

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.031

水炭运筹下水稻根系对氮素吸收利用的<sup>15</sup>N示踪分析张作合<sup>1,2</sup> 张忠学<sup>1,3</sup> 李铁成<sup>1,3</sup> 秦子元<sup>1,3</sup> 孙迪<sup>1,3</sup> 宋健<sup>1,3</sup>

(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:** 为揭示水炭运筹下水稻根系对氮素的吸收利用情况, 采用田间小区试验与<sup>15</sup>N示踪微区结合的方法, 试验设置两种灌水模式(浅湿干灌溉、常规淹灌)和4个秸秆生物炭施用水平(0、2.5、12.5、25 t/hm<sup>2</sup>), 以常规淹灌作为对照, 研究浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭对水稻根系形态特征和生理特性的影响, 以及根系对肥料和土壤氮素的吸收利用情况。结果表明: 施加秸秆生物炭改变了水稻根系形态特征和生理特性, 适量的秸秆生物炭提高了根系的主根长、根体积、根鲜质量、根系活跃吸收面积、根系伤流强度和根系活力, 优化了根冠比, 有利于根系对氮素的吸收; 浅湿干灌溉模式水稻根系对肥料-<sup>15</sup>N和土壤氮素的吸收量与根系伤流强度和根系活力呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与活跃吸收面积呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 与根冠比呈显著负相关( $P < 0.05$ ); 浅湿干灌溉模式根系形态特征和生理特性的变化促进了水稻根系对肥料-<sup>15</sup>N和土壤氮素的吸收, 提高了水稻产量和氮肥利用率。其中, 浅湿干灌溉模式施加12.5 t/hm<sup>2</sup>秸秆生物炭处理的水稻经济产量、氮肥吸收利用率(NUE)、氮肥农学利用率(NAE)、氮肥偏生产力(NPFP)较不施加秸秆生物炭处理分别提高了13.05%、30.54%、11.67%和13.05%。本研究可为秸秆生物炭在寒地黑土区稻田的应用提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 稻田; 水炭运筹; 根系伤流; 根冠比; 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(2021)06-0295-10

OSID:



## <sup>15</sup>N Tracer Analysis of Nitrogen Uptake and Utilization by Rice Roots under Water and Biochar Management

ZHANG Zuohe<sup>1,2</sup> ZHANG Zhongxue<sup>1,3</sup> LI Tiecheng<sup>1,3</sup> QIN Ziyuan<sup>1,3</sup> SUN Di<sup>1,3</sup> SONG Jian<sup>1,3</sup>

(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 nitrogen uptake and utilization of rice roots under water and biochar management, field plot experiment and <sup>15</sup>N tracer micro plot were used. Two irrigation modes (dry-shallow-wet irrigation and conventional flooding irrigation) and four straw biochar application levels (0 t/hm<sup>2</sup>, 2.5 t/hm<sup>2</sup>, 12.5 t/hm<sup>2</sup> and 25 t/hm<sup>2</sup>) were set up. The effects of straw biochar on the morphological and physiological characteristics of rice roots, and the absorption and utilization of fertilizer and soil nitrogen by roots under dry-shallow-wet irrigation were studied. The results showed that the application of straw biochar changed the morphological and physiological characteristics of rice roots, and the appropriate amount of straw biochar increased the main root length, root volume, root fresh weight, root active absorption area, root bleeding velocity and root activity, optimized the root-shoot ratio, which was conducive to nitrogen absorption; the uptake of fertilizer-<sup>15</sup>N and soil nitrogen by rice roots under dry-shallow-wet irrigation mode was also improved. There was a significant positive correlation with root bleeding and root activity ( $P < 0.01$ ), a significant positive correlation with active absorption area ( $P < 0.05$ ), and a significant negative correlation with root-shoot ratio ( $P < 0.05$ ). The changes of root morphological and physiological characteristics in dry-shallow-wet irrigation mode promoted the

收稿日期: 2020-08-24 修回日期: 2020-09-30

基金项目: 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费基础研究项目(YWK10236200143)和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

uptake of fertilizer- $^{15}\text{N}$  and soil nitrogen by rice roots, and improved rice yield and nitrogen use efficiency. Compared with the treatment without straw biochar, the economic yield, nitrogen absorption and utilization efficiency, agronomic utilization efficiency and partial productivity of nitrogen fertilizer in the treatment of dry-shallow-wet irrigation with  $12.5\text{ t/hm}^2$  straw biochar were increased by 13.05%, 30.54%, 11.67% and 13.05%, respectively. The results can provide theoretical basis and technical support for the application of straw biochar in paddy field in cold and black soil region.

**Key words:** paddy field; water and biochar management; root injury; root-shoot ratio; isotope trace technology

## 0 引言

东北地区是我国重要的商品粮生产基地<sup>[1]</sup>,对保障我国粮食安全具有重要意义<sup>[2]</sup>。为了保证水稻的高产、稳产,节水灌溉技术得到了大面积推广应用<sup>[3]</sup>,它能够有效地缓解水资源供需矛盾,但同时也加快了稻田土壤有机质的分解速度,长期应用会引起土壤退化。因此,为实现稻田水土资源的可持续利用,亟需研究与之相适应的先进碳管理技术。施用生物炭是一种新型碳管理技术,能够改善土壤理化性质<sup>[4]</sup>,由于生物炭的持留和束缚作用使土壤无机氮素分布发生变化,有效减缓了土壤无机氮素向深层的迁移,从而降低了淋溶损失<sup>[5]</sup>,促进了水稻根系对氮素的吸收和利用,提高了氮肥的利用率<sup>[6-10]</sup>。

根系是作物重要的代谢和吸收器官,其形态特征直接影响作物对水分和养分的吸收利用<sup>[11]</sup>,从而影响植株地上部的生长和作物产量。受旱时,作物根系最先感知土壤水分变化,通过调节叶片气孔开度来改善水分-产量的关系<sup>[12]</sup>,而生物炭的施用改变了土壤环境,从而影响作物根系的形态特征和生理特性。因此,研究根系对施加生物炭的响应机制能够促进生物节水技术的发展。由于根系生长在土壤中不易被监测,因此关于施加生物炭对根系形态特征和生理特性变化的研究相对较少。张伟明等<sup>[13]</sup>研究发现,土壤中施入生物炭能改变水稻生育前期根系形态特征,增加了根系活力,提高了根系伤流强度,并维持适宜的根冠比,在水稻生育后期延缓了根系衰老。李中阳等<sup>[14]</sup>研究了生物炭对冬小麦根形态的影响,发现生物炭增加了根系总根长和总表面积。周劲松等<sup>[15]</sup>研究了稻田土壤育苗基质中添加生物炭对秧苗根系形态建成的影响,发现添加5.0%生物炭明显增加了水稻秧苗根系长度、根系表面积和根系体积等。目前,在我国北方地区,关于节水灌溉模式下生物炭对水稻根系影响的相关研究较少。

本文以常规淹灌作为对比,采用田间小区试验与 $^{15}\text{N}$ 示踪微区结合的方法,研究浅湿干灌溉模式

施加秸秆生物炭对水稻根系形态特征和生理特性的影响,以及根系对肥料和土壤氮素的吸收利用情况,旨在为秸秆生物炭在寒地黑土区稻田的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2018年5—9月,在黑龙江省庆安县和平灌区水稻灌溉试验站进行。试验站( $46^{\circ}57'28''\text{N}$ ,  $127^{\circ}40'45''\text{E}$ )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,作物水热生长期一般为156~171 d,多年平均降水量500~600 mm,多年平均水面蒸发量700~800 mm,平均气温 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,平均日照时数为2600 h,是黑龙江省典型的水稻种植区。

### 1.2 试验材料

水稻秸秆生物炭(辽宁金和福农业开发有限公司生产)在 $450^{\circ}\text{C}$ 高温无氧条件下裂解制备而成,每公顷稻草可制成2.5 t左右直径为2 mm颗粒形式的秸秆生物炭,pH值为8.86,碳质量分数为42.72%,填充密度为 $0.13\text{ g/cm}^3$ ,比表面积为 $81.85\text{ m}^2/\text{g}$ ,总孔容积为 $0.080\text{ cm}^3/\text{g}$ ,阳离子交换量(CEC)为 $44.7\text{ cmol/kg}$ 。供试土壤为黑土,0~20 cm土层土壤理化性质:pH值为6.40,有机质质量比 $41.80\text{ g/kg}$ ,全氮质量比为 $1.51\text{ g/kg}$ ,全磷质量比 $15.61\text{ g/kg}$ ,全钾质量比为 $19.86\text{ g/kg}$ ,碱解氮质量比为 $148.27\text{ mg/kg}$ ,速效磷质量比为 $24.22\text{ mg/kg}$ ,速效钾质量比为 $156.13\text{ mg/kg}$ 。供试水稻品种为绥粳18,该品种已在研究区大面积推广种植,插秧密度为 $25\text{ 穴/m}^2$ 。

### 1.3 试验设计

试验采用灌溉模式和秸秆生物炭施用量2因素全面试验,两种水分管理模式见表1:浅湿干灌溉模式(D)和常规淹灌模式(F),秸秆生物炭每5年施用一次,施用量设置4个水平:B0( $0\text{ t/hm}^2$ )、B1( $2.5\text{ t/hm}^2$ )、B2( $12.5\text{ t/hm}^2$ )、B3( $25\text{ t/hm}^2$ )。8个处理,每个处理3次重复,共计24个试验小区,采用随机区组排列,方形小区面积 $100\text{ m}^2$ 。在前一年水稻收获后,将秸秆生物炭翻耕于稻田15 cm左右的

土层中,并旋耕混匀;氮肥施用量为 110 kg/hm<sup>2</sup> (纯氮),基肥、蘖肥、穗肥按 5:2:3 分施;K<sub>2</sub>O 施用量为 80 kg/hm<sup>2</sup>,基肥、穗肥按 1:1 分施;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施用量为 45 kg/hm<sup>2</sup>,作为基肥一次性施入。供试肥料选用尿素(N 质量分数为 46.4%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数为 12%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O 质量分数为 52%),并计

算实际施用量。在上述试验小区内设置<sup>15</sup>N 示踪微区,稻田整地后立即在每个小区内预埋无底钢制矩形框(尺寸为 2 m × 2 m × 0.5 m),将微区埋 30 cm 深至犁底层下,氮肥施用上海化工研究院生产的<sup>15</sup>N 标记尿素(丰度为 10.22%),深度与试验小区相同。其他管理措施与所在的试验小区相同。

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	控制指标	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(D)	蓄雨上限	50mm	50mm	50mm	晒田	50mm	50mm	50mm	落干
	灌水上限	30mm	30mm	30mm	晒田	30mm	30mm	30mm	落干
	灌水下限	$\theta_s$	0.85 $\theta_s$	0.85 $\theta_s$	晒田	0.85 $\theta_s$	0.85 $\theta_s$	0.7 $\theta_s$	落干
常规淹灌(F)	蓄雨上限	50mm	100mm	100mm	晒田	100mm	100mm	100mm	落干
	灌水上限	30mm	50mm	50mm	晒田	50mm	50mm	50mm	落干
	灌水下限	0mm	0mm	0mm	晒田	0mm	0mm	0mm	落干

注: $\theta_s$ 为根层土壤饱和含水率。

## 1.4 样品采集与测定

### 1.4.1 根基本指标测定

整株取样时,挖取 40 cm 带根土块,放入尼龙筛网袋(40 目)里,浸泡 30 min 后,用清水冲洗干净,测定每株样品的根系鲜质量、根体积、根长、根冠比和根系伤流强度。根系表面水分用滤纸轻拭擦干,用电子秤(精度 0.01 g)称量根系鲜质量和地上部总鲜质量,计算根冠比。用排水法测定根体积<sup>[16]</sup>。当天在距土壤表面 5 cm 处横切断植株,用已称量的脱脂棉覆盖切口处,外围用自封袋包扎收集伤流液,14 h 后取下脱脂棉称量,脱脂棉前后质量之差除以 14 即为伤流强度。

### 1.4.2 根系活力测定

植物根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法<sup>[16]</sup>测定。称取根样品 0.5 g,放入小培养皿(先加硫酸再加根样品),加入 0.4% TTC 溶液和磷酸缓冲液的等量混合液 10 mL,把根充分浸没在溶液内,在 37℃ 暗处保温 1 h,此后加入 1 mol/L 硫酸 2 mL,以停止反应。将根取出,吸干水分后与乙酸乙酯 3 ~ 4 mL 和少量石英砂一起磨碎,以提取出三苯基甲腈(TTF)。将红色提出液移入试管,用少量乙酸乙酯将残渣洗涤 2 ~ 3 次,皆移入试管,最后加乙酸乙酯使总量为 10 mL,用分光光度计在 485 nm 下比色,以空白作参比读出光密度,查标准曲线,求出四氮唑还原量即为根系活力值。

### 1.4.3 根系总吸收面积与活跃吸收面积测定

通过甲烯蓝比色法<sup>[16]</sup>测定根系总吸收面积与活跃吸收面积。将  $2 \times 10^{-4}$  mol/L 的甲烯蓝溶液(质量浓度 0.064 mg/mL)分别倒入 3 个小烧杯(编号 1、2、3)中,每个烧杯中装上溶液(约 10 倍于根系

体积),并记下每个烧杯中的溶液量;将冲洗干净的待测根系,用吸水纸小心吸干(慎勿伤根),然后依次浸入盛有甲烯蓝溶液的烧杯中,在每杯中浸 1.5 min;从 3 个烧杯中各取 1 mL 溶液加入试管,均稀释 10 倍,测得其光密度,查标准曲线,求出每杯浸入根系后溶液中剩下的甲烯蓝量,之后根据杯中原有的甲烯蓝量,求出每杯中根系所吸收的甲烯蓝量  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 。总吸收面积为  $1.1(A_1 + A_2)$ ,活跃吸收面积为  $1.1A_3$ 。

### 1.4.4 植株来自土壤和肥料氮含量测定

参照文献[17]方法,利用同位素质谱仪(DELTA V Advantage,美国)和元素分析仪(Flash 2000 HT 型,美国)联用的方法测定水稻植株各部位来自土壤和肥料氮含量,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。

## 1.5 计算方法和数据分析

氮肥利用率相关指标计算如下:氮肥吸收利用率(NUE,%)为施氮区植株肥料<sup>15</sup>N 积累量占施氮量百分比,氮肥农学利用率(NAE,kg/kg)为施氮区经济产量和氮空白区经济产量的差与施氮量比值,氮肥偏生产力(NPFP,kg/kg)为水稻经济产量与施氮量比值。

采用 WPS 2019、SPSS 软件分析和处理数据,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 不同水炭运筹对水稻根系形态特征的影响

#### 2.1.1 对主根长、根体积与根鲜质量的影响

由图 1a(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,施加秸秆生物炭各处理水稻单株的主根长显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ ),浅湿干灌溉模式各处理水稻单株的主根长在拔节末期达到最大,而常规淹灌模式在抽穗末期最大。在分蘖期,施加  $2.5 \text{ t/hm}^2$  的秸秆生物炭更利于主根长的增长,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻主根长显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在拔节期,施加  $12.5 \text{ t/hm}^2$  的

秆生物炭更利于主根长的增长,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻主根长显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ ),且二者在拔节期差异最大。在抽穗期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻主根长与常规淹灌模式无显著差异( $P > 0.05$ )。在水稻生长前期,施加秸秆生物炭有利于提高根系下扎,促进根系纵向生长。但随着生育期推进,施加秸秆生物炭各处理之间的主根长差异逐渐缩小。

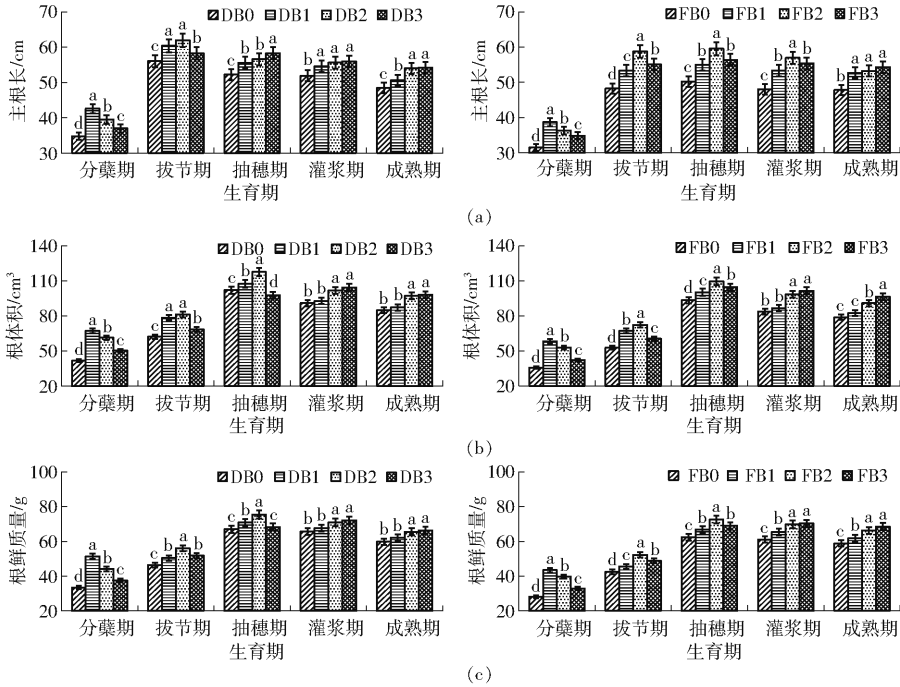


图1 不同处理各生育期主根长、根体积和根鲜质量的变化

Fig. 1 Changes of main root length, root volume and root fresh weight at different growth stages under different treatments

由图1b可知,施加秸秆生物炭各处理(除灌浆期、成熟期B1)水稻单株的根体积显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ ),浅湿干灌溉模式和常规淹灌模式各处理水稻单株的根体积均在抽穗末期达到最大。在分蘖期,施加  $2.5 \text{ t/hm}^2$  的秸秆生物炭更利于根体积的增长,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根体积显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在拔节期,施加  $12.5 \text{ t/hm}^2$  的秸秆生物炭更利于根体积的增长,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根体积显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在抽穗期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根体积显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在水稻生长后期,秸秆生物炭有利于保持根系体积,从而延缓根系衰老,有利于满足后期水稻植株对养分的需求。

由图1c可知,施加秸秆生物炭各处理(除抽穗期DB3、灌浆期和成熟期DB2)水稻单株的根鲜质量显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ ),浅湿干灌溉模式和常规淹灌模式各处理水稻单株的根

鲜质量均在抽穗末期达到最大。在分蘖期,施加  $2.5 \text{ t/hm}^2$  的秸秆生物炭更利于根鲜质量的生长,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根鲜质量显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在拔节期,施加  $12.5 \text{ t/hm}^2$  的秸秆生物炭更利于根鲜质量的生长,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根鲜质量显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在抽穗期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根鲜质量显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ )。在水稻生长前期,施加秸秆生物炭有利于增加根鲜质量,而在生长后期对根鲜质量的影响作用减少。

总体上看,秸秆生物炭促进了根系生长,对水稻生长前期的主根长、根体积与根鲜质量的影响较大。

### 2.1.2 对水稻根冠比的影响

如图2所示,分蘖期至抽穗期,施加秸秆生物炭各处理的水稻根冠比显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ )。水稻分蘖期,各处理根冠比在全生育期最大,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻的根冠比较常规淹灌模式分别提高

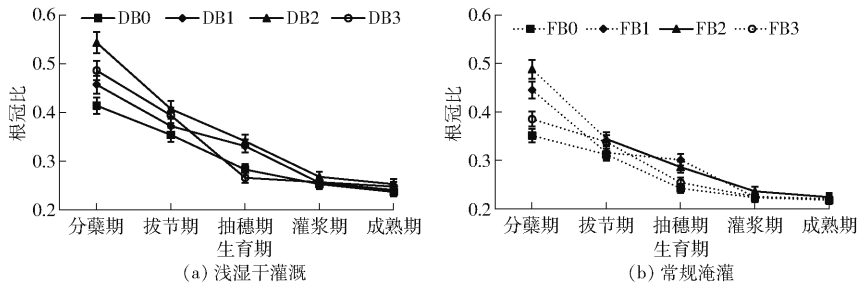


图2 不同处理各生育期水稻根冠比的变化曲线

Fig. 2 Changes of root-shoot ratio in rice at different growth stages under different treatments

17.95%、2.70%、11.27%和26.23%，浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的水稻根冠比较不施加秸秆生物炭处理分别提高10.39%、31.16%、17.39%。随着时间推移，各处理之间根冠比差异逐渐减小，在灌浆期和成熟期各处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。水稻生长前期，秸秆生物炭促进了根系生长，明显提高了根冠比，提高了根系吸收水分和养分的效率。而后期，秸秆生物炭延缓了水稻植株根系衰亡，较小的根冠减少了根系生长冗余，有利于营养物质的合理分配，能够增加籽粒干物质积累。

## 2.2 不同水炭运筹对水稻根系生理特性的影响

### 2.2.1 对水稻根系活跃吸收面积及占比的影响

由表2可知，不同水炭运筹对各生育期水稻根系活跃吸收面积影响存在差异，施加秸秆生物炭增加了水稻根系的活跃吸收面积占总吸收面积百分比。在分蘖期，相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系活跃吸收面积较常规淹灌模式分别提高6.84%、7.15%、11.68%和2.34%，浅湿干

灌溉模式施加秸秆生物炭各处理根系活跃吸收面积较不施加秸秆生物炭处理分别提高50.32%、45.23%、28.91%；浅湿干灌溉模式水稻根系的活跃吸收面积占总吸收面积百分比低于常规淹灌模式。在拔节期，相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系活跃吸收面积较常规淹灌模式分别提高13.17%、9.80%、13.41%和5.09%，浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理根系活跃吸收面积较不施加秸秆生物炭处理分别提高28.80%、45.66%、42.53%；浅湿干灌溉模式水稻根系的活跃吸收面积占总吸收面积百分比低于常规淹灌模式。在抽穗期，相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系活跃吸收面积较常规淹灌模式分别提高7.34%、4.52%、6.34%和2.07%，浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理根系活跃吸收面积较不施加秸秆生物炭处理分别提高2.77%、12.28%、7.07%；浅湿干灌溉模式水稻根系的活跃吸收面积占总吸收面积百分比高于常规淹灌模式。

表2 不同处理各生育期水稻根系活跃吸收面积及占总吸收面积百分比

Tab. 2 Active absorption area and percentage in total absorption area of rice roots in different growth stages under different treatments

处理	活跃吸收面积/cm <sup>2</sup>					活跃吸收面积占总吸收面积百分比/%				
	分蘖期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	分蘖期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
DB0	28.12 <sup>d</sup>	35.48 <sup>e</sup>	60.69 <sup>d</sup>	58.59 <sup>e</sup>	57.15 <sup>e</sup>	44.78 <sup>e</sup>	45.88 <sup>e</sup>	45.84 <sup>f</sup>	45.52 <sup>e</sup>	45.20 <sup>b</sup>
DB1	42.27 <sup>a</sup>	45.70 <sup>e</sup>	62.37 <sup>c</sup>	60.89 <sup>b</sup>	60.26 <sup>b</sup>	47.13 <sup>e</sup>	46.02 <sup>e</sup>	48.54 <sup>e</sup>	46.82 <sup>b</sup>	46.94 <sup>a</sup>
DB2	40.84 <sup>a</sup>	51.68 <sup>a</sup>	68.14 <sup>a</sup>	64.02 <sup>a</sup>	63.44 <sup>a</sup>	46.64 <sup>d</sup>	48.20 <sup>b</sup>	54.29 <sup>c</sup>	48.66 <sup>a</sup>	47.75 <sup>a</sup>
DB3	36.25 <sup>e</sup>	50.57 <sup>a</sup>	64.98 <sup>b</sup>	63.09 <sup>a</sup>	62.98 <sup>a</sup>	49.75 <sup>b</sup>	45.99 <sup>e</sup>	57.02 <sup>b</sup>	47.62 <sup>b</sup>	48.49 <sup>a</sup>
FBO	26.32 <sup>e</sup>	31.35 <sup>f</sup>	56.54 <sup>e</sup>	55.02 <sup>d</sup>	53.24 <sup>d</sup>	48.09 <sup>e</sup>	43.83 <sup>d</sup>	45.76 <sup>f</sup>	45.65 <sup>e</sup>	44.54 <sup>e</sup>
FB1	39.45 <sup>b</sup>	41.62 <sup>d</sup>	59.67 <sup>d</sup>	58.56 <sup>e</sup>	56.47 <sup>e</sup>	50.05 <sup>b</sup>	47.16 <sup>bc</sup>	47.50 <sup>e</sup>	46.90 <sup>b</sup>	45.68 <sup>b</sup>
FB2	36.57 <sup>e</sup>	45.57 <sup>e</sup>	64.08 <sup>b</sup>	61.14 <sup>b</sup>	60.75 <sup>b</sup>	52.73 <sup>a</sup>	48.27 <sup>b</sup>	52.77 <sup>d</sup>	48.66 <sup>a</sup>	47.90 <sup>a</sup>
FB3	35.42 <sup>e</sup>	48.12 <sup>b</sup>	63.66 <sup>bc</sup>	62.37 <sup>ab</sup>	61.52 <sup>ab</sup>	53.96 <sup>a</sup>	50.03 <sup>a</sup>	59.09 <sup>a</sup>	48.53 <sup>a</sup>	47.89 <sup>a</sup>

注：同列不同小写字母表示不同处理在  $P < 0.05$  水平差异显著，下同。

总体上看，在水稻生长前期，秸秆生物炭明显提高了根系总吸收面积与活跃吸收面积，使根系吸收能力提升，从而促进氮素吸收。随着生育期推进，两种灌溉模式各处理之间的根系总吸收面积与活跃吸收面积差异逐渐减小，但仍有较高的根系总吸收面

积和活跃吸收面积，有利于后期水分和养分的吸收和供应。

### 2.2.2 对水稻根系伤流的影响

由图3可知，两种灌溉模式各处理的水稻根系伤流强度变化均为先增加后减少的趋势。分蘖期至

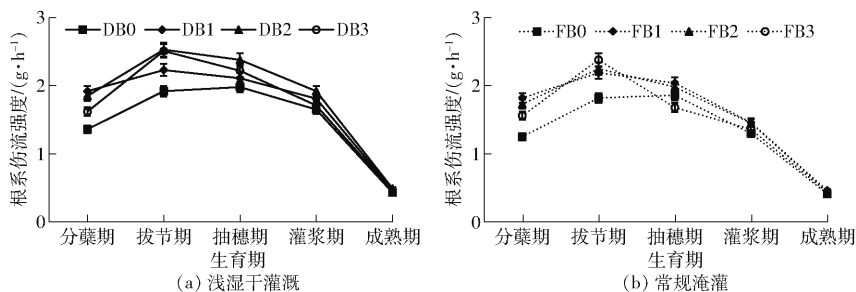


图3 不同处理各生育期水稻根系伤流强度的变化曲线

Fig. 3 Changes of root injury and flow in rice at different growth stages under different treatments

抽穗期,施加秸秆生物炭各处理的水稻根系伤流强度显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ ),施加秸秆生物炭处理水稻根系伤流强度在拔节期达到最大,而不施加秸秆生物炭处理在抽穗期达到最大。在分蘖期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系伤流强度较常规淹灌模式分别提高8.80%、5.49%、6.94%和3.85%,浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理根系伤流强度较不施加秸秆生物炭处理分别提高41.18%、36.03%、19.12%。在拔节期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系伤流强度较常规淹灌模式分别提高5.49%、1.83%、12.44%和5.46%,浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理根系伤流强度较不施加秸秆生物炭处理分别提高16.15%、31.77%、30.73%。在抽穗期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系伤流强度较常规淹灌模式分别提高6.45%、3.43%、20.20%和32.14%,浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理根系伤流强度较不

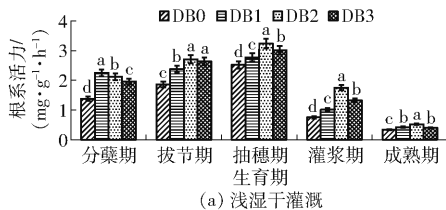


图4 不同处理各生育期水稻根系活力的变化

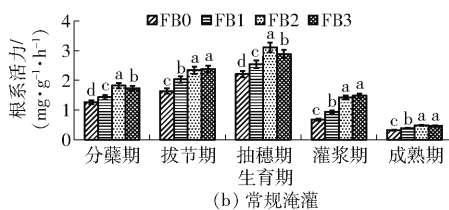
Fig. 4 Changes of root activity of rice at different growth stages under different treatments

### 2.3 水炭运筹下水稻根系对肥料和土壤氮素的吸收

由表3可知,当秸秆生物炭施加量为0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻在拔节期和抽穗期根系吸收的肥料-<sup>15</sup>N显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ ),各生育期施加秸秆生物炭处理的水稻根系吸收的肥料-<sup>15</sup>N显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ );相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻在拔节期和抽穗期根系吸收的土壤氮素显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ ),各生育期施加秸秆生物炭处理的水稻根系吸收的土壤氮素显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ )。浅湿干灌溉模式分别有

施加秸秆生物炭处理分别提高6.57%、20.20%、12.12%。在灌浆期和成熟期,两种灌溉模式各处理之间的根系伤流强度差异较小。在水稻生长前期,秸秆生物炭提高了根系伤流强度,使根系输送物质的效率提高。在抽穗期,较高的根系伤流强度能够协调根系结构与功能,对物质积累与产量形成更为有利。

水稻根系活力对提高根系对营养物质的吸收具有十分重要的作用,灌溉模式和施加秸秆生物炭均会对根系氧化力产生影响。由图4可知,两种灌溉模式各处理的水稻根系活力变化均为先增加后减少的趋势,且在抽穗期达到最大值。相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系活力显著高于常规淹灌模式( $P < 0.05$ ),施加秸秆生物炭各处理的水稻根系活力显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ )。总体来看,浅湿干灌溉模式下秸秆生物炭使水稻各生育期的根系活力提高,尤其是前3个生育期最明显,说明秸秆生物炭对根系生理进程影响较大。



34.53%~37.58%和29.61%~30.88%肥料-<sup>15</sup>N在拔节期和抽穗期被水稻根系吸收,同时水稻根系在拔节期和抽穗期分别吸收了32.85%~33.60%和26.61%~28.78%的土壤氮素;常规淹灌模式分别有33.43%~34.88%和28.65%~30.00%的肥料-<sup>15</sup>N在拔节期和抽穗期被水稻根系吸收,同时水稻根系在拔节期和抽穗期分别吸收了29.08%~31.33%和24.20%~27.93%的土壤氮素。由此可见,水稻的分蘖期和拔节期为氮素反应敏感期,应保证这两个时期的氮素供应,这对增加植株氮素总累积量和提高产量具有重要的意义。

表3 不同处理各生育期水稻根系肥料-<sup>15</sup>N吸收量和土壤氮素吸收量Tab.3 Amount of fertilizer-<sup>15</sup>N and soil nitrogen absorbed by rice roots at different growth stages under

different treatments

kg/hm<sup>2</sup>

处理	分蘖期		拔节期		抽穗期		灌浆期		成熟期	
	肥料- <sup>15</sup> N	土壤氮素	肥料- <sup>15</sup> N	土壤氮素	肥料- <sup>15</sup> N	土壤氮素	肥料- <sup>15</sup> N	土壤氮素	肥料- <sup>15</sup> N	土壤氮素
DB0	5.68 <sup>g</sup>	28.07 <sup>d</sup>	12.28 <sup>d</sup>	51.30 <sup>e</sup>	10.16 <sup>e</sup>	41.51 <sup>d</sup>	4.24 <sup>e</sup>	23.97 <sup>e</sup>	1.82 <sup>b</sup>	11.14 <sup>e</sup>
DB1	5.92 <sup>f</sup>	28.24 <sup>d</sup>	13.08 <sup>c</sup>	53.06 <sup>b</sup>	10.73 <sup>d</sup>	42.79 <sup>c</sup>	4.82 <sup>d</sup>	25.52 <sup>d</sup>	1.69 <sup>c</sup>	8.33 <sup>e</sup>
DB2	6.87 <sup>c</sup>	31.97 <sup>c</sup>	16.77 <sup>a</sup>	56.49 <sup>a</sup>	13.78 <sup>a</sup>	47.70 <sup>a</sup>	5.76 <sup>b</sup>	28.46 <sup>b</sup>	1.44 <sup>e</sup>	7.32 <sup>f</sup>
DB3	6.76 <sup>c</sup>	25.17 <sup>e</sup>	14.44 <sup>b</sup>	55.32 <sup>a</sup>	12.48 <sup>b</sup>	48.04 <sup>a</sup>	6.42 <sup>a</sup>	30.33 <sup>a</sup>	1.72 <sup>c</sup>	8.04 <sup>e</sup>
FB0	6.42 <sup>e</sup>	32.56 <sup>c</sup>	10.86 <sup>e</sup>	44.31 <sup>f</sup>	9.39 <sup>f</sup>	36.28 <sup>f</sup>	3.78 <sup>f</sup>	21.88 <sup>f</sup>	2.04 <sup>a</sup>	14.90 <sup>a</sup>
FB1	6.67 <sup>d</sup>	34.07 <sup>b</sup>	11.12 <sup>e</sup>	46.50 <sup>e</sup>	9.45 <sup>f</sup>	38.02 <sup>e</sup>	3.92 <sup>f</sup>	22.33 <sup>f</sup>	1.82 <sup>b</sup>	9.52 <sup>d</sup>
FB2	7.52 <sup>b</sup>	36.10 <sup>a</sup>	13.78 <sup>c</sup>	49.59 <sup>d</sup>	11.96 <sup>c</sup>	40.58 <sup>de</sup>	5.04 <sup>c</sup>	26.14 <sup>c</sup>	1.57 <sup>d</sup>	5.85 <sup>g</sup>
FB3	7.24 <sup>a</sup>	29.07 <sup>d</sup>	14.88 <sup>b</sup>	48.04 <sup>d</sup>	12.75 <sup>b</sup>	46.14 <sup>b</sup>	5.82 <sup>b</sup>	29.95 <sup>a</sup>	1.97 <sup>a</sup>	12.00 <sup>b</sup>

统计分析结果表明(表4),浅湿干灌溉模式水稻根系对肥料-<sup>15</sup>N的吸收量与根系伤流强度和根系活力呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与主根长和活跃吸收面积呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与根冠比呈显著负相关( $P < 0.05$ );水稻根系对土壤氮素的吸收量与根系伤流和根系活力呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与活跃吸收面积呈显著正相关( $P < 0.05$ ),

与根冠比呈显著负相关( $P < 0.05$ )。常规淹灌模式水稻根系对肥料-<sup>15</sup>N的吸收量与根系伤流强度和根系活力呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与活跃吸收面积呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与根冠比呈显著负相关( $P < 0.05$ );水稻根系对土壤氮素的吸收量与根系伤流强度和根系活力呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与活跃吸收面积呈显著正相关( $P < 0.05$ )。

表4 水稻吸氮量与根系形态特征和生理特性的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient between nitrogen uptake and morphological and physiological characteristics of rice roots

灌溉模式	吸氮量	主根长	根体积	根鲜质量	根冠比	根系伤流强度	活跃吸收面积	根系活力
浅湿干灌溉	肥料- <sup>15</sup> N	0.467 *	0.330	0.326	-0.516 *	0.880 **	0.556 *	0.890 **
	土壤氮素	0.435	0.277	0.277	-0.556 *	0.919 **	0.484 *	0.878 **
常规淹灌	肥料- <sup>15</sup> N	0.312	0.304	0.336	-0.520 *	0.896 **	0.514 *	0.914 **
	土壤氮素	0.277	0.340	0.402	-0.399	0.933 **	0.629 *	0.879 **

注: \* 表示显著( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著( $P < 0.01$ )。

## 2.4 水炭运筹下水稻氮肥利用率

由表5可知,水炭运筹两种灌溉模式下施加生物炭增加了水稻的经济产量、NUE、NAE和NPFP。浅湿干灌溉模式下秸秆生物炭施加12.5、25 t/hm<sup>2</sup>较不施生物炭水稻经济产量分别增加了13.05%、3.32%,在相同秸秆生物炭施用水平(除25 t/hm<sup>2</sup>)下浅湿干灌溉模式水稻经济产量较常规淹灌模式增加1.36%~6.13%。当生物炭施加量为0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻的NUE较常规淹灌分别提高了5.20%、9.88%、11.91%;浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的NUE较不施加秸秆生物炭处理分别提高6.03%、30.54%、22.35%。当生物炭施加量为0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻的NAE较常规淹灌分别提高了1.22%、2.21%、6.71%;浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的NAE较不施加秸秆生物炭处理分别提高1.45%、11.67%、6.92%。当生物炭施加量为0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,相同秸秆生物炭施用水平下浅

表5 不同处理的产量及氮肥利用率

Tab.5 Yield and nitrogen use efficiency of

different treatments

处理	经济产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	NUE/ %	NAE/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	NPFP/ (kg·kg <sup>-1</sup> )
DB0	8 196.30 <sup>d</sup>	31.07 <sup>e</sup>	25.34 <sup>e</sup>	74.51 <sup>f</sup>
DB1	8 277.64 <sup>d</sup>	32.95 <sup>d</sup>	25.71 <sup>d</sup>	75.25 <sup>e</sup>
DB2	9 265.87 <sup>a</sup>	40.56 <sup>a</sup>	28.30 <sup>a</sup>	84.24 <sup>a</sup>
DB3	8 468.38 <sup>c</sup>	38.02 <sup>b</sup>	27.10 <sup>b</sup>	76.99 <sup>d</sup>
FB0	8 086.22 <sup>e</sup>	29.54 <sup>g</sup>	25.04 <sup>f</sup>	73.51 <sup>h</sup>
FB1	8 134.80 <sup>e</sup>	29.98 <sup>f</sup>	25.16 <sup>ef</sup>	73.95 <sup>g</sup>
FB2	8 730.77 <sup>b</sup>	36.25 <sup>c</sup>	26.52 <sup>c</sup>	79.37 <sup>c</sup>
FB3	8 811.43 <sup>b</sup>	38.78 <sup>ab</sup>	27.03 <sup>b</sup>	80.10 <sup>b</sup>

湿干灌溉模式水稻的NPFP较常规淹灌分别提高了1.36%、1.76%、6.13%;浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的NPFP较不施加秸秆生物炭处理分别提高0.99%、13.05%、3.32%。

## 3 讨论

秸秆生物炭还田对于秸秆资源利用、环境和农

业可持续发展具有现实意义。生物炭施入土壤后能够改善土壤结构与理化性质<sup>[18-19]</sup>,提高作物产量<sup>[20-21]</sup>。它的积极作用已经被越来越多的研究<sup>[22-25]</sup>所验证,并且研究结果趋势基本一致。但由于生物炭的原材料、施用量、土壤类型等差异,使研究结果具有一定的局限性。根系是水分和养分吸收的主要器官,其形态和生理特性与地上部生长发育、氮素利用和产量均有密切关系<sup>[11,26-27]</sup>。但到目前为止,关于秸秆生物炭对作物根系的影响机制的相关研究还较少,尤其是节水灌溉模式下,水分状况的改变使农田生态环境发生变化,与常规淹灌存在较大差异,生物炭的作物学效应还有待进一步验证。本试验研究发现,秸秆生物炭改善了土壤水、气、热、养分等生态因子,有利于水稻根系形态的建成,促进了前期根系生长,延缓后期根系衰老,有利于根系对水分、养分等物质的吸收、转运与合成,促进根系组织结构发育。施加适量生物炭能够增加根体积和吸收面积,同时提高了根系生理活性,促进根系对水和矿物质元素的吸收利用<sup>[28]</sup>,最终提高了水稻的氮素利用率和产量。

生物炭固有的结构特征与理化特性,使其施入土壤后对土壤物理结构如土壤容重、孔隙度、pH值、阳离子交换量和养分含量<sup>[18-19]</sup>等产生直接影响。生物炭富含N、P、K等营养元素和微量元素<sup>[29]</sup>,能够提高土壤养分供给水平,从而为根系组织发育和形态建成提供重要物质基础。黑色的秸秆生物炭具有吸热属性,施用后可以提高土壤温度<sup>[30]</sup>,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。另外,OGUNTUNDE等<sup>[31]</sup>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性和透水性,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<sup>[13]</sup>。同时生物炭的施加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<sup>[32]</sup>,有利于促进根系生长。土壤pH值的变化对水稻根系的生长有直接影响,水稻秧苗移栽前的育苗土为偏酸性,移栽后由于秧苗对土壤pH值的变化十分敏感,若土壤pH值过高,则对生长不利<sup>[13]</sup>。故水稻生长前期,施用较低量生物炭有利于根系生长。秸秆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<sup>[5]</sup>,减少了硝态氮的淋溶,提高了土壤肥力和氮肥利用率<sup>[33-35]</sup>。同时因吸附氨离子降低了土壤中氮素的挥发<sup>[36]</sup>,减少了养分流失,对提高氮肥利用率有着重要作用。

当土壤水分发生变化时,作物根系最先感知,并通过调整自身形态和生理生化特征来适应水分环境

的变化<sup>[37]</sup>。根系形态特征的变化会影响作物对氮素吸收和利用<sup>[14]</sup>,从而影响着作物地上部生长和产量。施加过量生物炭可能会使土壤pH值发生剧烈变化,并削弱根系对养分的吸附作用,抑制根系生长和对养分的吸收。土壤pH值和碳氮比的大幅度提高,可能会对土壤的微生物群落结构和功能产生负效应,从而影响根系生理功能。此外,施加过量生物炭可能会使稻田土壤孔隙度过高,加速水分和养分流失,导致根系吸收养分不足,从而影响水稻生长。因此,秸秆生物炭施用量应控制在一定范围内,以利于提高氮素利用率及产量。

综上所述,节水灌溉模式下,在东北寒地黑土区稻田中施加适量生物炭,有利于协调、优化土壤水、肥、气、热等生态因子,为根系创造良好的生长环境,从而使根系形态特征优化,生理功能增强,促进根系生长,保障地上部营养物质供应、转化与积累,促使最终产量提高。但由于环境条件与土壤类型等因素影响,秸秆生物炭对水稻根系与产量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) 浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的水稻单株主根长、根体积和根鲜质量显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ ),相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式的水稻单株主根长、根体积和根鲜质量显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ );在分蘖期至抽穗期,秸秆生物炭促进了根系生长和根冠比的增加,提高了根系吸收水分和养分的效率;在灌浆期至成熟期,秸秆生物炭延缓了水稻植株根系的衰亡,较小的根冠减少了根系生长冗余,增加了籽粒干物质积累。

(2) 在分蘖期至抽穗期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻根系活跃吸收面积显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ ),浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的根系活跃吸收面积较不施加秸秆生物炭处理显著增加( $P < 0.05$ );两种灌溉模式各处理的水稻根系伤流强度变化均为先增加、后减少的趋势,在分蘖期至抽穗期,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式的水稻根系伤流强度显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ ),浅湿干灌溉模式施加秸秆生物炭各处理的水稻根系伤流强度显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ );相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式的水稻根系活力显著高于常规淹灌( $P < 0.05$ ),施加秸秆生物炭各处理的水稻根系活力显著高于不施加秸秆生物炭处理( $P < 0.05$ )。



(3) 浅湿干灌溉模式分别有 34.53% ~ 37.58% 和 29.61% ~ 30.88% 的肥料-<sup>15</sup>N 在拔节期和抽穗期被水稻根系吸收,同时吸收了 32.85% ~ 33.60% 和 26.61% ~ 28.78% 的土壤氮素;当秸秆生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm<sup>2</sup> 时,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻在拔节期和抽穗期根系吸收的肥料-<sup>15</sup>N 和土壤氮素显著高于常规淹灌 ( $P < 0.05$ ),各生育期施加秸秆生物炭处理的水稻根系吸收的肥料-<sup>15</sup>N 和土壤氮素显著高于不施加秸秆生物炭处理 ( $P < 0.05$ );浅湿干灌溉模式水稻根系对肥料-<sup>15</sup>N 的吸收量与根系伤流强度和根系活力呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与主根长和活跃吸收面积呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与根冠比呈显著负相关 ( $P < 0.05$ );浅湿干灌溉模式水稻根系对土壤氮素的吸收量与根系伤流强度和根系活力呈极显著正相

关 ( $P < 0.01$ ),与活跃吸收面积呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与根冠比呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。

(4) 浅湿干灌溉模式下,秸秆生物炭施加 12.5 t/hm<sup>2</sup> 和 25 t/hm<sup>2</sup> 较不施生物炭水稻经济产量分别增加了 13.05%、3.32%;在相同秸秆生物炭施用水平(除 25 t/hm<sup>2</sup>)下,浅湿干灌溉模式水稻经济产量较常规淹灌模式增加 1.36% ~ 6.13%。当生物炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm<sup>2</sup> 时,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻的 NUE、NAE 和 NPFP 高于常规淹灌,水炭运筹两种灌溉模式下施加生物炭增加了水稻的 NUE、NAE 和 NPFP。

(5) 浅湿干灌溉模式施加适量的秸秆生物炭处理,提高了水稻的经济产量、NUE、NAE 和 NPFP,且秸秆生物炭无需连年施入,加之应用分块还田模式,其经济成本较低。

#### 参 考 文 献

- [1] 孙强,张三元,张俊国,等. 东北水稻生产现状及对策[J]. 北方水稻,2010,40(2):72-74.  
SUN Qiang, ZHANG Sanyuan, ZHANG Junguo, et al. Current situation of rice production in northeast of China and countermeasures[J]. North Rice,2010,40(2):72-74 (in Chinese)
- [2] 金颖. 近代水稻传入东北及其影响研究[J]. 中国农史,2010(3):35-41.  
JIN Ying. A study on the rice spread and influence to northeastern region in modern times[J]. Agric. History China, 2010(3):35-41. (in Chinese)
- [3] 张忠学,陈鹏,陈帅宏,等. <sup>15</sup>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. <sup>15</sup>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](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)
- [4] 尚杰,耿增超,陈心想,等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(3):509-517.  
SHANG Jie, GENG Zengchao, CHEN Xinxiang, et al. Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science,2015,34(3):509-517. (in Chinese)
- [5] 张万杰,李志芳,张庆忠,等. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(10):1946-1952.  
ZHANG Wanjie, LI Zhifang, ZHANG Qingzhong, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10):1946-1952. (in Chinese)
- [6] GASKIN J W, SPEIR R A, HARRIS K, et al. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. Agronomy Journal,2010,102(2):623-633.
- [7] CUI Yuefeng, MENG Jun, WANG Qingxiang, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China [J]. Journal of Integrative Agriculture,2017,16(5):1064-1074.
- [8] HANSEN V, MULLER-STÖVER D, AHRENFELDT J, et al. Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment[J]. Biomass Bioenergy,2015,72:300-308.
- [9] SINGH R, BABU J N, KUMAR R, et al. Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective[J]. Ecological Engineering,2015,77(2):324-347.
- [10] 李娜,杨志远,代邹,等. 水氮管理对不同氮效率水稻根系性状、氮素吸收利用及产量的影响[J]. 中国水稻科学,2017,31(5):500-512.  
LI Na, YANG Zhiyuan, DAI Zou, et al. Effects of water-nitrogen management on root traits, nitrogen accumulation and utilization and grain yield in rice with different nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Rice Science,2017,31(5):500-512. (in Chinese)
- [11] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. 中国农业科学,2011,44(1):36-46.  
YANG Jianchang. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(1):36-46. (in Chinese)
- [12] 张亚洁,华晶晶,黄银琪,等. 旱、水稻根系生长对水氮响应的研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):55-59.  
ZHANG Yajie, HUA Jingjing, HUANG Yinqi, et al. Study on response of root growth of upland rice and paddy rice to water and nitrogen[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(11):55-59. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对东北冷凉区水稻秧苗根系形态建成与解剖结构的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(1):72–81.  
ZHOU Jinsong, YAN Ping, ZHANG Weiming, et al. Effect of biochar on root morphogenesis and anatomical structure of rice cultivated in cold region of Northeast China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(1):72–81. (in Chinese)
- [16] 张宪政, 陈凤玉, 王荣富. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1999.
- [17] 张作合, 张忠学. 稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的<sup>15</sup>N示踪分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(11):239–249.  
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. <sup>15</sup>N tracer-based analysis of effects of water and biochar management on nitrogen absorption, transport and distribution in rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11):239–249. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191127&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191127&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.027. (in Chinese)
- [18] EASTMAN C M. Soil physical characteristics of an aeric ochraqualf amended with biochar[D]. Columbus: The Ohio State University, 2011.
- [19] VERHEIJEN F, JEFFERY S, BASTOS A C, et al. Biochar application to soils [C] // Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2010.
- [20] YILANGAI R M, MANU A S, PINEAU W, et al. The effect of biochar and crop veil on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentus* Mill) in Jos, North central Nigeria[J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2014, 2(1):37–42.
- [21] GENESIO L, MIGLIETTA F, BARONTI S, et al. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: results from a four years field experiment in Tuscany[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 201:20–25.
- [22] 魏永霞, 石国新, 吴昱, 等. 黑土区坡耕地生物炭施用模式效应与土地生产力评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11):251–259.  
WEI Yongxia, SHI Guoxin, WU Yu, et al. Effect and comprehensive evaluation of biochar application mode on slope farmland in black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11):251–259. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181129&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181129&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.029. (in Chinese)
- [23] 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](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)
- [24] WANG Cong, LIU Jieyun, SHEN Jianlin, et al. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: a 4-year field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 262(15):83–96.
- [25] YANG Shihong, XIAO Yanan, SUN Xiao, et al. Biochar improved rice yield and mitigated CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy field under controlled irrigation in the Taihu Lake Region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 200(21):69–77.
- [26] 陈温福, 徐正进. 水稻超高产育种理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008:121–129.
- [27] 刘晓冰, 王光华, 金剑, 等. 作物根际和产量生理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010:30.
- [28] 李合生. 现代植物生理学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2012:163–211.
- [29] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. *Biol. Fert. Soils*, 2002, 35(4):219–230.
- [30] 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)
- [31] 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.
- [32] 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)
- [33] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16):3324–3333.  
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324–3333. (in Chinese)
- [34] 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]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(2):35–39.
- [35] 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(1):1592–1602.
- [36] KEI M, TOSHITATSU M, YASUO H, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3):255–257.
- [37] JIA Wensuo, ZHANG Jianhua. Stomatal movements and long-distance signaling in plangs[J]. *Plant Signaling and Behavior*, 2008, 3(10):772–777.