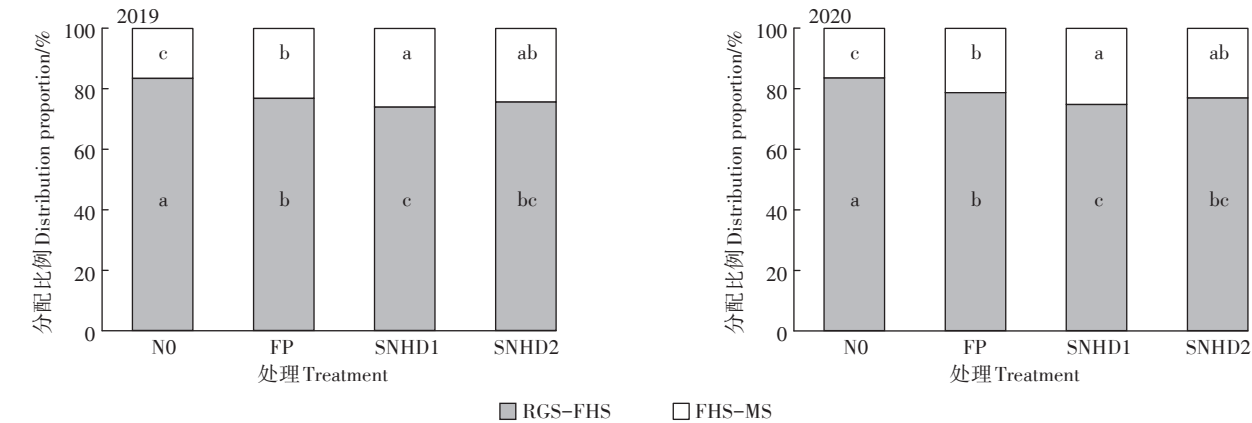


图5 不同处理水稻齐穗前后氮素积累分配比例

Figure 5 Distribution proportion of nitrogen accumulation before and after full heading of rice under different treatments

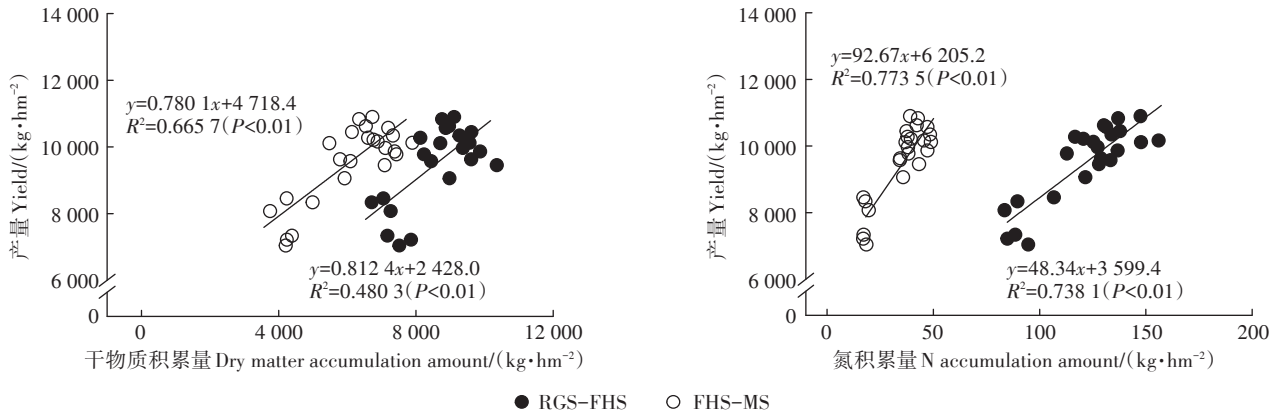


图6 水稻产量与水稻齐穗前后干物质质量和氮积累量的相关性

Figure 6 Correlation of rice yield with dry matter mass and nitrogen accumulation before and after full heading

明水稻齐穗后的干物质积累量和氮素积累量与水稻产量密切相关。

2.5 不同处理水稻氮肥利用效率

表2结果表明,不同处理对水稻氮素吸收率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥吸收利用率影响显著,而不同年份间仅氮肥偏生产力差异显著,且年份与处理间的交互作用均未达显著水平。与FP处理相比,SNHD1和SNHD2处理的水稻氮素吸收率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率均显著提高,其中两年平均氮素吸收率分别提高0.3 kg·kg⁻¹和0.3 kg·kg⁻¹,氮肥农学利用率分别提高6.2 kg·kg⁻¹和4.0 kg·kg⁻¹,氮肥偏生产力分别提高14.4 kg·kg⁻¹和12.2 kg·kg⁻¹,氮肥吸收利用率分别提高16.4个百分点和12.1个百分点。

2.6 不同处理水稻氮素表观收支平衡

表3结果表明,不同处理和年份对作物氮素吸收量、表观平衡和盈余率均影响显著,且年际与处理间

表2 不同处理肥料利用效率

Table 2 Fertilizer utilization efficiency of different treatments

年份 Year	处理 Treatment	氮素吸收率 NUPE/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学 利用率AEN/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生 产力PPFN/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥吸收 利用率REN/%
2019	FP	0.7±0.02b	9.8±2.3c	40.3±1.6c	21.3±5.3c
	SNHD1	1.0±0.01a	16.0±1.7a	54.2±1.7a	37.9±5.1a
	SNHD2	1.0±0.02a	13.9±1.8b	52.1±1.2b	33.5±5.5b
2020	FP	0.7±0.04c	7.2±2.4b	42.4±1.5b	24.2±5.1c
	SNHD1	1.0±0.03a	13.3±1.4a	57.3±1.5a	40.4±4.3a
	SNHD2	0.9±0.01b	11.0±1.8a	55.0±1.1a	36.2±4.5b

方差分析(ANOVA)

年份 Year(Y)	NS	NS	**	NS
处理 Treatment(T)	**	**	**	**
年份×处理(Y×T)	NS	NS	NS	NS

的交互作用均达显著水平。在不同施肥模式下,由于FP处理氮投入量远高于水稻氮素吸收量,导致两年平均氮素盈余率高达44.1%;而SNHD1和SNHD2处理两

表3 不同处理氮素表观平衡

Table 3 N apparent balance under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	N投入量 N input/ (kg·hm ⁻²)	氮素吸收量 N uptake/ (kg·hm ⁻²)	表观平衡 Apparent balance/ (kg·hm ⁻²)	盈余率 Surplus rate/%
2019	FP	235	157.6±6.6c	77.4±6.6a	49.1±5.2a
	SNHD1	188	178.8±2.2a	9.4±2.1c	5.3±1.2c
	SNHD2	188	170.5±6.6b	17.5±4.4b	10.3±2.3b
2020	FP	235	168.9±6.3c	66.1±6.2a	39.1±5.0a
	SNHD1	188	188.1±3.2a	-0.1±2.1c	-0.1±1.5c
	SNHD2	188	180.2±6.8b	7.8±2.4b	4.3±1.1b

方差分析(ANOVA)

年份 Year(Y)	*	*	*
处理 Treatment(T)	**	**	**
年份×处理(Y×T)	*	*	*

年平均氮素盈余率分别为2.6%和7.3%,且SNHD1处理的氮投入量与作物氮素吸收相近,氮素盈余率最低。由此可见,SNHD1处理的氮肥投入量和移栽密度较为适宜,可以大幅降低氮素盈余。

3 讨论

3.1 减氮增密对水稻产量与构成因素的影响

单位面积有效穗数、穗粒数、结实率及千粒重是产量构成的主要因素^[18],有研究^[19-21]表明,有效穗数是影响水稻产量的主要因素,孙长占等^[22]的研究指出,提高水稻的有效穗数和穗粒数是实现水稻高产的关键。本研究结果表明,与FP处理相比,SNHD1处理将氮肥用量减少20%,同时将水稻移栽密度提高至 2.40×10^5 穴·hm⁻²,水稻产量显著提高,其原因在于FP处理的水稻移栽密度过低,导致群体生长不足,影响水稻成穗率,同时氮素的过量供应导致水稻生长过旺^[14],无效分蘖增多^[23],并且水稻后期贪青晚熟,导致水稻有效穗数、结实率降低,影响水稻产量。而SNHD1处理由于移栽密度和氮肥用量较为适宜,个体与群体协调发展,在增加有效穗数的同时,稳定了结实率,提高了千粒重,从而使水稻产量得到了显著提高;SNHD2处理将移栽密度提高至 3.00×10^5 穴·hm⁻²,使水稻群体生长量过大,遮蔽严重。虽然成穗数较多,但由于个体生长受抑制^[24],群体质量下降,易产生较多的小分蘖,穗型较小,导致穗粒数、结实率和千粒重均有所下降,使水稻产量提高不明显。可见,在水稻生产中,需要通过合理移栽密度与适宜施氮量的协同调控,增加有效分蘖数,避免过多的无效分蘖争水争肥,形成壮个体和高质量的水稻群体,获得合

理的叶面积指数,提高光合物质生产效率,增加干物质质量,促进水稻高产。

3.2 减氮增密对水稻物质生产与氮素积累的影响

干物质与养分积累作为水稻产量形成的基础^[25-26],受移栽密度与氮肥用量影响显著。水稻产量形成的过程就是物质生产与再分配的过程。有研究^[19,27]指出,水稻籽粒产量的90%来自花后光合物质的积累,水稻产量随着水稻中后期干物质和氮素净积累量的增加而提高^[27-28]。然而拔节至齐穗阶段是水稻营养生长的重要时期,该阶段氮素与物质积累直接影响穗分化质量^[29]。因此,提高水稻生育后期的干物质与氮素积累比例,对水稻产量的提高至关重要。本研究中,FP处理移栽密度过低(1.80×10^5 穴·hm⁻²),使群体物质和氮素积累量相对较少,同时氮肥供应过量,导致水稻生育前期氮素代谢过旺,生育后期叶片早衰及光合能力下降,不利于水稻生育后期的氮素积累与物质生产^[30]。而SNHD1处理提高了移栽密度,使群体物质与氮素积累维持了较高水平,同时氮肥用量较为适宜,在水稻营养生长阶段构建了高效的群体结构,从而提高水稻齐穗后植株光合能力,提高水稻生育后期养分吸收比例^[3]。而SNHD2处理由于移栽密度过大,引起水稻群体养分竞争加剧,影响叶片的光合生产能力^[28],导致干物质与氮素积累下降。

3.3 减氮增密对水稻氮素利用效率的影响

养分利用率是衡量栽培措施合理性最直接的指标^[31],因此提高氮肥利用率是实现水稻高产高效的主要途径之一。刘红江等^[32]的研究指出,氮素利用率与施氮量呈负相关,而与移栽密度呈正相关。本研究中,氮素利用效率在各年际间变异性不大,而且趋势一致,SNHD1和SNHD2处理肥料利用率均高于FP处理,这说明移栽密度过低和过量施氮是造成当地传统施肥模式氮肥利用效率低下的主要原因。SNHD1和SNHD2两处理相比,SNHD1氮素利用效率的各项指标均高于SNHD2处理,说明适宜的群体结构通过增加养分积累和籽粒产量促进了肥料利用效率的提高。因此,水稻在生产过程中应适当控制移栽密度,科学施用氮肥,以促进水稻对氮素的吸收利用,从而增加水稻产量,提高氮肥利用效率,实现水稻高产高效和环境友好的目标。

4 结论

(1)与传统栽培模式相比,减氮增密提高了水稻各生育时期群体干物质积累量与氮素积累量,水稻齐

穗后的干物质和氮素积累比例也有显著提高。

(2)本研究的减氮增密措施将氮肥用量从传统栽培模式的 $235 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 降至 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (减氮 20%), 将移栽密度从 $1.80 \times 10^5 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提高至 $2.40 \times 10^5 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可大幅增加水稻有效穗数, 显著提高水稻产量, 且在降低氮素盈余的基础上, 提高氮肥利用效率。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 763-772. XU X P, ZHOU W, LIANG G Q, et al. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 763-772.
- [3] 孔丽丽, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 秸秆还田下寒地水稻实现高产高氮肥利用率的氮肥运筹模式[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7): 1282-1293. KONG L L, HOU Y P, YIN C X, et al. Nitrogen fertilizer management for high nitrogen utilization efficiency and rice yield under straw incorporation in a cold region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(7): 1282-1293.
- [4] 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 Fertilizer*, 2018, 24(4): 896-904.
- [5] 朱聪聪, 张洪程, 郭保卫, 等. 钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 122-133. ZHU C C, ZHANG H C, GUO B W, et al. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 122-133.
- [6] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 等. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1319-1328. CHEN H F, FENG Y, CAI H M, et al. Effect of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1319-1328.
- [7] 周文涛, 龙文飞, 戈家敏, 等. 增密减氮对双季稻光合特性及水分利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版) 2022, 48(1): 1-7. ZHOU W T, LONG W F, GE J M, et al. Effects of density increasing and nitrogen reducing on photosynthetic characteristics and water use efficiency of double cropping rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2022, 48(1): 1-7.
- [8] 郭保卫, 周兴涛, 曹利强, 等. 钵苗类型和摆栽密度对粳型超级稻植株抗倒伏能力的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2016, 37(3): 87-94. GUO B W, ZHOU X T, CAO L Q, et al. Effects of different bowl types and densities on the culm lodging resistance of bowl seedling transplanting japonica super rice[J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition)*, 2016, 37(3): 87-94.
- [9] 王海月, 张桥, 武云霞, 等. 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插杂交稻的产量及光合特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(5): 447-456. WANG H Y, ZHANG Q, WU Y X, et al. Effects of reduced urea application on yield and photosynthetic characteristics of mechanically-transplanted rice under different planting spaces[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(5): 447-456.
- [10] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 等. 施氮量对不同品种水稻氮素利用及碳氮代谢关键酶的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(3): 325-330. CONG X H, SHI F Z, RUAN X M, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen use efficiency and key enzymes for carbon and nitrogen metabolism in different rice varieties[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(3): 325-330.
- [11] 殷春渊, 孙建权, 王书玉, 等. 直播种植模式下水稻剑叶光合、强弱势籽粒灌浆特性及产量的氮素调控[J]. 中国农学通报, 2020, 36(9): 1-8. YIN C Y, SUN J Q, WANG S Y, et al. Direct seeding mode of rice: Nitrogen regulation of flag leaf photosynthesis, superior and inferior grains filling characteristics and yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(9): 1-8.
- [12] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 等. 施氮和干湿灌溉对水稻抽穗期根系分泌有机酸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 516-525. XU G W, LU D K, WANG H Z, et al. Coupling effect of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen rate on organic acid in rice root secretion at heading stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(4): 516-525.
- [13] 何俊俊, 杨京平, 杨虎, 等. 光照及氮素水平对水稻冠层叶片 SPAD 值动态变化的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版) 2014, 40(5): 495-504. HE J J, YANG J P, YANG H, et al. Effects of light intensity and nitrogen supply on the dynamic characteristics of leaf SPAD value of rice canopy[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)*, 2014, 40(5): 495-504.
- [14] 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.
- [15] 侯云鹏, 杨建, 李前, 等. 施氮对水稻产量、氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 118-124. HOU Y P, YANG J, LI Q, et al. Effects of nitrogen application on yield, nitrogen utilization and accumulation of soil inorganic nitrogen of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 118-124.
- [16] 刘奕, 王寅, 李春林, 等. 吉林省中部一季稻区推荐施肥方法研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 273-278. LIU Y, WANG Y, LI C L, et al. Study on recommended fertilization method in one-season rice area of central Jilin Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 273-278.
- [17] 侯云鹏, 刘志全, 尹彩侠, 等. 长期秸秆还田下基于东北水稻高产和钾素平衡的钾肥用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26

- (11):2020–2031. HOU Y P, LIU Z Q, YIN C X, et al. Optimum amount of potassium fertilizer based on high yield and soil potassium balance under straw return in rice production region of northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(11):2020–2031.
- [18] PAN S, WEN X, WANG Z. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in south China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203:139–149.
- [19] 汤亮, 朱相成, 曹梦莹, 等. 水稻冠层光截获、光能利用与产量的关系[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5):1269–1276. TANG L, ZHU X C, CAO M Y, et al. Relationships of rice canopy PAR interception and light use efficiency to grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5):1269–1276.
- [20] 怀燕, 陈照明, 张耿苗, 等. 水稻侧深施肥技术的氮肥减施效应[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, 46(2):217–224. HUAI Y, CHEN Z M, ZHANG G M, et al. Nitrogen reduction effect of side-deep placement of fertilizer on the rice production[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Science)*, 2020, 46(2):217–224.
- [21] XIE X B, SHAN S L, WANG Y, et al. Dense planting with reducing nitrogen rate increased grain yield and nitrogen use efficiency in two hybrid rice varieties across two light conditions[J]. *Field Crops Research*, 2019, 236:24–32.
- [22] 孙长占, 乔春贵, 邵喜文, 等. 水稻产量构成因素与产量关系的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 1993, 15(4):64–67. SUN C Z, QIAO C G, SHAO X W, et al. Study on the relationship between yield components and yield of rice[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1993, 15(4):64–67.
- [23] 田广丽, 李东伟, 甄博, 等. 灌溉模式和氮肥用量对水稻分蘖期生长特征的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(12):46–52. TIAN G L, LI D W, ZHEN B, et al. Effect of irrigation and nitrogen application on growth of two rice cultivars at the tillering stage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12):46–52.
- [24] 滕飞, 李传友, 陈惠哲, 等. 机插密度对杂交稻干物质积累及产量形成的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(3):1–7. TENG F, LI C Y, CHEN H Z, et al. Effects of transplanting density on dry matter accumulation and yield formation of machine transplanted hybrid rice[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(3):1–7.
- [25] 黄春东, 刘孙旺, 兰青, 等. 不同施氮量与抛植密度对水稻玉丝6号产量的影响[J]. *安徽农学通报*, 2015, 21(24):54–55. HUANG C D, LIU S W, LAN Q, et al. Effects of different nitrogen application amount and throwing planting density on yield of rice ‘Yusi 6’[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2015, 21(24):54–55.
- [26] 敬树忠, 刘然金, 李旭毅, 等. 氮肥水平和移栽密度对新品杂交稻‘蜀优217’产量性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(29):8–12. JING S Z, LIU R J, LI X Y, et al. Nitrogen rate and transplanting density: Effect on yield traits of hybrid rice ‘Shuyou 217’[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(29):8–12.
- [27] ROHACEK K, BARTAK M. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: Basic concepts, useful parameters, and some applications[J]. *Photosynthetic*, 1999, 37(3):339–363.
- [28] 吴文革, 张洪程, 陈烨, 等. 超级中籼杂交水稻氮素积累利用特性与物质生产[J]. *作物学报*, 2008, 34(6):1060–1068. WU W G, ZHANG H C, CHEN Y, et al. Dry matter accumulation and nitrogen absorption and utilization in middle-season indica super hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6):1060–1068.
- [29] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5):1157–1166. WANG Y W, GUO J X, KONG Y L, et al. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5):1157–1166.
- [30] 郎有忠, 王美娥, 吕川根, 等. 水稻叶片形态、群体结构和产量对种植密度的响应[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(1):7–11. LANG Y Z, WANG M E, LÜ C G, et al. Response of leaf morphology, population structure and yield to planting density in rice[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(1):7–11.
- [31] 李珺, 刘双全, 仇少君, 等. 典型黑土不同施氮量对马铃薯产量和氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5):850–857. LI J, LIU S Q, QIU S J, et al. Effects of different nitrogen rates on potato yield and nitrogen use efficiency in a typical black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(5):850–857.
- [32] 刘红江, 郭智, 张岳芳, 等. 移栽密度及氮肥投入量对水稻氮素利用效率的协同效应[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12):3952–3960. LIU H J, GUO Z, ZHANG Y F, et al. Synergistic effects of planting density and nitrogen application rate on the nitrogen use efficiency of rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12):3952–3960.