

稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的¹⁵N示踪分析

张作合^{1,2} 张忠学^{1,3}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061;
3. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示水炭运筹管理模式下水稻对不同阶段施用氮肥的吸收利用情况,采用田间小区试验与微区结合的方法,应用¹⁵N示踪技术分别标记施用的基肥、蘖肥和穗肥,以常规淹灌作为对比,研究两种灌溉模式不同水炭运筹下水稻对基肥、蘖肥、穗肥的吸收利用、积累和转运,以及水稻成熟期不同阶段施用的氮肥在植株各器官的分配情况。试验结果表明:合理的水炭运筹能够显著提高水稻成熟期地上部的氮素总积累量、氮肥吸收利用率和产量;不同水炭运筹下肥料对氮素总积累量的贡献率为17.81%~20.60%,两种灌溉模式之间的差异不显著($P>0.05$);水稻对基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率分别为15.55%~23.31%、31.68%~44.91%、48.82%~71.18%,施加适量的生物炭能够显著提高基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率,浅湿干灌溉模式下水稻植株除对基肥的吸收利用率较低外,对蘖肥和穗肥的吸收利用率均优于常规淹灌;水稻蘖肥和穗肥吸收利用率与肥料总氮素吸收利用率呈极显著正相关($P<0.01$),基肥、蘖肥和穗肥氮素转运对籽粒的贡献率与相应的吸收利用率呈极显著正相关($P<0.01$)。合理的水炭运筹能够提高肥料氮素转运对籽粒的贡献率和氮肥吸收利用率,降低氮肥在土壤中的残留。

关键词: 水稻; 水炭运筹; 氮素吸收; 氮素转运; 氮素分配; 同位素示踪技术

中图分类号: S511; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0239-11

¹⁵N Tracer-based Analysis of Effects of Water and Biochar Management on Nitrogen Absorption, Transport and Distribution in Rice

ZHANG Zuohe^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,3}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China
3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal the uptake and utilization of nitrogen fertilizer at different stages in rice under water and biochar management, the method of combining field plot experiment with micro-area was used, and the ¹⁵N tracer technique was used to mark the application of basal fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer respectively. Taking conventional flooding irrigation as a comparison, the uptake, utilization, accumulation and transportation of basal, tiller and panicle fertilizer in rice under different water and biochar managements and the distribution of nitrogen fertilizer applied at different stages of rice maturity in different organs under two different irrigation modes were studied. The results showed that reasonable water and biochar management could significantly increase the total nitrogen accumulation, nitrogen uptake and utilization efficiency and yield of aboveground parts of rice at maturity stage. The contribution rate of fertilizer to total nitrogen accumulation under different water and biochar managements was about 17.81%~20.60%. There was no significant difference between the two irrigation modes ($P>0.05$). The uptake and utilization rates of basal fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer in rice were 15.55%~23.31%, 31.68%~44.91%, 48.82%~71.18%, respectively. The application of appropriate amount of biochar could significantly improve the uptake and utilization rates of basal tiller, tiller and panicle fertilizer. The uptake and utilization rates of tiller fertilizer and panicle fertilizer under

收稿日期: 2019-04-02 修回日期: 2019-04-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)
作者简介: 张作合(1988—),男,博士生,绥化学院讲师,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: zhangzuohe@126.com
通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

dry-wet-shallow irrigation mode were better than those under conventional flooding irrigation except basal fertilizer. The uptake and utilization rates of tillering and panicle fertilizers were positively correlated with the total nitrogen uptake and utilization rates of fertilizers ($P < 0.01$), and the contribution rate of nitrogen transport of basal, tiller and panicle fertilizer to grain was positively correlated with the corresponding uptake and utilization rates ($P < 0.01$). Reasonable water and biochar management can improve the contribution rate of nitrogen transport to grain and the utilization rate of nitrogen absorption, and reduce the residue of nitrogen fertilizer in soil. The results can provide theoretical basis and technical support for the application of water and biochar management model in paddy field in cold black soil region.

Key words: rice; water and biochar management; nitrogen absorption; nitrogen transport; nitrogen distribution; isotope trace technology

0 引言

水稻是我国主要粮食作物,其产量约占粮食总产量的 33.75%^[1]。随着人口的增加,到 2030 年,我国水稻产量需要增加 20% 左右,才能满足国内粮食需求^[2]。目前,农民习惯通过施入高量化学氮肥来增加作物产量,这使我国成为世界上最大的氮肥消费国。2013 年,中国的氮肥用量为 3 360 万 t,占世界氮肥使用总量的 33%^[3]。氮肥投入过量及不合理施用使氮肥利用率下降,大量的氮素通过硝化与反硝化、淋溶和氨挥发等途径损失^[4],导致肥料氮素浪费。我国稻田氮肥利用率仅为 30% 左右^[5],远低于其他国家。通过运筹管理方法提高氮肥的吸收利用率仍是目前水稻生产中最常用的方法,与氮肥运筹和水氮运筹管理措施相比,新型的水炭运筹管理模式既解决了东北地区秸秆利用问题,又提高了氮肥的利用率。水炭运筹管理改善了稻田土壤通透性和土壤含氧量,使水稻根系活力增强,有助于水稻对氮素的吸收^[6],同时降低了土壤容重,提高了土壤有机质含量^[7-8],有利于土壤营养的释放和肥料养分的保留^[9]。

应用运筹管理的方法研究水稻对氮肥吸收转运及分配的影响已成为研究热点^[10-13]。利用¹⁵N 示踪分析水稻对不同时期氮肥的吸收分配,发现控制灌溉模式下水稻的肥料氮素总吸收利用率为 29.89% ~ 36.12%,基肥、蘖肥、穗肥氮素吸收利用率分别为 10.91% ~ 15.36%、34.84% ~ 36.90%、50.27% ~ 63.54%^[10]。适当的控制灌溉、合理的氮肥运筹措施可以促进水稻对氮素的吸收及转运,而氮肥后移比例过大则会导致水稻成熟期植株的茎鞘和叶片氮素转运总量降低,降幅达 6.52% ~ 17.02%^[11]。氮素穗肥运筹中倒四、倒二叶龄期等量追施,能够促进氮素累积与转运,从而提高氮肥利用率及产量^[12]。合理的水氮运筹管理有利于水稻各器官氮素的积累,增加水稻成熟期氮素的运转比例,提高对籽粒的转运贡献率^[13]。以上研究多集中

在水稻对施用氮肥的吸收利用或转运单一方面的阐述,关于水稻对不同阶段施用氮肥的吸收利用、转运和分配整个过程的系统研究较少。

本文以常规淹灌作为对比,采用田间小区试验与¹⁵N 示踪微区结合的方法,对整体的氮肥利用率进行细分,研究两种灌溉模式不同水炭运筹下水稻对基蘖和穗肥的吸收利用、积累和转运,以及水稻成熟期不同阶段施用的氮肥在植株各器官的分配情况,以期在水炭运筹管理在寒地黑土区稻田的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5 月 19 日—9 月 21 日,在黑龙江省庆安县和平灌区水稻灌溉试验站进行。试验站(127°40'45"E,46°57'28"N)位于呼兰河流域中上游,属于寒地黑土区。气候特征属寒温带大陆性季风气候,第三积温带,全年无霜期 128 d 左右,多年平均降水量 500 ~ 600 mm,平均气温 2 ~ 3℃,平均日照时数为 2 600 h,为黑龙江省典型的水稻生产区。

1.2 试验材料

水稻秸秆生物炭,由辽宁金和福农业开发有限公司生产,在 450℃ 高温无氧条件下裂解制备而成,每公顷稻草可制成直径 2 mm 颗粒形式的秸秆生物炭(去除灰分)约 2.5 t,pH 值 8.86,含碳质量分数 42.72%,填充密度 0.13 g/cm³,比表面积 81.85 m²/g,总孔容积 0.080 cm³/g,阳离子交换量(CEC)为 44.7 cmol/kg。供试土壤为黑土,在泡田之前,对试验小区 0 ~ 20 cm 土层进行 5 点对角取样后混合,分析主要的土壤理化性质,pH 值 6.40,有机质质量比 41.80 g/kg,全氮质量比 1.51 g/kg,全磷质量比 15.61 g/kg,全钾质量比 19.86 g/kg,碱解氮质量比 148.27 mg/kg,速效磷质量比 24.22 mg/kg,速效钾质量比 156.13 mg/kg。供试水稻品种为研究区大面积推广种植的绥粳 18,插秧密度为 25 穴/m²。

1.3 试验设计

采用灌水方式和生物炭施用量 2 因素全面试验,设置浅湿干灌溉 (Dry-wet-shallow irrigation, D) 和常规淹灌 (Flooding irrigation, F) 两种水分管理模式(表 1)。水稻浅湿干灌溉模式各处理根据控制指标来确定灌水时间和灌水定额,当田面无水层后,每天 08:00 和 18:00,用土壤水分测定仪 (TPIME – PICO64/32 型)分别测定各小区的土壤含水率,当土壤含水率接近或低于灌水下限时,灌水至上限,并记录各处理的灌水量;常规淹灌模式各处理的试验小区田面无水层时,人工灌水至上限。秸秆生物炭施用量设 4 个水平,即 0 t/hm² (B1)、2.5 t/hm² (1 年还田量, B2)、12.5 t/hm² (5 年还田量, B3)、25 t/hm²

(10 年还田量, B4)。共计 8 个处理,每个处理 3 次重复,共 24 个试验小区,方形小区面积 100 m²,采用随机区组排列,各小区之间田埂向地下内嵌 40 cm 深的塑料板。秸秆生物炭在泡田之前施入;按当地施肥标准施纯氮 110 kg/hm²,基肥、蘖肥、穗肥按 5:2:3 分施;K₂O 施入量 80 kg/hm²,基肥:穗肥按 1:1 分施;P₂O₅施入量 45 kg/hm²,作为基肥一次性施入。供试肥料选择尿素(含 N 质量分数 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅质量分数 12%)、硫酸钾(含 K₂O 质量分数 52%),并换算成实际化肥施入量。2018 年 5 月 5 日施基肥,5 月 19 日移栽水稻幼苗,株距 13.32 cm,行距 30 cm,每穴 3 株,9 月 21 日收获。水稻生长期注意田间管理,严格控制病虫草害。

表 1 稻田各生育期水分管理
Tab.1 Water management during each growth period of rice field

灌溉模式	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
浅湿干灌溉	0 ~ 30 mm	0. 85θ _s ~ 30 mm	0. 85θ _s ~ 30 mm	晒田	0. 85θ _s ~ 30 mm	0. 85θ _s ~ 30 mm	0. 7θ _s ~ 30 mm	落干
常规淹灌	0 ~ 30 mm	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	晒田	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	落干

注:浅湿干灌溉雨后蓄水深度上限值为 50 mm,常规淹灌雨后蓄水深度上限值为 100 mm,θ_s为根层土壤饱和含水率。

为明确水炭运筹下水稻对 3 个阶段施入氮肥的吸收利用、转运及分配情况,在试验小区内设置了¹⁵N 示踪微区,每个试验小区内设置 1 个微区,即同一处理下设置 3 个分处理:M1、M2、M3。各处理试验设置见表 2,各分处理中仅 M1 的基肥、M2 的蘖肥、M3 的穗肥施用¹⁵N-尿素,其他施用未标记的普

通尿素。稻田整地后立即在每个小区内埋设 2 m × 2 m × 0.5 m 的无底钢板矩形框,将微区埋 30 cm 深至犁底层下,施用上海化工研究院生产丰度为 10.22% 的¹⁵N 标记尿素,深度与试验小区相同。微区内设置单独排灌系统,水稻的种植密度、肥料用量、生物炭施用量及灌水方式与所在的试验小区相同。

表 2 试验处理设计
Tab.2 Design of experimental treatments

小区 试验	生物炭施用量/ (t·hm ⁻²)	微区试验	施尿素量/(kg·hm ⁻²)			小区 试验	生物炭施用量/ (t·hm ⁻²)	微区试验	施尿素量/(kg·hm ⁻²)		
			基肥	蘖肥	穗肥				基肥	蘖肥	穗肥
DB1	0	DB1M1	119 *	47	71	FB1	0	FB1M1	119 *	47	71
		DB1M2	119	47 *	71			FB1M2	119	47 *	71
		DB1M3	119	47	71 *			FB1M3	119	47	71 *
DB2	2.5	DB2M1	119 *	47	71	FB2	2.5	FB2M1	119 *	47	71
		DB2M2	119	47 *	71			FB2M2	119	47 *	71
		DB2M3	119	47	71 *			FB2M3	119	47	71 *
DB3	12.5	DB3M1	119 *	47	71	FB3	12.5	FB3M1	119 *	47	71
		DB3M2	119	47 *	71			FB3M2	119	47 *	71
		DB4M3	119	47	71 *			FB4M3	119	47	71 *
DB4	25.0	DB4M1	119 *	47	71	FB4	25.0	FB4M1	119 *	47	71
		DB4M2	119	47 *	71			FB4M2	119	47 *	71
		DB4M3	119	47	71 *			FB4M3	119	47	71 *

注: * 代表施用的是¹⁵N-尿素。

1.4 样品的采集与测定

干物质量及植株氮含量:在水稻开花期和成熟期测水稻干物质及植株氮含量,从各微区内外随机选取具有代表性植株 3 穴,将水稻植株地上部分为

茎鞘、叶、穗 3 部分,冲洗干净后将样品装袋带回实验室,放入干燥箱 105℃ 杀青 30 min,然后调至 80℃ 干燥后,称量不同部位的干物质量。称量后将样品进行粉碎处理,过 80 目筛后混匀,利用 H₂SO₄– H₂O₂

消煮法和 AA3 型连续流动分析仪 (Seal Analytical GmbH, 德国) 测定各部位全氮含量。

植株氮原子百分比: 稳定同位素测试在东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室完成, 将密封保存的样品带回实验室, 采用同位素质谱仪 (DELTA V Advantage, 美国) 和元素分析仪 (Flash 2000 HT 型, 美国) 联用的方法测定开花期和成熟期水稻各器官和籽粒¹⁵N 的丰度。

产量: 水稻成熟期进行产量测算, 各处理随机选 10 穴水稻用于考种, 干燥后用手持水分测试仪 (John Deere, Moline IL, 美国) 测定谷物水分, 在含水率为 14.5% 时, 分别测量有效穗数、穗粒数和千粒质量, 并折算成经济产量。

气象数据由试验站 DZZ2 型自动气象站 (天津气象仪器厂) 自动记录 (图 1)。

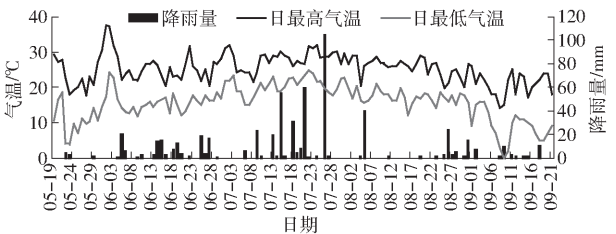


图 1 2018 年水稻生长期气温和降水量日变化
Fig. 1 Daily variation of air temperature and precipitation in 2018

1.5 计算方法和数据分析

不同水炭运筹下水稻植株样品中来自基肥的氮素百分比 $N_{diff(b)}$ 、蘖肥的氮素百分比 $N_{diff(t)}$ 、穗肥的氮素百分比 $N_{diff(p)}$, 计算公式为^[10]

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

式中 a ——微区内植株样品¹⁵N 丰度, %
 b ——相同处理小区内的植株样品¹⁵N 丰度, %
 c ——¹⁵N 标记尿素中¹⁵N 丰度, %
 d ——自然¹⁵N 丰度标准值, 为 0.366 3%

植株氮素总积累量 (kg/hm²) 为

$$P_{NNA} = D_M N_C$$
 (2)

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

微区内植株从基肥 (b)、蘖肥 (t)、穗肥 (p) 获得的¹⁵N 积累量 (kg/hm²) 为

$$N_{(b,t,p)} = P_{NNA} N_{diff(b,t,p)}$$
 (3)

植株中来自氮肥的氮素总积累量 (kg/hm²) 为

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

基肥 (b)、蘖肥 (t)、穗肥 (p) 及总氮肥 (total) 吸收利用率为

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

式中 F_{NRE} ——氮肥吸收利用率, %

N_F ——各时期施氮量, kg/hm²

水稻植株样品中来自肥料的氮素在茎鞘和叶片中积累后, 向籽粒中转运的转运量 (kg/hm²) 为

$$P_{NT} = S_{NF} + L_{NF} - (S_{NM} + L_{NM})$$
 (6)

式中 S_{NF} ——植株开花期茎鞘中氮素含量, kg/hm²

L_{NF} ——植株开花期叶片中氮素含量, kg/hm²

S_{NM} ——植株成熟期茎鞘中氮素含量, kg/hm²

L_{NM} ——植株成熟期叶片中氮素含量, kg/hm²

氮素转运率 (%) 为

$$P_{NTE} = \frac{P_{NT}}{S_{NF} + L_{NF}} \times 100\%$$
 (7)

氮转运对籽粒的贡献率 (%) 为

$$P_{NTR} = \frac{P_{NT}}{G_{NM}} \times 100\%$$
 (8)

式中 G_{NM} ——植株成熟期籽粒氮素含量, kg/hm²

数据分析和处理采用 WPS 2019、SPSS 13.0, 用 Duncan 进行处理间的多重比较, 用 WPS 2019 和 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水炭运筹下水稻产量和成熟期氮素吸收积累量

由表 3 可知, 水碳运筹两种灌溉模式下施加生物炭增加了水稻的有效穗数、千粒质量、结实率, 但减少了每穗粒数。当生物炭施加量为 0~12.5 t/hm² 时, 水稻成熟期两种灌溉模式之间的各产量构成因素差异显著 ($P < 0.05$), 与常规淹灌相比, 浅湿干灌溉模式水稻在相同生物炭施用水平下有效穗数、千粒质量和结实率均较高; 当施加 25 t/hm² 生物炭时, 常规淹灌模式的水稻产量构成因素中千粒质量较浅湿干灌溉模式增加。稻作浅湿干灌溉模式下生物炭

表 3 生物炭施用量对产量及其构成因素的影响
Tab. 3 Effect of biochar application amount on yield and its components

处理	有效穗数/ (穗·hm ⁻²)	每穗 粒数	千粒 质量/g	结实率/ %	产量/ (kg·hm ⁻²)
DB1	3.25 × 10 ^{6c}	123.62 ^b	23.72 ^e	86.07 ^e	8 196.30 ^d
DB2	3.42 × 10 ^{6c}	111.92 ^d	24.36 ^d	88.68 ^d	8 277.64 ^d
DB3	3.54 × 10 ^{6b}	106.41 ^e	26.98 ^a	91.21 ^a	9 265.87 ^a
DB4	3.67 × 10 ^{6a}	100.22 ^f	25.57 ^e	90.06 ^b	8 468.38 ^e
FB1	3.20 × 10 ^{6e}	128.82 ^a	23.28 ^f	84.28 ^f	8 086.22 ^e
FB2	3.34 × 10 ^{6d}	117.64 ^c	23.93 ^e	86.45 ^e	8 134.80 ^e
FB3	3.42 × 10 ^{6c}	109.73 ^e	25.98 ^e	89.62 ^e	8 730.77 ^b
FB4	3.57 × 10 ^{6b}	104.67 ^f	26.13 ^b	90.13 ^b	8 811.43 ^b

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

施加 12.5 t/hm²和 25 t/hm²较不施生物炭水稻产量增加了 13.05%、3.32%，与常规淹灌相比，浅湿干灌溉模式水稻在相同生物炭施用水平（除 25 t/hm²）下产量增加 1.36% ~ 6.13%。表明稻作浅湿干灌溉模式更有利于水稻产量的提高，同时能节约灌溉用水。

由图 2(图中不同小写字母表示相同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同)可知,水炭运筹下水稻植株中肥料-¹⁵N 总积累量在 32.49 ~ 44.62 kg/hm² 范围内变化,氮素总积累量在 182.42 ~ 216.56 kg/hm² 范围内变化。当生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm²时,水稻成熟期两种灌溉模式之间的肥料-¹⁵N 积累量和氮素总积累量差异显著 ($P < 0.05$),与常规淹灌相比,浅湿干灌溉模式下水稻在 3 个生物炭施用水平(0、2.5、12.5 t/hm²)均具有较高的肥料-¹⁵N 积累量和氮素总积累量,稻作浅湿干灌溉模式水稻肥料-¹⁵N 积累量在相同生物炭施用水平下较常规淹灌分别提高了 5.20%、9.88%、11.91%;氮素总积累量提高了 4.25%、5.87%、9.30%,并且浅湿干灌溉模式下 31.07% ~ 40.56% 的肥料氮素被水稻植株吸收利用,在相同生物炭施用水平下较常规淹灌提高了 5.20% ~ 11.91%;不同水炭运筹下肥料-¹⁵N 对氮素总积累量的贡献率为 17.81% ~ 20.60%,且两种灌溉模式下各处理之间肥料-¹⁵N 对水稻植株氮素总积累量的贡献率无显著差异 ($P > 0.05$)。研究表明,当生物炭施加量 0 ~ 12.5 t/hm²时,稻作浅湿干灌溉模式对肥料氮素的吸收利用优于常规淹

灌,对水稻氮素的积累更有利;当生物炭施加量为 25 t/hm²时,稻作常规淹灌模式对肥料氮素的吸收利用优于浅湿干灌溉,但二者差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 水炭运筹下水稻成熟期植株对基肥、蘖肥、穗肥的吸收利用

由图 3 可知,水炭运筹下仅基肥施用¹⁵N-尿素,水稻对基肥的吸收利用率为 15.55% ~ 23.31%。常规淹灌模式下基肥-¹⁵N 积累量和水稻植株对基肥吸收利用率都随着生物炭施入量的增加而增大,有 17.11% ~ 23.31% 的基肥氮素被水稻植株吸收利用,浅湿干灌溉模式下水稻成熟期各处理的基肥-¹⁵N 积累量约为 8.55 ~ 11.25 kg/hm²,当生物炭施加量为 12.5 t/hm²和 25 t/hm²时,仅有 20.45% 和 19.56% 的基肥被水稻植株吸收利用,不同灌溉模式比较发现,常规淹灌模式的稻作基肥吸收利用率较浅湿干灌溉模式平均增加 10.37%,研究结果表明,浅湿干灌溉模式水稻植株对基肥的利用率较低,施加一定量的生物炭能够增加基肥-¹⁵N 积累量和基肥吸收利用率,而施加 25 t/hm²的生物炭对基肥-¹⁵N 积累量和基肥吸收利用率会产生负效应。当仅基肥施入¹⁵N-尿素时,水炭运筹下基肥对水稻植株氮素总积累量贡献率随生物炭施入量增加而增大,稻作浅湿干灌溉模式下基肥对水稻氮素总积累量的贡献率为 4.59% ~ 4.99%,低于常规淹灌模式,特别是在生物炭施加量为 25 t/hm²时,常规淹灌模式基肥对水稻氮素总积累量的贡献率较浅湿干灌溉高 21.88%。

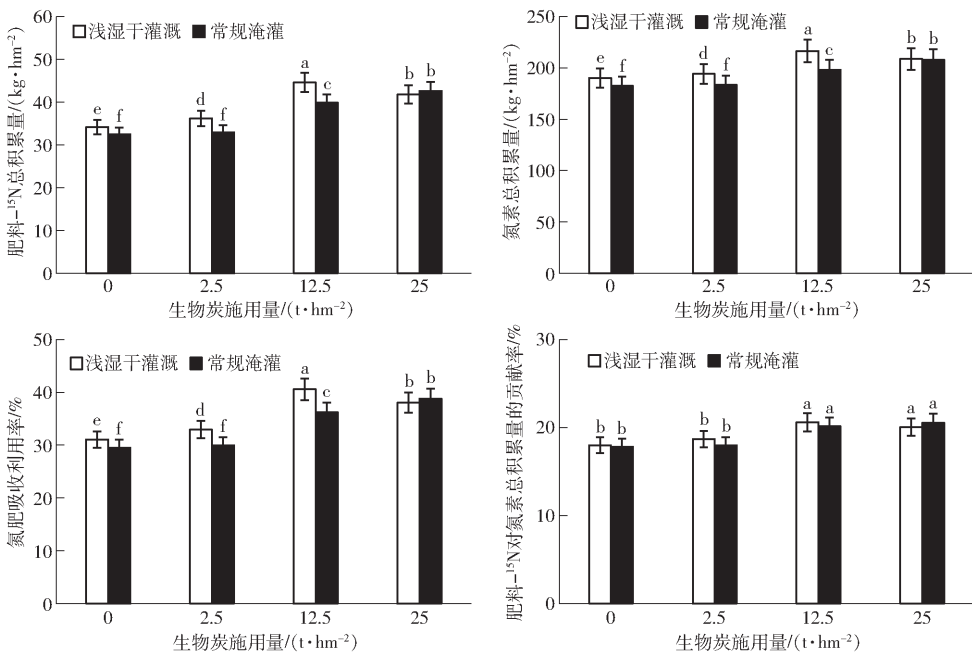


图 2 不同处理水稻成熟期地上部肥料-¹⁵N 积累量、氮素总积累量、氮肥吸收利用率和肥料-¹⁵N 对氮素总积累量的贡献率

Fig.2 Above-ground ¹⁵N and total N accumulation, nitrogen uptake and utilization efficiency and contribution rate of ¹⁵N to total nitrogen accumulation at mature stage under different treatments

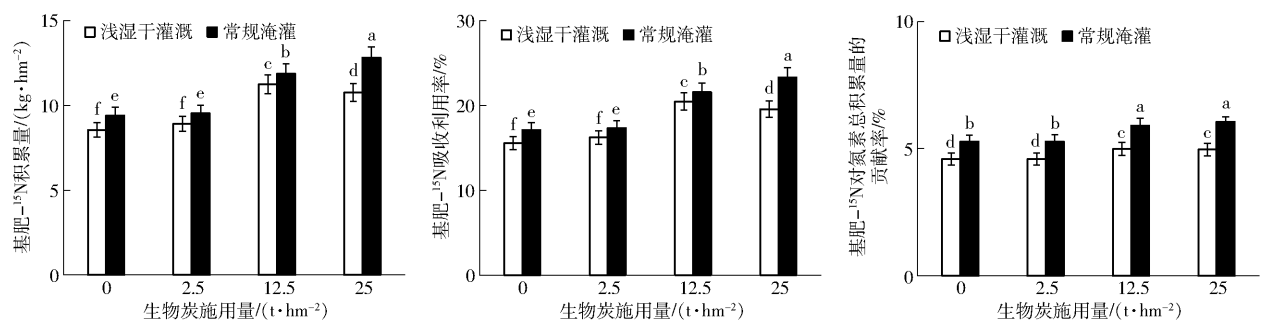


图3 不同处理水稻成熟期基肥¹⁵N 积累量、基肥¹⁵N 吸收利用率和基肥¹⁵N 对氮素总积累量的贡献率

Fig.3 Basal ¹⁵N accumulation, basal fertilizer ¹⁵N uptake and utilization, and contribution rate of basal ¹⁵N to total nitrogen accumulation at mature stage under different treatments

由图4可知,水炭运筹下仅穗肥施用¹⁵N-尿素,水稻对穗肥的吸收利用率为31.68%~44.91%。常规淹灌模式下水稻成熟期穗肥¹⁵N 积累量和植株对穗肥吸收利用率均随着生物炭施入量的增加而增大。浅湿干灌溉模式施加12.5 t/hm²生物炭时,水稻植株穗肥¹⁵N 积累量最大,为9.88 kg/hm²,施加25 t/hm²的生物炭对穗肥¹⁵N 积累量会产生负效应。不同灌溉模式下水稻成熟期穗肥¹⁵N 积累量差异显著($P < 0.05$),浅湿干灌溉模式下稻作穗肥¹⁵N 积累量在相同生物炭施用水平下较常规淹灌分别提高了13.92%、18.12%、19.32%、2.08%,且浅湿干灌溉模式相同生物炭施用水平下水稻穗肥¹⁵N 吸收利用率显著高于常规淹灌($P < 0.05$),研究结果表明,浅湿干灌溉模式有利于水稻植株对穗肥氮素的吸收利用,适量的生物炭能够增加穗肥¹⁵N 积累量和植株对穗肥吸收利用率。当仅穗肥施用¹⁵N-尿素时,水稻成熟期植株氮素总积累量中有3.89%~4.38%来源于穗肥¹⁵N,水炭运筹下浅湿干灌溉模式穗肥对水稻氮素总积累量的贡献率高于常规淹灌模式,生物炭施用量对穗肥贡献率的影响不显著($P > 0.05$)。

由图5可知,水炭运筹下仅穗肥施用¹⁵N-尿素,有48.82%~71.18%的穗肥氮素被水稻植株吸收利用,常规淹灌模式下水稻成熟期穗肥¹⁵N 积累量随着生物炭施入量的增加而增大,稻作浅湿干灌溉

模式下生物炭施用量由0 t/hm²增加到12.5 t/hm²时,水稻成熟期穗肥¹⁵N 积累量从17.69 kg/hm²增加到23.49 kg/hm²,穗肥¹⁵N 的吸收利用率由53.61%增加到71.18%,不同灌溉模式之间穗肥吸收利用率和穗肥¹⁵N 积累量差异均显著($P < 0.05$),浅湿干灌溉模式水稻成熟期穗肥¹⁵N 吸收利用率在相同生物炭施用水平下较常规淹灌分别提高了9.81%、15.82%、17.86%、2.99%。当仅穗肥施用¹⁵N-尿素时,水稻成熟期植株氮素总积累量中有8.83%~10.85%来源于穗肥¹⁵N,当生物炭施加量为0~12.5 t/hm²时,水炭运筹下穗肥对水稻植株氮素总积累量贡献率随生物炭施入量增加而增大,且浅湿干灌溉模式下穗肥对水稻氮素总积累量的贡献率显著高于常规淹灌模式。

2.3 水炭运筹下水稻植株积累的基肥、穗肥和穗肥氮素的转运

由表4可知,水炭运筹下水稻成熟期籽粒中氮素仅有16.68%~22.06%来自于花前茎鞘和叶片积累的肥料氮素,其中穗肥¹⁵N 向籽粒中的转运率最高,基肥¹⁵N 最低,基肥和穗肥氮的吸收主要用于茎鞘、叶片和根等营养器官的建成。水稻花前茎鞘和叶片积累的基肥¹⁵N 有3.12~4.85 kg/hm²转移到籽粒中,与浅湿干灌溉模式相比,在相同生物炭施用量水平下常规淹灌模式的基肥¹⁵N 的转运量较高,稻作基肥¹⁵N 的转运率和转运对籽粒的贡献

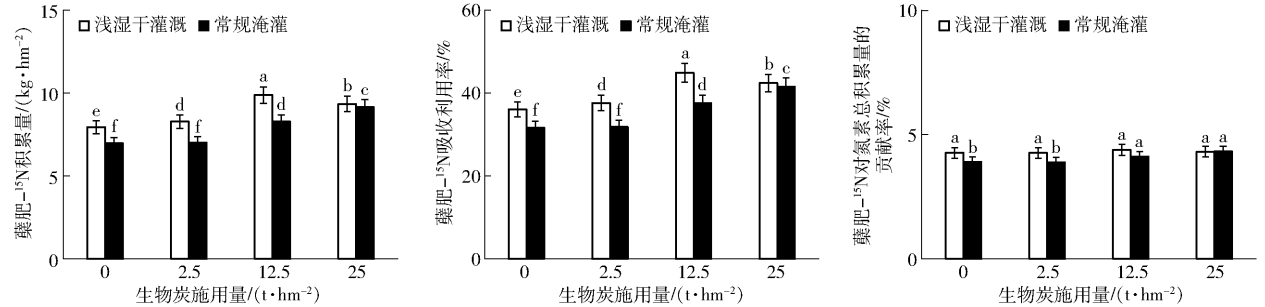


图4 不同处理水稻成熟期穗肥¹⁵N 积累量、穗肥¹⁵N 吸收利用率和穗肥¹⁵N 对氮素总积累量的贡献率

Fig.4 Tillering ¹⁵N accumulation, tillering fertilizer ¹⁵N uptake and utilization, and contribution rate of tillering ¹⁵N to total nitrogen accumulation at mature stage under different treatments

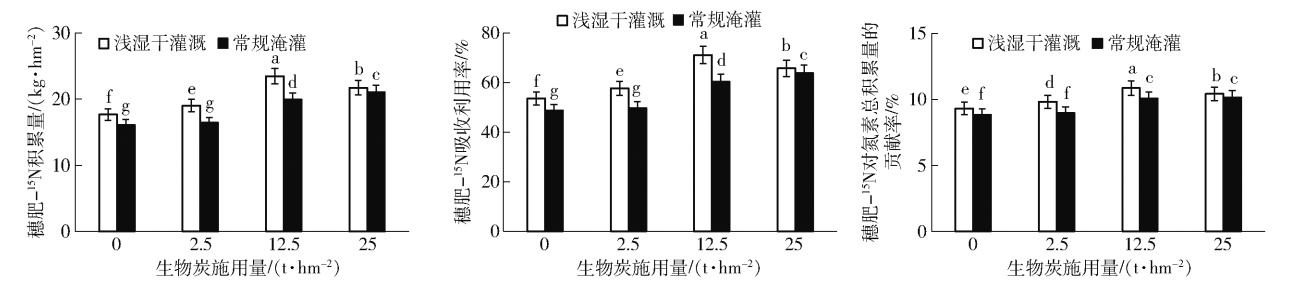


图 5 不同处理水稻成熟期穗肥-¹⁵N 积累量、穗肥-¹⁵N 吸收利用率和穗肥-¹⁵N 对氮素总积累量的贡献率

Fig.5 Panicle ¹⁵N accumulation, panicle fertilizer ¹⁵N uptake and utilization, and contribution rate of panicle ¹⁵N to total nitrogen accumulation at mature stage under different treatments

率都随着生物炭施入量的增加而增大,有 52.00% ~ 77.84% 的基肥氮素转移到籽粒中,但对籽粒的贡献率仅为 3.53% ~ 4.71%。水稻成熟期有 2.71 ~ 4.94 kg/hm² 花前茎鞘和叶片积累的蘖肥-¹⁵N 转移到籽粒中,当生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm² 时,稻作蘖肥-¹⁵N 的转运量、转运率和转运对籽粒的贡献率都随着生物炭施入量的增加而增大,在相同生物炭施用量水平下浅湿干灌溉模式优于常规淹灌模式,虽然转运率高于基肥-¹⁵N,但对籽粒的贡献率也仅为 3.22% ~ 4.38%,施加 25 t/hm² 的生物炭会产

生负效应。水稻花前茎鞘和叶片积累的穗肥-¹⁵N 有 8.16 ~ 14.63 kg/hm² 转移到籽粒中,稻作穗肥-¹⁵N 的转运率和转运对籽粒的贡献率都随着生物炭施入量的增加而增大,在相同生物炭施用量水平下浅湿干灌溉模式优于常规淹灌模式,穗肥-¹⁵N 的转运率高于基肥和蘖肥,对籽粒的贡献率为 9.69% ~ 13.25%。研究结果表明,浅湿干灌溉模式更有利于肥料氮素向籽粒中转运,施加一定量的生物炭能够促进水稻开花前茎鞘和叶片中积累的氮素向籽粒中转运。

表 4 水稻成熟期基肥-¹⁵N、蘖肥-¹⁵N 和穗肥-¹⁵N 的转运量、转运率及对籽粒的贡献率

Tab.4 Translocation, transport rate and contribution rate of basal ¹⁵N, tillering ¹⁵N and panicle ¹⁵N of rice at mature stage

灌溉模式	处理	基肥- ¹⁵ N			蘖肥- ¹⁵ N			穗肥- ¹⁵ N		
		转运量/ (kg·hm ⁻²)	转运率/ %	贡献率/ %	转运量/ (kg·hm ⁻²)	转运率/ %	贡献率/ %	转运量/ (kg·hm ⁻²)	转运率/ %	贡献率/ %
浅湿干灌溉	DB1	3.12 ^d	54.56 ^e	3.53 ^d	3.41 ^e	61.65 ^d	3.85 ^c	9.57 ^e	66.67 ^e	10.82 ^e
	DB2	3.38 ^c	56.78 ^d	3.68 ^c	3.67 ^d	63.73 ^c	4.00 ^b	10.87 ^d	70.59 ^d	11.85 ^c
	DB3	4.84 ^a	69.50 ^b	4.29 ^b	4.94 ^a	78.58 ^a	4.38 ^a	14.63 ^a	80.70 ^b	12.97 ^b
	DB4	4.78 ^a	77.84 ^a	4.71 ^a	4.15 ^c	77.69 ^a	4.09 ^b	13.43 ^b	86.03 ^a	13.25 ^a
常规淹灌	FB1	3.18 ^d	52.00 ^f	3.78 ^c	2.71 ^f	59.11 ^e	3.22 ^d	8.16 ^e	64.82 ^f	9.69 ^f
	FB2	3.42 ^c	55.26 ^d	3.82 ^c	2.99 ^f	65.31 ^c	3.34 ^d	8.82 ^f	68.68 ^e	9.86 ^f
	FB3	4.49 ^b	63.71 ^c	4.59 ^{ab}	3.87 ^d	74.21 ^b	3.96 ^b	11.19 ^d	75.38 ^c	11.44 ^d
	FB4	4.85 ^a	64.99 ^c	4.63 ^a	4.39 ^b	77.19 ^a	4.19 ^a	12.31 ^c	79.18 ^b	11.75 ^c

2.4 水炭运筹下水稻成熟期基肥、蘖肥和穗肥氮素在器官中的分配

由表 5 可见,水稻成熟期基肥-¹⁵N 在植株各器官的分布差异较大,常规淹灌模式下基肥-¹⁵N 在茎鞘、叶片和穗中积累量随着生物炭施用水平的增加而增大,浅湿干灌溉模式下茎鞘和叶片中基肥-¹⁵N 积累量与常规淹灌模式表现一致,而穗中基肥-¹⁵N 积累量在生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm² 时规律相同。浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下稻作基肥-¹⁵N 积累量的 20.60% ~ 26.47% 分布在植株茎鞘中;12.14% ~ 14.79% 的基肥-¹⁵N 分布在植株叶片中;58.74% ~ 67.23% 的基肥-¹⁵N 分布在植株穗部,与浅湿干灌溉模式相比,常规淹灌模式水稻各器官基肥-¹⁵N 的积累量偏高。水稻成熟期蘖肥-¹⁵N

在植株各器官的分布差异显著 ($P < 0.05$),浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下稻作蘖肥-¹⁵N 积累量的 19.28% ~ 28.53% 分布在植株茎鞘中;10.47% ~ 12.78% 的蘖肥-¹⁵N 分布在植株叶片中;58.69% ~ 70.07% 的蘖肥-¹⁵N 分布在植株穗部,当生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm² 时,浅湿干灌溉模式下相同生物炭施用量水稻植株各器官的蘖肥-¹⁵N 积累量显著高于常规淹灌。水稻成熟期植株中穗肥-¹⁵N 在各器官的分布差异同样显著 ($P < 0.05$),浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下稻作穗肥-¹⁵N 积累量的 10.30% ~ 16.01% 分布在植株茎鞘中;8.35% ~ 11.43% 分布在植株叶片中,72.56% ~ 81.35% 分布在植株穗部,稻作浅湿干灌溉模式水稻叶片和穗中的穗肥-¹⁵N 积累量显著高于常规淹灌 ($P < 0.05$)。

表 5 水稻成熟期各器官基肥-¹⁵N、蘖肥-¹⁵N 和穗肥-¹⁵N 积累量

Tab. 5 Basal - ¹⁵ N, tillering - ¹⁵ N and panicle - ¹⁵ N accumulation in aboveground parts at maturity stage		kg/hm ²								
灌溉模式	处理	基肥- ¹⁵ N			蘖肥- ¹⁵ N			穗肥- ¹⁵ N		
		茎鞘	叶片	穗	茎鞘	叶片	穗	茎鞘	叶片	穗
浅湿干灌溉	DB1	1.76 ^e	1.04 ^e	5.75 ^e	1.55 ^e	0.83 ^d	5.56 ^c	1.82 ^e	1.48 ^f	14.39 ^e
	DB2	1.84 ^f	1.09 ^e	5.99 ^d	1.60 ^e	0.88 ^c	5.80 ^b	2.00 ^d	1.59 ^e	15.45 ^e
	DB3	2.67 ^d	1.50 ^c	7.08 ^b	2.32 ^b	1.15 ^a	6.41 ^a	2.90 ^b	2.34 ^b	18.24 ^a
	DB4	2.85 ^c	1.59 ^c	6.32 ^b	2.66 ^a	1.19 ^a	5.48 ^c	3.48 ^a	2.48 ^a	15.76 ^b
常规淹灌	FB1	2.05 ^e	1.22 ^d	6.15 ^d	1.55 ^e	0.80 ^d	4.62 ^e	2.21 ^c	1.28 ^g	12.62 ^f
	FB2	2.07 ^e	1.23 ^d	6.23 ^c	1.56 ^e	0.80 ^d	4.62 ^e	2.25 ^c	1.31 ^g	12.88 ^f
	FB3	2.94 ^b	1.75 ^b	7.17 ^b	1.88 ^d	1.06 ^b	5.33 ^d	3.07 ^b	1.91 ^d	14.95 ^d
	FB4	3.24 ^a	1.94 ^a	7.64 ^a	2.09 ^c	1.24 ^a	5.82 ^b	3.30 ^a	2.11 ^c	15.67 ^b

2.5 不同阶段施用氮肥的吸收、转运和分配相关性分析

统计分析结果表明(表 6), $F_{NRE(total)}$ 与 $F_{NRE(t)}$ ($R=0.956, P<0.01$)、 $F_{NRE(p)}$ ($R=0.980, P<0.01$)、 $P_{NRT(t)}$ ($R=0.893, P<0.01$) 和 $P_{NRT(p)}$ ($R=0.876, P<0.01$)呈极显著正相关, $F_{NRE(total)}$ 与 $F_{NRE(b)}$ ($R=$

$0.804, P<0.05$) 和 $P_{NRT(b)}$ ($R=0.822, P<0.05$) 呈显著正相关, 与其他指标相关性不显著 ($P>0.05$)。 $F_{NRE(b)}$ 与 $P_{NRT(b)}$ 、 $F_{NRE(t)}$ 与 $P_{NRT(t)}$ 、 $F_{NRE(p)}$ 与 $P_{NRT(p)}$ 呈极显著正相关 ($P<0.01$), $F_{NRE(p)}$ 和 $P_{NRT(p)}$ 与 $t^{-15}N_{(p)}$ 呈显著正相关 ($P<0.05$)。

表 6 不同阶段施用氮肥的吸收、转运和分配相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of nitrogen uptake, transport and distribution in different stages of application							
	$F_{NRE(total)}$	$F_{NRE(b)}$	$F_{NRE(t)}$	$F_{NRE(p)}$	$P_{NRT(b)}$	$P_{NRT(t)}$	$P_{NRT(p)}$
$F_{NRE(b)}$	0.804 *						
$F_{NRE(t)}$	0.956 **						
$F_{NRE(p)}$	0.980 **						
$P_{NRT(b)}$	0.822 *	0.905 **					
$P_{NRT(t)}$	0.893 **		0.955 **				
$P_{NRT(p)}$	0.876 **			0.939 **			
$t^{-15}N_{(b)}$	-0.112	0.446			0.172		
$t^{-15}N_{(t)}$	0.017		0.212			0.425	
$t^{-15}N_{(p)}$	0.698			0.801 *			0.788 *

注: * 为 0.05 水平显著; ** 为 0.01 水平极显著。 $P_{NRT(b)}$ 、 $P_{NRT(t)}$ 、 $P_{NRT(p)}$ 分别代表水稻植株基肥、蘖肥、穗肥氮素转运对籽粒的贡献率; $t^{-15}N_{(b)}$ 、 $t^{-15}N_{(t)}$ 、 $t^{-15}N_{(p)}$ 分别代表水稻成熟期穗中基肥、蘖肥、蘖肥氮素积累量占植株氮素总积累量的百分比。

3 讨论

大量试验研究^[10,14-19]表明,应用节水灌溉技术和施加生物炭能够提高氮肥吸收利用率,但这些研究仅从单一因素来阐述水稻生长过程中对氮肥整体的利用情况。本文主要从水炭运筹的角度来研究水稻对不同阶段氮肥的吸收利用情况,应用¹⁵N 示踪技术,研究两种灌溉模式下稻作基肥、蘖肥和穗肥氮素在植株中的积累、转运及分配。研究结果表明,浅湿干灌溉模式水稻成熟期肥料对地上部氮素总积累量的贡献率为 17.97%~20.60%,水稻对基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率分别为 15.55%~20.45%、36.09%~44.91%、53.61%~71.18%,不同阶段施用的氮肥吸收利用率均高于张忠学等^[10]研究结果。通常情况下,水稻对基肥的吸收利用率低于 10%^[20-21],导致基肥氮素在稻田土壤中大量残留,

为此专家学者提出了减少水稻前期基肥的施用量,增加后期穗肥用量的方法,来减少水稻生育期内肥料氮素的损失^[22],但这种方法可能会因减少水稻的分蘖数^[23]而影响产量,而水炭运筹方法能够在不改变肥料施用比例的情况下有效地解决该问题。另外,浅湿干灌溉模式水稻植株对基肥氮素的吸收利用率要低于常规淹灌,这主要是因为浅湿干灌溉模式增加了 NH₃ 挥发损失^[24],且抑制水稻的前期生长。当生物炭施加量在 0~12.5 t/hm² 时,浅湿干灌溉模式水稻植株对蘖肥和穗肥的吸收利用率均高于常规淹灌,相同生物炭施用水平下分别提高了 13.92%~19.32% 和 9.81%~17.86%,这是由于节水灌溉模式有利于水稻根系的生长发育^[25],对后期水稻生长的补偿效应显著,促进后期水稻对氮肥的吸收利用^[26]。生物炭施入稻田土壤后会对土壤容重、孔隙度和 CEC^[8-9] 等产生直接影响。黑色的

生物炭有明显的吸热属性,施用后可以提高土壤温度^[17],减轻东北地区早春低温冷害,为根系生长发育创造有利条件;OGUNTUNDE 等^[27]研究发现,生物炭能够降低土壤容重和增加土壤总孔隙率,从而提高土壤的通气和透水性,为根系生理结构及形态发育提供良好的生态环境,有利于根系的深扎和伸展^[25];生物炭施入还能增加土壤微生物数量和改善微生物群落结构,微生物活动的增强能够改善根际生长环境,有利于促进根系生长^[28]。综合来看,施加适量的生物炭利于水稻根系的生长发育,促进了水稻对氮肥的吸收利用。此外,生物炭具有丰富的官能团和巨大的比表面积,施入土壤后提高了 CEC^[29],减少了硝态氮的淋溶,提高了氮肥吸收利用率^[18-19]。而 LIU 等^[30]研究结果表明,生物炭的施加能减少氮淋溶,但增加 NH₃ 挥发,施加量超过 40 t/hm² 将增加氮损失。不同灌溉模式引起氮损失的生物炭施用量阈值不同,本试验中浅湿干灌溉模式生物炭施用量的阈值在 12.5 ~ 25 t/hm² 之间,而常规淹灌在 25 t/hm² 以上,因此应根据实际情况来确定生物炭施加量。过量生物炭使土壤碳氮比增加,使有机物的分解速度减慢,土壤微生物无法从有机质的分解中获得足够的氮,开始消耗土壤中的有效氮(以肥料为主)^[31],降低了土壤提供的养分含量^[32],不利于水稻对肥料的吸收和利用。综合来看,在提高氮肥利用率方面,节水灌溉较常规淹灌更具优势。因此,节水灌溉下合理的水炭运筹模式可以提高氮肥的吸收利用率,减少肥料氮素在土壤中的残留^[33]。

本文相关性分析结果表明,水炭运筹模式下水稻蘖肥和穗肥吸收利用率与肥料总氮素吸收利用率呈极显著正相关($P < 0.01$),而基蘖穗肥氮素转运对籽粒的贡献率又与相应的吸收利用率呈极显著正相关($P < 0.01$)。因此,分析水稻氮素转运和分配过程对研究不同阶段施加的氮肥吸收利用率十分重要。水稻籽粒氮素主要依靠营养器官中氮素的转运,水炭运筹下水稻成熟期籽粒氮素中有 16.68% ~ 22.06% 是来自于花前茎鞘和叶片积累的肥料氮素,且不同阶段氮肥的转运情况也不同,与茎鞘和叶片中积累的基肥-¹⁵N 和蘖肥-¹⁵N 相比,穗肥-¹⁵N 更容易向穗部转运^[34],随着肥料-¹⁵N 向籽粒中转移,导致叶片、茎鞘中的肥料-¹⁵N 分配减少,而籽粒中肥料-¹⁵N 的分配增加^[35]。比较水稻成熟期植株不同部位积累的基肥-¹⁵N、蘖肥-¹⁵N 和穗肥-¹⁵N 的分配情况,发现穗肥-¹⁵N 在穗中分布最多。氮素在茎叶、鞘等营养器官中的累积和再分配,可以反映植株各个部位的代谢状况以及生长中的变化,影响水稻

产量^[35]。在提高肥料氮素转运方面,节水灌溉模式优于常规淹灌,施加适量的生物炭可以提高各阶段施用的肥料氮素转运率及转运贡献率,有利于增加肥料氮素在穗中的分配,而过量生物炭则会使成熟期叶片及茎鞘中肥料氮素滞留量显著增加,而穗部的积累量不再显著增加^[36-37]。总的来说,水炭运筹下氮素的累积、转运和分配过程较为复杂,需要长期的试验研究。

在东北寒地黑土区稻田中应用水炭运筹管理可以培肥土壤、提高水氮利用率和产量。本试验采用¹⁵N 示踪技术研究了当地氮肥条件下水炭运筹对氮素吸收利用、积累、转运及分配的影响,但考虑多方面因素,水炭运筹管理的长期效应还有待进一步验证,并对基于土壤-作物系统的调控机制、作用机制等科学问题系统研究和深入探讨。

4 结论

(1) 水炭运筹两种灌溉模式下施加生物炭增加了水稻的有效穗数、千粒质量、结实率,但减少了每穗粒数。当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm² 时,浅湿干灌溉模式水稻在相同生物炭施用水平下较常规淹灌产量增加 1.36% ~ 6.13%,稻作肥料-¹⁵N 吸收利用率在相同生物炭施用水平下较常规淹灌分别提高了 5.20%、9.88%、11.91%,氮素总积累量提高了 4.25%、5.87%、9.30%。

(2) 水稻对基肥、蘖肥和穗肥的吸收利用率分别为 15.55% ~ 23.31%、31.68% ~ 44.91%、48.82% ~ 71.18%。常规淹灌模式下水稻对基肥-¹⁵N 吸收利用率随着生物炭施用量的增加而增大,有 17.11% ~ 23.31% 的基肥氮素被水稻植株吸收利用,高于浅湿干灌溉模式;浅湿干灌溉模式在相同生物炭施用水平下,水稻蘖肥-¹⁵N 吸收利用率显著高于常规淹灌($P < 0.05$),提高了 2.08% ~ 19.32%;当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm² 时,水稻成熟期穗肥-¹⁵N 吸收利用率随着生物炭施加量增加而增大,浅湿干灌溉模式下水稻成熟期穗肥-¹⁵N 吸收利用率在相同生物炭施用水平下较常规淹灌提高了 2.99% ~ 17.86%。

(3) 水炭运筹下水稻成熟期籽粒中氮素仅有 16.68% ~ 22.06% 来自于花前茎鞘和叶片积累的肥料氮素,当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm² 时,稻作基肥-¹⁵N、蘖肥-¹⁵N 和穗肥-¹⁵N 转运对籽粒的贡献率都随着生物炭施入量的增加而增大,分别为 3.53% ~ 4.71%、3.22% ~ 4.38%、9.69% ~ 13.25%。水炭运筹下水稻成熟期不同阶段施加的肥料氮素在植株各器官的积累量由大到小均为穗、

茎鞘、叶片,施加一定量的生物炭有利于增加穗部肥料氮素的分配。

(4)相关性分析结果表明,水炭运筹模式下稻作肥料总氮素吸收利用率与蘖穗肥吸收利用率和蘖穗肥氮素转运对籽粒的贡献率呈极显著正相关($P < 0.01$),与基肥的吸收利用率和基肥氮素转运对籽粒

的贡献率呈显著正相关($P < 0.05$);不同阶段施用氮肥的吸收利用率与相应的氮素转运对籽粒的贡献率均呈极显著正相关($P < 0.01$);穗肥吸收利用率和穗肥氮素转运对籽粒的贡献率与水稻成熟期穗中穗肥积累量占植株氮素总积累量的百分比呈显著正相关($P < 0.05$)。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2017 年国民经济和社会发展统计公报[R] [EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228_1585631.html.
- [2] PENG S, TANG Q, ZOU Y, et al. Current status and challenges of rice production in China[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3–8.
- [3] FAO. *Agricultural production*[R]. Rome, 2014.
- [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 nitrogenous 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] YAN X Y, TI C P, VITOUSEK P, et al. Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 095002.
- [6] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [7] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 443–449.
- [8] EASTMAN C M. *Soil physical characteristics of an aerically ochraqualf amended with biochar*[D]. Columbus: The Ohio State University, 2011.
- [9] VERHEIJEN F, JEFFERY S, BASTOS A C, et al. *Biochar application to soils*[C]//Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2010.
- [10] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. ^{15}N 示踪分析节水灌溉下水稻对不同时期氮肥的吸收分配[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 309–317, 346.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. ^{15}N tracer-based analysis of water and nitrogen management differences in uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 309–317, 346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180636&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.036. (in Chinese)
- [11] 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 Yongjian, SUN Yuanyuan, LIU Shujin, 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. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(4): 655–664.
SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, LI Xuyi, et al. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4): 655–664. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 119–124.
LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 119–124. (in Chinese)
- [16] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 1–12.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural*

- Machinery, 2018, 49 (7): 1 – 12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001. (in Chinese)
- [17] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
ZHANG Weiming. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [18] LIU Z, HE T, CAO T, et al. Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 17(2): 35 – 39.
- [19] WANG Y, LIU Y, LIU R, et al. Biochar amendment reduces paddy soil nitrogen leaching but increases net global warming potential in Ningxia irrigation, China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 1592 – 1602.
- [20] 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)
- [21] WANG X, SUO Y, FENG Y, et al. Recovery of ¹⁵N-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.
- [22] 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)
- [23] 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.
- [24] 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)
- [25] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445 – 1451.
ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1445 – 1451. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4): 591 – 596.
- [28] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 751 – 758.
CHEN Xinxiang, GENG Zengchao, WANG Sen, et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(4): 751 – 758. (in Chinese)
- [29] JIA Wensuo, ZHANG Jianhua. Stomatal movements and long-distance signaling in plangs[J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3(10): 772 – 777.
- [30] LIU Qi, LIU Benjuan, ZHANG Yanhui, et al. Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH₃ volatilization, N₂O emissions, and N leaching) from croplands: options and mitigation strength in a global perspective[J]. Global Change Biochar, 2019, 25(6): 2077 – 2093.
- [31] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vengetation and soil respiration: correlation and controls[J]. Biochemistry, 2000, 48(1): 71 – 90.
- [32] 宋延静, 龚骏. 施用生物炭对土壤生态系统功能的影响[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2010, 26(4): 361 – 365.
SONG Yanjing, GONG Jun. Effects of biochar application on soil ecosystem functions[J]. Ludong University Journal (Natural Science Edition), 2010, 26(4): 361 – 365. (in Chinese)
- [33] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. 黑土区节水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 240 – 250.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. Effects of water-saving irrigation on residues of different period fertilizer nitrogen in black soils[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 240 – 250. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181128&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.028. (in Chinese)
- [34] WANG Danying, XU Chunmei, YAN Jinxiang, 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.
- [35] 林晶晶. 水稻对基肥穗肥氮素的吸收利用差异及适宜比例的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
LIN Jingjing. Studies on absorption and utilization and optimum proportion of nitrogen of basic, tillering and panicle fertilizer in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [36] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 等. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4745 – 4756.
SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, JIANG Mingjin, et al. Effects of fertilizer levels on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(24): 4745 – 4756. (in Chinese)
- [37] 董桂春, 王余龙, 周娟, 等. 不同氮素籽粒生产效率类型粳稻品种氮素分配与运转的差异[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 149 – 155.
DONG Guichun, WANG Yulong, ZHOU Juan, et al. Difference of nitrogen accumulation and translocation in conventional indica rice cultivars with different nitrogen use efficiency for grain output[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 149 – 155. (in Chinese)