

DOI: 10.11766/trxb202206200331

李越, 王颖, 熊子怡, 谢军, 王子芳, 高明. 有机肥配施生物质炭对根际/非根际土壤氮赋存形态的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (2): 495–505.

LI Yue, WANG Ying, XIONG Ziyi, XIE Jun, WANG Zifang, GAO Ming. Effect of Manure with Biomass Carbon on Forms of Nutrients and Nitrogen in Rhizosphere / Non-Rhizosphere Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (2): 495–505.

有机肥配施生物质炭对根际/非根际土壤氮赋存形态的影响*

李越¹, 王颖², 熊子怡¹, 谢军¹, 王子芳¹, 高明^{1†}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市规划与自然资源局, 重庆 401147)

摘要: 阐明化肥和有机肥配施生物质炭对根际/非根际土壤养分和氮赋存形态的影响, 有助于农田氮的高效利用及科学管理。采用盆栽试验方法, 设置不施肥 (CK)、单施化肥 (CF)、施有机肥 (M)、化肥配施生物质炭 (CFB)、有机肥配施生物质炭 (MB)、新鲜有机肥配施生物质炭 (FMB) 6 个处理, 通过测定根际及非根际土壤养分含量和土壤氮赋存形态, 阐明不同施肥处理对氮形态转化的影响。结果表明: 与 CK 处理相比, MB 处理提高非根际及根际土壤 pH 0.32 和 0.28 个单位, FMB 处理提高根际土壤 pH 0.63 个单位; MB 和 FMB 处理分别提高根际土壤有机质含量 25.4% 和 84.9%, 同时显著提高根际土壤全氮含量 25.4% 和 50.9%, 表现出明显的根际效应。施肥能显著提高土壤离子交换态氮 (IEF-N) 含量, 以 CF 和 CFB 处理的效果最好。施用有机肥和生物质炭能显著提高土壤碳酸盐结合态氮 (CF-N) 含量, 以 M 和 MB 处理效果最好, 且 CF-N 存在根际富集效应。配施生物质炭 (CFB、MB 和 FMB) 处理能促进土壤非可转化态氮 (NTF-N) 向铁锰氧化物结合态氮 (IMOF-N) 和有机硫化物结合态氮 (OSF-N) 这两种活性更高的氮形态转化, 其中 IMOF-N 和 OSF-N 分别占可转化态氮的 35.9%~61.7% 和 26.7%~46.6%, 是根际及非根际土壤可转化态氮 (TF-N) 的主要成分。因此, 有机肥配施生物质炭是改善根际及非根际土壤养分和调控氮转化有效的方式。

关键词: 有机肥; 生物质炭; 根际土; 非根际土; 土壤养分; 氮形态

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

Effect of Manure with Biomass Carbon on Forms of Nutrients and Nitrogen in Rhizosphere / Non-Rhizosphere Soils

LI Yue¹, WANG Ying², XIONG Ziyi¹, XIE Jun¹, WANG Zifang¹, GAO Ming^{1†}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, Chongqing 401147, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the effects of fertilizer and organic fertilizer combined with biomass charcoal on the forms of nutrients and nitrogen in rhizosphere / non-rhizosphere soil, which is helpful for the efficient utilization and

* 国家自然科学基金项目 (42177019) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42177019)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

作者简介: 李越 (1999—), 男, 重庆奉节人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: ly417375272@163.com

收稿日期: 2022-06-20; 收到修改稿日期: 2022-08-15; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-11-11

scientific management of farmland nitrogen. 【Method】 Taking the pot experiment of lemon as the research object, this paper set up six treatments: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (CF), manure (M), chemical fertilizer with biomass charcoal (CFB), manure with biomass charcoal (MB) and fresh manure with biomass charcoal (FMB). By measuring the changes of nutrient content in the rhizosphere and non-rhizosphere soils and the transformation of soil nitrogen storage forms, the effects of organic fertilizer combined with biomass charcoal on the forms of soil nutrients and nitrogen in rhizosphere and non-rhizosphere were studied. 【Result】 The results showed that compared with CK treatment, MB treatment increased non rhizosphere and rhizosphere soil pH by 0.32 and 0.28 units, and FMB treatment increased rhizosphere soil pH by 0.63 units; MB and FMB treatments increased the content of organic matter in rhizosphere soil by 25.4% and 84.9% respectively, and significantly increased the content of total nitrogen in rhizosphere soil by 25.4% and 50.9%, showing obvious rhizosphere effect. Fertilization can significantly increase the content of soil ion-exchange nitrogen (IEF-N), and CF and CFB treatments had the best effect. Applying manure and biomass charcoal can significantly increase the content of carbonate-bound nitrogen (CF-N) in soil, and M and MB treatments are the best, and CF-N has a rhizosphere enrichment effect. The combined application of biomass charcoal (CFB, MB and FMB) can promote the transformation of soil non-convertible nitrogen (NTF-N) to two more active nitrogen forms, iron manganese oxide bound nitrogen (IMOF-N) and organic sulfide bound nitrogen (OSF-N). IMOF-N and OSF-N account for 35.9%-61.7% and 26.7%-46.6% of convertible nitrogen, respectively, and are the main components of rhizosphere and non-rhizosphere soils convertible nitrogen (TF-N). 【Conclusion】 Therefore, manure combined with biomass charcoal is an effective way to improve rhizosphere and non-rhizosphere soil nutrients and regulate nitrogen transformation.

Key words: Manure; Biomass charcoal; Rhizosphere soil; Non-rhizosphere soil; Soil nutrients; Nitrogen form

氮是植物需求量最大的矿质营养元素，同时也是植物生长发育过程中最受限制的营养元素之一^[1]。为提高作物的产量和品质，氮肥在农业生产中被大量施用，但植物对氮肥的利用率仅有 30%~35%。氮肥施入土壤后一部分会转化成各种形态的氮储存于土壤中，氮素化学形态不同，其生物有效性也有所不同，土壤中绝大部分有机氮要经过微生物矿化作用转化为无机氮才能被植物吸收利用^[2]。因此，研究土壤中氮赋存形态及其转化对于优化农业生产中的氮肥投入和促进植物对土壤氮素的吸收利用具有重要意义。

近年来，过量施用氮肥影响了土壤中氮循环过程，不仅造成大量氮流失，还造成土壤退化、水体污染和大气污染等一系列环境问题^[3]。生物质炭作为一种新兴改良剂，主要来源于农业废弃物，在减少氮损失和改善土壤生化环境方面具有良好效果，其具有碳含量高、疏松多孔、比表面积大等特点，不仅能改善土壤结构、提高土壤肥力，还对土壤氮形态转化存在一定影响^[4]。有研究表明：适量施用生物质炭可能会促进土壤有机氮矿化，释放出无机氮，提高植物对土壤氮素的吸收利用率^[5]。同时，生物质炭还能通过改变土壤氮素迁移和转化过程对土壤氮循环产生影响^[6]。有机肥作为一种传统肥料，

具有养分平衡和养分释放慢的特点，能提高氮肥利用率并改良土壤^[7]。Marinari 等^[8]研究表明：与单施化肥相比，配施有机肥能显著提高速效钾和速效磷含量，减少氮损失。长期施用有机肥还可以大幅提高土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮，从而延长无机氮的有效性^[9]。目前关于生物质炭或者有机肥施用对土壤理化性质的影响已有大量研究，但是，有机肥配施生物质炭对土壤氮赋存形态影响的研究较少。

根际是土壤与植物进行物质、能量交换的重要场所，植物通过根系分泌物来影响土壤理化性质，其影响最先反映在根际土壤上，作为研究植物、土壤和微生物之间互相联系的重要领域，其与非根际土壤之间存在明显的差异性^[10]。但是，目前化肥配施有机肥或者生物质炭对土壤养分影响的研究主要集中于非根际土。有研究表明：生物质炭与氮肥减量调控利于非根际土壤的全氮和速效钾、速效磷含量的积累^[11]。有机肥配施生物质炭能够有效提高非根际土壤阳离子交换量以及土壤对氮、磷、钾的吸收效率^[12]。然而，化肥或有机肥配施生物质炭下，根际土养分变化特征的研究鲜有报道。

因此，本文以紫色土为研究对象，通过设置 6 个不同施肥处理，测定柠檬根际和非根际土壤基本

理化性质和氮形态, 探明有机肥配施生物质炭对根际及非根际土壤养分和氮赋存形态的影响, 为有机肥和生物质炭在调控农田氮转化和氮肥减施增效的应用中提供新的思路。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自重庆市潼南区太安镇国家农业科技园区柠檬种植基地 (0~30 cm), 是紫色土区琼江河台地冲积物 (Q₄) 经旱耕熟化而成的一种紫色潮土。采集的土壤置于阴凉干燥处自然风干, 去除杂质后研磨过 2 cm 筛供盆栽试验使用。初始土壤的基本理化性质: 容重 1.48 g·cm⁻³、pH 5.19、有机质 8.68 g·kg⁻¹、全氮 0.679 g·kg⁻¹、全磷 0.221 g·kg⁻¹、碱解氮 57.31 mg·kg⁻¹、硝态氮 3.46 mg·kg⁻¹、铵态氮 4.82 mg·kg⁻¹、有效磷 9.14 mg·kg⁻¹、速效钾 244.12 mg·kg⁻¹。

供试柠檬品种为尤力克 (Eureka), 苗龄为嫁接 7 个月的脱毒苗, 来自重庆市潼南区国家科技农业园区智能化柠檬脱毒育苗中心。供试生物质炭为稻壳生物质炭, 由四川省久晟农业有限责任公司提供, 烧制方法是将稻壳在 500 °C 高温厌氧条件下热解 2 h, 制成稻壳生物质炭。供试有机肥和新鲜有机肥分别为腐熟猪粪和新鲜猪粪, 均取自潼南温氏养猪场, 猪粪 (120 d) 碱解氮、有效磷和速效钾的缓释效率分别为 35.3%、34.8% 和 41.5%。供试生物质炭和有机肥的基本性质见表 1。

表 1 供试生物质炭和有机肥基本性质

Table 1 Basic properties of biomass charcoal and organic fertilizer tested

供试材料 Test materials	pH	C/ (g·kg ⁻¹)	N/ (g·kg ⁻¹)	P/ (g·kg ⁻¹)	K/ (g·kg ⁻¹)
生物质炭 Biomass charcoal	9.50	238.5	0.808	1.754	6.827
腐熟猪粪 Fully-fermented pig manure	8.89	—	22.91	51.5	8.8
新鲜猪粪 Fresh pig manure	8.61	—	21.46	31.3	7.9

1.2 试验设计

盆栽试验于 2019 年 5 月 1 日—2020 年 6 月 25 日在“紫色土地”进行, 2020 年 1 月由室外移至温室大棚。设置 6 个处理: ①不施肥 (CK)、②常规施肥 (CF)、③有机肥 (M)、④化肥+生物质炭 (CFB)、⑤有机肥+生物质炭 (MB)、⑥新鲜有机肥+生物质炭 (FMB), 采用随机区组设计, 每个处理 4 次重复。化肥品种分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。微量元素肥料为来自北美农大集团生产的硼锌锰铁镁钙硅复合微量元素水溶肥料 (B、Zn、Mg、Si、Ca、Mn、Fe≥12%), pH 为 6.0。

称取土壤 15 kg, 按照等氮施肥的原则将化肥、有机肥和生物质炭与土壤充分混匀后装入钵, 钵为盆口直径 22 cm、高 30 cm 的 PVC 圆桶。除 CK 处理外, 各处理保持等氮的施肥原则, 单株柠檬幼苗施入纯氮 (N) 2.625 g。施用完基肥后放置 15 d, 然后选择大小和长势基本一致的柠檬苗移栽, 每个钵 1 株, 移栽定植后浇水灌透, 之后适时浇水, 每次浇水保持各处理表层土壤的湿度一致。生物质炭作为基肥一次性施入, 施用量参照刘园等^[13]的研究, 有机肥和无机肥部分作为基肥施入, 之后每 2~3 个月以 1/3 基肥的量进行追肥, 一共 4 次追肥, 具体施肥量见表 2。

1.3 样品采集与分析

2020 年 6 月 25 日进行破坏性取样。打开定植盆, 用抖土法^[14]收集根际土, 先慢慢取出带土的柠檬植株, 轻轻抖落植株根系上的较大颗粒土, 再用细毛刷将黏附在须根上的根际土收集至无菌自封塑料袋中, 同时收取等量的非根际土。将土壤置于室外自然风干, 然后去除杂质, 研磨后分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛, 用于测定土壤理化性质和不同形态氮含量。

土壤 pH 采用 DMP-2mV 酸度计测定, 土水比为 1:2.5; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法 (K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 法); 土壤全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 蒸馏滴定法测定; 碱解氮采用碱解扩散法; 土壤硝态氮采用 KCl 溶液浸提—紫外分光光度法测定; 土壤铵态氮采用 KCl 溶液浸提—靛酚蓝比色法测定; 有效磷采用 Olsen 法; 土壤速效钾采用 NH₄OAc 溶液浸提—火焰光度法测定^[15]。

1.4 土壤氮分级的测定

采用改进后的沉积物中氮分级浸取分离法^[16], 将土壤中的氮分成可转化态氮 (TF-N) 和非可转化

表 2 各处理施肥总量

Table 2 Total fertilization for each treatment

处理 Treatment	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride	有机肥 Manure	新鲜有机肥 Fresh manure	生物质炭 Biomass charcoal	微量元素 Trace element
/ (g·kg ⁻¹)							
CK	—	—	—	—	—	—	—
CF	0.89	3.40	0.47	—	—	—	0.34
M	—	—	—	50.49	—	—	—
CFB	0.87	3.10	0.24	—	—	8.89	0.34
MB	—	—	—	49.61	—	8.89	—
FMB	—	—	—	—	52.96	8.89	—

注：CK 表示不施肥；CF 表示施化肥；M 表示施有机肥；CFB 表示化肥配施生物质炭；MB 表示有机肥配施生物质炭；FMB 表示新鲜有机肥配施生物质炭，下同。Note: CK means no fertilization; CF means chemical fertilizer; M means applying manure; CFB means chemical fertilizer combined with biomass charcoal; MB means manure combined with biomass charcoal; FMB means fresh manure combined with biomass charcoal. The same below.

态氮 (NTF-N)，并将可转化态氮分成离子交换态氮 (IEF-N)、碳酸盐结合态氮 (CF-N)、铁锰氧化物结合态氮 (IMOF-N) 和有机硫化物结合态氮 (OSF-N)，

具体氮分级的流程^[17]见图 1。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel2019 整理，IBM SPSS

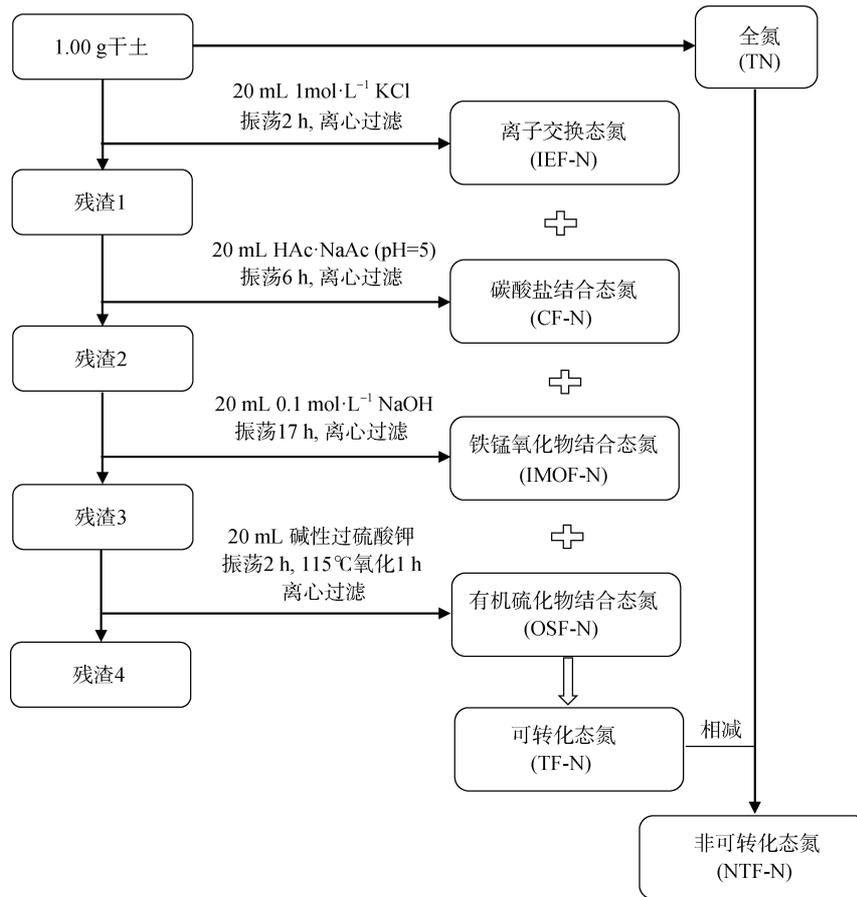


图 1 土壤氮分级测定流程图

Fig. 1 Flowchart of soil nitrogen fractionation determination

Statistics 26 进行统计分析和 Origin2018 软件进行图表绘制, 以 LSD 最小显著差异法进行多重比较, 差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结 果

2.1 不同施肥处理对根际及非根际土壤 pH、有机质及养分的影响

不同处理对根际及非根际土壤 pH、有机质及养分的影响如表 3 所示。对于非根际土而言, 与 CK 处理相比, CF 和 CFB 处理分别显著降低 pH0.64 和 0.23 个单位, M、MB 和 FMB 处理显著增加 pH0.15~0.32 个单位; M、CFB 和 MB 处理显著增加有机质

含量 9.46%~24.31%; CF、M、CFB 和 MB 处理显著增加硝态氮; MB 和 FMB 处理分别显著降低铵态氮含量, CF 处理显著增加铵态氮含量; CF 处理显著提高碱解氮含量, CFB、MB 和 FMB 处理显著降低碱解氮含量; CF、M、CFB、MB 和 FMB 处理显著增加全氮、有效磷和速效钾含量。

对于根际土而言, 与 CK 处理相比, CF 和 CFB 处理分别显著降低了 pH0.63 和 0.34 个单位, M、MB 和 FMB 处理显著增加 pH0.29~0.63 个单位; M、CFB、MB 和 FMB 显著增加有机质含量 25.37%~84.88%; CF 处理显著增加铵态氮含量; CF、M、CFB、MB 和 FMB 处理显著增加全氮、硝态氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量。

表 3 不同施肥处理对根际及非根际土壤 pH、有机质及养分的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on soil pH, organic matter and nutrients in the rhizosphere and non-rhizosphere soils

处理 Treatment	pH	SOM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)
根际土 Rhizosphere soil								
CK	5.16±0.00c	8.20±0.11a	0.56±0.01a	1.64±0.11a	4.56±0.63a	51.10±1.94a	8.34±0.49a	50.69±0.51a
CF	4.53±0.01a	8.27±0.04a	0.66±0.04b	15.59±1.13d	13.19±3.86b	69.16±0.23c	51.61±1.57c	205.4±1.24f
M	5.45±0.00d	13.05±0.06c	0.91±0.02f	7.13±0.12c	4.68±2.23a	86.20±0.18d	85.70±1.66d	135.0±1.63c
CFB	4.82±0.03b	12.79±0.47c	0.77±0.01d	15.83±0.11d	7.29±2.24a	68.36±0.07c	48.36±1.59c	156.6±2.01d
MB	5.70±0.01e	10.28±0.00b	0.71±0.01c	8.14±1.47c	3.82±1.12a	58.47±7.77b	38.67±0.98b	125.0±1.13b
FMB	5.79±0.04f	15.16±0.12d	0.85±0.01e	3.01±0.68b	6.29±3.50a	66.11±6.18c	37.57±2.87b	171.5±2.52e
非根际土 Non-rhizosphere soil								
CK	5.21±0.01c	7.61±0.04a	0.62±0.03a	4.37±0.23b	10.81±3.43b	58.57±3.56b	9.03±0.11a	74.43±0.24a
CF	4.57±0.00a	7.75±0.10a	0.76±0.01d	10.70±1.02e	24.64±4.91c	75.14±0.08c	70.43±4.24e	191.3±0.65f
M	5.36±0.00d	9.46±0.04d	0.75±0.00d	8.84±0.89d	6.70±1.14ab	57.08±0.64b	59.17±0.48d	99.94±1.16c
CFB	4.98±0.02b	8.35±0.03c	0.64±0.00c	9.26±1.02d	9.67±2.94b	50.70±2.13a	28.87±0.04bc	87.12±0.64b
MB	5.53±0.01f	8.33±0.00bc	0.63±0.02c	7.70±0.28c	3.07±0.49a	49.15±0.01a	30.93±1.48c	123.2±4.14e
FMB	5.49±0.03e	8.10±0.19ab	0.61±0.01b	2.97±0.06a	4.16±3.72a	50.71±2.34a	26.11±0.96b	111.8±2.35d

注: 数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误。组间不同小写字母表示不同处理下同一区域之间的显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: The data is the mean value ± standard error of 3 repetitions. Different lowercase letters between groups indicate the significant difference between the same area under different treatments ($P < 0.05$).

非根际土和根际土在施肥处理后的 pH 变化基本上一致。施用有机肥和生物质炭能提高土壤有机质含量, 且表现一定的根际效应。CFB、M、MB 和 FMB 处理的根际土全氮含量显著高于非根际土 ($P < 0.05$), 说明施用有机肥和生物质炭的土壤全氮

表现出了明显的根际效应。总体而言, 有机肥配施生物质炭显著增加土壤养分。

2.2 不同施肥处理对根际及非根际土壤氮赋存形态的影响

由表 4 可知, 各施肥处理土壤离子交换态氮

(IEF-N)含量占可转化态氮(TF-N)含量的 1.69%~19.48%, 碳酸盐结合态氮(CF-N)含量占可转化态氮(TF-N)含量的 4.57%~8.89%, 铁锰氧化物结合态氮(IMOF-N)含量占可转化态氮(TF-N)含量的 35.85%~61.72%, 有机硫化物结合态氮(OSF-N)

含量占可转化态氮(TF-N)含量的 26.65%~46.56%。4 种可转化态氮(TF-N)含量依次为: IMOF-N>OSF-N>IEF-N>CF-N, 说明铁锰氧化物结合态氮(IMOF-N)是土壤可转化态氮(TF-N)的主要组成部分。

表 4 不同施肥处理对根际及非根际土壤可转化态氮和非可转化态氮含量及占比的影响

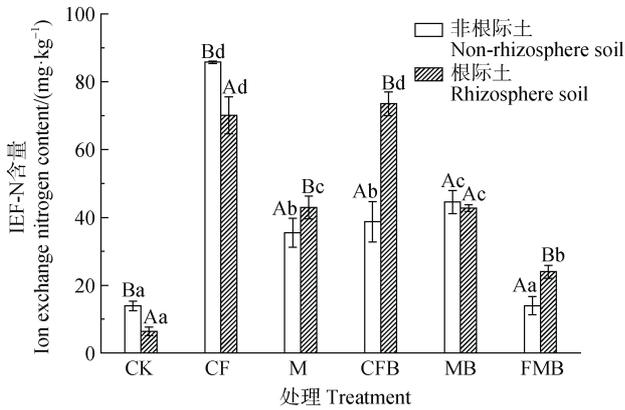
Table 4 Effects of different fertilization treatments on the contents and proportions of convertible nitrogen and non-convertible nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere soils

处理 Treatment	IEF-N	CF-N	IMOF-N	OSF-N	TF-N		NTF-N	
	占比 Proportion/ %	占比 Proportion/ %	占比 Proportion/ %	占比 Proportion/ %	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	占比 Proportion/ %	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	占比 Proportion/ %
根际土 Rhizosphere soil								
CK	1.69	5.36	60.29	32.66	378.0±0.9a	66.97	186.5±8.3a	33.03
M	9.78	7.81	35.85	46.56	438.9±27.3b	48.23	471.1±42.9e	51.77
CFB	15.22	5.93	50.46	28.39	483.2±12.0c	62.38	291.4±2.9bc	37.62
MB	11.54	8.89	43.67	35.89	370.1±2.8a	52.35	336.9±5.7d	47.65
FMB	4.52	4.85	59.89	30.73	530.4±25.2d	62.26	321.6±30.9cd	37.74
非根际土 Non -rhizosphere soil								
CK	3.31	5.06	61.72	29.92	420.4±1.6b	67.96	198.2±27.4a	32.04
CF	19.48	4.57	43.67	32.28	440.2±3.5c	57.88	320.3±5.7c	42.12
M	8.76	6.42	45.35	39.47	405.1±17.5b	54.02	344.9±17.5c	45.98
CFB	8.5	4.7	60.15	26.65	455.4±23.6c	71.72	179.6±27.7a	28.28
MB	10.56	5.65	55.77	28.03	421.6±7.0b	67.14	206.4±24.0a	32.86
FMB	3.93	5.77	57.4	32.9	355.4±5.2a	58.26	254.6±4.8b	41.74

注: IEF-N、CF-N、IMOF-N 和 OSF-N 属于可转化态氮, 占比为可转化态氮中的占比。数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误。Note: IEF-N, CF-N, IMOF-N and OSF-N belong to convertible nitrogen, and the proportion is the proportion of convertible nitrogen. The data is the mean value ± standard error of 3 repetitions.

根际土中 M 处理的氮形态占比为: NTF-N>TF-N, 其余处理氮形态占比均为: NTF-N<TF-N, 其中土壤可转化态氮(TF-N)含量占比为 48.23%~71.72%, 土壤非可转化态氮(NTF-N)占比为 28.28%~51.77%, 说明土壤氮素以土壤可转化态氮为主。CFB 处理较 CF 处理显著提高了土壤 TF-N 的占比 ($P<0.05$), 而降低了 NTF-N 的占比, MB 和 FMB 处理较 M 处理也显著提高了土壤 TF-N 的占比 ($P<0.05$), 而降低了 NTF-N 的占比, 说明配施生物质炭处理(CFB、MB 和 FMB)能促进土壤氮素从非可转化态氮向可转化态氮转化。

离子交换态氮(IEF-N)是一类水溶性强、吸附在土壤阳离子交换位点的结合态氮, 是可转化态氮(TF-N)中最“活跃”的形态, 易被植物吸收利用。图 2 是不同施肥处理对土壤离子交换态氮(IEF-N)含量的影响, 对于非根际土而言, 与 CK 处理相比, CF、M、CFB 和 MB 处理显著提高 IEF-N 含量 155.32%~516.91%, 其中 CF 处理增幅最显著; 对于根际土而言, 与 CK 处理相比, CF、M、CFB、MB 和 FMB 处理显著提高 IEF-N 含量 274.53%~1048.91%, 其中 CFB 处理增幅最显著。总体而言, 施肥显著提高了根际及非根际土壤中离子交换态氮



注：图中不同小写字母表示非根际土/根际土的不同施肥处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示同一施肥处理的非根际土和根际土之间差异显著 ($P < 0.05$)。CK：不施肥，CF：常规施肥，M：有机肥，CFB：化肥+生物质炭，MB：有机肥+生物质炭，FMB：新鲜有机肥+生物质炭。下同。Note: different small letters in the figure indicate significant differences between different fertilization treatments of non-rhizosphere soil/rhizosphere soil ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant differences between non-rhizosphere soil and rhizosphere soil of the same fertilization treatment ($P < 0.05$). CK: no fertilizer, CF: conventional fertilizer, M: organic fertilizer, CFB: fertilizer + biomass charcoal, MB: organic fertilizer + biomass charcoal, FMB: fresh organic fertilizer + biomass charcoal. The same below.

图2 不同施肥处理对根际及非根际土壤离子交换态氮含量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on ion exchange nitrogen content in the rhizosphere and non-rhizosphere soils

(IEF-N) 的含量，其中常规施肥 (CF) 和化肥配施生物质炭 (CFB) 处理的效果最显著，分别是 CK 处理的 10.95 倍和 6.70 倍。

碳酸盐结合态氮 (CF-N) 是土壤中与碳酸盐和少量溶解性有机物结合的活性态氮，释放性能稍低于离子交换态氮 (IEF-N)，在酸性条件下容易向水体释放。如图 3 所示，对于非根际土而言，与 CK 处理相比，M 处理显著提高 CF-N 含量 22.23%；对于根际土而言，与 CK 处理相比，M、CFB、MB 和 FMB 显著提高 CF-N 含量 27.05%~69.25%，其中 M 处理增幅最显著。CF、M、CFB、MB 和 FMB 处理的根际土 CF-N 含量均显著高于非根际土 CF-N 含量，这表明土壤碳酸盐结合态氮在根际存在一定的富集效应。CF 和 CFB 处理显著提高了根际土 CF-N 含量，同时 M 和 MB 处理较 CF 处理显著提高了土壤 CF-N 含量，表明施用有机肥和生物质炭能够有效提高土壤中 CF-N 含量，其中 M 和 MB 处理效果最显著。

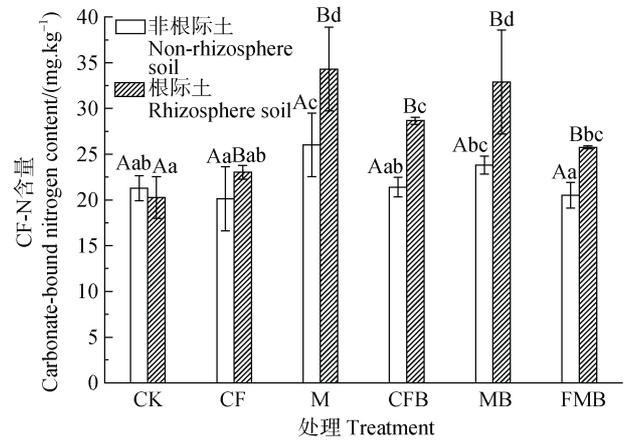


图3 不同施肥处理对根际及非根际土壤碳酸盐结合态氮含量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on the content of carbonate-bound nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere soils

铁锰氧化物结合态氮 (IMOF-N) 是可转化态氮中释放能力较弱的氮形态，对氧化还原环境很敏感，容易受到土壤铁锰氧化物含量的影响。图 4 是不同施肥处理对土壤铁锰氧化物结合态氮含量的影响，对于非根际土而言，与 CK 处理相比，CF、M、MB 和 FMB 显著降低 IMOF-N 含量 9.4%~29.18%，其中 M 处理降幅最显著；对于根际土而言，与 CK 处理相比，FMB 处理显著提高 IMOF-N 含量 39.40%，CF、M 和 MB 处理显著降低 IMOF-N 含量 21.74%~30.97%，其中 M 处理降幅最显著。CF 和 M 处理同 CK 处理相比均显著降低了土壤 IMOF-N 的含量，而 CFB 处理较 CF 处理显著提高了土壤 IMOF-N 含量，MB 和 FMB 处理较 M 处理显著提高了土壤 IMOF-N 含量，这表明单独施用化肥和有机肥会降低土壤中 IMOF-N 含量，配施生物质炭能够有效提高土壤中 IMOF-N 含量，其中，以新鲜有机肥配施生物质炭 (FMB) 处理效果最好。

有机硫化物结合态氮 (OSF-N) 主要是和稳定高分子腐殖质及硫化物结合的有机态氮，释放能力是 4 种可转化态氮中最弱的。如图 5 所示，对于非根际土而言，与 CK 处理相比，CF 和 M 处理显著提高 OSF-N 含量 12.98% 和 27.15%，其中 M 处理增幅最显著；对于根际土而言，与 CK 处理相比，M、CFB、MB 和 FMB 显著提高 OSF-N 含量 7.6%~65.51%，其中 M 处理增幅最显著。CF 处理较 CK 处理显著降低了根际土 OSF-N 含量，而 CFB、MB

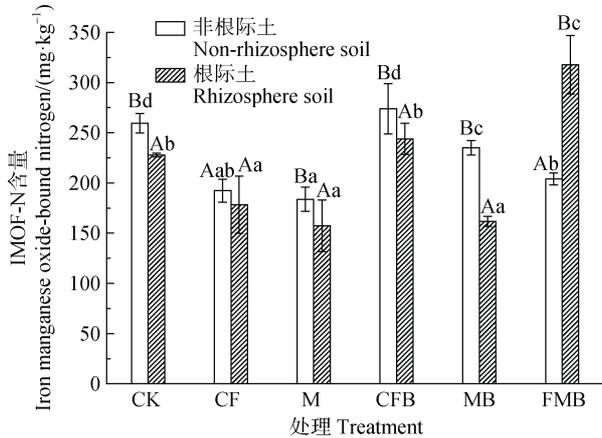


图4 不同施肥处理对根际及非根际土壤铁锰氧化物结合态氮含量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on the content of iron manganese oxide-bound nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere soils

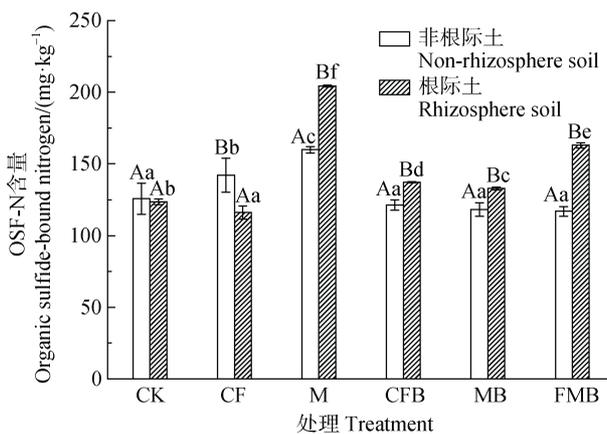


图5 不同施肥处理对根际及非根际土壤有机硫化物结合态氮含量的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization treatments on the content of organic sulfide-bound nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere soils

和 FMB 处理较 CF 处理显著提高了根际土 OSF-N 含量,表明单独施用化肥会降低根际土 OSF-N 含量,而配施生物质炭能够有效提高根际土 OSF-N 含量。

3 讨论

3.1 化肥和有机肥配施生物质炭对根际及非根际土壤 pH、养分的影响

在本研究中,化肥+生物质炭(CFB)和常规施肥(CF)处理较不施肥(CK)处理显著降低了非根际土和根际土的 pH,这是因为化肥会大量提高土壤硝态氮和铵态氮含量,植株吸收铵态氮的过程中会

释放 H^+ ,同时土壤铵态氮挥发损失和土壤硝态氮淋洗过程也会产生大量活性 H^+ ,因此导致土壤发生酸化^[18]。而有机肥(M)、有机肥+生物质炭(MB)和新鲜有机肥+生物质炭(FMB)处理能显著提高非根际土和根际土的 pH。这与赵牧秋等^[19]研究结果一致,这是因为有机肥富含有机官能团,对土壤中 Al^+ 和 H^+ 有较强的吸附作用,能够有效缓解土壤酸化。生物质炭表面含有碱性基团,施入土壤后能中和土壤中的 H^+ ,从而提高土壤的 pH,且生物质炭碱性基团的含量越高,提高土壤 pH 的效果就越好^[20]。本研究结果表明,配施生物质炭显著增加土壤有机质含量,以新鲜有机肥配施生物质炭(FMB)的效果最好,与王强等^[21]研究结果一致。这是因为生物质炭具有疏松多孔、比表面积大、吸附能力强等特点,能吸附土壤中大量的有机分子,并通过表面催化作用使有机分子聚合形成有机质,而且生物质炭自身含碳量高达 60% 以上,施入土壤后能成为土壤的碳源,添加后更高的不稳定碳氮比促进了土壤的氮循环,稳定的有机氮库中释放出更多的有机氮,从而提高土壤有机质的含量^[22]。

本研究发现,CF 处理的根际及非根际土壤铵态氮含量是最高的,配施生物质炭的 MB 和 FMB 处理较 CF 处理显著降低了非根际土壤的铵态氮含量,与王月玲^[23]等研究结果不同。这是因为生物质炭通过刺激土壤中的氨氧化细菌(AOA)和氨氧化古菌(AOB)基因丰度增加了土壤的硝化作用,而且生物质炭对土壤中的 NH_4^+/NH_3 有较强的吸附作用,当土壤 pH 为中性(pH=7~8)时,生物质炭通过吸附 NH_4^+/NH_3 减少土壤氨氮的损失,从而提高土壤铵态氮含量,但是,本研究供试土壤 pH 为 5.19,此时施入生物质炭会显著提高土壤的 pH,促使氨氮挥发,造成土壤铵态氮含量的降低^[24-25],李明等^[26]的研究也证实了这个结论。本研究还发现,施用有机肥和生物质炭较化肥能显著提高根际土全氮含量和碱解氮含量,且 CFB 和 CF 处理的土壤硝态氮含量是最高的,CFB 处理的土壤硝态氮含量和 CF 处理之间无显著差异, M 处理和 MB 处理之间的差异也不显著,说明化肥较有机肥能显著提高土壤硝态氮含量,但是,配施生物质炭对土壤硝态氮含量无显著影响。因为化肥是直接向土壤中施加养分,能迅速提高土壤的速效养分含量,但是肥效短,还会增加土壤氮素的流失风险,造成农业面源污染等环境

问题，有机肥和生物质炭虽前期肥效不如化肥，但具有长效性和缓释性，更有利于植株根系对氮的吸收利用^[27]。且生物质炭还能吸附土壤中的 NO_3^- ，减少硝态氮的淋失损失，为植株持续提供有效态氮源的同时降低了氮素流失风险^[28]。

3.2 化肥和有机肥配施生物质炭对根际及非根际土壤氮赋存形态的影响

在本文中，土壤可转化态氮（TF-N）含量占 TN（全氮）含量的 48.23%~71.72%，非可转化态氮（NTF-N）含量占 TN 含量的 28.28%~51.77%，土壤氮素以可转化态氮（TF-N）为主，CFB 处理较 CF 处理显著提高了土壤 TF-N 的占比，而降低了 NTF-N 的占比，MB 和 FMB 处理较 M 处理显著提高了土壤 TF-N 的占比，而降低了 NTF-N 的占比，说明配施生物质炭能促进土壤氮素从无法被植物直接吸收利用的氮形态向有效性更高的氮形态转化。本文还发现：生物质炭能促进土壤非可转化态氮（NTF-N）向铁锰氧化物结合态氮（IMOF-N）和有机硫化物结合态氮（OSF-N）这 2 种活性更高的氮形态转化，同时也有部分向碳酸盐结合态氮（CF-N）转化，这可能是由于生物质炭添加到土壤后，促进了土壤氮素的矿化作用，促进有机氮缓慢向无机氮转化，进而提高了土壤中有效性更高的氮素含量^[29]。

本研究中，施肥显著提高了非根际土和根际土的 IEF-N 含量，以单施化肥（CF）处理和化肥配施生物质炭（CFB）处理效果最好，化肥能促进土壤氮形态向 IEF-N 转化。因为化肥是直接将养分施入土壤中，能在短时间内迅速提高土壤的速效养分含量，但是植物只能吸收一小部分，剩下的氮素容易随水流失至地下水中，造成地下水污染等环境问题^[30]。而有机肥和生物质炭具有缓释性和长效性，虽前期的土壤可利用态氮含量低于化肥，但能够满足植物的生长需求，并且持续释放的有效态氮更有利于植株根系对氮的吸收利用^[31]。

本研究发现，M、CFB、MB 和 FMB 处理的根际及非根际土壤中 CF-N 含量均显著高于 CF 处理，以 M 和 MB 处理效果最好。一方面，因为 M、CFB、MB 和 FMB 处理较 CF 处理显著提高了土壤的 pH，减少了土壤 CF-N 的释放，从而提高土壤 CF-N 的含量；另一方面，向土壤中施入有机肥和生物质炭能显著提高土壤有机质含量，增加土壤碳酸盐和有机

物含量，从而促进土壤氮形态向 CF-N 转化。本文还发现，各处理根际土 CF-N 含量均显著高于非根际土，说明 CF-N 存在根际富集效应。这与王晓锋等^[32]的研究结果一致，因为各处理的有机质存在根际富集效应，且 M、MB 和 FMB 处理的根际土 pH 高于非根际土，同时植株根系在根际土中释放的碳源使微生物活性提升并释放大量的胞外酶，从而影响了根际土中氮形态的转化^[33]。

在对可转化氮含量的研究中，4 种可转化态氮（TF-N）在根际及非根际土壤中的含量占比从大到小依次为：IMOF-N>OSF-N>IEF-N>CF-N，说明铁锰氧化物结合态氮（IMOF-N）和有机硫化物结合态氮（OSF-N）是土壤可转化态氮（TF-N）的主要成分。单施化肥或有机肥会导致土壤 IMOF-N 含量下降，而配施生物质炭能显著提高土壤 IMOF-N 含量，以新鲜有机肥+生物质炭（FMB）处理的效果最好，因为，生物质炭能够提高土壤的透气性，降低土壤的厌氧还原水平，有利于 IMOF-N 在土壤中稳定存在，从而提高土壤 IMOF-N 含量^[34]。本研究还发现：施用有机肥和生物质炭较 CF 处理能显著提高根际土 OSF-N 含量，因为生物质炭和有机肥添加到土壤后，会使土壤氮素向较稳定的氮形态转化，延缓土壤氮素养分的释放，减少土壤氮的淋溶流失，提高肥料的利用率，而且，生物质炭还能吸附 NO_3^- 和 NH_4^+ ，所以，有机肥配施生物质炭能减少土壤的氮素流失和氨挥发，提高氮肥利用率，有利于植株根系对氮素的吸收利用，从而促进植株的生长^[35]。

4 结 论

有机肥配施生物质炭（MB 和 FMB）处理能够显著提高根际及非根际土壤 pH、根际土壤有机质和全氮含量。配施生物质炭能促进土壤非可转化态氮（NTF-N）向铁锰氧化物结合态氮（IMOF-N）和有机硫化物结合态氮（OSF-N）这 2 种活性更高的氮形态转化。有机肥配施生物质炭（MB 和 FMB）处理不仅能显著改善根际和非根际土壤养分，还有利于根际和非根际土中非可转化态氮向有效态转化。有机肥配施生物质炭是改善根际及非根际土养分和调控氮转化有效的方式。

参考文献 (References)

- [1] Luo X Q, Wang S J, Liu X M. Nitrogen source and its uptake by plants in terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26 (7): 1094—1100. [罗绪强, 王世杰, 刘秀明. 陆地生态系统植物的氮源及氮素吸收[J]. 生态学杂志, 2007, 26 (7): 1094—1100.]
- [2] Su H T, Guo P Y. Study on the nitrogen forms and release risks of soil nitrogen in estuarine wetland [J]. Energy and Environment, 2019, 3 (03): 2—3+5. [苏海涛, 郭沛涌. 河口湿地土壤氮赋存形态及释放风险研究[J]. 能源与环境, 2019, 3 (03): 2—3+5.]
- [3] Wang S, Wang Z F, Long Y, et al. Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland[J]. Environmental Science, 2020, 41 (5): 2406—2415. [王舒, 王子芳, 龙翼, 等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响[J]. 环境科学, 2020, 41 (5): 2406—2415.]
- [4] Wu A L, Wang J S, Dong E W, et al. Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (1): 176—185. [武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (1): 176—185.]
- [5] Liu Q, Zhang Y H, Liu B J, et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis[J]. Plant and Soil, 2018, 426 (1/2): 211—225.
- [6] Huang R, Wang Y Y, Liu J, et al. Variation in N₂O emission and N₂O related microbial functional genes in straw- and biochar-amended and non-amended soils[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 137: 57—68.
- [7] Yang Y Q, Wang H S, Zhou Y L. Differences of soil nutrients between rhizosphere and non-rhizosphere of different garden plants [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2015, 43 (12): 360—364. [杨亚琴, 王恒松, 周亚利. 不同园林植物根际和非根际土壤养分的差异[J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (12): 360—364.]
- [8] Marinari S, Lagomarsino A, Moscatelli M C, et al. Soil carbon and nitrogen mineralization kinetics in organic and conventional three-year cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 109 (2): 161—168.
- [9] Sabahi H, Veisi H, Soufizadeh S, et al. Effect of fertilization systems on soil microbial biomass and mineral nitrogen during canola (*Brassica napus* L.) development stages[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41 (14): 1665—1673.
- [10] Chen H B, Ma X L, Chen Z B, et al. Carbon, nitrogen and pH in rhizosphere of soil-water conserving plants in rare earth mining area in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5): 1334—1341. [陈海滨, 马秀丽, 陈志彪, 等. 南方稀土矿区水土保持植物根际土壤碳氮及 pH 特征[J]. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1334—1341.]
- [11] Cui W F, Chen J, Lu F K, et al. Effects of biochar and nitrogen reduction on soil nutrient and fertility[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34 (11): 2429—2436. [崔文芳, 陈静, 鲁富宽, 等. 生物炭与氮肥减量调控对土壤养分和肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34 (11): 2429—2436.]
- [12] Yan J R, Lü Q X, Gao Z P, et al. Effects of organic fertilizer and biochar on physicochemical properties of sandy soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47 (9): 303—307. [燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (9): 303—307.]
- [13] Liu Y, Khan M J, Jin H Y, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (4): 849—858. [刘园, M. Jamal Khan, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52 (4): 849—858.]
- [14] Shen J B, Mao D R. Research methods of plant nutrition[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011. [申建波, 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 3 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.]
- [15] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146—165. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146—165.]
- [16] Ma H B, Song J M, Lü X X, et al. Nitrogen forms and their functions in recycling of the Bohai Sea sediments[J]. Geochimica, 2003, 32 (1): 48—54. [马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. 地球化学, 2003, 32 (1): 48—54.]
- [17] Cheng L. Effect of flooding on soil nitrogen forms distribution and related enzyme, bacteria in the water level fluctuating zone of Three Gorges reservoir[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [程丽. 淹水对三峡库区消落带土壤氮形态分布及相关酶、细菌的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [18] Zhou J, Xia F, Liu X M, et al. Effects of nitrogen fertilizer on the acidification of two typical acid soils in South China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14 (2): 415—422.
- [19] Zhao M Q, Jin F L, Sun Z W, et al. Effects of pyrolysis condition on basic group of biochar and amelioration of acid soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (4): 299—303, 309. [赵牧秋, 金凡莉, 孙照炜, 等. 制炭条件对生物炭碱性基团含量及酸性土壤改良效果的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (4): 299—303, 309.]
- [20] Hue N V. Alleviating soil acidity with crop residues[J]. Soil Science, 2011, 176 (10): 543—549.

- [21] Wang Q, Geng Z C, Xu C Y, et al. Effects of biochar application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in Lou soil[J]. *Environmental Science*, 2020, 41 (5): 2425—2433. [王强, 耿增超, 许晨阳, 等. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41 (5): 2425—2433.]
- [22] Zhang Q Q, Song Y F, Wu Z, et al. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118435.
- [23] Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. *Environmental Science*, 2016, 37 (9): 3634—3641. [王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37 (9): 3634—3641.]
- [24] Chen C R, Phillips I R, Condon L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367 (1/2): 301—312.
- [25] Shen H J, Zhang Q Q, Zhang X, et al. In situ effects of biochar field-aged for six years on net N mineralization in paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104766.
- [26] Li M, Li Z P, Liu M, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (7): 1361—1369. [李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (7): 1361—1369.]
- [27] Yang S M, Li F M, Suo D R, et al. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu oasis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (10): 2043—2052. [杨生茂, 李凤民, 索东让, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38 (10): 2043—2052.]
- [28] Song D L, Xi X Y, Huang S M, et al. Effects of combined application of straw biochar and nitrogen on soil carbon and nitrogen contents and crop yields in a fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (2): 369—379. [宋大利, 习向银, 黄绍敏, 等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (2): 369—379.]
- [29] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. A wood based low-temperature biochar captures $\text{NH}_3\text{-N}$ generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353 (1/2): 73—84.
- [30] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (9): 1095—1103. [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.]
- [31] Zhao Y Y, Zhang Y P, Liu Q, et al. Effects of organic fertilizer and biochar on soil nutrient accumulation and utilization and Chinese cabbage yield in dryland[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32 (14): 119—125. [赵易艺, 张玉平, 刘强, 等. 有机肥和生物炭对旱地土壤养分累积利用及小白菜生产的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (14): 119—125.]
- [32] Wang X F, Yuan X Z, Liu H, et al. Nutrient characteristics and nitrogen forms of rhizosphere soils under four typical plants in the littoral zone of TGR[J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (10): 3662—3673. [王晓锋, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡库区消落带 4 种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态[J]. *环境科学*, 2015, 36 (10): 3662—3673.]
- [33] Koranda M, Schneck J, Kaiser C, et al. Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech - The influence of plant C exudates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (3): 551—558.
- [34] Li S, Li H L, Fang X B, et al. Biochar input to reduce trace greenhouse gas emission in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (21): 234—240. [李松, 李海丽, 方晓波, 等. 生物质炭输入减少稻田痕量温室气体排放[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (21): 234—240.]
- [35] 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.

(责任编辑: 卢 萍)