

¹⁵N示踪分析节水灌溉下水稻对不同时期氮肥的吸收分配

张忠学^{1,2} 陈鹏^{1,2} 陈帅宏^{1,2} 郑恩楠^{1,2} 聂堂哲^{1,2} 刘明^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示节水灌溉下水稻对肥料氮素吸收利用情况, 利用¹⁵N示踪技术分别标记施用的基氮肥、蘖氮肥、穗氮肥, 将传统淹水灌溉作为对照, 研究了稻作控制灌溉模式下成熟期水稻基肥、蘖肥、穗肥氮素的积累量及各时期肥料氮素在水稻地上部各器官的分布情况, 并对比研究了两种灌溉方式不同施氮水平下的各期肥料利用率。试验结果表明: 稻作控制灌溉模式较传统淹水灌溉显著提高了水稻地上部干物质积累量、氮素总积累量及产量, 起到了“节水、高产”的作用; 不同施氮量下水稻氮素总积累量中肥料氮素的占比约为 16.49% ~ 22.23%, 不同灌溉方式之间差异并不显著; 不同施氮水平控制灌溉处理水稻的肥料氮素总利用率为 31.82% ~ 36.29%、基肥氮素利用率为 10.91% ~ 15.36%、蘖肥氮素利用率为 34.84% ~ 36.90%、穗肥氮素利用率为 55.78% ~ 63.85%, 稻作控制灌溉模式下除水稻对基肥氮素的利用率较低外, 肥料氮素总利用率、蘖肥和穗肥氮素利用率均优于传统淹水灌溉, 肥料氮素得到了高效利用, 降低了肥料氮素残留引起环境污染的风险, 相关性分析表明: 肥料氮素的总利用率与蘖肥和穗肥氮素利用率呈极显著正相关, 研究结果可为进一步提高稻作控制灌溉条件下肥料氮素利用率提供理论依据。

关键词: 水稻; 节水灌溉; 氮素吸收; 氮肥回收率; 同位素示踪技术

中图分类号: S511; S14-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0309-09

¹⁵N Tracer-based Analysis of Water and Nitrogen Management Differences in Uptake and Partitioning of N Applied at Different Growth Stages in Transplanted Rice

ZHANG Zhongxue^{1,2} CHEN Peng^{1,2} CHEN Shuaihong^{1,2} ZHENG Ennan^{1,2} NIE Tangzhe^{1,2} LIU Ming^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to further investigate the uptake of fertilizer-N at different growth stages and in the partitioning of accumulated N in transplanted rice, field experiments were combined with micro-area test, and the traditional flooding irrigation was used as control, three N rates (85 kg/hm², 110 kg/hm² and 135 kg/hm²) were set and three ¹⁵N-labelled fertilizer application treatments were conducted in rice with different fertilizer-N recovery efficiencies. The fertilizer-N recovery efficiency of total fertilizer was measured, and the fertilizer-N recovery efficiencies of basal, tillering and panicle fertilizations were analyzed by applying ¹⁵N-labelled urea as basal, tillering or panicle fertilizer, and comparative study of the two kinds of irrigation fertilizer at different nitrogen utilization rates. The result showed that compared with the traditional flooding irrigation, rice irrigation control model significantly increased dry matter accumulation, nitrogen accumulation and yield of rice, had the “water-saving and high-yield” role. About 16.49% ~ 22.23% of different nitrogen amounts of total nitrogen accumulation in rice under nitrogen fertilizer, the difference between different irrigation methods was not significant; the difference between different irrigation methods was not significant; different nitrogen levels control irrigation rice total fertilizer-N recovery efficiency was 31.82% ~ 36.29%, the fertilizer-N recovery efficiency of basal fertilizer was 10.91% ~ 15.36%, the fertilizer-N recovery efficiency of tillering fertilizer was 34.84% ~ 36.90%, the fertilizer-N recovery efficiency of pancile fertilizer was 55.78% ~ 63.85%. The rice control irrigation mode in addition to fertilizer-N recovery efficiency of basal fertilizer in rice were lower, total, tillering and panicle fertilizer-N recovery efficiency was better than those of the traditional flooding irrigation. The correlation analysis showed that fertilizer-N recovery efficiency of total fertilizer had a

significant positive correlation with fertilizer-N recovery efficiency of tillering fertilizer and panicle fertilizer, which provided a reference for further improving the utilization rate of fertilizer nitrogen under controlled irrigation.

Key words: rice; water-saving irrigation; N uptake; fertilizer-N recovery efficiency; isotope tracer technology

0 引言

水稻是我国主要的粮食作物,种植地域广泛^[1]。由于不同地区的农田小气候差异较大,导致节水灌溉后水稻对不同时期氮肥的吸收利用情况有一定的差异,如何选择与之配套的田间氮肥管理技术,保证肥料氮素高效利用是需要考虑的问题之一。错误的氮肥管理方法会导致肥料氮素利用率降低,使未被吸收利用的肥料氮素经径流、淋溶等途径损失,引发农田环境污染^[2-4]。因此,在不同水稻种植区,研究节水灌溉下水稻对不同时期肥料氮素的利用情况对区域的水稻氮肥管理具有指导意义。

相关研究表明,水稻生长发育过程中施氮肥的次数超过3次对产量的影响较小^[5],在我国的水稻生产过程中,氮肥通常分为基肥、蘖肥和穗肥3次分施,施氮量的40%~60%作为基肥,20%~30%作为蘖肥,剩余的20%~30%作为穗肥施入。通常情况下,基肥在水稻移栽前施入到稻田土中,蘖肥在移栽后半个月返青期结束后施用,穗肥在水稻倒二叶露尖长到一半时施用。水氮是影响水稻生长发育的两大重要环境因子,近20年来,专家学者对于水稻氮素利用情况进行了深入研究,已有研究表明,传统淹水灌溉下水稻对穗肥的吸收利用率最高,可达54%~80%,基肥和蘖肥的回收利用率分别为9%~22%和17%~34%,并且基肥、蘖肥的用量越大,氮肥的回收利用率越低^[6];在此基础上如何进一步提高肥料氮素利用率一直是农业科学的研究重点之一,目前提高氮肥利用率的研究多集中于改良传统施肥方法,研发新型控释肥料和使用硝化、脲酶抑制剂等方面^[7-10],这些方法在减少稻田氮素损失、提高氮肥利用率上起到了一定的效果,但劳动成本和经济因素在一定程度上阻碍了这些方法在实际生产中的普及应用。通过改善田间水氮管理方法,提高氮肥回收利用率仍是目前水稻生产中使用最广泛的方法^[11]。研究表明节水灌溉模式下水稻可以获得不低于传统淹水灌溉的氮素利用率^[12],但此类研究多集中于水稻对生育期内肥料氮素总体利用情况,对节水灌溉下水稻对不同时期肥料氮素的吸收利用及在水稻植株各器官的分配研究较为模糊。

本文以传统淹水灌溉作为对照,采用在田间小区试验中开设¹⁵N示踪微区的方法,对传统的总氮

肥利用率进行细分,研究不同水氮调控下水稻对基肥、蘖肥和穗肥氮素吸收利用率,以及各期肥料氮素在水稻植株内的积累和分布情况,以期为节水灌溉下精确定量施肥技术应用和提高水稻肥料氮素利用效率提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年在黑龙江省水稻灌溉试验站进行,该站(127°40′45″E、46°57′28″N)位于庆安县和平镇,是典型的寒地黑土分布区。从水稻移栽到成熟,该地区总降雨量为232 mm,日气温和降雨量变化如图1所示,多年平均水面蒸发量750 mm,作物水热生长期为156~171 d,全年无霜期128 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候。供试土壤为黑土型水稻土,种植水稻20 a以上,土壤耕层厚度11.3 cm,犁底层厚度10.5 cm,在移栽和施肥前,对试验小区0~20 cm土层进行5点对角取样后混合,并对其主要土壤理化性质进行分析,土壤粒径0.02~2.0 mm的颗粒占37.3%、0.002~0.02 mm的颗粒占32.3%、粒径小于0.002 mm的颗粒占30.4%,土壤容重1.01 g/cm³,孔隙度61.8%,pH值6.45,耕层土壤(0~20 cm)基础肥力(均为质量比)为:有机质质量比41.8 g/kg、全氮质量比15.06 g/kg、全磷质量比15.23 g/kg、全钾质量比20.11 g/kg、碱解氮质量比198.29 mg/kg、有效磷质量比36.22 mg/kg和速效钾质量比112.06 mg/kg。

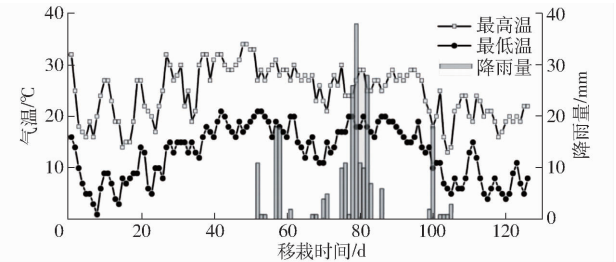


图1 水稻生长期内空气温度和降雨量的日变化

Fig.1 Daily changes of air temperature and rainfall during rice growth period

1.2 试验设计

1.2.1 小区试验

试验采用灌水方式和施氮量2因素全面试验,设置2种灌水方式:控制灌溉(C)、淹水灌溉(F),水

稻控制灌溉模式除水稻返青期田面保持 5 ~ 25 mm 浅薄水层外,其余各生育阶段均不建立水层,以根层的土壤含水率为控制指标确定灌水时间和灌水定额,灌水上限为土壤饱和含水率,分蘖前期、中期、末期、拔节孕穗期、抽穗开花期及乳熟期土壤含水率下限分别为饱和含水率的 85%、85%、60%、85%、85%、70%。淹水灌溉除分蘖后期为控制无效分蘖适当排水晒田和黄熟期自然落干以外,其余水稻生育期田面均保持 3 ~ 5 cm 水层。按当地施肥标准设 3 个施氮水平: N1 (85 kg/hm²)、N2 (110 kg/hm²)、N3 (135 kg/hm²)。共 6 个处理,每个处理设 3 次重复,共 18 个试验小区,每个小区面积 100 m² (10 m × 10 m),各小区之间田埂向地下内嵌 40 cm 深的塑料板,防止各小区间的水氮交换。氮肥按照基肥: 蘖肥: 穗肥比例为4. 5: 2: 3. 5 分施,基肥于水稻移栽前 1 d 施入,蘖肥于移栽后 24 d 施入,穗肥于移栽后 72 d 施入,各处理磷、钾肥用量均一致,施用 P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 80 kg/hm²,磷肥在移栽前一次性施用,钾肥于移栽前和水稻 8. 5 叶龄分 2 次施用,前后比例为 1: 1。试验选用当地的水稻品种“龙庆稻 3 号”,在充满土壤的育秧盘中将预发芽的种子培育成幼苗,

并于 2017 年 5 月 17 日将长势相同的水稻幼苗进行移栽,株距 16. 67 cm,行距 30 cm,每穴定 3 株,9 月 20 日收割,生育期为 126 d,在水稻各生长阶段及时除草,防治病虫害,以免影响水稻养分吸收。

1. 2. 2 微区试验

为了明确不同水氮管理下不同时期施入氮肥的吸收利用及分配情况,在上述试验小区内设置了¹⁵N 示踪微区(微区内水稻种植模式同试验小区),每个试验小区内设置 1 个微区,即单一处理下设置 3 个微区试验(3 个分处理),试验处理设置详见表 1,分处理 1(M1)为仅基肥施用¹⁵N-尿素,蘖肥和穗肥施用未标记的普通尿素;分处理 2(M2)为仅蘖肥施用¹⁵N-尿素,基肥和穗肥施用未标记的普通尿素;分处理 3(M3)为仅穗肥施用¹⁵N-尿素,基肥和蘖肥施用未标记的普通尿素。于稻田整地后和基肥尿素施用前在每个小区内预先埋设 1 个长 1 m、宽 1 m、高 0. 5 m 的无底 PVC 矩形框,将微区埋深及犁底层下(深 30 cm),施用的标记肥料为上海化工研究院生产的丰度为 10. 22% 的¹⁵N 标记尿素。氮肥、磷肥、钾肥用量及灌溉方式同所在的试验小区,试验微区采用农用小型潜水泵单独排灌,其余田间管理同试验小区。

表 1 试验处理设计
Tab.1 Design of experimental treatments

小区试验	微区试验	施肥量			小区试验	微区试验	施肥量		
		基肥	蘖肥	穗肥			基肥	蘖肥	穗肥
CN1	CN1M1	82 *	37	64	FN1	FN1M1	82 *	37	64
	CN1M2	82	37 *	64		FN1M2	82	37 *	64
	CN1M3	82	37	64 *		FN1M3	82	37	64 *
CN2	CN2M1	106 *	47	82	FN2	FN2M1	106 *	47	82
	CN2M2	106	47 *	82		FN2M2	106	47 *	82
	CN2M3	106	47	82 *		FN2M3	106	47	82 *
CN3	CN3M1	131 *	58	91	FN3	FN3M1	131 *	58	91
	CN3M2	131	58 *	91		FN3M2	131	58 *	91
	CN3M3	131	58	91 *		FN3M3	131	58	91 *

注:施肥量代表各处理每公顷施用氮素质量分数为 46. 4% 氮肥的质量,* 代表施用的是¹⁵N-尿素。

1. 3 观测内容与方法

1. 3. 1 干物质量及植株氮含量

于水稻成熟期从每个微区内、外随机选取代表性水稻各 3 穴,然后用农用压缩喷雾器冲洗干净,并将水稻植株地上部分为茎、叶、穗 3 部分,装入样品袋,带回实验室,放入干燥箱于 105℃、鼓风条件下杀青 30 min,然后 70℃ 下干燥至恒质量后称量不同部位的干物质量。称量后的样品使用球磨机进行粉碎处理,过 80 目筛后混匀,采用 H₂SO₄- H₂O₂ 消煮法和 AA3 型连续流动分析仪 (Seal Analytical GmbH, Germany, 灵敏度 0. 001 AUFS) 测定各部位全氮含量,剩余样品粉碎过筛后放入样品袋中密封

保存。

1. 3. 2 肥料氮素积累量

将密封保存的水稻各器官样品带回实验室进行同位素测定,稳定同位素测试在东北农业大学农业部水资源高效利用重点实验室完成,采用元素分析仪 (Flash 2000 HT, Thermo Fisher Scientific, USA) 和同位素质谱仪 (DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, USA) 联用方法测定成熟期水稻各器官¹⁵N 丰度。

不同水氮调控下水稻植株样品中基肥氮素含量为 N_{diff(b)}、蘖肥氮素含量为 N_{diff(i)}、穗肥氮素含量为 N_{diff(p)},根据 YANG 等^[13] 的公式分别计算。

$$N_{dff(b,t,p)} = (a - b) / (c - d) \times 100\% \quad (1)$$

式中 a ——微区内植株样品的 ^{15}N 丰度
 b ——相同水氮处理微区外植株样品中 ^{15}N 丰度
 c —— ^{15}N 标记氮料中 ^{15}N 丰度
 d ——天然 ^{15}N 丰度标准值(0.366 3%)

植株氮素总积累量(NAA)为

$$P_{NAA} = D_M N_C \quad (2)$$

式中 D_M ——植株干物质质量,kg/hm²
 N_C ——植株含氮率,%

植株从基肥(b)、蘖肥(t)、穗肥(p)获得的 ^{15}N 积累量为

$$N_{(b,t,p)} = P_{NAA} N_{dff(b,t,p)} \quad (3)$$

植株中来自氮肥的氮素总积累量(TN)为

$$P_{TN} = N_{(b)} + N_{(t)} + N_{(p)} \quad (4)$$

基肥(b)、蘖肥(t)、穗肥(p)及总氮肥(total)回收率为

$$F_{NRE(b,t,p,total)} = N_{(b,t,p,total)} / N_{F(b,t,p,total)} \times 100\% \quad (5)$$

式中 F_{NRE} ——氮肥回收率, %
 N_F ——各时期施氮量,kg/hm²

1.3.3 产量

成熟期各处理取 10 穴水稻用于考种,考查穗数、穗粒数、结实率和千粒质量,并取 2 m²实收计产。

1.4 数据处理和统计分析

采用 SPSS 13.0 单因素方差分析及 Duncan 多重比较方法对相同施氮量下不同灌溉方式之间水稻氮素总积累量及各时期肥料氮素积累量等进行差异性分析及均值比较,并对总氮肥回收率、各时期氮肥回收率与水稻成熟期地上部氮素总积累量中各器官各时期肥料氮素积累量占比进行相关性分析,采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮调控下水稻产量、干物质积累和氮素在植株中的积累量

由图 2 可知,稻作控制灌溉模式下施氮量为

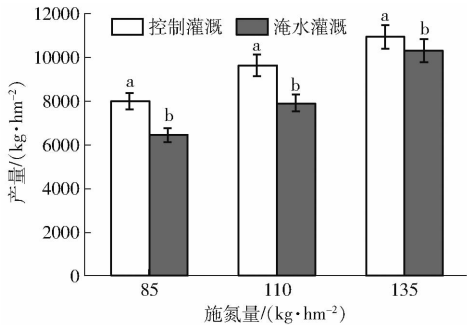


图 2 不同处理水稻地上部干物质质量与产量变化

110 kg/hm²和 135 kg/hm²较施氮量为 85 kg/hm²的水稻成熟期地上部干物质质量增加了 13.27% 和 27.52%;产量增加了 19.34% 和 43.99%。淹水灌溉下施氮量从 85 kg/hm²增加至 135 kg/hm²,水稻地上部干物质积累量增大了 1.32% ~ 6.65%,产量增加了 9.66% ~ 34.61%,两种灌溉方式下水稻成熟期地上部干物质积累量与产量均随施氮量的增加而增大,且稻作控制灌溉模式下增幅更优。不同灌溉方式处理间对比显示,稻作控制灌溉模式下水稻成熟期地上部干物质积累量在相同施氮量下较淹水灌溉分别高出 1.32%、7.49%、6.65%,产量分别高出 14.06%、24.14%、22.01%,表明稻作控制灌溉模式更有利于水稻地上部干物质积累并提高产量,起到节水高产的作用。

不同水氮调控下水稻氮素总积累量为 160.22 ~ 219.38 kg/hm²,肥料- ^{15}N 积累量为 22.75 ~ 48.76 kg/hm²,不同灌溉方式之间成熟期水稻植株氮素总积累量和 ^{15}N 积累量差异显著($P < 0.05$),与淹水灌溉相比(图 3),稻作控制灌溉模式水稻在 3 个施氮水平下均具有较高的植株氮素总积累量和 ^{15}N 积累量,稻作控制灌溉模式下水稻氮素总积累量在相同施氮量下较淹水灌溉分别提高了 2.35%、7.90%、3.90%;肥料- ^{15}N 积累量提高了 41.54%、3.26%、1.77%,并且控制灌溉模式下 31.82% ~ 36.29% 的肥料氮素被植株吸收利用,在相同施氮量下较淹水灌溉提高了 1.03% ~ 18.85%;控制灌溉处理下 3 个施氮水平水稻植株氮素总积累量中肥料- ^{15}N 占比分别为 16.49%、20.53%、22.23%,淹水灌溉处理下分别为 14.20%、21.41%、22.86%。研究结果表明,稻作控制灌溉模式有利于水稻的氮素积累,且水稻对肥料氮素的吸收利用情况要显著优于传统淹水灌溉。

2.2 不同水氮调控下水稻对基肥的吸收分配

仅基肥施用 ^{15}N -尿素时,10.91% ~ 20.05% 的基肥氮素被水稻吸收利用(图 4b),不同水氮调控下基肥回收率以及基肥- ^{15}N 积累量随着施氮量的增加而增

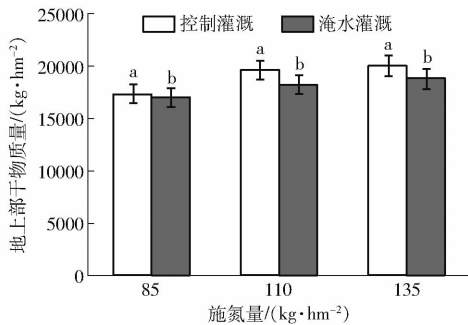


Fig.2 Dynamic trends of dry matter accumulation and grain yield under different treatments

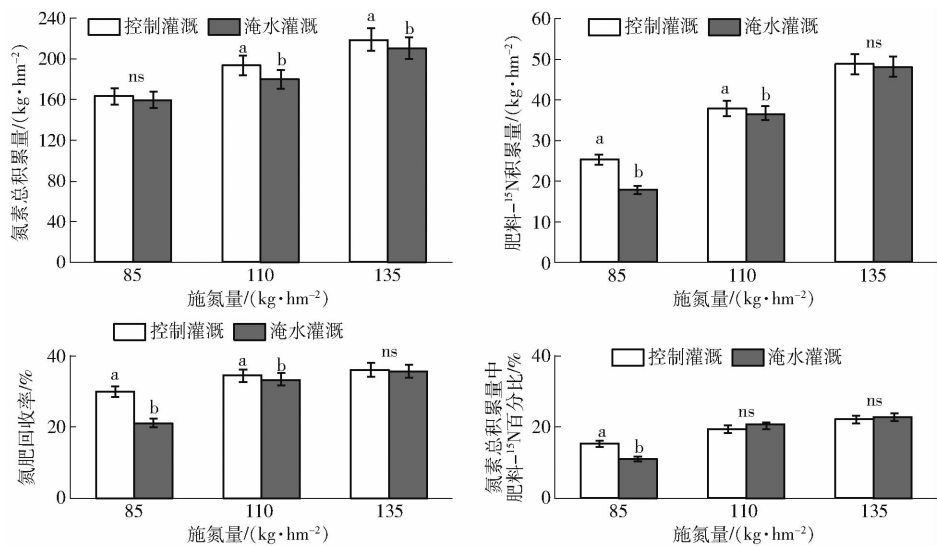


图 3 不同处理下水稻地上部氮素总积累量、肥料-¹⁵N 积累量、氮肥回收率和氮素总积累量中肥料-¹⁵N 百分比变化

Fig.3 Dynamic trends of total N and ¹⁵N accumulation, fertilizer-N recovery efficiency and percentage of ¹⁵N to total N under different treatments

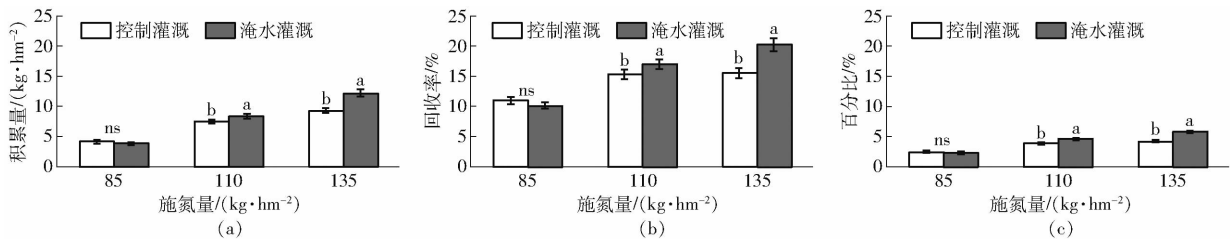


图 4 不同处理下水稻基肥-¹⁵N 积累量、回收率和氮素总积累量中基肥-¹⁵N 百分比

Fig.4 Basal -¹⁵N accumulation, basal fertilizer-N recovery efficiency and percentage of basal -¹⁵N under different treatments when only basal fertilizer was ¹⁵N-labelled urea

大(图 4a),不同施氮水平下稻作控制灌溉处理水稻成熟期基肥-¹⁵N 积累量约 4.17~9.33 kg/hm²,当施氮量为 110 kg/hm² 和 135 kg/hm² 时,仅有 15.16% 和 15.36% 的基肥被水稻吸收利用。不同灌溉方式处理间对比显示,传统淹水灌溉处理的水稻基肥-¹⁵N 积累量和基肥回收率在相同施氮量下较稻作控制灌溉处理增加了 11.51% 和 30.56%,研究结果表明控制灌溉处理水稻对基肥的利用率较低。当¹⁵N-尿素仅作为基肥施入时,不同水氮管理下水稻植株氮素总积累量来自基肥氮素的百分比随施氮量的增加而增大(图 4c),稻作控制灌溉模式下水稻植株氮素总积累量的 2.55%~4.25% 来自基肥氮素,基肥氮素在植株氮素积累量的占比显著低于传统淹水灌溉模式下,特别是在施氮量 135 kg/hm² 时,淹水灌溉处理水稻植株氮素总积累量中基肥氮素的占比较控制灌溉高 82.68%。

基肥-¹⁵N 在水稻植株各器官的分布差异较大,如表 2 所示,不同施氮水平下稻作控制灌溉模式下水稻植株基肥-¹⁵N 积累量的 9.05%~12.83% 分布在叶片中;16.56%~26.35% 的基肥-¹⁵N 分布在茎和鞘中,60.82%~74.40% 的基

肥-¹⁵N 分布在穗部,叶片中基肥-¹⁵N 约占水稻植株氮素总积累量的 0.26%~0.49%;茎和鞘约占 0.47%~1.00%;穗部约占 2.12%~2.44%,与传统淹水灌溉相比,稻作控制灌溉处理水稻各器官基肥氮素的积累量较低。

表 2 仅基肥施用¹⁵N-尿素时成熟期水稻各器官基肥-¹⁵N 积累量占总氮素积累量的百分比

Tab.2 Percentage of basal-¹⁵N in aboveground parts at maturity under different water and nitrogen managements when only basal fertilizer-N was ¹⁵N-labelled urea %

灌溉方式	施氮量/(kg·hm ⁻²)	叶	茎+鞘	穗
控制灌溉	85	0.26 ^b	0.47 ^c	2.12 ^b
	110	0.42 ^a	0.83 ^b	2.44 ^a
	135	0.49 ^a	1.00 ^a	2.32 ^a
淹水灌溉	85	0.27 ^c	0.50 ^c	1.49 ^c
	110	0.69 ^b	1.17 ^b	3.33 ^b
	135	0.97 ^a	1.74 ^a	4.57 ^a

注:表中同列不同小写字母表示数据在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.3 不同水氮调控下水稻对氮肥的吸收分配

当仅氮肥施用¹⁵N-尿素时,成熟期水稻地上部氮肥-¹⁵N 积累量随施氮量的增加而增大(图 5a),控

制灌溉处理施氮量为 135 kg/hm²时,水稻地上部蘖肥-¹⁵N 积累量最大,为 9.41 kg/hm²。不同灌溉方式处理间成熟期水稻蘖肥-¹⁵N 积累量差异显著 ($P < 0.05$),稻作控制灌溉模式成熟期水稻地上部蘖肥-¹⁵N 积累量在相同施氮量下较传统淹水灌溉分别提高了 54.82%、17.16%、10.20%,且相同施氮量下控制灌溉处理水稻蘖肥-¹⁵N 回收率显著高于传统淹水灌溉 ($P < 0.05$)。研究结果表明,稻作控制灌溉模式有利于水稻对蘖肥氮素的吸收利用,有效提高了蘖肥的回收利用率。

当¹⁵N-尿素仅作为蘖肥施入时,成熟期水稻地上部氮素总积累量中约 2.53% ~ 4.29% 来源于蘖

肥氮素,不同水氮管理下水稻植株氮素总积累量来自蘖肥氮素的百分比随施氮量的增加而增大(图 5c),且不同施氮量下稻作控制灌溉模式下水稻地上部氮素总积累量中蘖肥氮素占比显著大于传统淹水灌溉处理。如表 3 所示,不同水氮处理下成熟期水稻植株中蘖肥-¹⁵N 在各器官的分布差异显著 ($P < 0.05$),不同施氮水平下稻作控制灌溉处理水稻成熟期蘖肥-¹⁵N 积累量的 9.22% ~ 11.93% 分布在水稻叶片中,16.33% ~ 27.8% 分布在水稻茎和鞘中,60.23% ~ 74.44% 分布在穗部,稻作控制灌溉模式相同施氮量下水稻各器官的蘖肥-¹⁵N 积累量显著高于传统淹水灌溉。

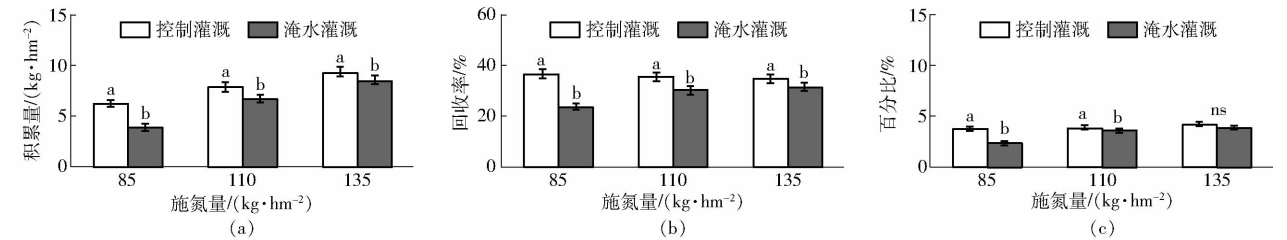


图 5 不同处理下水稻蘖肥-¹⁵N 积累量、蘖肥-¹⁵N 回收率和氮素总积累量中蘖肥-¹⁵N 百分比

Fig. 5 Tillering -¹⁵N accumulation, tillering fertilizer-N recovery efficiency and percentage of tillering -¹⁵N under different treatments when only tillering fertilizer was ¹⁵N - labelled urea

表 3 仅蘖肥施用 ¹⁵ N-尿素时成熟期水稻各器官 蘖肥- ¹⁵ N 积累量占总氮素积累量的百分比				
Tab.3 Percentage of tillering - ¹⁵ N in aboveground parts at maturity under different water and nitrogen managements when only tillering fertilizer - N was ¹⁵ N - labelled urea %				
灌溉方式	施氮量/(kg·hm ⁻²)	叶	茎 + 鞘	穗
控制灌溉	85	0.41 ^a	0.73 ^b	3.34 ^a
	110	0.45 ^a	0.93 ^a	2.75 ^b
	135	0.41 ^a	0.96 ^a	2.09 ^c
淹水灌溉	85	0.26 ^b	0.54 ^c	1.69 ^c
	110	0.43 ^a	0.79 ^b	2.27 ^b
	135	0.48 ^a	0.93 ^a	2.49 ^a

2.4 不同水氮调控下水稻对穗肥的吸收分配

当仅穗肥施用¹⁵N-尿素时,不同水氮调控下施入的穗肥氮素约 49.94% ~ 63.85% 被水稻吸收利用,成熟期水稻地上部穗肥-¹⁵N 的积累量随施氮量增加而增大,稻作控制灌溉模式下当施氮量由

85 kg/hm²增加到 135 kg/hm²时,成熟期水稻地上部穗肥-¹⁵N 积累量从 16.60 kg/hm²增加到 30.02 kg/hm²,穗肥-¹⁵N 的回收率由 55.78% 增加到 63.54%,不同灌溉方式之间穗肥-¹⁵N 积累量和穗肥回收率差异显著 ($P < 0.05$),如图 6 所示,稻作控制灌溉处理成熟期水稻地上部穗肥-¹⁵N 积累量和穗肥-¹⁵N 回收率在相同施氮量下较传统淹水灌溉提高了 11.70%、4.50%、8.99%。

当¹⁵N-尿素仅作为穗肥施入时,成熟期水稻地上部氮素总积累量中约 9.27% ~ 13.68% 来源于穗肥氮素,不同水氮调控下水稻植株氮素总积累量来自穗肥氮素的百分比随施氮量的增加而增大(图 6c),且不同施氮量下稻作控制灌溉模式下水稻地上部氮素总积累量中穗肥氮素占比显著大于传统淹水灌溉处理。如表 4 所示,不同水氮处理下成熟期水稻植株中穗肥-¹⁵N 在各器官的分布差异显著

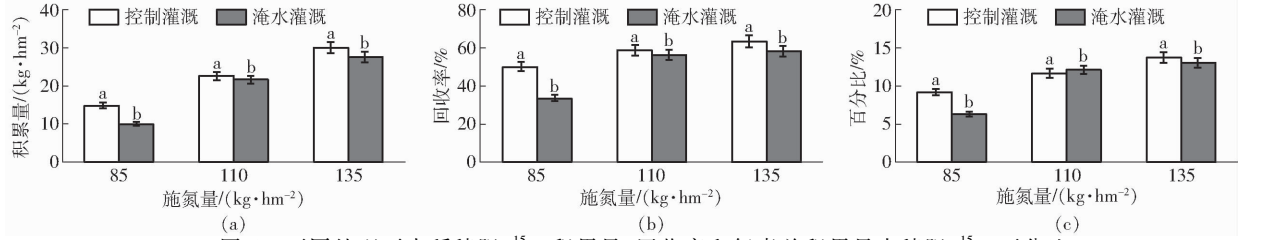


图 6 不同处理下水稻穗肥-¹⁵N 积累量、回收率和氮素总积累量中穗肥-¹⁵N 百分比

Fig. 6 Panicle -¹⁵N accumulation, panicle fertilizer - N recovery efficiency and percentage of panicle -¹⁵N under different treatments when only panicle fertilizer was ¹⁵N - labelled urea

($P < 0.05$),不同施氮水平下稻作控制灌溉处理水稻成熟期穗肥-¹⁵N 积累量的 5.77% ~ 7.40% 分布在水稻叶片中,12.72% ~ 19.50% 分布在水稻茎和鞘中,73.84% ~ 81.51% 分布在穗部,稻作控制灌溉模式水稻各器官的穗肥-¹⁵N 积累量显著高于传统淹水灌溉($P < 0.05$)。

表 4 仅穗肥施用¹⁵N-尿素时成熟期水稻各器官穗肥-¹⁵N 积累量占总氮素积累量的百分比

Tab.4 Percentage of panicle - ¹⁵ N in aboveground parts at maturity under different water and nitrogen managements when only panicle fertilizer - N was ¹⁵ N - labelled urea %				
灌溉方式	施氮量/(kg·hm ⁻²)	叶	茎+鞘	穗
控制灌溉	85	0.94 ^b	2.07 ^c	13.29 ^c
	110	1.45 ^a	3.63 ^b	14.57 ^b
	135	1.64 ^a	4.81 ^a	18.21 ^a
淹水灌溉	85	0.83 ^b	2.29 ^c	10.74 ^c
	110	1.32 ^a	3.04 ^b	12.06 ^b
	135	1.46 ^a	4.22 ^a	16.90 ^a

2.5 各期氮肥回收率相关性分析

统计分析表明(表 5), $F_{NRE(total)}$ 与 $F_{NRE(t)}$ ($R = 0.987, P < 0.01$) 和 $F_{NRE(p)}$ ($R = 0.990, P < 0.01$) 极显著正相关,但 $F_{NRE(total)}$ 与 $F_{NRE(b)}$ 的相关性不显著($R = 0.724, P > 0.05$),且 $F_{NRE(total)}$ 与 $t^{-15}N_{(1)}$ 、 $t^{-15}N_{(s)}$ 、 $p^{-15}N_{(1)}$ 、 $p^{-15}N_{(s)}$ 、 $p^{-15}N_{(t)}$ 显著相关。 $F_{NRE(b)}$ 和 $F_{NRE(p)}$ 与氮素总积累量中水稻各器官基肥

表 5 成熟期水稻各时期氮肥回收率相关系数

Tab.5 Correlation coefficient of fertilizer-N efficiency and percentage of accumulated fertilizer-N in total N in aboveground parts at maturity

	$F_{NRE(total)}$	$F_{NRE(b)}$	$F_{NRE(t)}$	$F_{NRE(p)}$
$F_{NRE(b)}$	0.724			
$F_{NRE(t)}$	0.987 **			
$F_{NRE(p)}$	0.990 **			
$b^{-15}N_{(1)}$	0.631	0.982 **		
$b^{-15}N_{(s)}$	0.708	0.997 **		
$b^{-15}N_{(t)}$	0.625	0.950 **		
$t^{-15}N_{(1)}$	0.848 *		0.796	
$t^{-15}N_{(t)}$	0.991 **		0.977 **	
$t^{-15}N_{(s)}$	0.199		0.204	
$p^{-15}N_{(1)}$	0.957 **			0.962 **
$p^{-15}N_{(s)}$	0.898 *			0.981 **
$p^{-15}N_{(t)}$	0.898 *			0.942 **

注:表中 $b^{-15}N_{(1)}$ 、 $b^{-15}N_{(s)}$ 、 $b^{-15}N_{(t)}$ 分别代表植株叶(1)、茎(s)、穗(t)中基肥氮素积累量占植株氮素总积累量的百分比; $t^{-15}N_{(1)}$ 、 $t^{-15}N_{(s)}$ 、 $t^{-15}N_{(t)}$ 分别代表植株叶(1)、茎(s)、穗(t)中蘖肥氮素积累量占植株氮素总积累量的百分比; $p^{-15}N_{(1)}$ 、 $p^{-15}N_{(s)}$ 、 $p^{-15}N_{(t)}$ 分别代表植株叶(1)、茎(s)、穗(t)中穗肥氮素积累量占植株氮素总积累量的百分比。* 表示变量之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,**表示变量之间在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

和穗肥氮素积累量占比均呈显著正相关($P < 0.01$),但 $F_{NRE(t)}$ 仅与 $t^{-15}N_{(1)}$ 呈显著正相关($R = 0.977, P < 0.01$),与氮素总积累量中叶和穗部蘖肥氮素占比相关性不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

通常所说的氮肥回收利用率只能单一的表示水稻生长过程中对总体肥料氮素的利用情况,本研究中利用¹⁵N 示踪技术,分别单独施用带有标记的肥料,研究节水灌溉下基肥、蘖肥和穗肥氮素在水稻植株中的积累和分配,为精确地描述稻作控制灌溉模式下水稻在全生育期内对肥料氮素的回收利用情况提供依据。试验结果表明,稻作控制灌溉模式下不同施氮量处理水稻成熟期地上部氮素总积累量中 16.49% ~ 22.23% 来自于肥料氮素,且水稻对穗肥的吸收利用率最高(55.78% ~ 63.85%),显著高于基肥的利用率(10.91% ~ 15.36%)和蘖肥利用率(34.84% ~ 36.90%),这与林晶晶等^[6]的研究结果相近。已有研究表明,一般情况下作物对基肥的吸收利用率不足 10%^[14],本试验中控制灌溉模式下水稻对基肥氮素的吸收利用情况要低于传统淹水灌溉模式,这主要是因为控制灌溉模式下水稻返青期后采用无水层的田间管理模式,这一时期节水灌溉管理会在一定程度上抑制水稻的生长,从而使水稻对前期基肥氮素的吸收利用率较低;另一方面,邵东国等^[15]利用 Hydrus - 1D 结合一阶动力学方程对节水条件下水稻对氮素的利用情况的研究表明,节水条件下肥料氮素的氨挥发损失是影响氮素利用率的一个重要方面^[16-17],导致水稻对基肥氮素的吸收利用情况要低于传统淹水灌溉模式,除此之外,稻作控制灌溉模式下水稻对蘖肥和穗肥的吸收利用情况均优于淹水灌溉,控制灌溉处理相同施氮量下水稻的蘖肥利用率和穗肥利用率较传统淹水灌溉提高了 10.20% ~ 54.82% 和 18.30% ~ 33.78%,这是由于节水灌溉处理水稻后期的生长有明显的补偿效应^[18-19],且节水灌溉有利于水稻根系的生长发育,有利于水稻对后期肥料氮素的吸收利用^[20-21]。因此,推行节水灌溉可以有效提高水稻对肥料氮素的高效利用,从而减少了残留并在土壤中积累的肥料氮素的含量。

本试验中相关性分析表明,氮肥总利用率与蘖肥和穗肥的利用率呈显著正相关,与基肥利用率相关性不显著,这与 WANG 等^[22]的研究结果不一致。已有研究表明,未被作物吸收利用而在土壤中积累的肥料氮素已成为土壤、水体和大气污染的重要来源^[23-26],本试验中,虽然稻作控制灌溉模式

下水稻总氮肥利用率、蘖肥利用率和穗肥利用率均高于传统淹水灌溉,且总氮肥利用率与基肥利用率相关性不显著,但控制灌溉下水稻对于前期基肥氮素的吸收利用率过低,导致大量基肥氮素残留在稻田土壤中的问题不容忽视,近年来,一些专家学者提出了减少前期基肥和蘖肥的用量并将氮肥后移,增加水稻穗肥施用量的方法,从而提高水稻产量,并减少水稻生长期内肥料氮素的损失^[27-28],但是基肥和蘖肥的施用量对增加水稻分蘖数起着非常重要的作用^[29],如何在不影响水稻前期生长发育的基础上因地制宜地减少基肥的施用量有待于进一步研究。另一方面,当水稻穗肥施用量超过一定阈值时,水稻的产量以及稻米的品质随着穗肥施用量的增加而降低^[30-32],孙永健等^[33]利用¹³C和¹⁵N双同位素示踪方法研究了不同氮肥后移比例对水稻氮素吸收代谢的影响,发现随着氮肥后移比例的增加氮素利用效率显著下降。综上所述,氮肥后移是一个有效降低节水灌溉下基肥氮素损失过大的方法,但需综合考虑多方面因素,需进一步研究。本试验采用¹⁵N示踪方法量化了控制灌溉下水稻对各期肥料氮素的吸收利用情况,为基蘖穗肥的定量计算提供了相关参数,为确定适宜的氮肥施用比例并进一步提高节水灌溉下水稻的肥料氮素吸收利用率提供依据。

4 结 论

(1)不同灌溉方式下水稻成熟期地上部干物质积累量、氮素积累量和产量均随施氮量的增加而增

大,稻作控制灌溉模式下水稻成熟期地上部干物质积累量在相同施氮量下较淹水灌溉分别提高了1.32%、7.49%、6.65%;氮素总积累量提高了2.35%、7.90%、3.90%;产量分别提高了14.06%、24.14%、22.01%,且随着施氮量的增加控制灌溉下水稻干物质积累量和产量的增幅更优,表明控制灌溉模式有利于水稻氮素及干物质的积累并提高产量。

(2)不同施氮量下控制灌溉处理水稻的基肥利用率为10.91%~15.36%;蘖肥利用率为34.84%~36.90%;穗肥利用率为55.78%~63.85%,不同水氮处理下不同时期肥料氮素在成熟期水稻植株各器官的积累量由大到小均表现为穗、茎、叶,稻作控制灌溉模式下除水稻基肥利用率较淹水灌溉低外,水稻对蘖肥和穗肥的利用率均显著高于淹水灌溉,且水稻对肥料总氮素利用率较传统淹水灌溉提高了1.03%~18.85%,稻作控制灌溉模式提高了水稻对肥料氮素的吸收利用率,有效降低了未被水稻吸收利用的肥料氮素在农田环境中的残留量,实现了“高效、减排”的目标。

(3)相关性分析表明,稻作控制灌溉模式下水稻肥料总氮素利用率与蘖肥利用率和穗肥利用率呈极显著正相关,与基肥的利用率相关性不显著,穗肥的利用率与氮素总积累量中穗肥氮素在水稻叶、茎和穗部积累量占比均呈显著正相关;蘖肥的利用率仅与氮素总积累量中蘖肥氮素在水稻茎部积累量占比呈显著正相关。

参 考 文 献

1 康绍忠. 新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展[J]. 干旱地区农业研究, 1998(1):11-17.
KANG Shaozhong. New agricultural sci-technological revolution and development of Chinese water-saving agriculture in 21st century [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998(1):11-17. (in Chinese)

2 尹娟,费良军,田军仓,等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):189-191.
YIN Juan, FEI Liangjun, TIAN Juncang, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6):189-191. (in Chinese)

3 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1):1-6.
ZHU Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1):1-6. (in Chinese)

4 商放泽,杨培岭,李云开,等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7):103-110.
SHANG Fangze, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Effects of different chemical nitrogrnous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7):103-110. (in Chinese)

5 JING Q, BOUMAN B A M, HENGSDIJK H, et al. Exploring options to combine high yields with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(2):166-177.

6 林晶晶,李刚华,薛利红,等. ¹⁵N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014,40(8):1424-1434.
LIN Jingjing, LI Ganghua, XUE Lihong, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ¹⁵N tracer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014,40(8):1424-1434. (in Chinese)

7 JAT R A, WANI S P, SAHRAWAT K L, et al. Recent approaches in nitrogen management for sustainable agricultural productionand eco-safety[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2012, 58(9):1033-1060.

8 张怡,吕世华,马静,等. 覆膜栽培及抑制剂施用对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5):830-837.
ZHANG Yi, LÜ Shihua, MA Jing, et al. Effects of cultivation pattern and inhibitor application on nitrous oxide emission from

- paddy fields[J]. Soils, 2013, 45(5):830–837. (in Chinese)
- 9 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16):1–7.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Experiment of synchronous side deep fertilizing technique with rice hill-drop drilling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16):1–7. (in Chinese)
- 10 丁晋利, 武继承, 杨永辉, 等. 长期保护性耕作对冬小麦氮素积累和转运的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):240–246, 341. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.032.
DING Jinli, WU Jicheng, YANG Yonghui, et al. Effects of long-term conservation tillage on nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):240–246, 341. (in Chinese)
- 11 王振华, 权丽双, 郑旭荣, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10):91–100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):91–100. (in Chinese)
- 12 PAN J, LIU Y, ZHONG X, et al. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184:191–200.
- 13 YANG G Z, CHU K Y, TANG H Y, et al. Fertilizer 15 N accumulation, recovery and distribution in cotton plant as affected by N rate and split[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(6):999–1007.
- 14 WANG X, SUO Y, FENG Y, et al. Recovery of 15 N-labeled urea and soil nitrogen dynamics as affected by irrigation management and nitrogen application rate in a double rice cropping system[J]. Plant & Soil, 2011, 343(1–2):195–208.
- 15 邵东国, 李颖, 杨平富, 等. 水稻节水条件下氮素的利用及环境效应分析[J]. 水利学报, 2015, 46(2):146–152.
SHAO Dongguo, LI Ying, YANG Pingfu, et al. Analysis on nitrogen utilization and environmental effects under water-saving irrigation in paddy field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(2):146–152. (in Chinese)
- 16 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8):35–39.
PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8):35–39. (in Chinese)
- 17 崔远来, 李远华, 吕国安, 等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):280–285.
CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LÜ Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3):280–285. (in Chinese)
- 18 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(3):92–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130317&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.017.
HAO Shurong, ZHENG Ji, FENG Yuanzhou, et al. After effects of water-nitrogen interaction on rice at jointing stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3):92–96. (in Chinese)
- 19 孟兆江, 段爱旺, 高阳, 等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12):203–212. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161225&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.025.
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):203–212. (in Chinese)
- 20 徐国伟, 陆大克, 孙会忠, 等. 干湿交替灌溉与施氮耦合对水稻根际环境的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):186–194.
XU Guowei, LU Dake, SUN Huizhong, et al. Effect of alternative wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on rhizosphere environment of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):186–194. (in Chinese)
- 21 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):129–138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160617&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):129–138. (in Chinese)
- 22 WANG D, XU C, YAN J, et al. ¹⁵N tracer-based analysis of genotypic differences in the uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J]. Field Crops Research, 2017, 211:27–36.
- 23 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):778–783.
ZHU Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5):778–783. (in Chinese)
- 24 程先, 陈利顶, 孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):265–272.
CHENG Xian, CHEN Liding, SUN Ranhao. Estimation of non-point source pollution loads of Beijing–Tianjin–Hebei region considering precipitation and topography[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):265–272. (in Chinese)

Bioresource Technology, 2015, 190: 13 – 20.

12 FECHLER N, WOHLGEMUTH S A, JAKER P, et al. Salt and sugar: direct synthesis of high surface area carbon materials at low temperatures via hydrothermal carbonization of glucose under hypersaline conditions [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 33(1): 9418 – 9421.

13 CHEN H J, WEI H M, FU N, et al. Nitrogen-doped porous carbon using ZnCl₂ as activating agent for high-performance supercapacitor electrode materials [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(1): 2669 – 2684.

14 CHANDRAKALA U, PRASAD R B, PRABHAVATHI DEVI B L. Glycerol valorization as biofuel additives by employing a carbon-based solid acid catalyst derived from glycerol [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(42): 16164 – 16169.

15 李昊,苏有勇,张京景.碳基固体酸催化剂的制备及其催化性能的研究[J]. 化学与生物工程,2011,28(1):4 – 14.
LI Hao, SU Youyong, ZHANG Jingjing. Synthesis of carbon-based solid acid catalyst and study on its catalytic performance [J]. Chemistry and Bioengineering, 2011,28(1):4 – 14. (in Chinese)

16 LIU F, KONG W, QI C, et al. Design and synthesis of mesoporous polymer-based solid acid catalysts with excellent hydrophobicity and extraordinary catalytic activity [J]. ACS Catalysis, 2012, 2(4):565 – 572.

17 XIONG X N, YU I K M, CAO L C, et al. A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel production, and pollution control [J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 254 – 270.

18 NAKAJIMA K, HARA M. Amorphous carbon with SO₃H groups as a solid Brønsted acid catalyst [J]. ACS Catalysis, 2012, 2(7):1296 – 1304.

19 ZHOU Y, NIU S L, LI J. Activity of the catbon-based heterogeneous acid catalyst derived from bamboo in esterification of oleric acid with ethanol [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 114: 188 – 196.

20 LI M, CHEN D Y, ZHU X F. Preparation of solid acid catalyst from rice husk char and its catalutic performance in esterification [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2013, 34(9): 1674 – 1682.

21 MA H, ADDY M M, ANDERSON E, et al. A novel process for low-sulfur biodiesel production from scum waste [J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 826 – 835.

22 PINOTTI L M, BENEVIDES L C, LIRA T, et al. Biodiesel production from oily residues containing high free fatty acids [J]. Waste and Biomass Valorization, 2018, 9(2): 293 – 299.

23 LIU T, LI Z, LI W, et al. Preparation and characterization of biomass carbon-based solid acid catalyst for the esterification of oleic acid with methanol [J]. Bioresource Technology, 2013, 133(2): 618 – 621.

(上接第 317 页)

25 王孟雪,张忠学.适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N₂O 排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15):72 – 79.
WANG Mengxue, ZHANG Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N₂O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15):72 – 79. (in Chinese)

26 马艳芹,钱晨晨,孙丹平,等.施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2):128 – 134.
MA Yanqin, QIAN Chenchen, SUN Danping, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2):128 – 134. (in Chinese)

27 刘汝亮,李友宏,张爱平,等.氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):16 – 20.
LIU Ruliang, LI Youhong, ZHANG Aiping, et al. Effect of postponing nitrogen application on rice yield and nitrogen losses in Yellow River irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2):16 – 20. (in Chinese)

28 张洪程,吴桂成,戴其根,等.水稻氮肥精确后移及其机制[J]. 作物学报, 2011, 37(10):1837 – 1851.
ZHANG Hongcheng, WU Guicheng, DAI Qigen, et al. Precise postponing nitrogen application and its mechanism in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(10):1837 – 1851. (in Chinese)

29 AKIRA T, GARCIA C V. Studies of the relationship between tillering and nitrogen uptake of the rice plant[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 1965, 11(3):31 – 37.

30 PAN S G, ZHAI J, CAO C G, et al. Effects of nitrogen management practices on nutrients (NPK) uptake and grain qualities of rice[J]. Plant Nutrition & Fertilizer Science, 2010, 16(3):522 – 527.

31 QIAO J, LIU Z, DENG S, et al. Occurrence of perfect and imperfect grains of six japonica rice cultivars as affected by nitrogen fertilization[J]. Plant & Soil, 2011, 349(1 – 2):191 – 202.

32 张艳霞,丁艳锋,王强盛,等.氮素穗肥对不同品种稻米品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6):1080 – 1085.
ZHANG Yanxia, DING Yanfeng, WANG Qiangsheng, et al. Effect of panicle nitrogen fertilizer on quality properties of different rice varieties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2007, 13(6):1080 – 1085. (in Chinese)

33 孙永健,孙园园,严奉君,等.氮肥后移对不同氮效率水稻花后碳氮代谢的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(3):407 – 419.
SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, YAN Fengjun, et al. Effects of postponing nitrogen topdressing on post-anthesis carbon and nitrogen metabolism in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(3):407 – 419. (in Chinese)