

水炭运筹下稻田土壤氮素分布与盈亏¹⁵N示踪分析

张作合^{1,2} 张忠学^{1,3} 郑衍波^{1,3} 李铁成^{1,3} 韩羽^{1,3} 赵文博^{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: 为揭示水炭运筹下铵态氮、硝态氮在不同土层的分布规律和土壤氮素在水稻植株中的分布规律, 设置两种水分管理模式(浅湿干灌溉、常规淹灌)和4个秸秆生物炭施用量水平(0、2.5、12.5、25 t/hm²), 采用田间小区和¹⁵N示踪微区结合的方法, 研究了不同水炭运筹下0~60 cm土层NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和肥料NH₄⁺-¹⁵N、NO₃⁻-¹⁵N的累积分布, 以及土壤氮素在水稻植株中的分布情况, 并计算了不同水炭运筹下的土壤盈亏状况。试验结果表明: 浅湿干灌溉模式下, 稻田土壤中的NH₄⁺-N累积量随土层深度的增加而减小, 施加适量的秸秆生物炭增加了0~20 cm土层NH₄⁺-N、NO₃⁻-N累积量, 同时减少了20~60 cm土层的累积量。相同秸秆生物炭施用水平下, 浅湿干灌溉模式0~20 cm土层中NH₄⁺-N、NO₃⁻-N累积量和肥料NH₄⁺-¹⁵N、NO₃⁻-¹⁵N累积量均高于常规淹灌模式, 浅湿干灌溉模式20~40 cm和40~60 cm土层NO₃⁻-¹⁵N累积量较常规淹灌模式显著降低($P < 0.05$)。浅湿干灌溉模式积累的土壤氮素有9.79%~13.96%分布在植株叶片, 15.71%~20.03%分布在植株茎鞘, 66.00%~74.50%分布在植株穗部。综合考虑寒地黑土区土壤氮库盈亏平衡, 浅湿干灌溉模式施加12.5 t/hm²秸秆生物炭的水炭运筹模式最优。

关键词: 稻田; 水炭运筹; 铵态氮; 硝态氮; 盈亏; 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(2020)06-0309-09

OSID:



¹⁵N Tracer Analysis of Nitrogen Distribution and Break-even in Paddy Soil under Water and Biochar Management

ZHANG Zuohe^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,3} ZHENG Yanbo^{1,3} LI Tiecheng^{1,3} HAN Yu^{1,3} ZHAO Wenbo^{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 distribution of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in different soil layers and the distribution of soil nitrogen in plants under water and biochar management, the accumulation and distribution of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N, fertilizer NH₄⁺-¹⁵N and NO₃⁻-¹⁵N in 0~60 cm soil layers under different water and biochar management were studied by combining field plots with ¹⁵N tracer micro-area, and the distribution of soil nitrogen in plants under different water and biochar management was calculated. The results showed that the accumulation of NH₄⁺-N in paddy soil was decreased with the increase of soil depth under dry-shallow-wet irrigation. The accumulation of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in 0~20 cm soil layer was increased by applying appropriate amount of straw biochar, while the accumulation of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in 20~60 cm soil layer was reduced. The accumulations of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and fertilizer NH₄⁺-¹⁵N, NO₃⁻-¹⁵N in 0~20 cm soil layer of rice under the same straw biochar application level were higher than those of flooding irrigation. The accumulation of NO₃⁻-¹⁵N in 20~40 cm and 40~60 cm soil layers of dry-shallow-wet model was significantly lower than that of conventional flooding ($P < 0.05$). Totally 9.79%~13.96% of the soil nitrogen accumulated in rice under dry-shallow-wet irrigation was distributed in plant leaves, 15.71%~20.03% was in plant stems and sheaths, and

收稿日期: 2019-10-04 修回日期: 2019-11-22

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

66.00% ~ 74.50% was in plant panicles. Considering the break-even of soil nitrogen pool in cold and black soil area, the best water and biochar management model was dry-shallow-wet irrigation plus 12.5 t/hm² straw biochar.

Key words: paddy field; water and biochar management; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; break-even; isotope trace technology

0 引言

水稻是中国主要粮食作物,其产量约占粮食总产量的33.8%^[1]。东北黑土区作为重要的水稻生产基地^[2],对保障我国粮食安全具有重要的地位^[3]。氮是水稻生长需要量最大的营养元素^[4],氮肥的施用对水稻增产具有重要意义,盲目追求高产而过度施用氮肥不仅不会增产,反而降低了氮肥利用率,同时导致NH₄⁺-N和NO₃⁻-N在土壤中过度累积,造成农田生态环境污染^[5]。水炭运筹管理能够使氮素形态发生变化,改变NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的迁移和分布规律,从而影响水稻植株对氮素的吸收和利用^[6]。因此,研究不同水炭运筹下无机氮在稻田土壤中的累积及分布,对氮素利用及稻田生态环境安全具有重要意义。

生物炭对土壤无机氮迁移及累积分布的影响已经成为热点。张万杰等^[7]研究发现,在表层土添加0.5%生物炭可以有效减缓NH₄⁺-N向土壤深层迁移。同样,通过土柱淋溶试验也发现,施加生物炭可以使20 cm深处的NH₄⁺-N损失降低15.2%。DEMPSTER等^[8]研究表明,1~10 cm土层施加生物炭(25 t/hm²)可以使砂质土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N淋失量分别降低14%和28%。SIKA等^[9]研究显示,施加0.5%、2.5%、10%生物炭使土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N淋失量分别降低12%、50%、86%和26%、42%、96%。生物炭对土壤无机氮的持留和束缚作用使土壤中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的分布发生变化^[10],稻田土壤中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的分布直接影响水稻植株对土壤氮素的吸收及土壤氮素在水稻植株中的分布。目前,关于不同水炭运筹管理对土壤氮素影响的研究多集中于土壤总无机氮的分布情况,对无机形态的肥料氮素在稻田土壤中的分布研究较为模糊。

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,研究不同水炭运筹下0~60 cm土层NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和肥料NH₄⁺-¹⁵N、NO₃⁻-¹⁵N的累积分布,以及土壤氮素水稻在植株中的分布情况,计算不同水炭运筹管理下土壤盈亏状况,以为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—9月在庆安国家灌溉试验重点站进行。该站(127°40'45"E,46°57'28"N)位于黑龙江省庆安县和平灌区,属典型寒地黑土区。位于第三积温带,属寒温带大陆性季风气候,多年平均降水量为560 mm,平均水面蒸发量为750 mm,平均气温为2.9℃,平均日照时数为2 600 h,全年无霜期约为128 d,是黑龙江省典型的水稻种植区。2018年水稻本田生长期内试验区最高温度、最低温度和降雨量变化如图1所示。

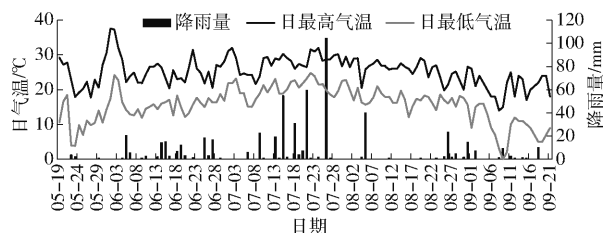


图1 2018年水稻生长期气温和降雨量日变化

Fig.1 Daily variation of air temperature and precipitation in 2018

1.2 试验材料

采用辽宁金和福农业开发有限公司生产的水稻秸秆生物炭,在450℃高温无氧条件下裂解制备而成,每公顷稻草可转化颗粒形式(直径2 mm)的秸秆生物炭约2.5 t,pH值8.86,碳质量分数为42.72%,氮质量分数为1.26%,阳离子交换量(CEC)为44.7 cmol/kg,比表面积为81.85 m²/g。供试土壤为黑土型水稻土,耕层厚度为11.3 cm,犁底层厚度为10.5 cm,37.3%土壤粒径在0.02~2.0 mm之间、32.3%土壤粒径在0.002~0.02 mm之间、30.4%土壤粒径为0~0.002 mm,试验小区0~20 cm土层的土壤基本理化性质:pH值6.40,有机质质量比41.80 g/kg,全氮质量比1.51 g/kg,碱解氮质量比148.27 mg/kg,全磷质量比15.61 g/kg,速效磷质量比24.22 mg/kg,全钾质量比19.86 g/kg,速效钾质量比156.13 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25万穴/hm²。

1.3 试验设计

试验采用生物炭施用量和灌溉模式2因素全面试验,秸秆生物炭施用量设置4个水平:B0(0 t/hm²)、

B1(2.5 t/hm²)、B2(12.5 t/hm²)、B3(25 t/hm²),两种水分管理模式(表1)分别为浅湿干灌溉模式(Dry-wet-shallow irrigation, D)和常规淹灌模式(Flooding irrigation, F)。当田面无水层后,水稻浅湿干灌溉模式各试验小区采用土壤水分测定仪(TPIME-PICO64/32型)测定土壤含水率,若土壤含水率低于或接近灌水下限时,开始灌水直至上限;当田面无水层时,常规淹灌模式各处理灌水至上限,同时记录灌水量。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 m²,各小区之间田埂向地下内嵌40 cm深的塑料板。秸秆生物炭在前一年水稻收获后施入,将

生物炭翻耕于稻田土壤表层15 cm左右,并旋耕混匀;氮肥基肥、蘖肥、穗肥按5:2:3分施,纯氮施用量为110 kg/hm²(当地施氮水平),基肥在泡田之前3~5 d深施,蘖肥和穗肥在田面无水层或水层较浅时撒施;K₂O基肥、穗肥按1:1分施,施用量为80 kg/hm²;P₂O₅作为基肥一次性施入,施用量为45 kg/hm²。供试肥料选用尿素(N质量分数为46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅质量分数为12%)、硫酸钾(K₂O质量分数为52%),并计算实际施用量。2018年5月19日选择长势基本相同的水稻秧苗进行移栽,每穴定苗3株,并于9月21日收割。水稻生长期统一田间管理,同时严格控制病虫及草害。

表1 稻田各生育期水分管理

Tab. 1 Water management during each growth stage 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	50 mm	50 mm	50 mm		50 mm	50 mm	50 mm	
	灌水上限	30 mm	30 mm	30 mm	晒田	30 mm	30 mm	30 mm	落干
	灌水下限	θ_s	0.85 θ_s	0.85 θ_s		0.85 θ_s	0.85 θ_s	0.7 θ_s	
常规淹灌(F)	蓄雨上限	50 mm	100 mm	100 mm		100 mm	100 mm	100 mm	
	灌水上限	30 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水下限	0	0	0		0	0	0	

注: θ_s 为根层土壤饱和含水率。

在上述试验小区内设置¹⁵N示踪微区,稻田整地后立即在每个小区内预埋长2 m、宽2 m、高0.5 m的无底钢制矩形框,将微区埋30 cm深,施用丰度为10.22% ¹⁵N标记尿素(上海化工研究院生产)。微区内设置单独小型排灌系统,水稻的种植模式、灌溉模式、肥料用量及秸秆生物炭施用量等田间管理与所在试验小区相同。

1.4 样品的采集与测定

1.4.1 植株氮含量及¹⁵N丰度

水稻成熟期测植株氮含量,从各小区和微区随机选取3穴具有代表性水稻植株,用喷雾器及时冲洗干净,切除根后将植株地上部分为茎鞘、叶、穗,并装袋带回实验室,干燥箱105℃杀青30 min,然后于80℃鼓风条件下干燥至质量恒定后,立即称量各部位干物质的质量。称量后将样品用球磨机粉碎,过筛(80目)后混匀,采用消煮法(H₂SO₄-H₂O₂)及AA3型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国)测定植株各部位的全氮含量,并将剩余样品装袋密封保存,用于同位素测定。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,主要利用元素分析仪(Flash 2000 HT型,美国)和同位素质谱仪(DELTA V Advantage,美国)联用的方法测定水稻收获后不同器官的¹⁵N丰度。

不同水炭运筹下水稻植株样品中积累的氮素来

自于¹⁵N-尿素百分比 N_{diff} 参照张忠学等^[11]的公式计算,即

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

式中 a ——微区内水稻植株样品¹⁵N丰度,%
 b ——相同处理微区外水稻植株样品的¹⁵N丰度,%
 c ——¹⁵N标记尿素中¹⁵N的丰度,%
 d ——天然¹⁵N丰度标准值,为0.3663%

水稻植株样品中积累的氮素来自于土壤氮素的百分比为

$$N_{dfs} = 1 - N_{diff} \quad (2)$$

植株样品中从土壤吸收的氮素量 F_{Ns} (kg/hm²)为

$$F_{Ns} = N_{dfs} D_M N_C \quad (3)$$

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

1.4.2 土壤无机氮累积量

水稻植株取样同时,各处理的小区 and 微区分别用100 mL环刀分层取供元素分析土样和原状土样,当地黑土层厚度一般在53~58 cm,为研究完整的黑土层取样深度定为0~60 cm,分3层取样即0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm,各层均取3个平行土样,用胶带密封取原状土的环刀后,将全部土样带回

实验室,原状土样 105℃干燥至质量恒定,并计算各层土壤容重。用 2 mol/L KCl 浸提混合土样后,利用 AA3 型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国)测定各层土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量,同时将剩余土壤浸提液低温保存供同位素测定使用。

各土层 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 累积量 $N_m(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 计算公式^[12]为

$$N_m = 0.1HB_D C \quad (4)$$

式中 H ——土层厚度,cm

B_D ——对应土层土壤容重, g/cm^3

C ——对应土层中无机氮质量比, mg/kg

1.4.3 残留的肥料¹⁵N 中无机氮含量

本试验采用微扩散法^[13-14]制备不同处理土壤浸提液中无机氮的¹⁵N 稳定同位素比值样品。并通过同位素质谱仪和元素分析仪联用的方法测定样品中¹⁵N 稳定同位素的比值^[15]。样品制备过程中设置空白对照校正测定的结果,以确保测定的土壤样品中无机氮的¹⁵N 丰度更准确。校正公式为

$$E_s = \frac{E_m M_{s+b} - E_b M_b}{M_{s+b} - M_b} \quad (5)$$

式中 E_s ——校正后的样品¹⁵N 丰度,%

E_m ——实际测定的样品¹⁵N 丰度,%

M_{s+b} ——样品含氮量和空白对照含氮量的总和, μg

E_b ——空白对照的¹⁵N 丰度,%

M_b ——空白对照的含氮量, μg

1.4.4 土壤氮素激发率

土壤氮素激发率计算公式为

$$S_E = \frac{N_{PK}}{P_K} \times 100\% \quad (6)$$

式中 N_{PK} ——施氮处理来自土壤中氮量, kg/hm^2

P_K ——不施氮处理植株总氮量, kg/hm^2

1.5 数据统计分析

采用 WPS 2019、SPSS 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成熟期土壤无机氮累积量的影响

2.1.1 不同水炭运筹对土壤剖面 NH_4^+-N 累积量的影响

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,常规淹灌模式下施加 2.5、12.5、25 t/hm^2 的秸秆生物炭处理 0 ~ 20 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较不施加秸秆生物炭处

理分别提高 2.09%、18.70%、32.42%;20 ~ 40 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 3.21%、21.62%、29.50%;40 ~ 60 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 1.51%、21.31%、34.68%。浅湿干灌溉模式 0 ~ 20 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别提高 13.14%、21.16%、60.58% 和 52.56%;而浅湿干灌溉模式 20 ~ 40 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别降低 17.53%、23.17%、39.34% 和 43.91%;40 ~ 60 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别降低 26.73%、31.02%、40.98% 和 44.89%。两种灌溉模式下 0 ~ 60 cm 土壤剖面 NH_4^+-N 累积量均随土层深度的增加而降低,与常规淹灌相比,浅湿干灌溉模式不同秸秆生物炭施用水平下 20 ~ 40 cm 土层 NH_4^+-N 累积量较 0 ~ 20 cm 土层深度大幅度下降,降幅达 45.95% ~ 72.74%,相同秸秆生物炭施用水平下较常规淹灌提高了 20.19% ~ 78.37%。

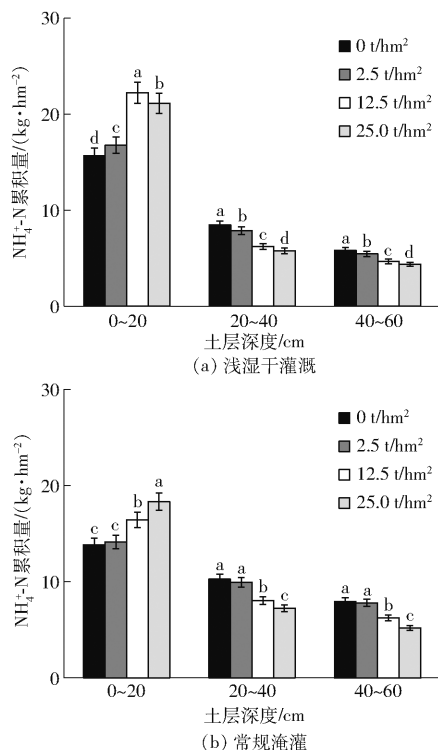


图 2 不同处理水稻收获后铵态氮在土壤中的分布

Fig. 2 Distributions of NH_4^+-N in soil after rice harvest under different treatments

2.1.2 不同水炭运筹对土壤剖面 NO_3^--N 累积量的影响

由图 3 可知,常规淹灌模式下施加 2.5、12.5、25 t/hm^2 的秸秆生物炭处理 0 ~ 20 cm 土层 NO_3^--N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别提高 2.00%、23.13%、41.40%;20 ~ 40 cm 土层 NO_3^--N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 2.71%、26.32%、

39.55%;40~60 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 4.16%、17.46%、30.01%。浅湿干灌溉模式 0~20 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量较常规淹灌不加生物炭处理分别提高 22.13%、25.98%、62.91% 和 50.04%;而浅湿干灌溉模式 20~40 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别降低 39.91%、43.13%、50.85% 和 53.08%;40~60 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别降低 54.30%、57.61%、66.20% 和 68.82%。研究表明,浅湿干灌溉模式下 NO₃⁻-N 的累积区域主要分布在 0~20 cm 土层中,水稻收获后 NO₃⁻-N 存在淋失的风险,而常规淹灌模式下 NO₃⁻-N 的累积区域主要分布在 20~40 cm 土层中,水稻本田期 NO₃⁻-N 已淋失到较深下层土壤中,会威胁地下水资源安全。常规淹灌模式下 0~60 cm 土壤剖面 NO₃⁻-N 累积量均随土层深度的增加呈先增加后减少趋势,与浅湿干灌溉相比,常规淹灌模式不同秸秆生物炭施用水平下 20~40 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量较 0~20 cm 土层深度大幅度上升,增幅达 10.58%~158.67%。不同灌溉模式对土壤各剖面 NO₃⁻-N 累积量影响较大,NO₃⁻-N 极易向土壤深层淋失,从而导致地下水严重污染,因此在进行稻田管理时应选择合理水炭运筹方式。

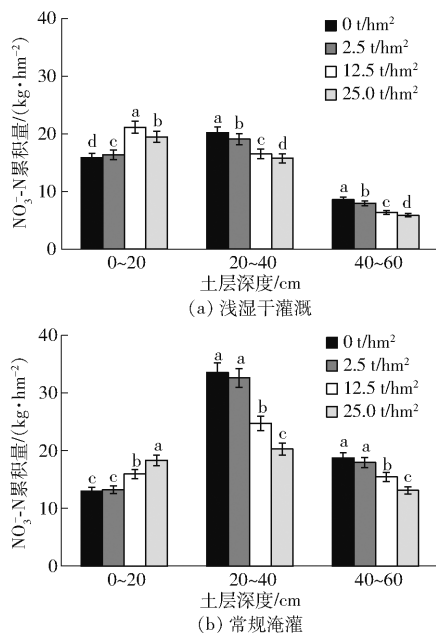


图3 不同处理水稻收获后硝态氮在土壤中的分布

Fig. 3 Distributions of NO₃⁻-N in soil after rice harvest under different treatments

2.2 不同水炭运筹对土壤中无机氮形态肥料氮素累积量的影响

2.2.1 不同水炭运筹对土壤剖面 NH₄⁺-¹⁵N 累积量的影响

由图4可知,常规淹灌模式下施加 2.5、12.5、

25 t/hm²的秸秆生物炭处理 0~20 cm 土层 NH₄⁺-¹⁵N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别提高 3.67%、66.51%、123.39%;20~40 cm 土层 NH₄⁺-¹⁵N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 2.03%、24.32%、35.14%;40~60 cm 土层 NH₄⁺-¹⁵N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 3.96%、29.70%、38.61%。浅湿干灌溉模式 0~20 cm 土层 NH₄⁺-¹⁵N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别提高 120.64%、135.78%、356.42% 和 301.38%。两种灌溉模式下 0~60 cm 土壤剖面 NH₄⁺-¹⁵N 累积量均随土层深度的增加而降低,与常规淹灌相比,浅湿干灌溉模式不同秸秆生物炭施用水平下 20~40 cm 土层 NH₄⁺-¹⁵N 累积量较 0~20 cm 土层深度降幅达 57.59%~86.73%,相同秸秆生物炭施用水平下较常规淹灌提高了 6.90%~79.35%。研究表明,水稻收获后不同水炭运筹下浅湿干灌溉模式水稻本田期施用的氮肥在土壤 0~60 cm 剖面以 NH₄⁺-¹⁵N 形态残留氮素的累积量均高于常规淹灌。

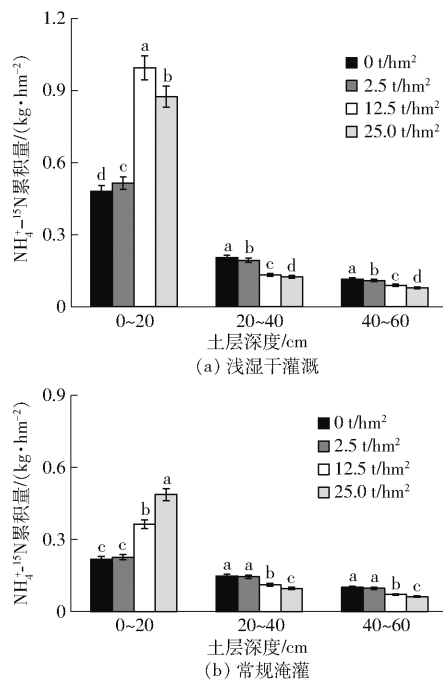


图4 不同处理水稻收获后铵态氮形态的肥料氮素在土壤中的分布

Fig. 4 Distributions of NH₄⁺-¹⁵N in soil after rice harvest under different treatments

2.2.2 不同水炭运筹对土壤剖面 NO₃⁻-¹⁵N 累积量的影响

由图5可知,常规淹灌模式下施加 2.5、12.5、25 t/hm²的秸秆生物炭处理 0~20 cm 土层 NO₃⁻-¹⁵N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别提高 7.56%、24.42%、44.19%;20~40 cm 土层 NO₃⁻-¹⁵N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 5.99%、

28.74%、40.23%；40~60 cm 土层 NO_3^- - ^{15}N 累积量较不施加秸秆生物炭处理分别降低 11.49%、27.70%、47.30%。浅湿干灌溉模式 0~20 cm 土层 NO_3^- - ^{15}N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理分别提高 45.93%、55.81%、107.56% 和 84.30%；而浅湿干灌溉模式 20~40 cm 土层 NO_3^- - ^{15}N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理降低 90% 左右；40~60 cm 土层 NO_3^- - ^{15}N 累积量较常规淹灌不施加生物炭处理降低 80% 左右。浅湿干灌溉模式下 0~60 cm 土壤剖面 NO_3^- - ^{15}N 累积量均随土层深度的增加而减少，而常规淹灌模式下则随土层深度的增加均呈先增加后减小的趋势。与浅湿干灌溉相比，常规淹灌模式不同秸秆生物炭施用水平下 20~40 cm 土层 NO_3^- - ^{15}N 累积量较 0~20 cm 土层有较大幅度增长，相同秸秆生物炭施用水平下较耕层土壤 NO_3^- - ^{15}N 累积量提高 4~10 倍。

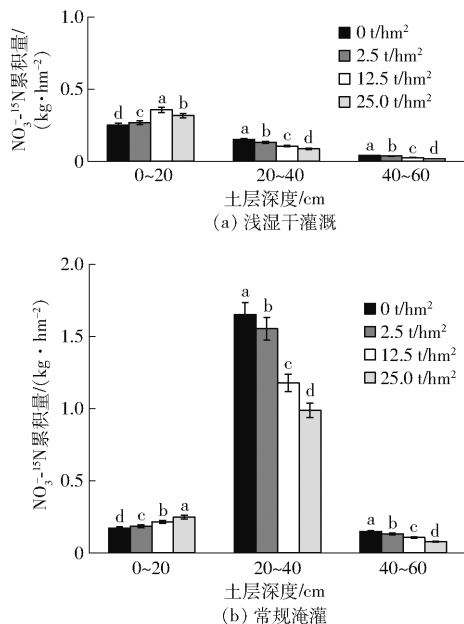


图5 不同处理水稻收获后硝态氮形态的肥料氮素在土壤中的分布

Fig. 5 Distributions of NO_3^- - ^{15}N in soil after rice harvest under different treatments

2.3 水炭运筹下秸秆生物炭和肥料氮对土壤氮的激发效应

通常情况下施加无机氮会对土壤氮素产生激发效应^[16-17]，这种激发效应能够反映土壤氮库的盈亏及平衡状况。由表 2 (表中数据为 $110 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的氮肥与生物炭耦合产生的激发效应) 可知，不同水炭运筹下各处理均产生正向激发效应，土壤氮素激发率在 138%~165% 范围内变化。两种灌溉模式之间土壤的氮素激发率差异显著 ($P < 0.05$)，当秸秆生物炭施加量在 0~12.5 t/hm^2 时，与常规淹灌相比，浅湿干灌溉模式在相同秸秆生物炭施用水平下

较常规淹灌增加了 2.98%、3.69% 和 5.22%，而施加 25 t/hm^2 秸秆生物炭时，浅湿干灌溉模式较常规淹灌降低了 4.21%；两种灌溉模式的土壤氮素激发率不同处理之间差异均显著 ($P < 0.05$)，且随着秸秆生物炭施加量的增加而增大。

表 2 土壤氮的激发率

Tab. 2 Soil nitrogen excitation effect %		
灌溉模式	处理	土壤氮素激发率
浅湿干灌溉	DB0	141 ^d
	DB1	145 ^e
	DB2	165 ^a
	DB3	156 ^b
常规淹灌	FB0	138 ^e
	FB1	140 ^d
	FB2	157 ^b
	FB3	163 ^a

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。

2.4 不同水炭运筹下水稻对土壤氮素利用及产量的影响

由图 6 可知，不同水炭运筹下水稻植株从土壤中吸收的氮素占总吸氮量的 79.40%~82.19%，各处理水稻植株从土壤中吸收的氮素均显著高于吸收的肥料氮素 ($P < 0.05$)。当秸秆生物炭施加量在 0~12.5 t/hm^2 时，两种灌溉模式水稻植株从土壤中吸收的氮素量均随秸秆生物炭施用量的增加而增

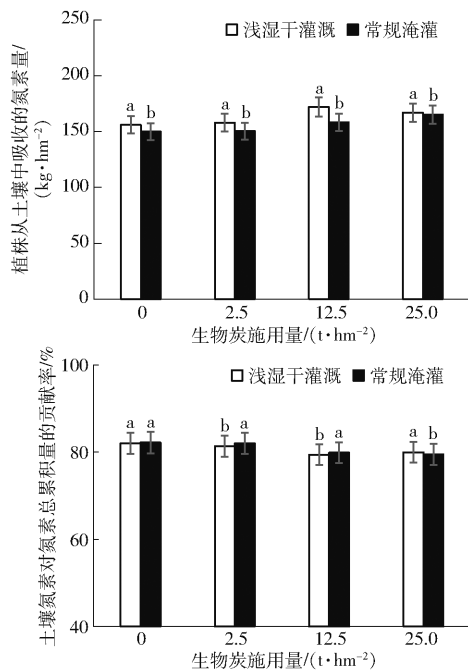


图6 不同处理水稻地上部植株从土壤中吸收的氮素量及对氮素总累积量的贡献率
Fig. 6 Nitrogen uptake from soil and its contribution to total nitrogen accumulation by rice aboveground plants under different treatments

大,浅湿干灌溉模式下施加 2.5、12.5、25 t/hm² 秸秆生物炭处理植株从土壤中吸收的氮素量较不施加秸秆生物炭处理分别提高 1.25%、10.23% 和 6.99%。水稻植株从土壤吸收的氮素量在相同秸秆生物炭施用水平下两种灌溉模式之间的差异显著 ($P < 0.05$), 相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式水稻植株从土壤中吸收的氮素量较常规淹灌分别提高 4.04%、4.99%、8.64% 和 1.03%, 研究结果表明,浅湿干灌溉模式植株对土壤氮素的吸收优于常规淹灌。

由表 3 可知,水稻成熟期土壤氮素在植株各器官的分布差异较大,两种灌溉模式不同秸秆生物炭施用水平下植株地上部各器官中土壤氮素的累积量由大到小依次为穗、茎鞘、叶,当秸秆生物炭施加量在 0~12.5 t/hm² 时,两种灌溉模式土壤氮素在叶片、茎鞘和穗中的累积量均随着秸秆生物炭施用量的增加而增大,而施加 25 t/hm² 秸秆生物炭会对浅湿干灌溉模式土壤氮素在穗中的累积产生负效应。浅湿干灌溉模式土壤氮素累积量的 9.79%~13.96% 分布在植株叶片中;15.71%~20.03% 分布在植株茎鞘中;66.00%~74.50% 分布在植株穗部。常规淹灌模式土壤氮素累积量的 12.10%~15.73% 分布在植株叶片中;17.10%~18.86% 分布在植株茎鞘中;65.87%~68.82% 分布在植株穗部。当施加秸秆生物炭量在 0~12.5 t/hm² 时,浅湿干灌溉模式下相同秸秆生物炭施用量水稻植株在叶片和茎鞘中的土壤氮素累积量低于常规淹灌,而在穗中的土壤氮素累积量显著高于常规淹灌 ($P < 0.05$)。浅湿干灌溉模式各处理较常规淹灌不施加生物炭水稻产量分别增加了 1.36%、2.37%、14.59% 和 4.73%。综合考虑寒地黑土区土壤氮库盈亏平衡,浅湿干灌溉模式施加 12.5 t/hm² 秸秆生物炭的水炭运筹模式最优。

表 3 水稻成熟期各器官中土壤氮素的累积量及产量

Tab.3 Accumulation of soil nitrogen in organs and yield of rice at maturity kg/hm²

灌溉模式	处理	土壤氮素累积量			产量
		叶	茎鞘	穗	
浅湿干灌溉	DB0	15.12 ^c	24.28 ^d	115.12 ^b	8 196.30 ^d
	DB1	15.67 ^c	24.71 ^c	116.31 ^b	8 277.64 ^d
	DB2	19.68 ^b	28.48 ^b	121.80 ^a	9 265.87 ^a
	DB3	22.82 ^a	32.74 ^a	107.86 ^c	8 468.38 ^c
常规淹灌	FB0	19.44 ^c	27.76 ^c	104.20 ^c	8 086.22 ^c
	FB1	19.42 ^c	28.13 ^c	104.17 ^c	8 134.80 ^c
	FB2	24.74 ^b	29.02 ^b	106.28 ^b	8 730.77 ^b
	FB3	26.25 ^a	31.18 ^a	110.85 ^a	8 811.43 ^b

3 讨论

关于不同水炭运筹对稻田土壤无机氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 累积和分布的影响相对研究较少,本试验研究发现,不同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分布区域主要集中在 0~20 cm 土层中,且随深度的增加而减小,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 则随深度的增加呈先增加后减小的趋势,分布区域主要集中在 20~40 cm 土层中。与常规淹灌模式相比,相同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式耕层土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量均较高,这是由于浅湿干灌溉模式增加了土壤的通气性,使土壤脲酶活性增强,促进肥料氮素的水解,从而提高了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量^[18]。当秸秆生物炭施加量在 0~12.5 t/hm² 时,两种灌溉模式下 0~20 cm 土层中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量随着生物炭施用量增加而增加,这可能是由于秸秆生物炭比表面积较大,施入稻田土壤后对 NH_4^+ 、 NO_3^- 具有较强的吸附作用^[19-20],有利于提高稻田土壤的 CEC 值,减少氮素的淋溶损失^[21-22]。

无机态氮是氮循环转化过程中的重要形态,其中 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 的测定特别重要。用传统的蒸汽蒸馏法测定 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 含量是最常用的方法,但这种方法易发生样品之间的交叉污染,并且只适用于高含氮量的样品^[23]。与蒸汽蒸馏法相比,微扩散法对自然丰度和高¹⁵N 丰度的示踪样品测试均适用,且不易发生样品间的交叉污染,同时避免了传统方法引起的同位素分馏和有机氮分解对测定值产生的干扰^[24]。前人对土壤无机态氮中肥料氮素的累积与分布研究较为模糊,本文应用¹⁵N 示踪技术,采用微扩散法定量分析了稻田土壤中 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 累积与分布情况。研究结果表明,不同秸秆生物炭施用水平下浅湿干灌溉模式稻田耕层土壤 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 累积量均高于常规淹灌模式,相同秸秆生物炭施用水平下 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 累积量常规淹灌模式显著高于浅湿干灌溉模式 ($P < 0.05$),而 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 累积量常规淹灌模式低于浅湿干灌溉模式,与 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 相比,常规淹灌模式下 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 在水稻本田期淋溶现象更明显。有研究表明,水稻植株对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 具有较高的吸收量,尤其是在距离根尖 0~20mm 的区域内对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收速率最高^[25],而浅湿干灌溉模式下耕层土壤 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 累积量较高,使肥料氮素的淋溶损失降低,从而促进水稻植株吸收土壤无机态氮。

水稻植株中来自土壤的氮素占比与土壤肥力有着密切的关系。彭卫福等^[26]利用¹⁵N 同位素示踪技术研究不同肥力水平对氮肥吸收及其去向的影响,发现相同氮肥施用条件下,水稻植株对土壤氮素和肥料氮素的吸收量均随土壤肥力的提高而增加,水稻植株总吸氮量中来自肥料氮素的比例随土壤肥力的提高而降低,而来自土壤氮素的比例则随之增加,水稻植株吸收的总氮素中仅有 21% 左右来自肥料氮素,而来自土壤氮素的占比却高达 79% 左右。这与本试验研究结果相接近,说明在高肥力的寒地黑土区土壤是水稻植株氮素吸收的最主要来源。本研究中,将稻田 0~60 cm 土层残留的氮肥作为对土壤氮库的补偿,不同水炭运筹下土壤氮库盈亏情况如表 4 所示。在计算土壤氮库盈余时除了需要考虑作物带走土壤氮素和土壤残留肥料氮素外,还要考虑秸秆生物炭还田等对土壤氮素的补充(0~315.50 kg/hm²)。在作物生产中,过高的氮素盈余意味着高氮素损失风险,过低的氮素盈余可能造成土壤氮素耗竭从而不利于作物可持续生产,因而必须把氮素盈余控制在合理的范围内。文献^[27-28]研究发现,适量的生物炭增加了土壤对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的吸附和保留,减少表土中氮素的流失。而施加过量的生物炭会使土壤中盈余的氮素过多,导致 NO₃⁻-N 急剧增加而发生渗漏、淋溶等现象,增加了地下水污染源的风险^[29]。因此,根据寒地黑土区气候特点、土壤类型及肥力等合理地选择水炭运筹模式非常重要。

表 4 收获后土壤氮素盈亏量

Tab. 4 Budget of soil N after harvest kg/hm²

灌溉模式	处理	作物带走 土壤氮量	土壤残留 肥料氮量	生物炭施 加氮量	土壤氮素 盈亏量
浅湿干灌溉	DB0	154.52 ^c	30.98 ^c		-123.54 ^d
	DB1	156.69 ^c	32.67 ^d	31.55 ^c	-92.47 ^c
	DB2	169.96 ^a	37.86 ^a	157.75 ^b	25.65 ^b
	DB3	163.42 ^b	33.73 ^c	315.50 ^a	185.81 ^a
常规淹灌	FB0	151.40 ^d	27.24 ^f		-124.16 ^d
	FB1	151.72 ^d	27.68 ^f	31.55 ^c	-92.49 ^c
	FB2	160.04 ^b	31.42 ^c	157.75 ^b	29.13 ^b
	FB3	168.28 ^a	34.25 ^b	315.50 ^a	181.47 ^a

4 结论

(1) 浅湿干灌溉模式下,0~20 cm 土层中 NH₄⁺-N

和 NO₃⁻-N 累积量随秸秆生物炭施用量的增加呈先增加、后减小的趋势,而常规淹灌模式下,两者则随秸秆生物炭施用量的增加而增加;两种灌溉模式下,20~60 cm 土层中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 累积量均随着生物炭施用量的增加而减少。两种灌溉模式下,0~60 cm 土壤剖面 NH₄⁺-N 累积量均随土层深度的增加而减小,常规淹灌模式下,0~60 cm 土壤剖面 NO₃⁻-N 累积量随着土层深度增加呈先增加、后减少的趋势。相同秸秆生物炭施用水平下,浅湿干灌溉模式 0~20 cm 土层的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 累积量均高于常规淹灌模式,而 20~60 cm 土层的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 累积量均低于常规淹灌模式。

(2) 两种灌溉模式下,各土层 NH₄⁺-¹⁵N 和 NO₃⁻-¹⁵N 累积量随生物炭施用量的变化规律与 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 累积量的变化规律一致。两种灌溉模式下,0~60 cm 土壤剖面 NH₄⁺-¹⁵N 累积量均随土层深度的增加而减小;浅湿干灌溉模式下,0~60 cm 土壤剖面 NO₃⁻-¹⁵N 累积量随土层深度增加而减少,常规淹灌模式则随土层深度增加呈先增加、后减少的趋势。常规淹灌模式下,各土层中 NH₄⁺-¹⁵N 累积量均低于浅湿干灌溉模式,常规淹灌模式 20~40 cm 和 40~60 cm 土层 NO₃⁻-¹⁵N 累积量均高于浅湿干灌溉模式。

(3) 两种灌溉模式各处理水稻植株对土壤氮素吸收均产生正的激发效应,两种灌溉模式之间土壤的氮素激发率差异显著($P < 0.05$),浅湿干灌溉模式的激发效果更明显。不同水炭运筹下,水稻植株从土壤中吸收的氮素占总吸氮量的 79.40%~82.19%,相同秸秆生物炭施用水平下,浅湿干灌溉模式水稻植株从土壤中吸收的氮素量比常规淹灌提高了 1.03%~8.64%。浅湿干灌溉模式土壤氮素积累量的 9.79%~13.96% 分布在植株叶片,15.71%~20.03% 分布在植株茎鞘,66.00%~74.50% 分布在植株穗部。浅湿干灌溉模式各处理较常规淹灌不施加生物炭水稻产量分别增加了 1.36%、2.37%、14.59% 和 4.73%。

(4) 综合考虑寒地黑土区土壤氮库盈亏平衡,浅湿干灌溉模式施加 12.5 t/hm² 秸秆生物炭的水炭运筹模式最优。

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] 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)

- [3] 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)
- [4] HE L, SONG X, FENG W, et al. Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data[J]. Remote Sensing Environment, 2016, 174: 122–133.
- [5] JU X, XING G, CHEN X, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. PNAS, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [6] DONN S, ALMARIO J, MULLER D, et al. Rhizosphere microbial communities associated with rhizoctonia damage at the field and disease patch scale[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 78: 37–47.
- [7] 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)
- [8] DEMPSTER D N, JONES D L, MURPHY D V. Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil[J]. Soil Research, 2012, 50(3): 216–221.
- [9] SIKA M, HARDIE A. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 113–119.
- [10] LEHMANN J, DA SILVA J P, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343–357.
- [11] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. ¹⁵N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. ¹⁵N 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)
- [12] 杜臻杰, 齐学斌, 李平, 等. 猪场废水灌溉对土壤氮素时空变化与氮平衡的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 262–269.
DU Zhenjie, QI Xuebin, LI Ping, et al. Effect of piggery wastewater irrigation on temporal-spatial variation and balance of nitrogen[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 262–269. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170830&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.030. (in Chinese)
- [13] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 控制灌溉下秸秆还田对稻田土壤氮素组成的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 229–238.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of straw returning on nitrogen composition in paddy soil under controlled irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 229–238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191126&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.026. (in Chinese)
- [14] 张珮仪, 温腾, 张金波, 等. 扩散法测定土壤无机氮¹⁵N丰度方法优化研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 948–957.
ZHANG Peiyi, WEN Teng, ZHANG Jinbo, et al. On improving the diffusion method for determination of $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ and $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ in soil extracts[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 948–957. (in Chinese)
- [15] 孙建飞, 白娥, 戴巍巍, 等. ¹⁵N标记土壤连续培养过程中扩散法测定无机氮同位素方法改进[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2574–2580.
SUN Jianfei, BAI E, DAI Weiwei, et al. Improvements of the diffusion method to measure inorganic nitrogen isotope of ¹⁵N labeled soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9): 2574–2580. (in Chinese)
- [16] LIU X J A, GROENIGEN K J V, DIJKSTRA P, et al. Increased plant uptake of native soil nitrogen following fertilizer addition—not a priming effect? [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 114: 105–110.
- [17] CHEN Z, XU Y, HE Y, et al. Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: a greater role of organic over inorganic fertilizer[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 116: 253–264.
- [18] 肖新, 朱伟, 肖靓, 等. 适宜的水氧处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 91–98.
XIAO Xin, ZHU Wei, XIAO Liang, et al. Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 91–98. (in Chinese)
- [19] KIMETU J M, LEHMANN J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 577–585.
- [20] CHEN C R, PHILLIPS I R, CONDRON L M, et al. Impacts of green-waste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand[J]. Plant and Soil, 2012, 367(1/2): 301–312.
- [21] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779–785.
YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4): 779–785. (in Chinese)

- Machine Theory, 2002, 37(5): 427–439.
- [17] PASHKEVICH A, CHABLAT D, WENGER P. Stiffness analysis of overconstrained parallel manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 44: 966–982.
- [18] YAN S J, ONG S K, NEE A Y C. Stiffness analysis of parallelogram-type parallel manipulators using a strain energy method [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 13–22.
- [19] WU Guanglei, BAI Shaoping, HJORNET Preben. On the stiffness of three/four degree-of-freedom parallel pick-and-place robots with four identical limbs [C] // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Stockholm, 2016.
- [20] 王一熙, 吴广磊, 沈惠平, 等. 半对称三平移 Delta-CU 并联机构的刚度建模与分析[J]. 中国机械工程, 2019, 12(9): 75–85.
WANG Yixi, WU Guanglei, SHEN Huiping, et al. Stiffness modeling and analysis of semi-symmetric three-translation Delta-CU parallel mechanism[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2019, 12(9): 75–85. (in Chinese)
- [21] 李家宇, 沈惠平, 孟庆梅, 等. 一种 Delta 变形机构及其基于工作空间分析的尺度设计[J]. 机械设计, 2018, 35(7): 92–98.
LI Jiayu, SHEN Huiping, MENG Qingmei, et al. A Delta derived mechanism and its scale design based on working space analysis[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(7): 92–98. (in Chinese)
- [22] 沈惠平, 吴成琦, 许可, 等. 一种零耦合度且运动解耦的非对称三平移并联机构——设计及运动学[J]. 中国机械工程, 2019, 30(6): 658–664.
SHEN Huiping, WU Chenqi, XU Ke, et al. Design and kinematics of 3-translation parallel mechanisms with zero coupling degree[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2019, 30(6): 658–664. (in Chinese)
- [23] 王一熙. 一种新型 SCARA 并联机构的运动学、刚度及动力学分析[D]. 常州: 常州大学, 2019.
WANG Yixi. Kinematics, stiffness and dynamics analysis of a new SCARA parallel mechanism[D]. Changzhou: Changzhou University, 2019. (in Chinese)
- [24] 许正骁. 三平移—转动并联操作手的设计与分析[D]. 常州: 常州大学, 2019.
XU Zhengxiao. Design and analysis of the parallel manipulator with three translation and one rotation [D]. Changzhou: Changzhou University, 2019. (in Chinese)
- [25] 朱伟, 郭倩, 马致远, 等. SCARA 并联机构刚度和动力学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 376–385.
ZHU Wei, GUO Qian, MA Zhiyuan, et al. Stiffness and dynamics analysis of SCARA parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 376–385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191044&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.044. (in Chinese)

(上接第 317 页)

- [22] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54–61.
GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 54–61. (in Chinese)
- [23] BROOKS P, STARK J M, MCINTEER B, et al. Diffusion method to prepare soil extracts for automated nitrogen-15 analysis [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(6): 1707–1711.
- [24] 温腾, 曹亚澄, 张佩仪, 等. 微扩散法测定铵态氮、硝态氮的¹⁵N 稳定同位素研究综述[J]. 土壤, 2016, 48(4): 634–640.
WEN Teng, CAO Yacheng, ZHANG Peiyi, et al. On progress in use of micro-diffusion method in $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ and $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ measurements[J]. Soils, 2016, 48(4): 634–640. (in Chinese)
- [25] 张亚丽, 董园园, 沈其荣, 等. 不同水稻品种对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 918–923.
ZHANG Yali, DONG Yuanyuan, SHEN Qirong, et al. Characteristics of NH_4^+ and NO_3^- uptake by rice of different genotypes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 918–923. (in Chinese)
- [26] 彭卫福, 吕伟生, 黄山, 等. 土壤肥力对红壤性水稻土水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3614–3624.
PENG Weifu, LÜ Weisheng, HUANG Shan, et al. Effects of soil fertility on rice yield and nitrogen use efficiency in a red paddy soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(18): 3614–3624. (in Chinese)
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 和玉璞, 张展羽, 徐俊增, 等. 控制地下水位减少节水灌溉稻田氮素淋失[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 121–127.
HE Yupu, ZHANG Zhanyu, XU Junzeng, et al. Reducing nitrogen leaching losses from paddy field under water-saving irrigation by water table control[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 121–127. (in Chinese)