

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.031

引用格式:蒲俊宇, 苏颖佳, 王新生, 等. 炭化及改性牛粪添加对盐碱化草地土壤的改良效应评估[J]. 草地学报, 2026, 34(1): 331–339

PU Jun-yu, SU Ying-jia, WANG Xin-sheng, et al. Evaluation of the Improvement Effects of Carbonized and Modified Cattle Manure Additions on Salinized Grassland Soils[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1): 331–339

炭化及改性牛粪添加对盐碱化草地土壤的改良效应评估

蒲俊宇¹, 苏颖佳¹, 王新生¹, 乔建霞², 邢志贤³, 杜金山¹, 洪逸楠¹, 刘克思^{1,4*}

(1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 2. 乌兰察布市草原工作站, 内蒙古 乌兰察布 012000; 3. 河北省生态环境监测中心, 河北 石家庄 050037; 4. 河北沽源草地生态系统国家野外站, 河北 张家口 076550)

摘要: 草地土壤盐碱化严重影响区域畜牧业发展, 亟需改良盐碱化土地以提升土地质量保障草原生产生态安全。本研究以牛粪(NF)为原料, 通过不同温度炭化(400℃炭化处理, NF4; 500℃炭化处理, NF5)及对应改性(Ca4、Ca5)处理评估它们对盐碱化草地土壤的改良效应, 为牛粪的科学资源化利用和盐碱地土壤改良提供数据和技术支撑。研究结果发现向盐碱化草地土壤添加NF、NF4、NF5和Ca4显著降低土壤pH($P < 0.05$)。各种牛粪添加处理不同程度降低土壤总碱度, 添加NF5的处理土壤总碱度下降最大。添加炭化牛粪及其改性材料后, 土壤可溶性钠离子含量显著降低($P < 0.05$), 其中NF4和Ca4降低效果最好。添加炭化牛粪及其改性材料显著提高土壤有机碳含量($P < 0.05$), 一定程度提高有效磷和交换性钾含量。综合来看, NF4可兼顾盐碱土降碱与养分提升需求, 可以作为利用牛粪改良盐碱土壤时的优先选择。

关键词: 盐碱化土壤; 炭化牛粪; 牛粪改性; 土壤碱度; 土壤营养

中图分类号: S156.4+1

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)01-0331-09

Evaluation of the Improvement Effects of Carbonized and Modified Cattle Manure Additions on Salinized Grassland Soils

PU Jun-yu¹, SU Ying-jia¹, WANG Xin-sheng¹, QIAO Jian-xia², XING Zhi-xian³,
DU Jin-shan¹, HONG Yi-nan¹, LIU Ke-si^{1,4*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Grassland Workstation of Ulanqab City, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China; 3. Hebei Ecological Environment Monitoring Center, Shijiazhuang, Hebei Province 050037, China; 4. National field station of grassland ecosystem in Guyuan, Zhangjiakou, Hebei Province 076550, China)

Abstract: Soil salinization of grassland seriously affects the development of regional animal husbandry. It is urgent to improve the salinized land to enhance its quality and ensure the ecological security of grassland production. In this study, cattle manure (NF) was utilized as raw material to produce biochar through carbonization at different temperatures (400℃, NF4; 500℃, NF5), with corresponding Ca(NO₃)₂-modified counterparts (Ca4, Ca5). These amendments were systematically evaluated for their remediation effects on saline-alkali grassland soils, to provide data and technical support for sustainable manure valorization and salinized soil improvement. Biochar and its modified counterparts amendments significantly reduced both soil pH and total alkalinity ($P < 0.05$), with NF4 showing the greatest pH decrease and NF5 exhibiting the maximum alkalinity reduction. Soluble sodium content was significantly reduced ($P < 0.05$), with NF4 and Ca4 showing the highest reductions. Biochar amendments also significantly increased soil organic carbon ($P < 0.05$), available phos-

收稿日期: 2025-04-01; 修回日期: 2025-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(32271764); CARS专项资金(CARS-34)共同资助

作者简介: 蒲俊宇(2002-), 女, 汉族, 重庆万州人, 硕士研究生, 主要从事草地生态与管理方面研究, E-mail: beihai1109@126.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: kliu@cau.edu.cn

phorus, and exchangeable potassium, with carbonized manure demonstrating the greatest improvements. Overall, NF4 optimally balanced alkalinity reduction and nutrient enhancement, suggesting its priority for saline-alkali soil remediation when using cattle manure to improve saline soil.

Key words: Saline soil; Carbonized manure; Manure modification; Soil alkalinity; Soil nutrients

在自然因素与不合理利用水土资源等人类活动的共同作用下,土壤表层可溶性盐含量不断增加导致水盐失调形成土壤盐碱化^[1]。土壤盐碱化引起的过量 Na^+ 累积破坏土壤团聚体形成,堵塞孔隙,降低土壤渗水性和透气性,过量的交换性钠可通过产生渗透胁迫,抑制植物吸收水分引起生理干旱,也可通过离子毒害影响植物蛋白质合成和对其他营养物质的吸收,导致植物生理代谢紊乱等^[2]。草地作为最大的陆地生态系统大部分都处于年降水量较少的区域^[3],近年来由于利用管理不当,许多草地系统也进行着盐碱性的退化演替^[4],导致草地植物多样性和生产力下降^[5],严重影响着区域畜牧业的发展和生态安全。因此,急需对盐碱化土地进行改良以提升土地质量保障农业粮食生产和草原生态安全。

针对土壤盐碱化问题,目前已开展了相关的研究和技术攻关,生物炭凭借独特的性状优势成为新兴的土壤改良剂^[6],其可通过改良盐碱地土壤物理结构和化学性质同态调控土壤盐分,同时促进养分循环,提高微生物活性和养分有效性,促进植物对养分的吸收,具有快速改良和效果持久的特性^[7-9]。常用的生物炭包括各种农作物秸秆、果壳果核和木材加工废料等制备的生物炭,这些以植物性材料为原料的生物炭具有较多的孔隙结构和较高的比表面积,有利于对盐离子的吸附,但存在产率低、养分单一等局限性^[10-11]。以牛粪、猪粪等富含矿物质的畜禽粪便为原料的生物炭具有灰分含量高、养分丰富的特点,同时也存在重金属超标和抗生素残留的局限性^[12,13]。随着我国畜牧业快速发展,畜禽粪污问题日益严峻,我国畜禽粪污年产量可达3.8 Gt,牛粪产量近1.4 Gt^[14]。牛粪作为主要畜禽有机废弃物,如果直接还田,虽然能在一定程度上改善土壤性状,但牛粪中大量的易腐败物、有害污染物、病原菌等可能加剧土壤问题和环境污染^[15]。对牛粪进行高温热解炭化可以有效消除病原物、固化重金属物质,并保留牛粪中丰富的有机质和其他养分,同时保持生物炭的优良特性^[16-18]。因此对牛粪进行炭化和改性处理后添加可能在改良盐碱化土壤理化性质并提高土壤养分含量方面产生良好的效果。

目前我国牛粪生物炭化及改性在盐碱地改良

中应用较少,本研究对炭化牛粪及其改性材料在盐碱化草地土壤的改良效果进行评估,为牛粪的科学资源化利用和盐碱地土壤的改良提供数据支持和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试土壤取自河北省张家口市沽源县国家草地生态系统野外观测研究站盐碱地(表层0~30 cm),盐碱地类型为混合型盐碱地。该站地处为东经114°25',北纬40°16',海拔1470 m,年均温为6℃,年降雨量为400 mm左右,属于北温带半湿润大陆性季风气候^[19]。供试土壤的基本性质为土壤pH: 9.16,土壤电导率(Electrical conductivity): 1984.67 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,土壤总碱度(Total alkalinity): 1380.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤可溶性钠含量(Soluble sodium): 965.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤有机碳(Soil organic carbon): 8.30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤有效磷(Available phosphorus): 14.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤交换性钾(Exchangeable potassium): 332.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

原牛粪(NF)取自河北省张家口市沽源县坝上草原牛场,在风干后用炭化炉分别在400℃和500℃下进行150 min的缺氧热裂解形成不同温度的炭化牛粪,分别命名为NF4和NF5。然后取部分NF4和NF5在0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 溶液中浸泡改性48 h,期间适时翻动搅拌以便充分浸润。浸泡结束后,取出浸泡材料在马弗炉中200℃下烘6 h,然后取出形成改性炭化牛粪,分别命名为Ca4和Ca5。牛粪及其炭化、改性材料理化性质如表1。

制备的NF, NF4, NF5, Ca4和Ca5按照4%(80 g)的添加量分别与2 kg过2 mm筛的供试土壤均匀混合,然后转移至直径16 cm、高17.5 cm的土培试验盆中开始进行为期130 d的土壤培养试验,试验于室温条件为25℃的温室展开。同时制备1个不含任何添加物仅有2 kg土壤的土培盆作为对照,形成包括对照(不添加牛粪,CK)的6个处理。每个处理重复3次。此后根据沽源县全年降水分布集中于6—8月的气候特征,培养期间对不同处理以总计400

mm 降水量进行水分管理,每盆试验盆共计加入 8040 mL 蒸馏水(以试验盆横截面作为降水面积进行计算),一周 2 次,每次加入 216.5 mL。于土壤培

养 130d 混匀试验盆土壤后进行土壤样品采集,测定土壤盐碱化指标和养分指标,评估不同温度炭化牛粪及其改性料对盐碱化土壤的改良效应。

表 1 牛粪及其炭化、改性材料理化性质

Table 1 Characteristics of manure biochar and modified substance

添加材料 Additive	pH	电导率 Electrical conductivity/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机碳 Soil organic carbon/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available phosphorus/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
NF	7.65 $\pm$ 0.07 ^b	2834.33 $\pm$ 475.66 ^c	3.66 $\pm$ 0.72 ^d	17.34 $\pm$ 8.64 ^b
NF4	7.49 $\pm$ 0.06 ^c	4395 $\pm$ 207.18 ^b	7.75 $\pm$ 1.54 ^c	31.17 $\pm$ 3.42 ^b
NF5	9.54 $\pm$ 0.04 ^a	5925 $\pm$ 81.69 ^a	10.91 $\pm$ 1.34 ^b	62.13 $\pm$ 14.42 ^a
Ca4	7.12 $\pm$ 0.03 ^e	2371.67 $\pm$ 62.53 ^d	11.12 $\pm$ 2.57 ^b	14.6 $\pm$ 6.63 ^b
Ca5	7.26 $\pm$ 0.03 ^d	3060.33 $\pm$ 92.45 ^c	14.55 $\pm$ 1.27 ^a	19.23 $\pm$ 5.73 ^b

注: NF, 风干牛粪; NF4, 400℃炭化牛粪; NF5, 500℃炭化牛粪; Ca4, 400℃改性牛粪; Ca5, 500℃改性牛粪。不同小写字母表示各处理之间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: NF, air-dried manure; NF4, manure biochar at 400℃; NF5, manure biochar at 500℃; Ca4, calcium nitrate modified manure biochar at 400℃; Ca5, calcium nitrate modified manure biochar at 500℃. Different lowercase letters between treatments mean significant differences ($P<0.05$). The same as below

1.2 测定指标与方法

测定的土壤盐碱化指标和养分指标包括土壤 pH、电导率、总碱度、可溶性钠含量、土壤有机碳、硝态氮、铵态氮、有效磷和交换性钾。具体测定方法简述如下:

pH 和电导率: 称取过 2 mm 筛的风干土样于 50 mL 离心管中, 采用土水比 1:5 进行浸提, 利用 pH 计和电导率测定仪测定(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司, FE20 和 FE38)。

总碱度: 酚酞和溴酚蓝双指示剂滴定法^[20]。

可溶性钠: 称取 5 g 过 2 mm 筛的干土, 按照土水比 1:5 提取土壤浸提液, 稀释适当倍数后, 使用火焰光度计测定经水系滤膜过滤的土壤浸提液^[21]。

有机碳: 采用重铬酸钾-稀释热法^[20]。

铵态氮和硝态氮: 称取过 2 mm 筛的鲜土 5 g 于 50 mL 离心管中, 加入 2 mol·L⁻¹ 的氯化钾溶液 25 mL, 塞紧瓶盖, 于室温下震荡 1 h。使用全自动流动分析仪(FIA Compact, Germany)测定用定性滤纸过滤的土壤浸提液^[21]。

有效磷: 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定^[20]。

交换性钾: 称取 2 g 过 2 mm 筛的干土, 用乙醇-乙二醇溶液淋洗除去可溶性离子后, 加入 1 mol·L⁻¹ 的乙酸铵(NH₄OAc)溶液 40 mL, 振荡 30 min, 利用水系滤膜立即过滤。使用火焰光度计测定稀释适当倍数后的土壤浸提液^[21]。

1.3 数据分析

利用 R4.3.2 对试验数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 检验(置信度为 95%),

分析土壤盐碱化指标和养分指标对不同热解温度炭化牛粪及其改性材料添加的响应差异, 并进行绘图; 对所有土壤盐碱化指标和养分指标进行最大-最小归一化处理等权重加和作为综合指标, 分析不同热解温度炭化牛粪及其改性材料添加对盐碱化土壤的综合影响。

2 结果与分析

2.1 土壤盐碱化指标对炭化牛粪及其改性材料添加的响应

牛粪及其改性材料添加对盐碱化土壤的碱化指标均产生影响。与对照相比, 添加牛粪(NF)、炭化牛粪(NF4、NF5)及 400℃改性牛粪(Ca4)后, 土壤 pH 值显著降低, 降低幅度分别为 3.59%, 6.89%, 3.49% 和 2.50% ($P<0.05$); 添加 500℃改性牛粪(Ca5)后, 土壤 pH 值与对照无显著差异(图 1a)。

添加风干牛粪(NF)显著提高土壤电导率, 从 584.27 升高至 721.83 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($P<0.05$); 添加炭化牛粪(NF4、NF5)及其改性材料(Ca4、Ca5)的处理土壤电导率与对照相比无显著差异, 但添加 400℃炭化牛粪及其改性材料(NF4、Ca4)后, 土壤电导率均表现出一定的降低趋势(图 1b)。

牛粪及其改性材料添加降低土壤总碱度。添加 NF 后, 土壤总碱度由 1251.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (CK) 降至 907.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 添加炭化牛粪(NF4、NF5)的处理土壤总碱度分别降至 809.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 807.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 与对照相比, 添加改性牛粪(Ca4、Ca5)的处理分别降低 264.27 和 87.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2)。总体来看, 添加未经改性的炭化牛粪在降低土壤总碱度方面效果最佳。

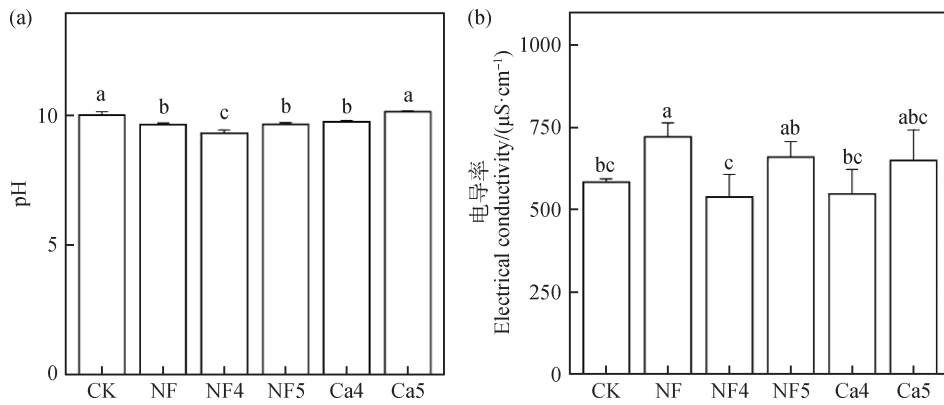


图1 炭化及改性牛粪添加对盐碱化土壤pH和电导率的影响

Fig. 1 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on pH and electrical conductivity of salt-alkali soil

注:CK,对照组;NF,风干牛粪;NF4,400℃炭化牛粪;NF5,500℃炭化牛粪;Ca4,400℃改性牛粪;Ca5,500℃改性牛粪。不同小写字母表示各处理之间差异显著($P<0.05$)。下同

Note:CK, control group; NF, air-dried manure; NF4, manure biochar at 400℃; NF5, manure biochar at 500℃; Ca4, calcium nitrate modified manure biochar at 400℃; Ca5, calcium nitrate modified manure biochar at 500℃. Different lowercase letters between treatments mean significant differences ($P<0.05$). The same as below

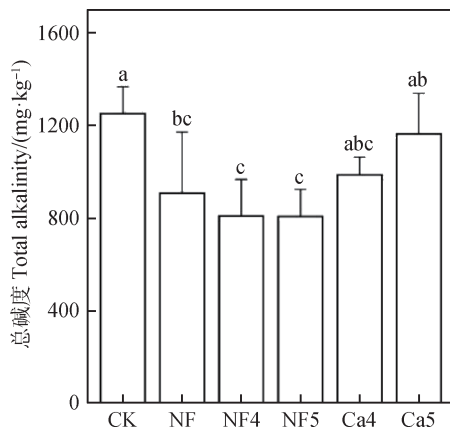


图2 炭化及改性牛粪添加对土壤总碱度的影响

Fig. 2 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on total alkalinity of salt-alkali soil

牛粪及其改性材料添加均显著降低土壤可溶性钠离子含量($P<0.05$)。与对照(CK, 392.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,添加400℃炭化牛粪及改性材料(NF4、Ca4)后,土壤可溶性钠离子含量分别降低252.43和260.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而添加500℃炭化牛粪及其改性材料(NF5、Ca5)的处理分别降低76.22和114.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与添加风干牛粪(NF)的效果相似(图3)。这表明炭化牛粪及其改性材料对降低盐碱土壤中可溶性钠离子含量具有较好的效果。

2.2 土壤主要养分对炭化牛粪及其改性材料添加的响应

牛粪及其改性材料添加对盐碱化土壤有机碳含量均产生影响。与对照相比,添加炭化牛粪

(NF4、NF5)及其改性材料(Ca4、Ca5)后,土壤有机碳含量显著增加($P<0.05$),增幅分别为66.70%,88.69%,79.82%和72.22%;添加风干牛粪(NF)后,土壤有机碳含量与对照无显著差异(图4)。炭化牛粪具有提高土壤有机碳的作用,对其改性在提高土壤有机碳含量方面无显著优势。

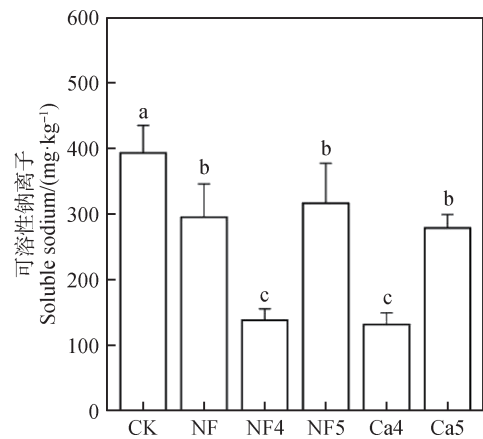


图3 炭化及改性牛粪添加对土壤可溶性钠离子含量的影响

Fig. 3 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on soluble sodium of salt-alkali soil

牛粪及其改性材料添加对土壤中无机氮均产生不利影响。与对照相比,牛粪(NF)、炭化牛粪(NF4、NF5)及其改性材料(Ca4、Ca5)的添加对土壤中硝态氮含量无显著影响,硝态氮含量维持在0.85~1.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;但均导致土壤铵态氮含量显著降低,下降至1.87~6.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$,图5)。

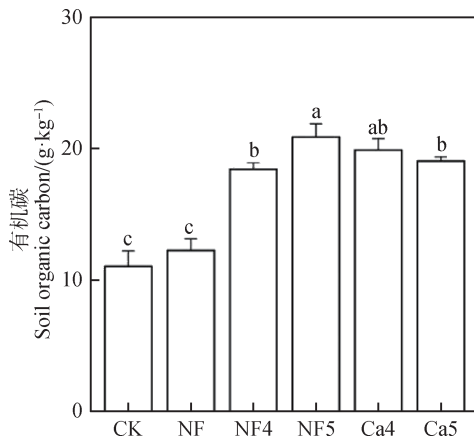


图4 炭化及改性牛粪添加对土壤有机碳含量的影响

Fig. 4 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on organic carbon of salt-alkali soil

牛粪及其改性材料添加对土壤有效磷含量均产生影响。与对照相比,炭化牛粪(NF4、NF5)及其改性材料(Ca4、Ca5)的添加均显著提高土壤有效磷含量($P < 0.05$),其中添加500℃炭化牛粪(NF5)的效果最好,可

提升至47.76 mg·kg⁻¹;添加风干牛粪(NF)的处理土壤有效磷含量与对照无显著差异(图6)。这表明炭化牛粪及其改性材料可以提高土壤中磷的可用性。

牛粪及其改性材料添加可不同程度影响土壤交换性钾含量,其中,与对照相比,添加炭化牛粪(NF4、NF5)和500℃改性牛粪(Ca5)均显著提高土壤交换性钾含量($P < 0.05$)(图7)。添加500℃炭化牛粪(NF5)后,土壤交换性钾含量上升至1115.74 mg·kg⁻¹,增幅可达235.76%;添加风干牛粪(NF)和400℃改性牛粪(Ca4)的处理土壤交换性钾含量与对照无显著差异。

2.3 炭化牛粪及其改性材料添加对盐碱化土壤的综合改良效果

炭化牛粪及其改性材料添加对盐碱化土壤的综合改良效果均显著高于牛粪添加($P < 0.05$)(表2)。其中400℃炭化牛粪(NF4)添加的综合指标得分最高,可达7.01,表明400℃炭化牛粪(NF4)添加对盐碱化土壤的综合改良效果最好。

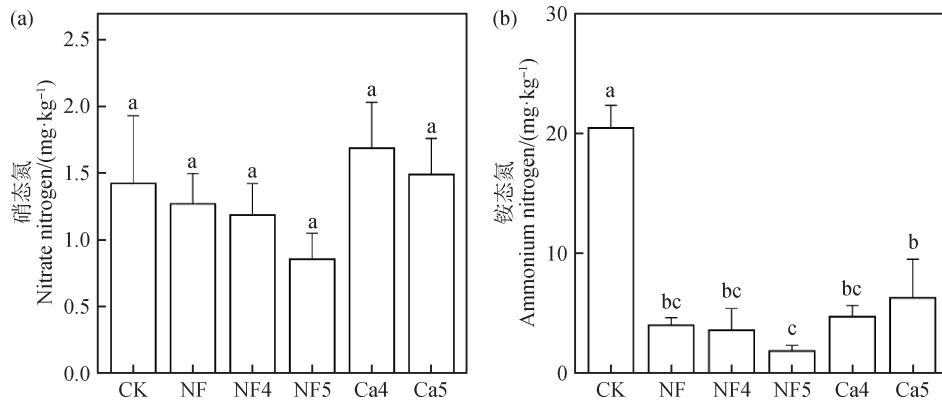


图5 炭化及改性牛粪添加对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

Fig. 5 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on nitrate nitrogen and ammonium nitrogen of salt-alkali soil

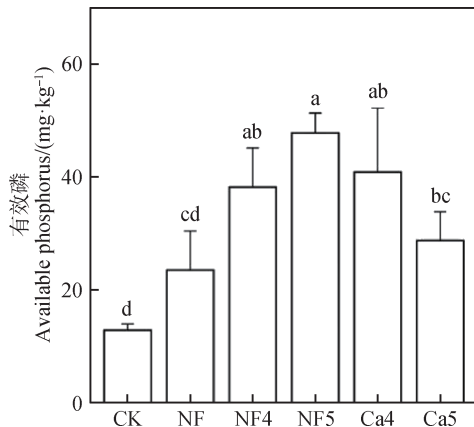


图6 炭化及改性牛粪添加对土壤有效磷含量的影响

Fig. 6 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on available phosphorus of salt-alkali soil

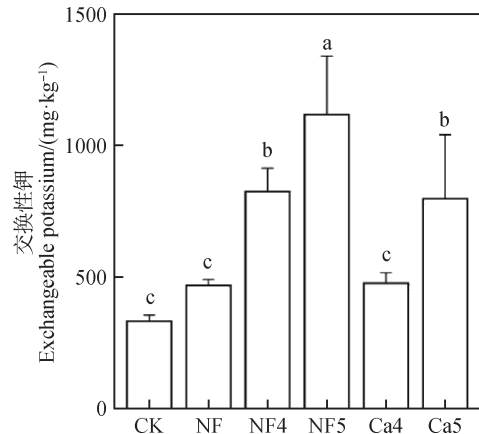


图7 炭化及改性牛粪添加对土壤交换性钾含量的影响

Fig. 7 Effects of the addition of manure biochar and modified substance on exchangeable potassium of salt-alkali soil

表 2 炭化及改性牛粪添加对盐碱化土壤的综合影响

Table 2 Comprehensive Effects of the addition of manure biochar and modified substance of salt-alkali soil

处理 Treatment	NF	NF4	NF5	Ca4	Ca5
综合指标 Composite indicator	3.14±0.6 ^c	7.01±0.56 ^a	6.58±0.29 ^a	6.32±0.91 ^{ab}	4.94±1.32 ^b

3 讨论

3.1 炭化牛粪及其改性材料添加对土壤盐碱化指标的影响

生物炭作为一种对土壤改良的材料,向不同类型的土壤中添加会对土壤 pH 值产生不同的影响。有研究表明向酸性土壤中添加生物炭可以提高土壤 pH,也有研究表明向碱性土壤中添加生物炭可以降低土壤 pH 值^[22,23]。本研究中,向盐碱性土壤中添加炭化牛粪及其改性材料对土壤 pH 值均起到降低的作用,与之相应的土壤总碱度(通常包含碳酸盐、碳酸氢盐、交换性和水解性碱度)也表现出一致的下降变化趋势。其下降的原因可能是:首先,pH 值更低的生物炭与盐碱性土壤混合后降低了土壤 pH 值;其次,向土壤中添加生物炭这一多孔性材料,有利于改善土壤的孔隙结构,降低土壤容重,增加土壤的通气性和持水能力,改善了土壤的物理性质,进而间接影响土壤的 pH 值和土壤总碱度^[24,25];第三,土培过程中炭化牛粪及改性材料会分解释放酸性基团中和一部分碱性基团,使土壤 pH 值和总碱度下降^[26];第四,粪便类生物炭中含有的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等金属离子可以将盐碱土中的交换性 Na^+ 置换,加速土壤中 Na^+ 的淋洗,从而降低 pH^[27]。研究表明,热解温度上升伴随着生物炭微孔结构和比表面积的提高,有利于吸附并降低土壤 Na^+ ^[28]。此外,高温炭化生物炭灰分中碳酸盐比例较高,使其表现高碱度的特性,但添加后易被交换并随水分迁移离去,对土壤 pH 和总碱度的贡献较为短暂^[29]。因此,向土壤中添加具有最高的 pH 和 EC 的 NF5 仍具有降低土壤盐碱化程度的效果(表 1)。

盐碱土壤中过量 Na^+ 不仅通过降低土壤颗粒间凝聚力破坏团聚体结构^[30],导致通气性和渗透性下降^[31],其高渗透压和离子拮抗作用还会抑制植物对水分及养分的吸收^[32]。本研究中,向盐碱土壤添加牛粪及其炭化和改性材料可以不同程度降低土壤可溶性 Na^+ 含量。有研究报道向土壤中添加生物炭可以降低土壤容重,提高土壤渗透性,并增加土壤阳离子交换能力,有助于土壤中的 Na^+ 的置换和淋失^[33]。牛粪通过合适温度炭化后降盐效果更佳,本

研究中添加热解温度为 400℃ 的牛粪生物炭对降低土壤可溶性 Na^+ 含量的效果较好,与韩剑宏(玉米秸秆-污泥生物炭)和 Tan(小麦秸秆生物炭)的研究结果一致^[34,35],可能是因为牛粪的主要成分也是草本纤维,在该温度下可以形成更良好的孔隙结构和表面特性。

3.2 炭化牛粪及其改性材料添加对盐碱化土壤养分的影响

土壤中有机碳在炭化牛粪及改性材料添加后显著提高。这与前人研究结果一致。万云星等的研究中发现,添加生物炭显著提高土壤有机碳含量及其组分含量^[36]。这是因为高温热解产生的生物炭芳香碳结构比例高,化学稳定性和生物稳定性更好,不易分解,有利于碳的长期封存^[37]。另一方面,生物炭的孔隙结构增加了对土壤有机碳等养分的吸附能力,同时,添加生物炭有利于土壤团聚体的形成与稳定,通过团聚体的物理保护作用,降低微生物对有机碳的分解速率^[38]。另外,Chen 等^[39]的研究结果发现,生物炭的添加改变了土壤细菌和真菌的组成和共现网络,产生负激发效应,降低了土壤有机碳的矿化速率。随着热解温度的升高,生物炭芳香性增强,形成更多的稳定结构,增加土壤稳定态有机碳含量^[40]。而 $Ca(NO_3)_2$ 改性可能导致生物炭孔隙结构堵塞并减少对可溶性有机碳的保护作用或在改性过程中形成碳酸钙沉淀,导致提高有机碳含量的效果减弱^[41]。

牛粪及其炭化和改性材料添加后土壤理化性质的变化会影响土壤微生物和酶活性,从而影响氮的化学转化,导致土壤氮的流失或固持^[42-44]。盐碱土壤中较高的盐分含量会抑制硝化作用,引起土壤铵态氮的积累进而提高土壤氨挥发量,Zhu 等^[45-46]的研究结果表明在中度盐碱化的土壤中添加生物炭会引起土壤对铵态氮的吸附能力下降,且氨挥发量增加。同时,生物炭表面所带的负电荷与其丰富的孔隙结构为 NH_4^+ 提供了静电吸附和物理吸附的条件^[47]。这可能是导致牛粪及其炭化和改性材料添加后土壤中铵态氮下降的重要原因。

土壤中有效磷的含量在牛粪及其炭化和改性

材料添加后显著提高,其中炭化牛粪处理中更高。可能因为热解使牛粪中的有机磷分解转化为无机磷,导致土壤中可用磷的含量提高。随着牛粪生物炭制备温度的升高,磷在生物炭中的形态会发生转变,从有机磷或弱结合态向更易释放的无机磷形态转化^[48]。本研究中添加500℃炭化牛粪的处理具有最高的土壤有效磷含量,与500℃炭化牛粪效磷含量最高相对应(表1),这与Yang等^[49]的研究结果类似。而经过Ca(NO₃)₂改性的牛粪生物炭会导致土壤中Ca²⁺提高,更易于形成稳定的磷酸钙,降低磷有效性^[50]。

盐碱土壤中钾的含量在炭化牛粪添加后显著增加,可能因为生物炭含有大量的钾元素,可以直接释放到土壤中,也有利于转化为各种形式的钾^[51]。另外,生物炭高吸附能力帮助固定土壤中容易流失的钾离子,为作物生长提供稳定的钾来源^[52]。Zheng等^[53]的研究结果表明,随着热解温度的上升,生物炭钾含量逐渐上升,这印证了本研究中添加500℃的炭化牛粪的土壤中交换性钾含量高于添加400℃的炭化牛粪处理。而改性生物炭负载高价阳离子或产生更多表面官能团,在与Na⁺交换或吸附过程中更具优势,抑制K⁺释放至土壤的效率,削弱提高土壤交换性钾含量的效果^[54]。

4 结论

盐碱化草地土壤添加牛粪(NF)、炭化牛粪(NF4、NF5)及其改性材料(Ca4、Ca5)整体上对盐碱化土壤的碱化指标和主要养分产生差异化的改良效应。与对照相比,各种牛粪添加处理均显著降低盐碱化草地土壤的pH、土壤总碱度和土壤可溶性钠离子含量,其中400℃炭化牛粪表现出最好的效果。在养分方面,炭化牛粪及其改性材料的添加显著提高土壤有机碳含量;土壤硝态氮含量在各种牛粪添加处理后变化不大,但铵态氮含量显著降低;土壤中有效磷含量在炭化牛粪及其改性材料的添加后显著提高;土壤交换性钾在不同牛粪添加处理后也不同程度的提高,其中炭化牛粪对其提升程度最大。综合来看,400℃炭化牛粪可兼顾盐碱土降碱与养分提升需求,因此建议在利用牛粪改良盐碱土壤时优先选用400℃炭化牛粪作为盐碱土改良剂。

参考文献

[1] SHOKRI N, HASSANI A, SAHIMI M. Multi-scale soil salini-

zation dynamics from global to pore scale: a review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2024, 62(4): e2023RG000804

- [2] SAIFULLAH, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 625: 320-335
- [3] DIXON A P, FABER-LANGENDOEN D, JOSSE C, et al. Distribution mapping of world grassland types [J]. *Journal of Biogeography*, 2014, 41(11): 2003-2019
- [4] 韦银珠, 李家红, 孙雪铜, 等. 松嫩盐碱退化草地土壤理化性质及离子变化规律分析 [J]. *草地学报*, 2024, 32(6): 1702-1709
WEI Y Z, LI J H, SUN X T, et al. Analysis of soil physical and chemical properties and ion variation rule of saline-alkali degraded grassland in Songnen [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(6): 1702-1709
- [5] HAMMER E C, FORSTREUTER M, RILLIG M C, et al. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 114-121
- [6] 张倩茹, 冀琳宇, 高程程, 等. 改性生物炭的制备及其在环境修复中的应用 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5): 913-925
ZHANG Q R, JI L Y, GAO C C, et al. Preparation of modified biochar and its application in environmental remediation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 913-925
- [7] XIAO L, MENG F D. Evaluating the effect of biochar on salt leaching and nutrient retention of Yellow River Delta soil [J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(4): 740-750
- [8] ABU ZIED AMIN A E. Comparative effects of different kinds of biochar on ammonia volatilization and chemical properties of saline soil [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(9): 1600-1613
- [9] 李玮, 汪军, 徐汝民, 等. 污泥生物炭添加对黑麦草和土壤养分特性的影响 [J]. *草地学报*, 2024, 32(4): 1295-1302
LI W, WANG J, XU R M, et al. Effects of sludge biochar addition on ryegrass and soil nutrient properties [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1295-1302
- [10] 冯勇, 楚合营, 李凡, 等. 棉秆生物炭添加对棉花种子萌发感应作用研究 [J]. *塔里木大学学报*, 2019, 31(3): 45-49
FENG Y, CHU H Y, LI F, et al. Allelopathy of cotton stalk biochar on germination of cotton seeds [J]. *Journal of Tarim University*, 2019, 31(3): 45-49
- [11] 李际会, 魏萍, 杨宝山, 等. 秸秆及生物炭对土壤盐分含量和小白菜发芽的影响 [J]. *北方园艺*, 2021(3): 13-19
LI J H, WEI P, YANG B S, et al. Effects of straw and biochar on soil salt content and germination of Chinese cabbage [J]. *Northern Horticulture*, 2021(3): 13-19
- [12] HASSAN M, LIU Y J, NAIDU R, et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140714
- [13] 单英杰, 章明奎. 不同来源畜禽粪的养分和污染物组成 [J].

- 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 80-86
- SHAN Y J, ZHANG M K. Contents of nutrient elements and pollutants in different sources of animal manures [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 80-86
- [14] 刘春, 刘晨阳, 王济民, 等. 我国畜禽粪便资源化利用现状与对策建议[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(2): 35-43
- LIU C, LIU C Y, WANG J M, et al. The current situation of resource utilization of livestock and poultry manure in China and the countermeasures and suggestions [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(2): 35-43
- [15] 屈璐璐, 刘芳, 贾海凤, 等. 我国牛粪污资源化利用研究进展[J]. 现代畜牧兽医, 2025(1): 80-84
- QU L L, LIU F, JIA H F, et al. Research progress on resource utilization of cow manure in China [J]. Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2025(1): 80-84
- [16] HUANG H, YAO W L, LI R H, et al. Effect of pyrolysis temperature on chemical form, behavior and environmental risk of Zn, Pb and Cd in biochar produced from phytoremediation residue [J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 487-493
- [17] MENG J, LIANG S J, TAO M M, et al. Chemical speciation and risk assessment of Cu and Zn in biochars derived from co-pyrolysis of pig manure with rice straw [J]. Chemosphere, 2018, 200: 344-350
- [18] 张进红, 林启美, 赵小蓉, 等. 不同炭化温度和时间下牛粪生物炭理化特性分析与评价[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 298-305
- ZHANG J H, LIN Q M, ZHAO X R, et al. Physico-chemical characteristics and evaluation of cow manure hydrochar at different carbonization temperatures and durations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 298-305
- [19] 白雅芳. 垦殖草地持续利用对有机碳在土壤粒径中分布的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 6
- BAI Y F. Effects of Sustainable Utilization of Reclaimed Grassland on the Distribution of Organic Carbon in Soil Particle Sizes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 6
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-40
- BAO S D. Soil Agro-Chemical Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 30-40
- [21] 何宜璇. 草地盐碱土对不同温度裂解的麦秆生物炭添加的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2022: 16-27
- HE Y X. Response of saline-alkali soil in grassland to the addition of wheat straw biochar pyrolyzed at different temperatures [D]. Beijing: China Agricultural University, 2022: 16-27
- [22] 何宜璇, 刘克思. 生物炭对草地盐碱土盐碱化特征和土壤养分的影响[J]. 乡村科技, 2023, 14(13): 126-130
- HE Y X, LIU K S. Effects of biochar on salinization characteristics and soil nutrients of grassland saline-alkali soil [J]. Xiang Cun Ke Ji, 2023, 14(13): 126-130
- [23] SHI R Y, NI N, NKO H J N, et al. Biochar retards Al toxicity to maize (*Zea mays* L.) during soil acidification: the effects and mechanisms [J]. Science of The Total Environment, 2020, 719: 137448
- [24] OUYANG L, ZHANG R D. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(9): 1561-1572
- [25] SUN J, YANG R, LI W, et al. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(11): 3271-3279
- [26] 魏盈, 焦乐, 张鹏, 等. 生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 940-951
- WEI Y, JIAO L, ZHANG P, et al. Research and application progress of biochar in amelioration of saline-alkali soil [J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 940-951
- [27] GAO G, YAN L, TONG K Q, et al. The potential and prospects of modified biochar for comprehensive management of salt-affected soils and plants: A critical review [J]. Science of The Total Environment, 2024, 912: 169618
- [28] TOMCZYK A, SOKOŁOWSKA Z, BOGUTA P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2020, 19(1): 191-215
- [29] MAO T T, WANG Y F, NING S R, et al. Assessment of the effects of biochar on the physicochemical properties of saline-alkali soil based on meta-analysis [J]. Agronomy, 2024, 14(10): 2431
- [30] 余洁, 苗淑杰, 乔云发. 不同类型土壤团聚体稳定机制的研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(14): 89-95
- YU J, MIAO S J, QIAO Y F. The stabilization mechanism of different types of soil aggregates [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(14): 89-95
- [31] TIAN Y, XIA R M, YING Y Q, et al. Desulfurization steel slag improves the saline-sodic soil quality by replacing sodium ions and affecting soil pore structure [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118874
- [32] 王娜, 罗玉虎. 盐碱地可持续利用及改良技术研究进展[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(3): 589-594
- WANG N, LUO Y H. Research progress on sustainable utilization and improvement technology of saline alkali land [J]. Advances in Environmental Protection, 2021, 11(3): 589-594
- [33] HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHAI Y M, et al. Effect of straw biochar on soil properties and wheat production under saline water irrigation [J]. Agronomy, 2019, 9(8): 457
- [34] 韩剑宏, 李艳伟, 姚卫华, 等. 玉米秸秆和污泥共热解制备的生物质炭及其对盐碱土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 92-98, 105
- HAN J H, LI Y W, YAO W H, et al. Co-pyrolysis preparing biochar with corn straw and sewage sludge and its effects on saline soil improvement [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 92-98, 105
- [35] TAN Z X, YE Z X, ZHANG L M, et al. Application of the

- 15N tracer method to study the effect of pyrolysis temperature and atmosphere on the distribution of biochar nitrogen in the biomass-biochar-plant system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 79-87
- [36] 万云星, 牟金霞, 杨婧妍, 等. 生物炭长期施入对燥红土有机碳及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(9): 2032-2040
- WAN Y X, MOU J X, YANG R Y, et al. Effects of long-term application of biochar on organic carbon and its fractions in dry red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(9): 2032-2040
- [37] 张华杰, 陈友媛, 王磊, 等. 生物炭碳稳定性及对滨海湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(2): 1025-1031
- ZHANG H J, CHEN Y Y, WANG L, et al. Carbon stability of biochar and its effects on soil organic carbon mineralization in coastal wetlands[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 1025-1031
- [38] 张磊, 柳璇, 韩俊杰, 等. 生物炭对土壤团聚体及结合态碳库影响研究进展[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(9): 157-161
- ZHANG L, LIU X, HAN J J, et al. Application of biochar on soil aggregate and combined state of carbon sinks[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(9): 157-161
- [39] CHEN L J, JIANG Y J, LIANG C, et al. Competitive interaction with keystone taxa induced negative priming under biochar amendments[J]. *Microbiome*, 2019, 7(1): 77
- [40] GUO J L, ZHENG L, LI Z F, et al. Effects of various pyrolysis conditions and feedstock compositions on the physicochemical characteristics of cow manure-derived biochar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311: 127458
- [41] HAFEEZ A, PAN T W, TIAN J H, et al. Modified biochars and their effects on soil quality: a review[J]. *Environments*, 2022, 9(5): 60
- [42] 史广宇, 吴贝贝, 胡嘉源, 等. 施加生物炭缓解土壤氮流失机理的研究进展[J]. *环境化学*, 2025, 44(1): 149-163
- SHI G Y, WU B B, HU J Y, et al. Advances in nitrogen loss reduction mechanism study by biochar application[J]. *Environmental Chemistry*, 2025, 44(1): 149-163
- [43] WANG X B, ZHOU W, LIANG G Q, et al. Characteristics of maize biochar with different pyrolysis temperatures and its effects on organic carbon, nitrogen and enzymatic activities after addition to fluvo-aquic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 137-144
- [44] 孟繁昊, 高聚林, 于晓芳, 等. 生物炭配施氮肥改善表层土壤生物化学性状研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1214-1226
- MENG F H, GAO J L, YU X F, et al. Improvement of biochemical property of surface soil by combined application of biochar with nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1214-1226
- [45] ZHU H, YANG J S, YAO R J, et al. Interactive effects of soil amendments (biochar and gypsum) and salinity on ammonia volatilization in coastal saline soil[J]. *Catena*, 2020, 190: 104527
- [46] WANG Y F, LI D N, LIU H C, et al. Screening the optimal modified biochar for nitrogen retention in black soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(52): 113088-113104
- [47] TAGHIZADEH-TOOSI A, CLOUGH T J, SHERLOCK R R, et al. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1): 57-69
- [48] LIU F, XIAO Z H, FANG J, et al. Effect of pyrolysis treatment on phosphorus migration and transformation of pig, cow and sheep manure[J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): 9215
- [49] YANG C D, LU S G. Pyrolysis temperature affects phosphorus availability of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(8): 2817-2830
- [50] LIANG Y, CAO X D, ZHAO L, et al. Phosphorus release from dairy manure, the manure-derived biochar, and their amended soil: effects of phosphorus nature and soil property[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(4): 1504-1509
- [51] XIA H, WANG J Y, RIAZ M, et al. Co-application of biochar and potassium fertilizer improves soil potassium availability and microbial utilization of organic carbon: A four-year study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 469: 143211
- [52] LIU L Y, TAN Z X, GONG H B, et al. Migration and transformation mechanisms of nutrient elements (N, P, K) within biochar in straw-biochar-soil-plant systems: a review[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(1): 22-32
- [53] ZHENG H, WANG Z Y, DENG X, et al. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130: 463-471
- [54] LI C Y, WANG Z C, XU Y T, et al. Analysis of the effect of modified biochar on saline-alkali soil remediation and crop growth[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5593

(责任编辑 彭露茜)