

李夏雯, 卢树昌. 调理剂对旱直播稻土壤物理性状、氮素吸收与迁移的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(22): 216–222.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.22.030

调理剂对旱直播稻土壤物理性状、 氮素吸收与迁移的影响

李夏雯, 卢树昌

(天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384)

摘要: 常规稻田土壤氮素环境风险较为严重, 急需改善稻田土壤物理性状, 降低氮素累积, 减缓旱直播稻田土壤氮素迁移, 提升旱直播稻氮素吸收及产量。在旱直播条件下选用生物炭、腐殖酸调理剂, 设计 4 个处理, 即 CK(对照)、BC(生物炭 24 000 kg/hm²)、HA(腐殖酸 1 500 kg/hm²)、BC + HA(生物炭 12 000 kg/hm² + 腐殖酸 750 kg/hm²), 研究旱直播稻田土壤物理性状、氮素吸收及迁移状况。结果表明, 物理性状方面, BC 处理能够显著降低土壤容重 5.96% ($P < 0.05$), 提升土壤田间持水量 10.93%, 显著提升 > 0.25 mm 土壤团聚体含量和平均质量直径(MWD), 有效改善土壤团粒结构; 同时生物量与氮素吸收方面, BC 处理能够获得最大总干物质质量 21 957.67 kg/hm²、稻谷干物质质量 7 949.17 kg/hm² 及氮素吸收量 169.42 kg/hm²; 氮素迁移方面, BC + HA 处理能够显著降低 4 个土层硝态氮含量, 降幅为 6.56% ~ 64.22%。说明施用土壤调理剂能够有效改善土壤物理性状, 促进旱直播稻氮素吸收, 单施生物炭有利于旱直播稻总干物质与产量提升, 生物炭与腐殖酸结合施用对于降低旱直播稻田土壤氮素迁移风险效果显著。

关键词: 旱直播; 土壤调理剂; 物理性状; 养分吸收; 氮素迁移

中图分类号: S511.06; S143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)22-0216-07

我国北方水资源紧张, 大水灌溉下的渗漏、地

收稿日期: 2022-01-02

基金项目: 天津市重点研发计划科技支撑重点项目(编号: 19YFZCSN00290); 国家重点研发计划(编号: 2016YFD0801006)。

作者简介: 李夏雯(1995—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤与作物生长环境关系研究。E-mail: 17854255528@163.com。

通信作者: 卢树昌, 博士, 教授, 从事农田土壤质量与植物营养的教学与科研工作。E-mail: lsc9707@163.com。

表蒸发等途径造成稻田水分利用率低, 严重制约我国水稻种植可持续发展^[1]。另外, 我国常规稻田氮肥投入量较世界平均水平高出 75%, 过量施用氮肥导致大量氮素在土壤中积累, 加之水田长期淹水增加了氮素向土壤下层及周围扩散运移, 容易造成环境风险^[2-5]。水稻直播旱管栽培具有节水、省工、省时的特点, 发展直播旱管栽培方式(下文以“旱直播稻”表达)配以科学配套管理措施, 可为水稻节水、

[19] Zhao H S, Shi J P, Qi X J, et al. Pyramid scene parsing network [C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017: 2881–2890.

[20] Natalia K, Mykola L, Sergii S, et al. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(5): 778–782.

[21] Liu Y F, Zhong Y F, Fei F, et al. Scene semantic classification based on random-scale stretched convolutional neural network for high-spatial resolution remote sensing imagery [C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE, 2016: 763–766.

[22] Felix S, Teja K, Annett F, et al. Mapping forest tree species in high resolution UAV-based RGB imagery by means of convolutional neural networks [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 170: 205–215.

[23] Gui Y Y, Li W, Wang Y N, et al. Woodland detection using most-sure strategy to fuse segmentation results of deep learning [C]//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE, 2019.

[24] He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Las Vegas, 2016: 770–778.

[25] Gong Y P, Xiao Z F, Tan X W, et al. Context-aware convolutional neural network for object detection in VHR remote sensing imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(1): 34–44.

[26] Zhang T Z, Liu S, Xu C S, et al. Mining semantic context information for intelligent video surveillance of traffic scenes [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 149–160.

减缓氮素运移风险提供有效途径;早直播稻对土壤环境的需求较常规水稻有较大差异。近年来,不少研究利用土壤调理剂来改善土壤理化性状,提高土壤质量。研究表明,土壤调理剂可以促进团粒结构形成,降低容重,使土壤水肥保持性能提高^[6]。黄家怡等研究发现,在氮、磷各减量 20% 的基础上增施生物炭和腐殖酸,能显著提高双季稻的株高、结实率及产量,明显降低氮流失风险^[7]。

常规水稻栽培一般需要黏粒含量高的质地黏重土壤,灌溉方式为灌水量大的水田管理,而直播早管栽培直接播种于大田,实行旱地管理,在种植方式与水肥管理方面与常规水稻差异较大,对土壤理化性状要求也存在差异^[8-11]。当前,土壤调理剂施用对直播早管栽培方式下土壤环境质量提升、提高氮素利用方面的报道较少,尤其对早直播稻田土壤理化性状研究不深入。基于此,本试验提出在优化水分管理方式下,施用不同土壤调理剂,探究对早直播稻田土壤物理性状、氮素吸收及迁移状况的影响,以期为北方水稻直播早管栽培土壤管理方式提供一定参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于天津市武清区大孟庄镇后幼庄村,地理位置为 39°32′~39°33′N,116°57′~116°58′E。该区为暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量 550~606 mm,60% 集中在 6—8 月。土壤类型为潮土,质地为轻壤,土壤保水保肥性能不高,常年大水漫灌,容重偏高,呈碱性、非盐渍化,肥力中等以上。具体土壤理化性状如表 1 所示。

表 1 试验地土壤理化性状

指标	指标值
有机质含量	(21.21 ± 1.55) g/kg
全氮含量	(1.89 ± 0.08) g/kg
有效磷含量	(21.98 ± 7.85) mg/kg
速效钾含量	(212.37 ± 6.46) mg/kg
硝态氮含量	(10.51 ± 0.15) mg/kg
阳离子交换量(CEC)	(19.54 ± 0.02) cmol/kg
pH 值	8.31 ± 0.05
含盐量	(0.55 ± 0.02) g/kg
容重	(1.49 ± 0.07) g/cm ³
田间持水量	(22.32 ± 0.09) %

1.2 供试作物与材料

1.2.1 供试作物 早稻品种为津原 E28。该品种

为粳型常规稻,京津唐地区种植的平均全生育期为 178 d。

1.2.2 供试土壤调理剂材料 稻壳生物炭:由稻壳材料制作,购于天津亚德尔生物质科技股份有限公司。腐殖酸:固体粉状,购于天津休美特国际贸易有限公司。供试调理剂基本理化性状见表 2。

表 2 供试材料理化性状

指标	指标值	
	生物炭	腐殖酸
有机碳含量(g/kg)	450	378
全氮含量(g/kg)	0.13	3.10
全磷含量(P ₂ O ₅ , g/kg)	5.81	8.35
全钾含量(K ₂ O, g/kg)	9.86	0
CEC(cmol/kg)	34.18	181.02
pH 值	10.47	5.30
密度(g/cm ³)	0.50	0.80
比表面积(m ² /g)	292	2 000

1.3 试验设计与管理

试验时间为 2020 年 5—10 月,采用生物炭和腐殖酸 2 种调理剂,设计 4 个处理,即 CK(对照)、BC(24 000 kg/hm² 生物炭)、HA(1 500 kg/hm² 腐殖酸)、BC + HA(12 000 kg/hm² 生物炭 + 750 kg/hm² 腐殖酸)。小区面积 36 m²(6 m × 6 m),采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,设置保护行,播种量为 90 kg/hm²,播种行距为 30 cm。

水分优化管理方式为早直播湿润灌溉,即早直播后立即进行田间灌水等待出苗,除分蘖后期排水晒田外,在整个生育期内灌小水,保持土壤湿润,以根层土壤水分占饱和含水率的 75%~85% 作为灌水控制标准。全生育期灌水量 7 500 m³/hm²,10~15 d 灌 1 次,每次 750 m³/hm²。

施肥管理:全生育期施氮 300 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm²。氮肥分为整地、分蘖期、分蘖末期、拔节孕穗期 4 次施用,分别按照 40%、20%、20%、20% 的比例施入,即基追比 4:6,以尿素形式提供;磷、钾作为基肥一次性施入,以磷酸二铵和硫酸钾形式提供。由于磷酸二铵含有部分氮素,基肥尿素施用量计算时要扣除磷酸二铵中的氮素。

1.4 样品采集与测试方法

收获期(10 月 31 日,结实期)用环刀采集各小区土壤样品,然后测定容重、田间持水量;用铁锹采集 0~20 cm 散土,自然风干、去杂后用于测定土壤

团粒结构;用土钻按“S”形五点取样法采集各小区深层为 0~30、30~60、60~90、90~120 cm 的土样,经标准化处理后,测定分析土壤全氮、硝态氮含量。在收获期(10 月 31 日,结实期)每小区去除两侧保护行各 5 行(1.5 m 宽)及两头各 1 m 边界,取中心区 10 行(3 m 宽)共 12 m²(3 m×4 m)植株进行整株收获,自然风干晾晒后将旱直播稻茎叶、根、穗分离,各部位分别称质量,计算干物质量。

土壤容重采用环刀法测定,用高 10 cm、规格 200 cm³ 的环刀取 5~15 cm 深度土壤,无损失转移并称质量后在 105 ℃ 下烘干至恒重,再称质量计算可得^[12]。田间持水量采用环刀法取 5~10 cm 深度土壤,同时取相同土层散土样品,将环刀原状土样浸入水面比环刀上缘低 1~2 mm 的水中,浸泡 24 h,散土风干后过 2 mm 筛,装入另一环刀,将饱和的湿土环刀同滤纸一起压在同类风干土环刀上方,接触 8 h,后从原状土样环刀中取土 20~30 g 置于铝盒中,烘干法测定含水量^[13]。团粒结构采用湿筛法,称取 5.00 g 经研磨过 5 mm 筛的土样,放入>2 mm、>1~2 mm、>0.5~1 mm、>0.25~0.5 mm、>0.106~0.25 mm 和≤0.106 mm 共 6 个不同粒级的土壤团粒结构分析仪中,振荡 40 min 后,各筛控水,放入 105 ℃ 烘箱内烘烤 8 h,再称量不同孔径下的烘干土质量,并计算平均质量直径(MWD)。土壤全氮含量采用浓硫酸-H₂O₂ 消煮-凯氏定氮法测定。土壤硝态氮含量采用氯化钙溶液浸提,紫外分光光度法测定。平均质量直径计算公式如下:

$$MWD^{[14]} = \sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i)。$$

(1)

式中: \bar{x}_i 为 i 粒级团聚体平均直径,mm; w_i 为 i 粒级团聚体质量分数,%。

植物样品用浓硫酸-H₂O₂ 消煮后用凯氏定氮法测定各部位全氮含量,并计算各部位吸氮量(吸氮量=干生物量×含氮量)。

1.5 数据处理与分析

数据采用 Excel 2010 进行处理,采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析,用 Duncan’s 新复极差法和 LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理旱直播稻田土壤物理性状状况

2.1.1 不同处理旱直播稻田土壤容重和田间持水

量状况 由表 3 可知,与 CK 相比,各处理均能够降低土壤容重,BC 处理降幅最大,达 5.96%,显著低于其他处理($P<0.05$),BC+HA 处理次之,降幅为 4.64%。施加调理剂处理(BC、HA、BC+HA)的田间持水量较 CK 均有所增加,BC 增幅为 10.93%,显著优于其他处理,BC+HA 处理次之,增幅为 2.27%。综上,施加土壤调理剂对于降低旱直播稻田土壤容重以及提高田间持水量有积极作用,其中,BC 处理在降低土壤容重和提升田间持水量方面效果最为显著,说明生物炭本身具有的多孔性以及密度较小等特征利于增加土壤孔隙度,进而改善土壤容重和持水能力。

表 3 各处理旱直播稻田土壤容重和田间持水量状况

处理	容重 (g/cm ³)	田间持水量 (%)
CK	1.51±0.003a	22.04±0.023c
BC	1.42±0.001c	24.45±0.001a
HA	1.46±0.005b	22.10±0.004b
BC+HA	1.44±0.005b	22.54±0.005b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

2.1.2 不同处理旱直播稻田土壤团粒结构状况

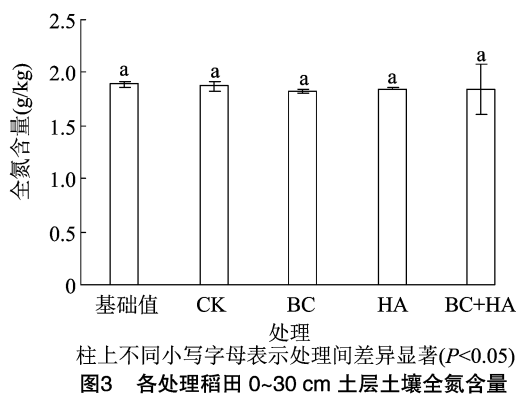
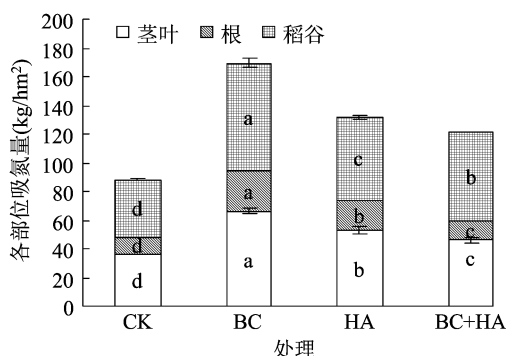
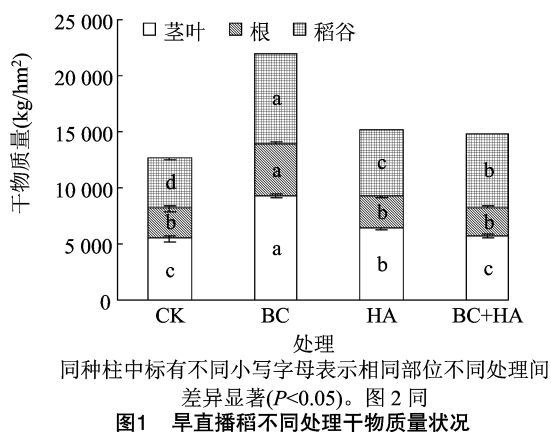
由表 4 可知,BC 处理能够明显提高>2 mm 和>1~2 mm 粒级的团聚体含量,而显著降低>0.106~0.25 mm 和≤0.106 mm 粒级团聚体含量,说明 BC 有利于大团聚体和中间团聚体的形成,同时降低微团聚体与黏团聚体含量。BC 处理>0.25 mm 粒级含量和平均重量直径(MWD)显著高于其他处理,较 CK 高出和 31.92%和 15.26%,BC+HA 次之,分别高出 25.02%、6.32%。综上,BC 处理能够较好地改善土壤团粒结构进而提高土壤结构稳定性。

2.2 不同处理旱直播稻干物质量及氮素吸收状况

2.2.1 不同处理旱直播稻干物质量状况 由图 1 可知,旱直播稻各处理干物质量状况均为茎叶>稻谷>根,茎叶所占比例最大,为 38.5%~43.6%,稻谷比例为 35.5%~44.5%,根部比例为 17.1%~21.3%。各处理总干物质量依次为 BC>HA>BC+HA>CK,BC 处理最大(21 957.67 kg/hm²)。稻谷部位,BC 处理干物质量达到 7 949.17 kg/hm²,显著高于其他处理,与 CK 相比,稻谷干物质量显著提升 77.61%,较 HA、BC+HA 处理增加了 34.59%、20.50%,HA、BC+HA 处理稻谷干物质量分别较 CK 提升 31.97%、47.40%,说明施加调理剂能够促

表 4 各处理土壤团粒结构不同粒级比例及平均质量直径

处理	土壤团粒结构不同粒级比例(%)							平均质量直径 (mm)
	>2 mm	>1~2 mm	>0.5~1 mm	>0.25~ 0.5 mm	>0.106~ 0.25 mm	≤0.106 mm	>0.25 mm	
CK	0.60c	2.93c	3.91b	5.03d	12.24a	75.29a	12.47d	0.190b
BC	0.83a	3.32a	3.96a	8.34a	11.27c	72.28d	16.45a	0.219a
HA	0.60c	3.09b	3.75c	7.55c	11.82b	73.19b	14.99c	0.199b
BC+HA	0.62b	3.15b	3.57d	8.25b	11.82b	72.59c	15.59b	0.202ab



进水稻穗部发育,显著提升籽粒产量。结合总干物质量及稻谷干物质量表现来看,BC 处理能够明显促进早直播稻生长发育,有利于茎叶与稻谷干物质积累,对产量提升有显著效果。

2.2.2 不同处理早直播稻氮素吸收状况 由图2可知,各处理总吸氮量表现为 $BC > HA > BC + HA > CK$,其中 BC 处理最大(169.42 kg/hm^2),显著高于其他处理。各处理吸氮量均表现为稻谷>茎叶>根;其中,茎叶和根部的吸氮量为 $BC > HA > BC + HA > CK$,BC 处理氮素吸收最好,茎叶、根部的吸氮量分别为 66.10 、 28.01 kg/hm^2 ,与 CK 相比分别增加 29.63 、 17.32 kg/hm^2 ,说明生物炭调理剂单一施用处理(BC)对促进早直播稻茎叶和根氮素吸收有显著效果。稻谷吸氮量表现为 $BC > BC + HA > HA > CK$,BC 处理最高(75.31 kg/hm^2),BC+HA 处理次之(62.37 kg/hm^2),较 CK 分别高出 82.71% 和 51.33% ,各处理对促进早直播稻根部对氮素吸收均有显著效果,BC 处理的促进效果最好。

2.3 不同处理早直播稻田土壤氮素含量变化及迁移状况

2.3.1 不同处理早直播稻田土壤全氮含量变化 由图3可知,与基础值相比,各处理在收获期均能降低土壤 0~30 cm 土层全氮含量,降幅在 $0.95\% \sim$

3.17% 之间,但差异未达显著水平。与 CK 相比,BC 处理全氮含量降低 2.14% ,BC+HA 处理次之,降幅为 1.60% 。说明施加生物炭在一定程度上能够降低土壤表层全氮含量。

2.3.2 不同处理早直播稻田土壤硝态氮含量状况 由表5可知,在收获期(10月31日,结实期),与基础样比较,BC+HA 处理 4 个土层的硝态氮含量均显著降低,降幅从表层向下依次为 50.14% 、 64.22% 、 40.87% 和 6.56% ,且与其他处理差异显著($60 \sim 90 \text{ cm}$ 土层除外)。土壤水分下渗会引起硝态氮的淋失,硝态氮含量较种植前大幅降低是由于作物与灌溉方式均发生改变,早作节水灌溉方式减缓了大水灌溉造成的下渗累积。在 $60 \sim 90 \text{ cm}$ 和 $90 \sim 120 \text{ cm}$ 土层,CK 的硝态氮含量相较于基础值

显著增加,其后期累积在土壤中的硝态氮没有被及时汲取而向下淋洗,其他施用调理剂处理硝态氮含量均有不同程度的降低,说明生物炭、腐殖酸的施用可以减缓氮素随水向深层迁移状况。综合收获期 4 个土层的硝态氮含量变化,BC + HA 处理能显著降低土壤硝态氮含量,对于减缓氮素迁移、控制环境风险有明显效果。

表 5 各处理收获期稻田土壤硝态氮含量状况

土层深度 (cm)	处理	硝态氮含量 (mg/kg)	变幅 (%)
0 ~ 30	基础值	10.51 ± 0.15a	
	CK	8.95 ± 0.03b	-14.84
	BC	7.18 ± 0.01d	-31.68
	HA	7.98 ± 0.20c	-24.07
	BC + HA	5.24 ± 0.16e	-50.14
30 ~ 60	基础值	11.85 ± 0.22a	
	CK	8.85 ± 0.05c	-25.32
	BC	8.23 ± 0.09b	-30.55
	HA	5.99 ± 0.05d	-49.45
	BC + HA	4.24 ± 0.01e	-64.22
60 ~ 90	基础值	8.71 ± 0.30b	—
	CK	10.92 ± 0.13a	-25.37
	BC	7.22 ± 0.35bc	-17.11
	HA	7.84 ± 0.11b	-9.99
	BC + HA	5.15 ± 0.12c	-40.87
90 ~ 120	基础值	9.30 ± 0.43b	—
	CK	14.06 ± 0.14a	-51.18
	BC	9.03 ± 0.13c	-2.90
	HA	9.12 ± 0.05bc	-1.94
	BC + HA	8.69 ± 0.19d	-6.56

3 讨论与结论

土壤物理性状的改善有利于形成适宜的旱直播稻生长条件,促进氮素吸收。何立德等的研究表明,土壤调理剂能够改善旱直播稻生长环境,促进其生长以及干物质积累,增产率达 9.0%^[15]。本试验结果表明,单施生物炭处理在产量与氮素吸收方面的效果最好,可能与生物炭对土壤物理性状改善效果显著有关。研究表明,生物炭颗粒密度较低,具有多孔性质,能够吸附更多的水分子,增加土壤的蓄水、保水作用^[16-17]。土壤团粒结构是土壤结构的基本单元,各粒级团聚体的数量分布和空间排列方式决定了土壤水力性质及通透性能,对土壤氮的利用、供给与转化等都有重要影响,进而影响氮素

在土体内迁移^[18-19]。Lu 等研究发现,施加 6% 稻壳生物炭能够显著提高 2 ~ 5、0.25 ~ 0.5mm 大团聚体含量,同时减小 <0.25 mm 微团聚体含量,且显著提高了平均重量直径^[20]。这可能是由于生物炭等土壤调理剂与土壤混合,在氢键和静电的作用下对电解质离子、有机分子、络合物等发生吸附,促使分散的土壤颗粒团聚形成团粒,以增加土壤水稳性团聚体含量及其稳定程度^[21-22];同时,生物炭本身能够提高土壤中有机碳含量并降低有机碳矿化,有机碳作为胶结物质,可以有效促进团聚体的形成^[23];另外,生物炭等调理剂的 CEC 较高且比表面积大,可吸附大量的多酚化合物为微生物提供碳源,激发其活性,进而使非稳定性胶结剂(真菌菌丝、根系、植物源的多糖等)含量得到提升,以促进土壤团聚体胶结作用^[24-26]。

张爱平等研究发现,生物炭配施氮肥可以显著提高水稻籽粒产量 44.89%,增加地上部吸氮量 66.27 kg/hm²,大大提升氮肥利用率^[27]。本研究结果中,单施生物炭效果显著优于其他处理,稻谷部位氮素吸收较对照增加 82.71%,氮素利用明显提高。这可能是因为一方面生物炭密度低、多孔,吸附作用较强,可吸附大量的多酚化合物,为微生物提供碳源进而提升微生物活性,促进矿化^[28],从而促进氮的固定^[29];另一方面,生物炭孔隙结构发达且稳定性高,可以通过在微、中观土壤毛孔中滞留水分而实现养分的保留,从而增强对氮素的吸持能力^[30],促进土壤中氮素的吸收,进而减缓在土层间运移^[31]。生物炭具高度的稳定特性,施入土壤中具有多年持续效果^[32],本试验对土壤物理性状的研究为 1 年田间小区试验结果,有待继续开展多年试验,以进一步深入研究。

刘灿华等的研究表明,腐殖酸施入土壤可有效增加土壤孔隙度并降低土壤容重,大幅度改善土壤物理性质,进而调节土壤养分状况^[33]。而本试验单施腐殖酸处理在改善土壤质量和提高产量方面均未获得最优效果,可能是因为刘灿华等的研究中腐殖酸施用量为 3 000 kg/hm²,较本试验单施量高出 2 倍因而效果显著。腐殖酸施用对化肥中氮素有缓释作用,对钾素有增效效果^[34],本试验单施腐殖酸处理生物量表现较弱,其原因可能是腐殖酸加强了茎秆部位的养分吸收,同时促进根部发育效果显著,根系活力提高使根部干物质累积增加,而这对旱直播稻籽粒生长产生了负向影响^[35],因而影响了

总生物量和产量。本试验结果表明,生物炭与腐殖酸结合也可以较好地降低土壤容重,降幅仅次于生物炭,这可能是由于生物炭丰富的微孔隙结构使土壤通气和透水性增强,腐殖酸的施入有效调节了土壤酸碱度,使土壤 pH 值始终处于有益于土壤微生物生长的范围内,以激发微生物的生化活性,二者结合有利于改善土壤物理性状及氮素吸收^[22,36],而可能由于配施处理 2 种调理剂施用量相对较小,促进作用低于单施生物炭,因而未能获得最高产量。

农田土壤中氮淋溶是氮素损失的重要途径之一,极易造成氮素环境污染。生物炭和腐殖酸调理剂对减缓土壤氮迁移均有较好作用^[37]。卢慧宇等研究发现,施用生物炭能够有效减少旱地土壤硝态氮的淋失,降幅为 3.23% ~ 11.87%^[38]。卜晓莉研究发现,添加稻壳生物炭减少了 32.4% ~ 67.3% 的硝态氮淋失^[39]。王平等研究发现,腐殖酸能够调控氮素去向,随着施用量的增加,土壤表观硝化率明显降低,进而有效减少氮素淋溶损失^[40]。本研究结果表明,生物炭配施腐殖酸在收获期能够显著降低 4 个土层硝态氮含量,降幅为 6.56% ~ 64.22%,阻控氮素流失风险效果最好,与黄家怡等的研究成果^[10]相一致。这可能是由于生物炭和腐殖酸都具有较强的吸附性,生物炭具有较大的比表面积,可吸附土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,其对 NH_4^+ 较强的吸附力也延缓了 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化速率^[41],生物炭施用后土壤田间持水量显著提升,对硝态氮的固持能力增强^[42-43],减缓了土壤水分垂直运移造成的硝态氮淋失;而腐殖酸含有羟基、羧基和酚羟基等活性基团,这些活性基团能与土壤中富含氮营养元素的离子结合,具有络合作用^[44],从而减少氮素淋失。另外,土壤调理剂对土壤团聚体的形成有促进作用,进而增加了土壤保水性能,可以阻止土壤水分的扩散,氮素流失也随之减少。有研究表明,生物炭降低土壤硝态氮淋洗的平均降幅达 24.6%,施用腐殖酸能够减少 23.0% 的氮淋失^[45-46]。本试验施用生物炭、腐殖酸处理在收获期平均降低率分别为 20.57%、21.34%,淋洗效果主要与调理剂施用量、种类以及试验地土壤质地和 pH 值不同有关。

从土壤物理性状方面看,单一施加生物炭能够显著降低土壤容重 5.96%,提高田间持水量 10.93%,并有效改善土壤团粒结构;从生物量、氮素养分吸收来看,单施生物炭处理的生物量与氮素吸收量均最大,其总干物质量为 21 957.67 kg/hm²,稻

谷部位达 7 949.17 kg/hm²,同时总吸氮量达 169.42 kg/hm²,稻谷部位为 75.31 kg/hm²。生物炭与腐殖酸配施处理仅次于单施生物炭处理;从减缓氮素迁移方面看,生物炭与腐殖酸配施效果最好,能够显著降低 4 个土层硝态氮含量,降幅为 6.56% ~ 64.22%。总体看,施加 24 000 kg/hm² 生物炭能有效改善稻田土壤物理性状,促进氮素吸收,提高早直播稻生物量,12 000 kg/hm² 生物炭与 750 kg/hm² 腐殖酸配施下,能够显著减缓早直播稻田土壤氮素迁移,降低氮素环境风险。

参考文献:

- [1] 陈钰佩. 氮素形态和水分条件对水稻通气组织及水分吸收影响的研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
- [2] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.
- [3] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [4] 李勇,杨林章,殷广德. 太湖地区直播稻田氮素渗漏损失试验研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):99-104.
- [5] 吴萍萍,刘金剑,周毅,等. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(2):277-283.
- [6] Hillel D. Research in soil physics[J]. Soil Science,1991,151(1):30-34.
- [7] 黄家怡,荣湘民,侯坤,等. 氮、磷减量配施生物炭和腐殖酸对双季稻产量和氮、磷流失的影响[J]. 河南农业科学,2020,49(8):31-44.
- [8] 王德胜,胡芸莎,曹琦,等. 棉秆生物炭对南疆地区水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(20):52-55.
- [9] 江泽普,黄绍伟,韦广泼,等. 不同免耕模式对水稻产量及土壤理化性状的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(12):362-365.
- [10] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science,2009,12(1):3-8.
- [11] 陈丽,贺奇,王兴盛,等. 不同直播栽培方式对水稻产量及其构成的影响[J]. 东北农业科学,2021,46(3):10-14.
- [12] 卢树昌. 土壤肥料学实验教程[M]. 北京:中国农业出版社,2019.
- [13] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. 中国新技术新产品,2014(9):184.
- [14] 韩贞贵,周运超,任娇娇,等. 马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配[J]. 生态学报,2021,41(23):9388-9398.
- [15] 何立德,周莉,郑文江. 土壤调理剂稻田应用效果试验[J]. 农村科技,2016(11):26-27.
- [16] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报,2011,27(2):1-7.

- [17] 李 杰. 保护土壤质量变化规律及不同措施对土壤改良效果研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [18] 于文竹,魏 霞,赵恒策,等. 青藏高原高寒草原草甸土壤团聚体及养分因子变化特征[J]. 水土保持学报,2020,34(6):301–308,317.
- [19] 刘中良,宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):447–455.
- [20] Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol) [J]. Catena, 2014, 114: 37–44.
- [21] 徐晓敏,吴淑芳,康倍铭,等. 五种天然土壤改良剂的养分与保水性研究及评价[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(9):85–89.
- [22] 黄 静. 改良剂对旱地红壤保水保肥效果的影响[D]. 南昌:南昌工程学院,2014.
- [23] 刘 哲,韩霁昌,孙增慧,等. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(6):2351–2359.
- [24] 张进红,吴 波,王国良,等. 生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(8):285–294.
- [25] Ascough P L, Sturrock C J, Bird M I. Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2010, 46(1):64–77.
- [26] Chan K Y, van Zwieten L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Soil Research, 2008, 46(5):437.
- [27] 张爱平,刘汝亮,高 霁,等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(5):1352–1360.
- [28] Zackrisson O, Nilsson M C, Wardle D A. Key ecological function of charcoal from wildfire in the boreal forest[J]. Oikos, 1996, 77(1):10.
- [29] Berglund L M, DeLuca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(12):2067–2073.
- [30] Sudhakar Y, Dikshit A K. Kinetics of endosulfan sorption on to wood charcoal[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 1999, 34(4):587–615.
- [31] 熊荟菁,张乃明,赵学通,等. 秸秆生物炭对葡萄园土壤改良效应及葡萄品质的影响[J]. 土壤通报,2018,49(4):936–941.
- [32] 高海英,何绪生,陈心想,等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(10):1948–1955.
- [33] 刘灿华,袁天佑,闫军营,等. 减氮配施腐殖酸对耕层土壤理化性质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(5):77–83.
- [34] 王曰鑫,栗 丽. 腐殖酸对化学肥料的增效作用研究[J]. 腐植酸,2007(2):22–27.
- [35] 吴岳轩,吴振球. 播期对亚种间杂交稻根系形态发育和生理活性的影响[J]. 作物学报,1996,22(2):178–184.
- [36] 于砚民. 利用风化煤改良盐碱湿地的初步研究[J]. 北京工业大学学报,1995,21(4):122–127.
- [37] 白 珊,倪 幸,杨瑗羽,等. 不同原材料生物炭对土壤重金属 Cd、Zn 的钝化作用[J]. 江苏农业学报,2021,37(5):1199–1205.
- [38] 卢慧宇,杜文婷,张弘弢,等. 水肥管理与生物炭对作物产量和氮效率及氮淋失的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(3):75–85.
- [39] 卜晓莉,汪浪浪,马青林,等. 稻壳炭施用对太湖滨岸灰潮土氮磷淋失及土壤性质的影响[J]. 生态环境学报,2019,28(11):2216–2222.
- [40] 王 平,付战勇,李絮花,等. 腐殖酸对土壤氮素转化及氨挥发损失的影响[J]. 中国土壤与肥料,2018(4):28–33.
- [41] Lehmann J, da Silva J 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, 249:343–357.
- [42] Laird D A. The charcoal vision: a win – win – win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(1):178–181.
- [43] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality [J]. Soil Research, 2010, 48(7):526.
- [44] 陈振德,何金明,李祥云,等. 施用腐殖酸对提高玉米氮肥利用率的研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):52–54.
- [45] 张水勤,袁 亮,林治安,等. 腐殖酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 腐植酸,2018(1):46.
- [46] 谢迎新,刘宇娟,张伟纳,等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. 农业工程学报,2018,34(14):115–123.