

栽培措施对水稻氮素吸收利用及稻田尾水氮磷含量的影响

丁周宇, 张娜, 舒小伟, 杨英, 王树深, 伏桐, 赵士茹, 王子涵, 周娟, 姚友礼, 季美娣, 董桂春

引用本文:

丁周宇, 张娜, 舒小伟, 杨英, 王树深, 伏桐, 赵士茹, 王子涵, 周娟, 姚友礼, 季美娣, 董桂春. 栽培措施对水稻氮素吸收利用及稻田尾水氮磷含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2004–2015.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变化及养分利用的影响

徐嘉翼, 牛世伟, 隋世江, 张鑫, 叶鑫, 蔡广兴, 王娜

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1696–1703 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0229>

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响

朱远芄, 史燕捷, 管浩, 叶新新, 郇红建, 华胜, 王宜坤

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2596–2605 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0289>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 杨俊诚, 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 张建峰, 姜慧敏

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2785–2792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0165>

不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响

刘雅文, 马资厚, 潘复燕, 杨林章, 薛利红

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1395–1405 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1674>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

丁周宇, 张娜, 舒小伟, 等. 栽培措施对水稻氮素吸收利用及稻田尾水氮磷含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2004–2015.

DING Z Y, ZHANG N, SHU X W, et al. Effects of cultivation practices on nitrogen absorption and utilization of rice and nitrogen and phosphorus contents of paddy tailwater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9): 2004–2015.

栽培措施对水稻氮素吸收利用 及稻田尾水氮磷含量的影响

丁周宇¹, 张娜², 舒小伟¹, 杨英¹, 王树深¹, 伏桐¹, 赵士茹¹, 王子涵¹, 周娟¹,
姚友礼¹, 季美娣^{2*}, 董桂春^{1*}

(1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室培育点/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/教育部植物功能基因组重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2. 常州市农业综合技术推广中心, 江苏 常州 213001)

摘要:为探讨在不同耕作模式下秸秆还田和肥料品种对水稻产量形成、氮素吸收利用、土壤养分含量及稻田尾水氮磷含量的影响,以南粳9108和金武软玉为供试材料,设计秸秆还田与肥料品种、秸秆还田与耕作方式、耕作方式与肥料品种3个互作试验。结果表明:与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理的水稻产量平均高5.57%,成穗率平均高6.11%,吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力和氮肥利用率分别高3.30%、2.16%、0.70%、5.46%和4.96%,土壤中全氮和速效氮含量分蘖期较低,分蘖期后较高,全生育期尾水中总氮、总磷含量分别平均提高4.83%、39.28%。与浅旋处理相比,深耕处理的水稻产量平均高9.75%,成穗率平均低0.62%,吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率分别高3.27%、6.33%、9.76%和1.52%,氮素收获指数低1.42%,土壤全氮和速效氮含量分别低0.27%和2.83%,全生育期尾水中总氮、总磷含量分别平均降低4.23%、12.71%。与速效肥处理相比,缓释肥处理的水稻产量平均低12.01%,成穗率平均低2.95%,氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力分别低13.89%、4.48%、12.05%,吸氮量和氮肥利用率分别高1.92%和3.85%,土壤全氮含量高1.50%,土壤速效氮含量低2.83%,全生育期尾水中总氮、总磷含量分别平均降低6.31%、1.12%。还田深耕速效肥处理产量最高,氮肥利用率略低,尾水氮、磷含量较高;还田深耕缓释肥处理的产量略低,尾水氮磷含量最低,氮肥利用率最高。研究表明,采用秸秆还田+深耕+速效肥的方式有利于水稻产量的提高,采用秸秆不还田+深耕+缓释肥的方式可以提高氮肥利用率,减少稻田对环境氮、磷的排放。

关键词:耕作方式;秸秆还田;肥料品种;氮素吸收利用;稻田尾水氮磷含量

中图分类号:X173;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)09-2004-12 doi:10.11654/jaes.2022-1099

Effects of cultivation practices on nitrogen absorption and utilization of rice and nitrogen and phosphorus contents of paddy tailwater

DING Zhouyu¹, ZHANG Na², SHU Xiaowei¹, YANG Ying¹, WANG Shushen¹, FU Tong¹, ZHAO Shiru¹, WANG Zihan¹, ZHOU Juan¹,
YAO Youli¹, JI Meidi^{2*}, DONG Guichun^{1*}

(1. Jiangsu Crop Genetics and Physiology Key Laboratory Incubation Site/Jiangsu Modern Industrial Technology Collaborative Innovation

收稿日期:2022-11-02 录用日期:2023-01-16

作者简介:丁周宇(1998—),男,江苏常熟人,硕士研究生,主要从事水稻栽培与生理研究。E-mail:997757745@qq.com

*通信作者:董桂春 E-mail:gcdong@yzu.edu.cn; 季美娣 E-mail:cszjmd2008@sina.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31571608);江苏省农业重大技术协同推广计划项目(2023-ZYXT-03-2);常州市现代农业产业技术体系建设项目(2021007);常州市2022年农业科技创新和示范推广项目;江苏现代农业产业技术体系建设项目(JATS[2021]091)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31571608); Jiangsu Province Agricultural Major Technology Collaborative Promotion Plan Project (2023-ZYXT-03-2); Changzhou Modern Agricultural Industry Technology System Construction Project (2021007); Changzhou 2022 Agricultural Science and Technology Innovation and Demonstration Promotion Project; Jiangsu Modern Agricultural Industry Technology System Construction Project(JATS[2021]091)

Center for Grain Crops/Key Laboratory of Plant Functional Genome Ministry of Education, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Changzhou Comprehensive Agricultural Technology Extension Center, Changzhou 213001, China)

Abstract: In order to quantify the effects of cultivation measures on rice yield formation, nitrogen absorption and utilization of rice, soil nutrient content, and nitrogen and phosphorus contents of paddy tailwater, three interaction experiments of straw returning by fertilizer varieties, straw returning by tillage methods, and tillage methods by fertilizer types were conducted, based on NJ9108 and Jinwuruanyu as rice varieties. Results showed that: Compared with that observed in the no-straw-returning treatment, the average rice yield of straw-returning treatment was 5.57% higher and the average panicle rate was 6.11% higher; the nitrogen absorption(NA), nitrogen use efficiency for grain yield (NUE_g), nitrogen harvest index (NHI), nitrogen partial factor productivity (PFP_N), and nitrogen fertilizer recovery (FR_N) were 3.30%, 2.16%, 0.70%, 5.46%, and 4.96% higher, respectively; and the total soil nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) contents were lower at the tillering stage and higher after the tillering stage; and the average contents of TN and TP in paddy tailwater were 4.83% and 39.28% higher during the whole growth period, respectively. Compared with that observed in the shallow spin treatment, the average rice yield of the deep plowing treatment was 9.75% higher and the average panicle rate was 0.62% lower; the NA , NUE_g , PFP_N and FR_N were 3.27%, 6.33%, 9.76%, and 1.52% higher, respectively; NHI was 1.42% lower; the contents of soil TN and AN were 0.27% and 2.83% lower, respectively; and the average contents of TN and TP in paddy tailwater were 4.23% and 12.71% lower during the whole growth period, respectively. Compared with that observed in the fast-acting fertilizer treatment, the average rice yield of the slow-release fertilizer treatment was 12.01% lower and the average panicle rate was 2.95% lower; the NUE_g , NHI , and PFP_N were 13.89%, 4.48%, and 12.05% lower, respectively, whereas the NA and FR_N were 1.92% and 3.85% higher, respectively; the content of soil TN was 1.50% higher, and the content of soil AN was 2.83% lower; and the average contents of TN and TP in paddy tailwater were 6.31% and 1.12% lower during the whole growth period, respectively. The highest yield value, a slightly higher FR_N value, and higher TN and TP contents of paddy tailwater occurred with the interaction among straw returning, deep plowing, and fast-acting fertilizer, whereas a slightly lower yield, the lowest TN and TP contents of paddy tailwater, and the highest FR_N value occurred with the interaction among straw returning, deep plowing, and slow-acting fertilizer. The three-way interaction among straw returning, deep plowing, and fast-acting fertilizer was most beneficial for the improvement of rice yield, whereas that among no straw returning, deep plowing, and slow-acting fertilizer improved the nitrogen fertilizer recovery and reduced the nitrogen and phosphorus emissions from the paddy field into the atmosphere.

Keywords: tillage method; straw returning; fertilizer type; nitrogen absorption and utilization; nitrogen and phosphorus content of paddy tailwater

水稻占我国粮食总产量的1/3以上^[1],为我国粮食安全提供重要保障。随着人增地减的矛盾日益突出^[2-3],提高作物单产成为解决矛盾的主要方法。为了挖掘、提高水稻的产量潜力,许多学者对水稻养分吸收规律及配套的栽培措施进行了持久深入的研究^[4],形成了一系列的施肥理论与技术体系。其中,提高水稻对氮素的利用水平是维持与促进水稻生长和提高水稻产量最直接有效的方法之一。

农业生产实践中,为了获得高产,常长期大量投入氮肥,导致氮肥利用率仅有30%~40%^[5]。此外,肥料中一些养分元素随尾水排出稻田进入周围水体及江河湖泊,加大了水体富营养化的风险。有研究表明,我国河流湖泊的氮、磷养分负荷有一半以上来自农业^[6-8],农业面源污染^[9-11]日益严重,亟需研究与解决。研究发现,适量的秸秆还田可提高氮素利用率,施用缓/控释肥也可有效提高氮素利用率^[12-13],但将两者相结合的研究还较少。有学者研究了秸秆还田、肥料运筹、水分管理等措施在稻麦轮作模式中对稻田尾

水养分含量的影响,通过对不同生产技术结合的研究发现,秸秆还田和翻耕可以降低尾水中的养分含量,氮肥偏生产力较低^[14-18]。在秸秆还田的同时采用减肥处理,水稻产量与常规生产技术无显著差异,尾水中养分含量显著降低。但目前关于耕作方式、秸秆还田、肥料种类等互作措施对水稻养分吸收利用及稻田尾水养分的影响关注较少。为此,本研究于2020—2021年在江苏省扬州大学和常州市奔牛稻麦原种场开展研究,为明确不同栽培措施对水稻氮素吸收利用及稻田尾水氮、磷浓度的影响,为绿色、高效、生态水稻生产方式的制定提供数据支持与理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

本研究选择在江苏省扬州市与常州市开展大田试验,两地生态条件和生产条件相似。扬州市的试验于2020年在扬州大学试验田(32°39'N, 119°42'E)进行,供试土壤为黄土母质的淹育型水稻土,0~20 cm

耕层土壤含全氮 $1.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $103.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $23.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $92.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $22.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；常州市的试验于2021年在奔牛稻麦原种场($31^{\circ}91' \text{N}$, $119^{\circ}79' \text{E}$)进行,供试土壤为黄土状湖积母质的潴育型水稻土,0~20 cm土壤含全氮 $1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $65.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $23.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $94.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $35.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

1.2.1 试验1:秸秆还田与肥料品种互作试验

2020年在扬州进行试验,供试材料为迟熟中粳水稻南粳9108。裂区设计,主区为秸秆还田方式,副区为肥料类型。秸秆还田方式设全量麦秸秆还田(Sr)和不还田(Nr)两个水平,肥料类型设山东茂施缓释肥(Sf)、常州中东绿聚能长效肥(Lf)、速效肥(Ff)3个水平,并设两个对应不施肥(No)处理,合计8个处理,即SSS、SSL、SSF、SSN、NSS、NSL、NSF、NSN(中间的S表示浅旋处理)。缓释肥采用树脂包膜尿素,该肥料含氮率为43.5%,100 d的释放周期;长效肥采用硫包膜尿素,含氮率为41.0%;速效肥采用常规尿素,含氮率为46.7%。施纯氮 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、磷、钾施用比例为1:0.35:0.35,磷、钾肥一次性基施。缓释肥和长效肥一次性基施,速效肥为基肥:分蘖肥:穗肥=3.5:3.0:3.5。每个处理3次重复,每个重复采用土埂加塑料隔板方式隔离,以防止水分和肥料相互串漏。采用塑盘育秧,人工模拟机插,株距11 cm、行距30 cm,密度为 $3.03 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2.2 试验2:秸秆还田与耕作方式互作试验

2021年在常州进行试验,供试材料为早熟晚粳水稻金武软玉,大田试验,塑盘育秧,机械栽插,株距13.3 cm、行距30 cm,密度为 $2.51 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。设秸秆还田+深耕(SD)、秸秆还田+浅旋(SS)、秸秆不还田+深耕(ND)、秸秆不还田+浅旋(NS)4个处理,每个处理种植面积为 667 m^2 。秸秆还田为全量麦秸秆还田。肥料均为常规速效肥(即各处理表示为SDF、SSF、NDF、NSF),施纯氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、磷、钾施用比例为1:0.35:0.35,磷、钾肥一次性基施。氮肥为基肥:分蘖肥:穗肥=3.5:3.0:3.5。

1.2.3 试验3:耕作方式与肥料品种互作试验

试验时间、地点、供试材料同试验2,防渗漏小区,塑盘育秧,人工模拟机插,株距13.3 cm、行距30 cm,密度为 $2.51 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。前茬作物为小麦。设秸秆浅旋+速效肥(SSF)、秸秆深耕+速效肥(SDF)、秸秆深耕+缓释肥(SDS)、对照(CK)共4个处理,每个处

理 33 m^2 。施肥区施纯氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、磷、钾施用比例为1:0.35:0.35,磷、钾肥一次性基施。速效氮肥均用尿素,含氮量46.7%,缓释肥采用与扬州试验中一致的山东茂施缓释肥,基肥一次性施用。

1.3 测定指标与方法

在稻田排水口设置防渗漏水泥蓄水池进行尾水收集,于分蘖期、拔节期、抽穗期肥后7 d取水样,取样时用500 mL塑料瓶在各小区蓄水池采集3瓶水体样品,随即带回实验室采用哈希DR6000紫外-可见光分光光度计进行测定。在各小区取水稻栽前及主要生育期0~20 cm深的土样,将样品风干、研磨、过筛,采用苏州科铭生物公司试剂盒测定土壤全氮、全磷、速效氮和速效磷含量。在栽后20 d进行茎蘖动态调查,各小区选定10穴水稻调查茎蘖数,每7 d记录1次,直至茎蘖数下降为止。在拔节期、抽穗期和成熟期分别选取代表性植株4穴,将植株分为叶片、茎鞘、稻穗等部位,105℃杀青30 min后80℃烘至质量恒定(约72 h),测定干质量后将叶片、茎鞘、稻穗样品粉碎,用FOSS-8400凯氏定氮仪测定各器官含氮率。在成熟期各小区内取代表性植株10穴,测定产量及其构成因素。试验1只分析对产量、氮素吸收利用及稻田尾水中氮、磷含量的影响;试验2、试验3分析所有测定项目。

氮素吸收量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为某时期地上部干物质量与含氮率的乘积;氮素籽粒生产效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)为水稻籽粒产量与成熟期植株吸氮量的比值;氮素收获指数(%)为成熟期穗部氮积累量与成熟期植株吸氮量的比值;氮肥偏生产力为稻谷产量与施氮量的比值;氮肥利用率(%)为施氮区吸氮量和空白区吸氮量的差值与施氮量的比值^[16-17]。

1.4 数据处理与统计分析

本试验所有数据均以Excel 2019进行处理,以SPSS 5.0进行统计分析,以Origin 2021绘图。各处理的比较均采用最小显著差法(LSD),差异显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 栽培措施对水稻茎蘖动态的影响

各处理的茎蘖动态均表现为先增加后下降的趋势,且均在栽后34 d达到高峰(图1)。从试验2来看,秸秆还田处理在栽后34 d的茎蘖数均低于不还田处理,栽后41 d时高于不还田处理,深耕处理的各调查日期的茎蘖数比浅旋平均低4.11%。从试验3来看,深耕处理的茎蘖数比浅旋处理低2.64%,速效肥处理

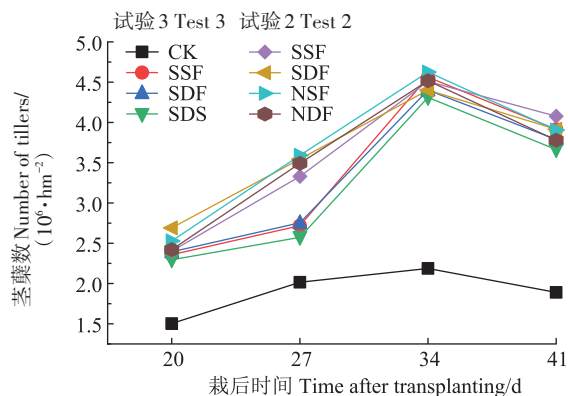


图1 栽培措施对水稻茎蘖动态的影响

Figure 1 Effects of cultivation practices on stem tiller dynamics of rice

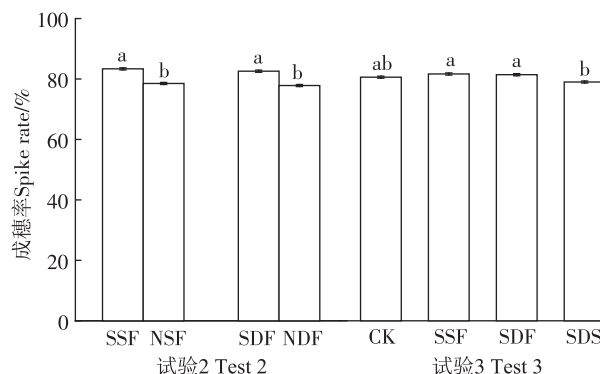
的茎蘖数比缓释肥处理高3.43%。

2.2 栽培措施对水稻成穗率的影响

如图2所示,试验2中秸秆还田处理的成穗率要显著高于秸秆不还田处理,平均提高6.11%,深耕处理的成穗率比浅旋处理平均低0.90%;试验3中深耕处理的成穗率比浅旋处理低0.03%,速效肥处理的成穗率比缓释肥处理高3.04%。

2.3 栽培措施对水稻物质生产与分配的影响

由表1可知,试验2中秸秆还田处理的拔节期、抽穗期干物质质量和经济系数均高于秸秆不还田处理,分别平均高6.88%、2.77%和3.81%,成熟期干物质质量较秸秆不还田处理显著增加2.29%;表1中深耕处理下的这4个指标均显著高于浅旋处理,分别平均高10.38%、9.35%、2.16%、7.77%。试验3中深耕处理的拔节期、抽穗期干物质质量比浅旋处理分别高



不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著(LSD检验)。文中多重比较为单一实验。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the level of 0.05 (LSD test). The multiple comparisons in this paper are a single experiment. The same below.

图2 栽培措施对水稻成穗率的影响

Figure 2 Effects of cultivation measures on rice spike rate

14.63%、6.54%,成熟期干物质质量和经济系数较浅旋处理均显著增加6.00%和10.00%;速效肥处理下拔节期、抽穗期干物质质量比缓释肥处理分别高1.29%、3.16%,成熟期干物质质量比缓释肥处理低0.65%,速效肥处理的经济系数较缓释肥处理显著增加10.00%。结果表明,秸秆还田和深耕处理在各时期均能提高水稻干物质生产量。

2.4 栽培措施对水稻产量的影响

由图3可知,试验1中秸秆还田处理的产量较秸秆不还田处理平均显著提高5.49%,速效肥处理的产量均显著高于长效肥和缓释肥,分别平均高10.68%和15.03%,试验1以秸秆还田速效肥处理产量最高,较其他处理平均增高13.99%。试验2中秸秆还田处

表1 栽培措施对水稻物质生产与分配的影响

Table 1 Effects of cultivation practices on material production and distribution of rice

试验 Test	处理 Treatment	干物质生产量 Dry matter production/(t·hm ⁻²)			经济系数 Economic factor
		拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage	
试验2 Test 2	SSF	2.43±0.03bc	9.33±0.31bc	15.64±0.08b	0.52±<0.01c
	SDF	2.70±0.15a	10.30±0.44a	16.01±0.15a	0.57±0.01a
	NSF	2.29±0.05c	9.17±0.24c	15.32±0.25c	0.51±0.01c
	NDF	2.51±0.11ab	9.93±0.11ab	15.62±0.18b	0.54±0.01b
试验3 Test 3	CK	1.34±0.03b	5.87±0.36b	10.91±0.06c	0.42±0.01c
	SSF	2.05±0.17a	9.18±0.56a	15.84±0.23b	0.50±0.01b
	SDF	2.35±0.13a	9.78±0.65a	16.79±0.29a	0.55±0.01a
	SDS	2.32±0.08a	9.48±0.43a	16.90±0.20a	0.50±0.01b

注:不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著(LSD检验)。文中多重比较为单一实验。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the level of 0.05 (LSD test). The multiple comparisons in this paper are a single experiment. The same below.

理的产量较秸秆不还田平均显著提高5.64%,深耕处理的产量比浅旋处理平均显著提高8.75%,试验2以还田深耕处理的产量最高,较其他处理平均增高10.94%。试验3中深耕处理的产量比浅旋处理显著增高10.79%,速效肥处理的产量比缓释肥处理显著增高12.31%,试验3以深耕速效处理的产量最高,较其他处理平均增高11.55%。结果表明,秸秆还田、深耕和速效肥处理均能显著增加产量。

2.5 栽培措施对水稻氮素吸收利用的影响

由表2可知,秸秆还田处理可以使描述养分利用的几个主要指标呈上升趋势,深耕处理相较于浅旋处理可以提高水稻对氮素的吸收利用,缓释肥处理在吸氮量和氮肥利用率上起到了促进作用。试验1中秸

秆还田处理的吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力和氮肥利用率均高于秸秆不还田处理,平均分别高4.93%、0.44%、0.89%、5.26%和4.33%;缓释肥处理的吸氮量和氮肥利用率均高于长效肥处理和速效肥处理,吸氮量平均分别高9.63%和1.07%,氮肥利用率平均分别高20.45%和2.09%;速效肥处理的氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力均高于长效肥和缓释肥,分别平均高2.05%和16.32%、2.55%和4.37%、10.70%和15.10%。

试验2中秸秆还田处理的吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力和氮肥相对利用率均高于秸秆不还田处理,平均分别高1.66%、3.88%、0.51%、5.65%和5.59%;深耕处理的吸氮量、氮素籽粒生产效率和氮肥偏生产力均高于浅旋处理,平均分别高4.20%、4.36%和8.73%,深耕处理的氮素收获指数比浅旋处理平均低2.50%。

试验3中深耕处理的吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥利用率均高于浅旋处理,分别高2.33%、8.29%、1.15%、10.78%、1.52%;速效肥处理的吸氮量、氮肥利用率均低于缓释肥处理,分别低2.92%、5.31%,但氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力均显著高于缓释肥处理,分别高15.67%、5.02%、12.33%。

2.6 栽培措施对水稻不同生育时期土壤养分的影响

由表3可知,试验2中秸秆还田处理的土壤全氮含量,在分蘖期比秸秆不还田处理平均显著降低1.28%,在拔节期和成熟期平均显著提高1.04%和3.33%;深耕处理的土壤全氮含量均低于浅旋处理;秸秆还田和耕作方式处理对土壤中全磷含量无显著影响。试验3中深耕处理的土壤全氮含量均低于浅旋处理;缓释肥处理的土壤全氮含量,在分蘖期和拔节期比速效肥处理显著降低1.55%和3.08%,在抽穗期和成熟期显著提高5.78%和5.88%;耕作方式和肥料处理对土壤中总磷含量无显著影响。秸秆还田处理在分蘖期显著降低土壤全氮含量,随着生育期的进行,成熟期土壤全氮含量显著高于秸秆不还田处理,深耕处理的土壤中全氮含量都低于浅旋处理,缓释肥处理的土壤内全氮含量相较于速效肥处理出现先后高的现象。

由表4可知,试验2中秸秆还田处理的土壤速效氮含量,在分蘖期比秸秆不还田处理平均显著降低4.08%,在抽穗期、拔节期和成熟期平均显著提高8.69%、2.57%和10.54%;深耕处理的土壤速效氮含量

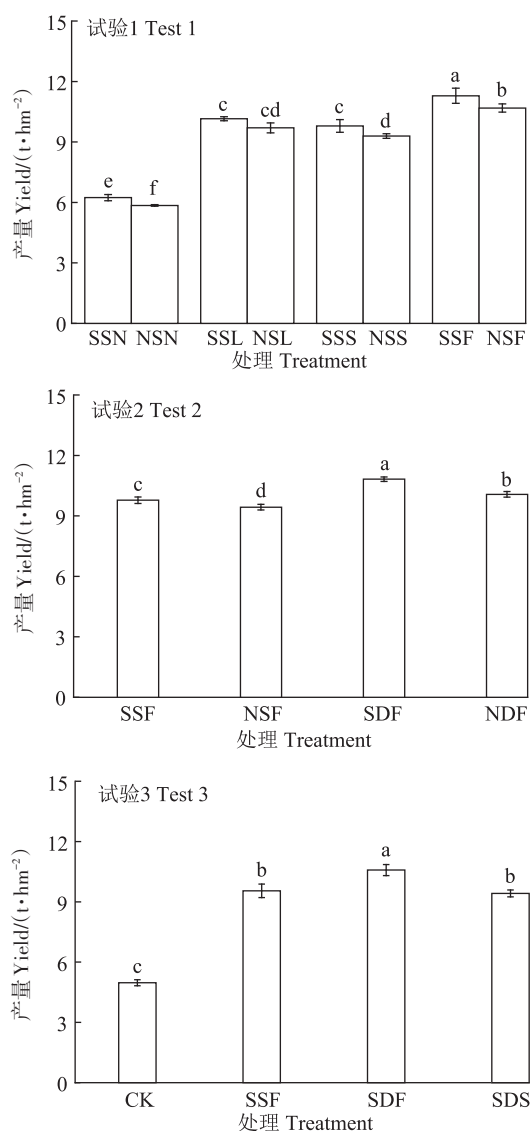


图3 栽培措施对水稻产量的影响

Figure 3 Effects of cultivation practices on rice yield

表2 栽培措施对水稻氮素吸收利用的影响

Table 2 Effects of cultivation practices on nitrogen uptake and utilization in rice at maturity

试验 Test	处理 Treatment	吸氮量 Nitrogen uptake/ (kg·hm ⁻²)	氮素籽粒生产效率 Nitrogen grain production efficiency/(kg·kg ⁻¹)	氮素收获指数 Nitrogen harvest index/%	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity/(kg·kg ⁻¹)	氮肥利用率 Nitrogen fertilizer utilization efficiency*/%
试验1 Test1	SSN	91.35±1.51d	68.38±0.84a	64.65±0.41a		
	SSL	176.40±2.23c	57.59±0.78b	62.30±0.68bc	37.60±0.38c	30.36±0.82c
	SSS	197.25±5.49a	49.68±1.89c	59.33±0.72d	36.28±1.17c	38.13±2.04a
	SSF	194.85±2.36a	57.98±2.38b	61.72±0.60c	41.82±1.39a	37.21±0.87a
	NSN	85.95±1.40e	68.12±1.31a	64.05±0.40a		
	NSL	172.65±1.27c	56.20±1.46b	59.08±0.74d	35.92±0.92cd	30.81±0.47c
	NSS	185.40±2.46b	50.15±0.89c	59.93±0.40d	34.43±0.42d	35.55±0.92b
试验2 Test2	NSF	183.75±1.95b	58.14±1.03b	62.75±0.72b	39.57±0.75b	34.96±0.72b
	SSF	180.45±1.65a	54.17±0.58b	54.54±0.83a	40.74±0.66c	3.64
	SDF	187.50±1.26a	57.72±0.83a	53.38±0.66b	45.10±0.46a	7.53
	NSF	177.00±1.89a	53.29±0.68b	54.47±1.15a	39.31±0.58d	
试验3 Test3	NDF	184.95±1.13a	54.42±0.66b	52.90±1.17b	41.94±0.39b	
	CK	85.65±0.84d	58.07±1.23a	63.22±1.04a		
	SSF	180.60±1.25c	52.86±1.66c	55.79±1.03bc	39.79±1.40b	35.19±0.46c
	SDF	184.80±1.36b	57.24±1.50b	56.44±0.91b	44.08±1.15a	36.74±0.50b
	SDS	190.35±1.60a	49.46±0.55d	53.74±1.72c	39.24±0.72b	38.80±0.59a

注:*试验1为氮肥利用率,试验2、试验3为氮肥相对利用率,氮肥相对利用率=(还田处理区吸氮量-不还田处理区吸氮量)/施氮量×100%。

Note: *Test 1 is the nitrogen fertilizer utilization rate, Test 2 and Test 3 are the relative utilization rate of nitrogen fertilizer, and the relative utilization rate of nitrogen fertilizer =(nitrogen uptake in the field treatment area - nitrogen absorption in the non-return treatment area) / nitrogen application amount×100%.

表3 栽培措施对水稻不同生育时期土壤全氮、全磷的影响

Table 3 Effects of cultivation practices on soil total N and total P

试验 Test	处理 Treatment	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)					全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)				
		栽前 Before planting	分蘖期 Tiller stage	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage	栽前 Before planting	分蘖期 Tiller stage	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
试验2 Test2	SSF	1.89	1.93±<0.01b	1.95±<0.01a	1.74±0.01a	1.72±0.01a	0.62	0.67±0.01a	0.66±0.01a	0.57±0.01a	0.53±0.02a
	SDF	1.89	1.93±0.01b	1.94±0.01ab	1.71±0.01ab	1.69±<0.01b	0.62	0.66±0.02a	0.63±0.01a	0.55±0.01a	0.53±0.01a
	NSF	1.89	1.96±0.01a	1.93±0.01bc	1.68±0.01b	1.64±0.01c	0.62	0.64±0.01a	0.65±0.02a	0.58±0.01a	0.55±0.01a
	NDF	1.89	1.95±<0.01a	1.92±0.01c	1.67±0.01b	1.66±0.01c	0.62	0.63±0.01a	0.66±0.02a	0.53±0.01a	0.51±0.01a
试验3 Test3	CK	1.87	1.86±<0.01c	1.86±0.01b	1.72±0.01b	1.71±0.01b	0.59	0.58±0.01b	0.56±<0.01b	0.56±0.01a	0.52±0.01a
	SSF	1.87	1.94±0.01a	1.96±0.01a	1.74±0.01b	1.71±0.01b	0.59	0.66±0.01a	0.64±0.01a	0.55±0.02a	0.52±0.01a
	SDF	1.87	1.93±0.01a	1.95±0.01a	1.73±0.01b	1.70±0.01b	0.59	0.66±0.01a	0.61±0.01a	0.56±0.01a	0.51±0.01a
	SDS	1.87	1.90±0.01b	1.89±0.01b	1.83±0.01a	1.80±0.01a	0.59	0.64±<0.01a	0.63±0.01a	0.55±0.02a	0.51±0.01a

比浅旋处理各时期分别平均显著降低1.37%、2.38%、3.26%、4.25%;秸秆还田和耕作方式处理对土壤中速效磷含量无显著影响。试验3中深耕处理的土壤速效氮含量比浅旋处理各期分别显著降低1.27%、2.74%、3.82%、2.23%;缓释肥处理的土壤速效氮含量,在分蘖期和拔节期比速效肥处理显著降低3.73%和8.51%,在成熟期显著提高2.30%;耕作方式和肥料处理对土壤中速效磷含量无显著影响。各处理对土

壤速效氮和速效磷含量的影响趋势与对全氮和全磷的影响趋势相似。

2.7 栽培措施对水稻主要生育时期稻田尾水总氮、总磷的影响

由表5可知,试验1中秸秆还田处理尾水的总氮含量,在分蘖期比秸秆不还田处理平均显著降低5.70%,在拔节期和抽穗期比秸秆不还田处理平均显著提高5.96%和6.46%;与秸秆不还田处理相比,秸秆

表4 栽培措施对土壤速效氮、速效磷的影响

Table 4 Effects of cultivation measures on soil available N and available P

试验 Test	处理 Treatment	速效氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)					速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)				
		栽前 Before planting	分蘖期 Tiller stage	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage	栽前 Before planting	分蘖期 Tiller stage	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
试验2 Test2	SSF	65.30	76.33±0.02c	79.32±0.05a	69.43±0.21a	60.37±0.07a	23.30	28.48±0.07a	24.42±0.11a	21.61±0.02a	19.25±0.15a
	SDF	65.30	75.30±0.06d	77.27±0.15b	66.89±0.05b	58.58±0.04b	23.30	28.37±0.05a	24.39±0.01a	21.77±0.33a	19.18±0.03a
	NSF	65.30	79.59±0.02a	72.82±0.05c	67.41±0.08b	55.37±0.03c	23.30	28.38±0.09a	24.19±0.09a	21.03±0.14a	19.26±0.08a
	NDF	65.30	78.49±0.10b	71.25±0.14d	65.49±0.30c	52.24±0.14d	23.30	28.27±0.05a	24.44±0.15a	21.37±0.01a	19.10±0.07a
试验3 Test3	CK	64.80	64.33±0.05d	63.68±0.21d	60.31±0.03c	57.82±0.14b	22.60	21.69±0.09b	20.72±0.03b	18.51±0.13b	17.39±0.17b
	SSF	64.80	76.28±0.06a	79.17±0.03a	68.93±0.06a	59.22±0.09a	22.60	27.44±0.12a	24.41±0.13a	21.52±0.14a	19.33±0.05a
	SDF	64.80	75.31±0.07b	77.00±0.11b	66.30±0.09b	56.60±0.22c	22.60	28.00±0.02a	24.34±0.05a	21.46±0.08a	19.53±0.01a
	SDS	64.80	72.50±0.06c	70.45±0.13c	66.61±0.23b	57.90±0.26b	22.60	27.79±0.13a	24.28±0.03a	21.60±0.05a	19.60±0.24a

表5 栽培措施对水稻主要生育时期稻田尾水总氮、总磷的影响

Table 5 Effects of cultivation measures on total N and total P in the tailwater of paddy fields

试验 Test	处理 Treatment	总氮 Total N/(mg·L ⁻¹)			总磷 Total P/(mg·L ⁻¹)		
		分蘖期 Tiller stage	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	分蘖期 Tiller stage	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage
试验1 Test1	SSN	1.72±0.02g	2.03±0.02g	1.71±0.03e	0.21±0.04f	0.47±0.04e	0.34±0.03c
	SSL	5.53±0.03d	5.73±0.02c	2.18±0.03c	2.85±0.03d	1.41±0.01b	0.42±0.02ab
	SSS	5.27±0.03e	5.64±0.02d	2.37±0.02b	2.94±0.02c	1.42±0.03ab	0.46±0.02a
	SSF	6.02±0.05b	6.34±0.02a	2.48±0.02a	2.95±0.02c	1.45±0.03a	0.39±0.02bc
	NSN	1.91±0.03f	1.88±0.01h	1.62±0.02f	0.31±0.03e	0.39±0.04f	0.24±0.03d
	NSL	5.74±0.03c	5.51±0.02e	2.03±0.02d	3.28±0.02a	1.22±0.03d	0.36±0.03c
	NSS	5.68±0.03c	5.22±0.03f	2.22±0.02c	3.11±0.03b	1.22±0.02d	0.41±0.02ab
	NSF	6.33±0.03a	6.02±0.01b	2.34±0.02b	3.21±0.04a	1.26±0.02c	0.35±0.02c
试验2 Test2	SSF	5.17±0.04c	5.48±0.04a	2.32±0.05a	2.20±0.02b	1.47±0.06a	0.47±0.06a
	SDF	5.02±0.06d	5.35±0.05b	2.13±0.06bc	2.04±0.06c	1.21±0.05b	0.32±0.05b
	NSF	5.56±0.07a	5.11±0.03c	2.23±0.07ab	2.54±0.07a	1.09±0.04bc	0.34±0.03b
	NDF	5.39±0.05b	4.98±0.06d	2.11±0.03c	2.31±0.05b	0.97±0.05c	0.24±0.06b
试验3 Test3	CK	1.88±0.04d	1.92±0.02d	1.62±0.06d	0.23±0.03c	0.31±0.03c	0.21±0.04b
	SSF	5.73±0.02a	5.68±0.05a	2.16±0.01a	2.62±0.04a	1.53±0.04a	0.52±0.05a
	SDF	5.51±0.05b	5.32±0.05b	2.06±0.02c	2.36±0.07b	1.28±0.04b	0.43±0.04a
	SDS	5.32±0.05c	5.20±0.04c	2.11±0.01b	2.31±0.05b	1.25±0.05b	0.44±0.05a

还田处理的尾水中总磷含量,在分蘖期平均显著降低9.69%,在拔节期平均显著提高16.14%,在抽穗期平均提高18.38%。缓释肥处理尾水中总氮含量,在分蘖期和拔节期比速效肥处理平均显著降低11.34%和2.84%,比长效肥处理平均降低13.03%和4.36%,在抽穗期比速效肥处理平均显著降低4.77%,比长效肥处理平均显著提高9.03%;缓释肥处理的尾水中总磷含量,在分蘖期比速效肥和长效肥处理平均显著降低1.79%和1.31%,在拔节期比速效肥处理平均低2.58%,比长效肥处理平均高0.38%,在抽穗期比速效肥处理平均显

著高17.57%,比长效肥处理平均高11.54%。

试验2中秸秆还田处理的尾水中总氮含量,在分蘖期比秸秆不还田处理平均显著降低6.94%,在拔节期平均显著提高7.33%,在抽穗期平均高2.54%;与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理的尾水中总磷含量,在分蘖期平均显著降低12.58%,在拔节期平均显著提高30.10%,在抽穗期平均高36.21%。深耕处理的尾水中总氮含量均显著低于浅旋处理,各期分别平均低2.98%、2.46%、6.81%,总磷含量在分蘖期比浅旋处理平均显著降低8.23%,在拔节和抽穗期分别平均

低14.84%、30.86%。

试验3中深耕处理的尾水中总氮含量比浅旋处理各期分别显著降低3.84%、6.34%、4.63%,总磷含量在分蘖期和拔节期比浅旋处理显著降低9.92%和16.34%,在抽穗期低17.31%,缓释肥处理的尾水中总氮含量在分蘖期和拔节期比速效肥处理显著降低3.45%和2.26%,在抽穗期显著高2.43%,总磷含量在分蘖期和拔节期分别降低2.12%和2.34%,在抽穗期提高2.33%。

3个试验相结合比较发现秸秆还田处理的尾水中氮、磷含量在前期低于不还田处理,从拔节期开始高于秸秆不还田处理,深耕处理在各时期均能降低尾水中的氮、磷含量,缓释肥处理的尾水氮、磷含量呈现出前期低于速效肥处理,从抽穗期开始高于速效肥处理。

3 讨论

3.1 栽培措施对水稻生长发育的影响

前人研究认为,秸秆还田处理的水稻从分蘖发生阶段至高峰苗期的茎蘖数一直都低于不还田处理^[19-22],而徐国伟等^[23]研究发现秸秆还田后茎蘖发生数在穗分化前都低于不还田处理。从两个研究结果来看,在拔节期(高峰苗期)或穗分化前秸秆还田处理的茎蘖数均小于不还田处理,但从何时开始超越并不清楚。本研究表明,从栽后发生分蘖开始到高峰苗期,秸秆还田处理的水稻茎蘖数一直低于不还田处理,但之后由于秸秆分解释放了一些养分,分蘖的下降速度变慢,使栽后41 d左右时茎蘖数反而略高于不还田处理,从而实现了成穗率的提高,分析原因可能与麦秸秆腐解养分释放特点有关。由于麦秸秆中的C/N较高,一般不能被水稻直接利用,需要经过腐解释放出养分后,才能被水稻植株吸收利用。但秸秆在腐解的过程中,需要从土壤中吸收一定的氮素^[24],从而造成了短期内土壤肥力的短缺,影响了水稻前期的生长发育和分蘖的发生,高峰苗有降低的趋势,但随着中、后期养分的释放,在适量施肥的情况下,秸秆还田对水稻生长具有一定的促进作用,即增加了分蘖数和高峰苗数,提高了成穗率。

前人研究表明,加深耕作层有利于水稻分蘖的发生和成穗率的提高^[25],而本研究表明深耕处理的茎蘖数和成穗率都要低于浅旋处理。在深耕处理下,稻田20 cm下的土壤翻到上层,稀释了表层的养分,使土壤表层养分含量小于浅旋处理^[26],水稻分蘖发生及成穗率与分蘖期的养分释放量紧密相关,分蘖发生的数量

与养分释放量呈显著正相关关系^[27]。因此,浅旋处理有利于分蘖期水稻吸收较多的养分,从而促进分蘖的发生,增加茎蘖数和高峰苗数。而缓释肥在分蘖前期释放慢,后期不断释放,促进分蘖前期分蘖的发生,后期分蘖特别是无效分蘖大量增加,从而影响了水稻壮秆大穗,降低了成穗率,因此,一些生产者和研究者在使用缓释肥时,为了弥补其不足,于分蘖期适当配施少量的速效氮肥,以有效提高分蘖的数量。本研究结果也表明,缓释肥处理的茎蘖数和成穗率均低于对应的速效肥处理。

水稻干物质积累量与稻田中土壤有效养分含量有着密切的关系^[28-30],秸秆还田下的水稻生长表现为前期生长缓慢,后期生长速率加快,地上部干物质积累量增加^[31-34]。本研究表明,秸秆还田处理的水稻从拔节期开始,一直到抽穗期和成熟期干物质积累量都高于不还田处理。干物质积累量受水稻对养分的吸收量影响较大^[35],深耕处理提高了深层土壤的养分含量,在水稻生长过程中,随着根系的伸长,深耕处理比浅旋处理能在土壤中吸收到更多深层的氮素养分^[36]。本研究表明,深耕处理的干物质积累量在拔节期、抽穗期和成熟期都显著高于浅旋处理。缓释肥处理在水稻营养生长过程中提供的养分满足了水稻各器官生长的需求,在生育中后期,氮素积累量更多,使干物质积累量显著提高^[37]。本研究中的缓释肥处理在拔节期、抽穗期形成的干物质质量低于速效肥处理,一直到成熟期才高于速效肥处理,而李世发等^[38]研究发现施用缓释肥处理的水稻干物质质量在穗分化期和减数分裂期显著高于速效肥处理,到抽穗期和收获期干物质积累量无明显差异。这可能与应用的缓释肥不同有关,从李世发等^[38]的研究结果来看,其应该是采用释放周期中等的缓释肥产品(文中无法查及),从而在分蘖期到减数分裂期释放大氮素养分,导致其穗分化时期水稻干物质积累量显著高于常规肥处理,而在分蘖期、抽穗期和成熟期无明显差异。而本试验采用的缓释肥产品释放周期长达100 d,这导致了后期养分释放量大于前期释放量,所以缓释肥处理的拔节期和抽穗期干物质积累量低于速效肥处理,在成熟期高于速效肥处理,但从整个周期来看,肥效释放较为平缓,所以干物质积累量处理间无显著差异。两个试验肥料释放特点的不同,造成了水稻前后期干物质积累量的趋势不一致的现象。

3.2 栽培措施对水稻产量形成的影响

秸秆还田可以增加土壤养分含量,改善有机质组

分品质,提高水稻产量^[39]。本研究表明,秸秆还田使水稻的产量平均增加5.26%;适当加深耕层是改善土壤环境、提高土壤肥力、实现水稻增产的有效手段。本研究表明,虽然深耕处理的穗粒数略少于浅旋处理,但显著促进了结实率和千粒质量的提高,从而促进了产量的增加,平均增加9.75%;有研究认为,缓释肥由于肥效期长,养分释放速率与作物需肥规律基本吻合,可以实现作物整个生育期内对养分的需求,具有稳产增产作用^[40-42],但张金萍等^[43]的研究表明,一次基施缓释肥,水稻产量仅能保持持平的状态,并没有出现增产的现象。本研究表明,在等量施用条件下,速效肥处理产量最高,显著高于缓释肥和长效肥处理,平均增产10.10%~15.20%,这可能与本试验施用的缓释肥品种有关,该产品肥料释放较为平缓,释放周期较长,前期释放的肥料量满足不了同期分蘖大量发生的需求,导致茎蘖数低于速效肥,从而影响了最后的产量,而长效肥在水稻前期养分释放量较大,后期养分释放较少,从而也影响了产量。

3.3 栽培措施对水稻氮素吸收利用的影响

秸秆还田配施氮肥可以增加土壤含氮量,提高土壤矿质氮的生物有效性,从而增加水稻对氮素的吸收。本研究表明,秸秆还田处理的吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力 and 氮肥利用率均高于秸秆不还田处理,试验1的增幅为0.44%~5.26%,试验2的增幅为0.51%~5.65%。深耕处理可以扩大根系生长范围,有效养分含量较高,有利于根系吸收深层土壤养分,促进水稻养分的积累,从而获得较高的氮素利用率。本研究表明,深耕处理的吸氮量、氮素籽粒生产效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率都要高于浅旋处理,表现出氮素吸收和氮素利用的主要指标同时提高的趋势。缓释肥对水稻的氮肥利用率有较明显的促进作用^[44],在干湿交替灌溉条件下,缓释肥能保持氮素的高效释放,有利于高产群体的形成,从而提高稻株氮素积累量^[45]。本研究表明,缓释肥处理的水稻植株吸氮量和氮肥利用率要高于速效肥处理。

3.4 栽培措施对不同生育时期土壤养分的影响

秸秆还田可以提高了土壤全氮、碱解氮、全磷和速效磷含量^[39]。杨敏芳等^[46]也发现,无论是翻耕还是旋耕,秸秆还田均不同程度提高了土壤养分含量。本研究表明,秸秆还田处理的水稻土壤全氮和碱解氮的含量呈现先下降后上升的趋势,由于秸秆前期腐解需要吸收氮素,导致秸秆还田处理的水稻分蘖期土壤全氮和碱解氮含量显著低于秸秆不还田处理,但随着秸

秆中的养分不断释放,拔节期、抽穗期和成熟期土壤全氮和碱解氮含量均高于秸秆不还田处理。但秸秆还田处理的水稻全磷和速效磷含量与不还田处理相比无明显变化。深耕处理将土壤表层的养分物质转移到深层土壤中,使其土壤上层中氮素含量低于浅旋处理,同时深耕处理过后疏松的土壤使水稻根系可以充分吸收土壤表层养分,导致表层养分含量下降。本研究表明,深耕处理的水稻土壤全氮、碱解氮含量都低于浅旋处理,但深耕处理对土壤全磷和速效磷含量无显著影响。缓释肥养分释放具有缓慢、长期的规律,即前期释放养分较少,中后期较多,相对应的土壤中氮素含量也是前期低、中后期高。本研究发现,从分蘖期到拔节期,缓释肥处理的土壤中全氮、速效氮含量低于速效肥处理,进入拔节后开始提高,至抽穗、成熟期一直高于速效肥处理,但缓释肥处理对土壤中全磷和速效磷也无显著影响。

3.5 栽培措施对不同生育时期稻田尾水氮、磷含量的影响

秸秆还田能够有效减少农田尾水中氮素的流失量^[12,47-48],在水稻生育前期,分解还田秸秆的微生物需要消耗大量的养分,加上秸秆本身对稻田中的小颗粒氮、磷具有一定的吸附作用,从而降低了稻田尾水中的氮、磷含量。随着水稻生育进程推进,秸秆腐解逐渐完成,养分逐渐释放,导致其尾水中氮、磷含量增加^[49]。本研究表明,在分蘖期,秸秆还田处理的尾水中氮、磷含量低于不还田处理,从拔节后开始高于不还田处理。从耕作方式来看,浅旋处理使得土壤养分留在土壤表层,提高了尾水中的氮、磷含量,而深耕与旋耕能有效降低尾水中的氮素含量^[50]。本研究表明,在分蘖期、拔节期和抽穗期深耕处理的尾水中氮、磷含量都低于浅旋处理,这也说明了耕作层越深,在一定程度上越有益于土壤的固肥作用。从肥料品种来看,缓释肥处理的稻田尾水中的养分含量与其缓慢释放的特点有较强的联系。本研究表明,由于缓释肥前期释放较缓慢,中后期的释放较快,使得分蘖期、拔节期缓释肥处理稻田尾水中氮、磷含量低于速效肥处理,但在抽穗期却高于速效肥处理。根据国家地表水环境质量基本项目标准,V类水标准中总氮 $\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总磷 $\leq 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,本研究试验3中深耕速效处理的总氮含量在抽穗期接近该标准,试验2中的还田深耕速效、不还田浅旋速效和还不田深耕速效处理中的总磷含量在抽穗期达到了V类水总磷含量的要求。

4 结论

秸秆还田、深耕和施用速效肥能够提高产量,秸秆不还田、深耕和施用缓释肥能够降低稻田尾水中氮、磷含量。采用秸秆还田+深耕+速效肥的方式可以挖掘水稻的产量潜力,采用秸秆不还田+深耕+缓释肥的方式可以实现绿色、高效、生态的水稻生产目的。水稻根系性状及栽插密度等是影响养分吸收利用、稻田尾水氮磷含量的重要因素,如何在本研究的基础上,将它们与秸秆还田、耕作方式、肥料类型等因素有机连接起来,实现丰产、高效、生态、绿色的生产目标,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 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 Fertilizers*, 2015, 21(4): 836-845.
- [2] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 不同栽培技术对水稻产量及径流 NPK 流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1790-1796. LIU H J, GUO Z, ZHENG J C, et al. Effect of different cultivation techniques on rice yield and NPK runoff losses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9): 1790-1796.
- [3] YAN W J, HUANG M X, ZHANG S, et al. Phosphorus export by runoff from agricultural field plots with different crop cover in Lake Taihu watershed[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13(4): 502-507.
- [4] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1611-1621. YANG J C, DU Y, LIU H. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1611-1621.
- [5] 秦娜, 朱灿灿, 代书桃, 等. 施氮时期对谷子产量、品质和氮素利用率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 67-78. QIN N, ZHU C C, DAI S T, et al. Effects of nitrogen fertilizer application stage on the grain yield and quality and nitrogen use efficiency of foxtail millet[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(1): 67-78.
- [6] 王荣嘉, 张建锋. 植被缓冲带在水源地面源污染治理中的作用[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 981-988. WANG R J, ZHANG J F. Roles of vegetation buffer zones on non-point source pollution control in water source areas[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 981-988.
- [7] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 81-84. LI X F, ZHU J Z, GU X J, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 81-84.
- [8] 汪洪, 李录久, 王凤忠, 等. 人工湿地技术在农业面源水体污染控制中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 441-446. WANG H, LI L J, WANG F Z, et al. Application of constructed wetlands for treating water pollution from agricultural non-point sources[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl): 441-446.
- [9] 晏军, 王伟义, 李斌, 等. 秸秆还田下化肥减施对苏北地区水稻产量与氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 74-82. YAN J, WANG W Y, LI B, et al. Effects of straw returning and fertilizer reduction on rice yield, nitrogen uptake and utilization in northern Jiangsu[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5): 74-82.
- [10] 张均华, 刘建立, 张佳宝, 等. 施氮量对稻麦干物质转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1736-1742. ZHANG J H, LIU J L, ZHANG J B, et al. Effects of nitrogen application rates on translocation of dry matter and utilization of nitrogen in rice and wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(10): 1736-1742.
- [11] 剧成欣, 季红娟, 张春梅, 等. 中国水稻生产“双减”的目的意义与途径方法[J]. 中国农学通报, 2018, 34(23): 12-18. JU C X, JI H J, ZHANG C M, et al. The meaning and approach of “double reduction” of rice production in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(23): 12-18.
- [12] 孙会峰, 周胜, 付子斌, 等. 秸秆与缓释肥配施对水稻产量及氮素吸收利用率的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 95-98. SUN H F, ZHOU S, FU Z S, et al. Effects of application of controlled-release fertilizer combined with wheat straw on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *China Rice*, 2015, 21(4): 95-98.
- [13] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 81-85. ZHU L Q, ZHANG D W, BIAN X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 81-85.
- [14] 王桂苓, 马友华, 孙兴旺, 等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 6-10, 29. WANG G L, MA Y H, SUN X W, et al. Study of nitrogen and phosphorus runoff in wheat-rice rotation farmland in Chao Lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 6-10, 29.
- [15] 周胜, 张鲜鲜, 王从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 852-862. ZHOU S, ZHANG X X, WANG C, et al. Research progress and prospects of water and crop residue managements to mitigate greenhouse gases emissions from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 852-862.
- [16] YI L X, HU Y G, ZENG Z H, et al. Effects of Chinese milk vetch (*As-tragalus sinicus* L.) residue incorporation on CH₄ and N₂O emission from a double-rice paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(9): 1537-1544.
- [17] 李思平, 丁效东, 曾路生, 等. 秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 208-215. LI S P, DING X D, ZENG L S, et al. Effects of straw returning and chemical fertilizer reduction on growth index and photosynthetic pa-

- rameters of rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2):208-215.
- [18] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12):2221-2232. SUN Y J, SUN Y Y, LIU S J, et al. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12):2221-2232.
- [19] 周娟, 舒小伟, 赖上坤, 等. 不同类型水稻品种产量和氮素吸收利用对大气 CO₂ 浓度升高响应的差异[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(6):561-573. ZHOU J, SHU X W, LAI S K, et al. Differences in response of grain yield, nitrogen absorption and utilization to elevated CO₂ concentration in different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(6):561-573.
- [20] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 常规籼稻与杂交籼稻氮素利用效率的差异[J]. 江苏农业研究, 2001, 22(1):12-15. SHAN Y H, WANG Y L, YAMAMOTO Y, et al. Genotypic differences of nitrogen use efficiency in various types of indica rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Jiangsu Agricultural Research*, 2001, 22(1):12-15.
- [21] 张振江. 长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(4):154-155, 147. ZHANG Z J. Effects of long-term direct return of wheat straw to the field on crop yield and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(4):154-155, 147.
- [22] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究[J]. 作物学报, 2011, 37(7):1235-1248. LI J, ZHANG H C, CHANG Y, et al. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7):1235-1248.
- [23] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 等. 麦秸还田及氮肥管理技术对水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(2):284-291. XU G W, WU C F, LIU H, et al. Effects of wheat residue incorporation and nitrogen management techniques on formation of the grain yield of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2):284-291.
- [24] 李鹏, 李永春, 史加亮, 等. 水稻秸秆还田时间对土壤真菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(13):4309-4317. LI P, LI Y C, SHI J L, et al. Rice straw return of different decomposition days altered soil fungal community structure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13):4309-4317.
- [25] 董姝含, 贺章咪, 王婉琦, 等. 土壤有机氮组分的年际变化及其对秸秆还田的响应[J]. 应用生态学报, 2022, 33(11):2963-2970. DONG S H, HE Z M, WANG W Q, et al. Interannual variation of soil organic nitrogen fractions and its response to straw returning[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11):2963-2970.
- [26] 董桂春, 陈琛, 袁秋梅, 等. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3):642-651. DONG G C, CHEN C, YUAN Q M, et al. The effect of nitrogen fertilizer treatments on root traits and nitrogen use efficiency in Indica rice varieties with high nitrogen absorption efficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3):642-651.
- [27] 顾克军, 张传辉, 顾东祥, 等. 短期不同秸秆还田与耕作方式对土壤养分与稻麦周年产量的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(6):1408-1413. GU K J, ZHANG C H, GU D X, et al. Effects of different straw returning and tillage methods on annual yield and soil nutrients under rice-wheat rotation system in short-term[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(6):1408-1413.
- [28] 张娟琴, 郑宪清, 张翰林, 等. 长期秸秆还田与氮肥调控对稻田土壤质量及产量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(1):181-187. ZHANG J Q, ZHENG X Q, ZHANG H L, et al. Effects of long-term straw returning and nitrogen fertilizer regulation on soil quality and yields of rice field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(1):181-187.
- [29] CHOUDHURY S G, SRIVASTAVA S, SINGH R, et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 136:76-83.
- [30] 裴刚鹏, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(3):282-290. PEI P G, ZHANG J H, ZHU L F, et al. Effects of straw returning coupled with N application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(3):282-290.
- [31] 樊剑波, 沈其荣, 谭炯壮, 等. 不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异[J]. 生态学报, 2009, 29(6):3052-3058. FAN J B, SHEN Q R, TAN J Z, et al. Difference of root physiological and ecological indices in rice cultivars with different N use efficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6):3052-3058.
- [32] ZENG X M. Effects of modified fertilization technology on the grain yield and nitrogen use efficiency of midseason rice[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137:203-212.
- [33] HYUCK-SOO K. Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response[J]. *Chemosphere*, 2016, 142:153-159.
- [34] AGNES T P, KAZUNARI T, KAZUYUKI I, et al. Enhancing soil quality through residue management in a rice-wheat system in Fukuoka, Japan[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2005, 51(6):849-860.
- [35] 王秋菊, 高中超, 张劲松, 等. 黑土稻田连续深耕改善土壤理化性质提高水稻产量大田试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9):126-132. WANG Q J, GAO Z C, ZHANG J S, et al. Black-soil paddy field experiment on improving soil physical and chemical properties and increasing rice yield by continuous deep ploughing-soil paddy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(9):126-132.
- [36] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10):132-141. XU G W, WANG H Z, ZHAI Z H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10):132-141.
- [37] 周洁宇, 何军, 李杜白, 等. 不同栽培方式下缓释肥施用对水稻生长特性及产量的影响[J]. 中国稻米, 2022, 28(3):92-95. ZHOU J Y, HE J, LI D B, et al. Effects of slow-release fertilizer application

- on the growth characteristics and yield of rice under different cultivation methods[J]. *China Rice*, 2022, 28(3):92-95.
- [38] 李世发, 刘元英, 范立春, 等. 缓释肥对水稻生长发育及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(7):38-43. LI S F, LIU Y Y, FAN L C, et al. Effects of slow-release fertilizer on growth and yield of rice[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(7):38-43.
- [39] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13):3779-3787. YANG B J, HUANG G Q, XU N, et al. The effects of returning straw containing fertilizer with varying nutrient ratios on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13):3779-3787.
- [40] 侯红乾, 黄永兰, 翼建华, 等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(4):389-396. HOU H Q, HUANG Y L, YI J H, et al. Effects of controlled-release fertilizer application on double cropping rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30(4):389-396.
- [41] YANG Y C. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6):2307-2317.
- [42] CAI G X, CHEN D L, DING H, et al. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3):187-195.
- [43] 张金萍, 陈照明, 王强, 等. 缓释氮比例对一次性施肥单季晚稻生长和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6):207-212, 221. ZHANG J P, CHEN Z M, WANG Q, et al. Effect of slow-release nitrogen ratio on growth and nitrogen utilization of single-cropping late rice with one-time fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6):207-212, 221.
- [44] 王忠林. 缓释肥对水稻甬优1540产量、土壤地力与肥料利用率的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(11):2205-2207. WANG Z L. Effects of slow-release fertilizer on yield, soil fertility and fertilizer utilization rate of rice Yongyou 1540[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(11):2205-2207.
- [45] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5):859-870. PENG Y, SUN Y J, JIANG M J, et al. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(5):859-870.
- [46] 杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2):272-275, 281. YANG M F, ZHU L Q, HAN X Z, et al. Effects of tillage and crop residues incorporation on soil nutrient, microbial biomass and enzyme activity under rice-wheat rotation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2):272-275, 281.
- [47] 谢红梅, 朱波. 农田非点源氮污染研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3):349-352. XIE H M, ZHU B. Research progress on non-point source pollution of nitrogen in agro-ecosystem[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(3):349-352.
- [48] SMITH K A, JACKSON D R, PEPPER T J. Nutrient losses by surface run-off following the application of organic manures to arable land. 1. Nitrogen[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 112(1):41-51.
- [49] 李瑞鸿, 洪林, 罗文兵. 漳河灌区农田地表排水中磷素流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12):102-106. LI R H, HONG L, LUO W B. Characteristic analysis of phosphorus loss in surface drainage from cropland in Zhanghe irrigation district[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12):102-106.
- [50] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):6-10. ZHU L Q, XIA X J, HU Q Y, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):6-10.

(责任编辑:李丹)