

生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响

陆洁, 冯嘉仪, 盛晗, 彭维新, 吴道铭, 张学平, 曾曙才

引用本文:

陆洁, 冯嘉仪, 盛晗, 彭维新, 吴道铭, 张学平, 曾曙才. 生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1082–1090.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0936>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

羊栖菜生物炭对镉污染土壤性质及镉形态的影响

汪玉瑛, 计海洋, 吕豪豪, 刘玉学, 杨瑞芹, 杨生茂

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1132–1140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1501>

虾壳生物炭对Cd-As复合污染土壤修复效应及土壤可溶性有机碳含量的影响

孙涛, 孙约兵, 贾宏涛, 吴泽赢

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1675–1685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0056>

不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响

安梅, 董丽, 张磊, 孙崇海, 夏培玉

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 892–898 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1388>

石灰与生物炭对矿山废水污染农田土壤的改良效应

张新帅, 张红宇, 黄凯, 施翠仙, 陈建军, 李元, 湛方栋

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 481–491 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0704>

生物炭对土壤-植物体系中铅镉迁移累积的影响

黄连喜, 魏岚, 刘晓文, 吴颖欣, 李翔, 黄玉芬, 黄庆, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2205–2216 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0740>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆洁, 冯嘉仪, 盛晗, 等. 生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1082–1090.

LU J, FENG J Y, SHENG H, et al. Effects of biochar types on properties of sludge–soil mixture and plant growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 1082–1090.

生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响

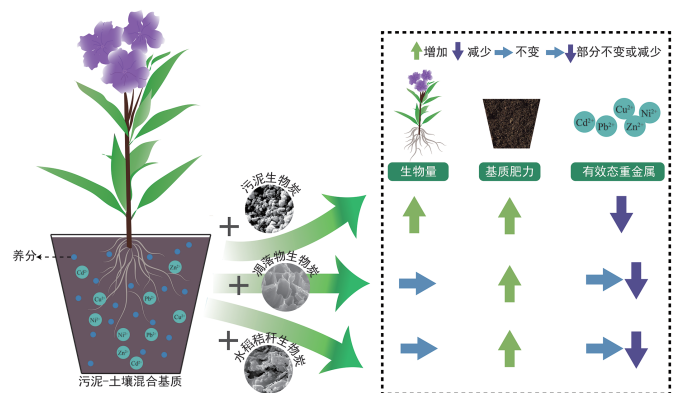
陆洁¹, 冯嘉仪¹, 盛晗¹, 彭维新¹, 吴道铭¹, 张学平², 曾曙才^{1*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 佛山市林业科学研究所, 广东 佛山 528222)

摘要:为探讨不同原料生物炭对污泥–土壤混合基质理化性质和在该基质中种植的园林植物生长的影响,采用盆栽试验,以污泥和土壤(质量比1:1)混合物为栽培基质(CK),研究污泥生物炭(SB)、凋落物生物炭(LB)和水稻秸秆生物炭(RB)添加(按照基质质量的4.5%添加)对基质理化性质、有效态重金属含量以及蓝花草(*Ruellia simplex*)生长的影响。结果表明:与CK(基质中不添加生物炭)相比,3种生物炭均降低基质容重,提高总孔隙度和毛管持水量,对基质pH影响不显著。SB显著增加基质全P含量,降低速效P含量,LB显著提高有机质、全N、全P、碱解N、速效K含量,降低速效P含量,RB显著提高全P、全K、速效P、速效K含量。对于有效态重金属,SB显著降低有效态Cd、Pb、Cu、Zn、Ni含量,而LB和RB仅显著降低有效态Cu含量。3种生物炭均显著促进蓝花草根系生长及对N、K的吸收,SB还显著提高蓝花草地上部生物量及对P的吸收。模糊隶属函数显示,对基质改良和植物生长影响的综合评价排序为SB>LB>RB>CK。综上,在污泥园林利用中添加污泥生物炭、凋落物生物炭和水稻秸秆生物炭均可有效提升土壤质量,促进园林植物生长,其中污泥生物炭的综合改良效果最佳。

关键词:生态修复;生物炭;污泥利用;蓝花草

中图分类号:X703;TU986.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)05-1082-09 doi:10.11654/jaes.2022-0936



Effects of biochar types on properties of sludge–soil mixture and plant growth

LU Jie¹, FENG Jiayi¹, SHENG Han¹, PENG Weixin¹, WU Daoming¹, ZHANG Xueping², ZENG Shucui^{1*}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Forestry Science Research Institute of Foshan, Foshan 528222, China)

Abstract: This study aims to investigate the effects of three biochar types on the physicochemical properties of sludge–soil mixed substrate (mass ratio 1:1) and the growth of garden plants grown in the substrate and explore the potential of biochar application in sludge utilization. A pot experiment was conducted to quantify the effects of three biochar types (added at 4.5% of the substrate mass), including sludge biochar (SB), tree litter biochar (LB), and rice straw biochar (RB), on the physicochemical properties of the substrate, availability of

收稿日期: 2022-09-22 录用日期: 2023-01-11

作者简介: 陆洁 (1998—), 女, 广东潮州人, 硕士研究生, 从事园林生态学研究。E-mail: 18211218598@163.com

*通信作者: 曾曙才 E-mail: sczeng@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971629)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31971629)

heavy metals, and the growth of *Ruellia simplex*. Results showed that all the biochar types decreased the bulk density and raised the total porosity and capillary capacity of the substrate compared with that of the control (substrate without biochar addition, CK), with no significant effect on pH. These biochars differently enhanced substrate nutrient levels. SB only significantly increased total P content, whereas LB increased the contents of organic matter, total N, total P, alkaline solubilized N, and available K, and RB promoted the total P, total K, available P, and available K contents. The addition of SB and LB decreased the available P content, while SB reduced the contents of available Cd, Pb, Cu, Zn, and Ni. LB and RB only reduced the available Cu content. These biochars remarkably promoted root biomass and the uptake of N and K by *R. simplex*, while only SB enhanced the aboveground biomass and the uptake of P by *R. simplex*. The membership function values showed that the overall effect of the three treatments on substrate improvement and plant growth exhibited the following order: SB > LB > RB > CK. This study shows that the addition of SB, LB, and RB to the sludge-soil mixture effectively improved the substrate quality and promoted the growth of garden plants, with the sludge biochar outperforming the others.

Keywords: ecological restoration; biochar; sludge utilization; *Ruellia simplex*

随着工业化和城镇化不断发展,城市污泥产量日益增加。据统计,2020年我国城市污水厂产生的干污泥(含水率80%)约 1.16×10^7 t^[1]。目前我国采用的污泥处置方法主要有焚烧、卫生填埋和土地利用等^[2]。相较于污泥农用,园林绿化利用是实现污泥资源化利用的一种可靠方式,可有效避开食物链,减少对人类的危害^[3]。污泥中含有大量的有机质,氮(N)、磷(P)、钾(K)养分元素,以及多种植物生长所需的微量元素,其施入土壤能够提升园林土壤肥力,促进植物生长^[4]。同时,污泥中含有大量的重金属元素^[5],即使经过堆肥化处理也无法将重金属完全去除,过量的重金属会抑制植物生长,甚至引起植株死亡^[2]。因此,如何更加安全地进行污泥园林利用一直是科研工作者的研究热点。

生物炭是将生物质如农业、林业废弃物在低氧或缺氧环境下进行高温热裂解而产生的富碳固态产物^[6]。生物炭具有比表面积大、孔隙结构发达、富含有机官能团和有机碳、pH高等特性,在土壤中施加生物炭可有效改良土壤理化性质,增强养分固持,并增加微生物活性^[7-8]。除此之外,较多研究表明生物炭对重金属污染物有良好的吸附作用,能够降低有效态重金属在土壤中的迁移性^[9-10]。已有学者将生物炭与污泥共同堆肥并进行土地利用,但发现短期内其对有效态重金属的钝化效果并不显著^[11]。而目前在污泥土地利用中添加生物炭作为改良剂的研究却鲜有报道。

污泥可进一步热解转化为污泥生物炭进行处置;华南地区大量的高山榕凋落物可制成生物炭回收利用;水稻是南方重要的粮食作物,收获后将其秸秆制成生物炭也是有效的资源化利用方式。不同原料生物炭对土壤改良效果不同^[12],如研究发现水稻秸秆生物炭对土壤速效养分的提升作用较水稻谷壳生物炭、

果木生物炭更显著^[13]。此外,土壤环境条件的差异(如土壤质地、酸碱度、水分等)也会影响生物炭的改良效果^[14-15]。关于污泥生物炭、水稻秸秆生物炭对农田土壤的改良效果,已有较多研究报道,但对高山榕凋落物生物炭的相关研究未见报道。另外,关于生物炭对华南地区园林绿地土壤的改良效果,尤其是对于污泥用作土壤改良剂施入园林绿地土壤后,再使用生物炭进行进一步改良的效果,目前鲜有研究。由此可见,针对污泥园林土壤利用,有必要对不同原料生物炭的作用效果进行深入探讨。蓝花草(*Ruellia simplex*)为爵床科芦莉草属草本植物,耐寒耐湿,抗逆性强,是生态修复的良好材料^[16]。因此,本研究通过盆栽试验,以污泥-土壤混合物作为基质,探究3种不同原料生物炭(污泥生物炭、凋落物生物炭、水稻秸秆生物炭)对基质理化性质、有效态重金属以及蓝花草生长和养分吸收的影响,并对3种生物炭的改良效果进行综合评价,以期对污泥的安全处置与资源化利用和生物炭的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自佛山市林业科学研究所树木园0~20 cm土壤,为赤红壤,土样风干后碾碎过4 mm筛。供试污泥取自清远市绿由环保科技有限公司,污泥上盖塑料薄膜,经厌氧堆置处理60 d后风干碾碎过4 mm筛。供试土壤、污泥的基本性质见表1。

供试生物炭分别为污泥生物炭、凋落物生物炭和水稻秸秆生物炭。污泥生物炭购买于台山市三顺环保装备有限公司,水稻秸秆生物炭购买于江苏华丰农业生物工程有限公司,凋落物生物炭以取自佛山市林业科学研究所的高山榕(*Ficus altissima*)落叶为原料,

表 1 供试材料的基本性质

Table 1 Basic properties of experimental materials

指标 Index	土壤 Soil	污泥 Sludge	污泥处置园林绿化用泥质 GB/T 23486—2009 Quality of sludge disposal used in garden or parks GB/T 23486—2009	
			酸性土壤 Acidic soil (pH<6.5)	中性和碱性土壤 Neutral and alkaline soils (pH≥6.5)
pH	5.77	7.52	6.5~8.5	5.5~7.8
容重/(g·cm ⁻³)	1.31	0.84		
含水量/(g·kg ⁻¹)	154.69	702.68		
有机质/(g·kg ⁻¹)	15.41	96.54		
全 N/(g·kg ⁻¹)	0.70	7.35		
全 P/(g·kg ⁻¹)	0.38	4.81		
全 K/(g·kg ⁻¹)	2.71	6.43		
碱解 N/(mg·kg ⁻¹)	26.83	428.50		
速效 P/(mg·kg ⁻¹)	15.27	611.08		
速效 K/(mg·kg ⁻¹)	65.23	413.27		
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.18	19.88	<5	<50
Pb/(mg·kg ⁻¹)	29.56	48.51	<300	<1 000
Cu/(mg·kg ⁻¹)	17.31	423.66	<800	<1 500
Zn/(mg·kg ⁻¹)	40.23	863.49	<2 000	<4 000
Ni/(mg·kg ⁻¹)	10.10	47.96	<100	<200

将其磨碎、过筛后由华南农业大学自主研发设计的生物炭连续热解装置(BCP-05, 辽宁省能源研究所)经 500 ℃高温缺氧热解制备而得。3 种生物炭使用前均过 2 mm 筛,基本性质见表 2。供试植物蓝花草购于广州市芳村花博园,选取高约 35 cm、长势良好的半年生蓝花草幼苗用于试验。栽培用盆为高 19.5 cm、口径 22 cm 且底部带孔的塑胶盆。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

盆栽试验于 2019 年 10 月开始,在佛山市林业科学研究所的温室大棚进行,试验期为 8 个月。将污泥、土壤按 1:1 的质量比充分混匀,每盆添加 3 kg。分别将污泥生物炭(SB)、凋落物生物炭(LB)和水稻秸秆生物炭(RB)按照基质质量的 4.5% 施入盆中并充分混匀,每个处理设 9 次重复,不添加生物炭的为对照(CK)。所有处理每周浇水一次至有下渗水流出,干湿交替平衡 3 周。每个处理选取 6 盆进行植物种植,每盆栽植 1 株蓝花草,栽植周期为 7 个月。同时对不种植物的 3 盆盆栽基质进行风干,四分法采样 500 g,研磨、过筛,用于测定理化性质与有效态重金属等指标。植物生长期间夏天每隔 3 d 浇水 100 mL,其他季节每隔一周浇水 100 mL,浇水过后土壤含水

表 2 3 种不同原料生物炭的基本性质

Table 2 Basic properties of three biochars from different raw materials

指标 Index	污泥生物炭 Sludge biochar	凋落物生物炭 Litter biochar	水稻秸秆生物炭 Rice straw biochar
pH ^a	10.28	12.53	12.91
C 含量/(g·kg ⁻¹)	117.79	667.05	642.90
N 含量/(g·kg ⁻¹)	6.01	12.55	8.60
H 含量/(g·kg ⁻¹)	8.51	34.80	21.20
C/N	19.60	53.14	74.76
C/H	13.84	19.17	30.33
Cd/(mg·kg ⁻¹)	8		
Pb/(mg·kg ⁻¹)	23	4	17
Cu/(mg·kg ⁻¹)	122	14	31
Zn/(mg·kg ⁻¹)	735	108	271
Ni/(mg·kg ⁻¹)	53	248	233
阳离子交换量 CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	11.25	21.57	30.35
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	13.14	2.08	0.09
总孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)	0.09	0.01	0.01
平均孔径/nm	24.20	34.72	58.64

注:^a生物炭:水=1:2.5。
Note:^aBiochar:Water=1:2.5.

量为田间持水量的 70% 左右。

1.2.2 指标分析

种植结束后采用米尺测量株高。选取 3 株长势良好的植株整株挖出,带回实验室,先用自来水洗净根部,再用去离子水冲洗 3 遍并置于室内晾干,然后将地上部分(茎叶)和地下部分(根)剪开,分别装入信封,放入烘箱 105 ℃杀青 30 min 后,70 ℃烘至质量恒定。用电子天平称得地上、地下部分生物量(干质量),然后使用不锈钢粉碎机将植物各部位粉碎后密封保存,用于植物养分的测定。植物 N、P、K 养分元素的测定:先用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解植物样品获得待测液,N 含量使用凯氏定氮仪测定,P 含量采用钼锑抗比色法测定,K 含量用原子吸收分光光度计测定。养分吸收量按下列公式计算:

各部分养分元素吸收量(mg)=各部分养分元素含量(mg·g⁻¹)×各部位生物量(g) (1)

单株养分吸收量(mg)=地上部吸收量(mg)+地下部吸收量(mg) (2)

供试土壤(混合基质)样品分析方法参照《土壤农化分析》^[17]进行。容重采用环刀法测定;毛管持水量和总孔隙度采用烘干法测定;pH 采用 pH 计测定(水土比为 2.5:1);有机质采用重铬酸钾容量法测定;全

N采用浓H₂SO₄消煮-凯氏定氮仪测定,碱解N采用碱解扩散法测定;全P采用H₂SO₄和HClO₄消煮-钼锑抗比色法测定,速效P采用NaHCO₃溶液浸提-钼锑抗比色法测定;全K采用HNO₃-HF-HClO₄(6:2:2)消煮-原子吸收分光光度计测定,速效K采用CH₃COONH₄浸提-原子吸收分光光度计测定。重金属Cd、Pb、Cu、Zn、Ni的有效态采用DTPA浸提-原子吸收分光光度法测定^[10]。

1.2.3 数据处理

通过模糊隶属函数对不同原料生物炭添加条件下基质和植物生长指标进行综合评价,计算公式如下^[18]:

$$R(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \tag{3}$$

$$R(X_i)_{反}=1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \tag{4}$$

式中: $R(X_i)$ 为不同指标的隶属函数值; $R(X_i)_{反}$ 为不同指标的反隶属函数值; X_i 为第*i*个指标测定值; X_{max} 为所测指标的最大值; X_{min} 为所测指标的最小值。

本研究中毛管持水量、pH、有机质、碱解N、速效P、速效K、株高、单株生物量、单株N吸收量、单株P吸收量、单株K吸收量用 $R(X_i)$ 计算;容重、有效态Cd、有效态Pb、有效态Cu、有效态Zn、有效态Ni用 R

$(X_i)_{反}$ 计算。最后求取同一处理所有指标隶属函数值的平均值,平均值越大表示综合改良效果越好。

1.2.4 数据处理

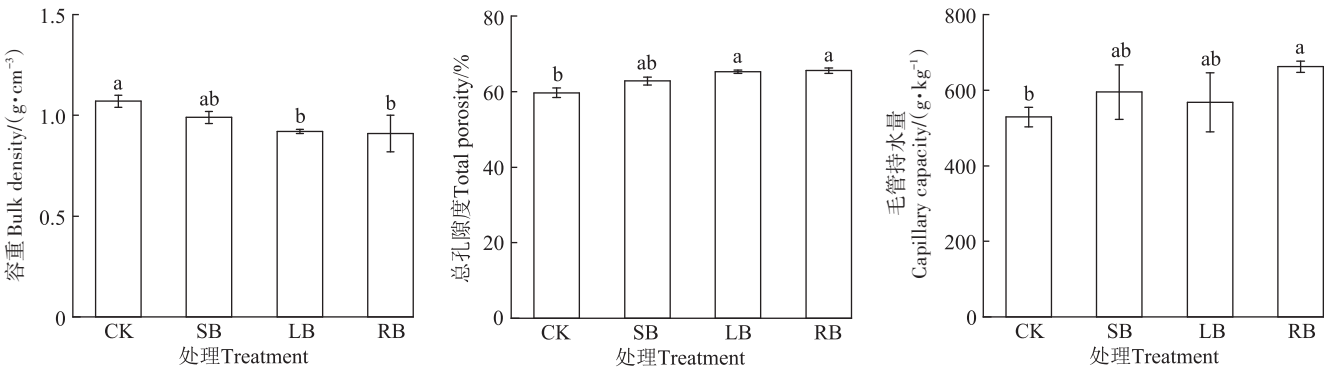
采用Excel 2010和SPSS 19.0软件对数据进行统计分析,采用单因素(One-way ANOVA)和Duncan法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),利用Origin 2019软件制图。图表中数据为平均值±标准误($n=3$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对基质理化性质的影响

不同处理对基质物理性质均有不同程度的促进作用(图1)。与CK相比, LB 基质容重显著降低14.02%,总孔隙度显著提高9.39%,但毛管持水量与CK无显著差异;RB处理基质容重显著降低14.95%,总孔隙度和毛管持水量分别显著提高9.86%和25.17%;SB处理基质容重、总孔隙度和毛管持水量与CK均无显著差异。可见在3种处理中,水稻秸秆生物炭对基质物理性质的改良效果最明显。

3种生物炭对基质化学性质的影响存在差异(表3)。与CK相比,SB仅使全P含量显著提高了10.38%;



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

图1 不同处理对基质物理性质的影响

Figure 1 Effects of different treatments on physical properties in substrate

表3 不同处理对基质化学性质的影响

Table 3 Effects of different treatments on chemical properties in substrate

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全 N Total N/ (g·kg ⁻¹)	全 P Total P/ (g·kg ⁻¹)	全 K Total K/ (g·kg ⁻¹)	碱解 N Available N/ (mg·kg ⁻¹)	速效 P Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效 K Available K/ (mg·kg ⁻¹)
CK	7.48±0.07a	67.43±6.70b	4.03±0.07b	2.60±0.04c	4.58±0.41bc	228.21±0.88b	313.13±17.23b	239.25±6.29c
SB	7.60±0.02a	66.28±4.20b	4.61±0.21b	2.87±0.08b	4.29±0.09c	230.03±5.25ab	241.68±8.49c	237.66±16.61c
LB	7.58±0.03a	93.74±5.18a	5.39±0.28a	3.01±0.41ab	5.74±0.35b	241.38±2.20a	206.58±3.12d	1 185.42±13.90a
RB	7.52±0.01a	60.04±3.44b	4.28±0.20b	3.14±0.05a	7.25±0.48a	223.89±3.39b	365.85±2.49a	867.05±33.65b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

LB显著提升了有机质、全N、全P、碱解N、速效K含量,各指标分别提升了39.02%、33.75%、15.77%、5.77%和395.47%;RB显著提升了全P、全K、速效P、速效K含量,各指标分别提升了20.77%、58.30%、16.84%、262.40%。但是,SB和LB使速效P含量分别较CK降低了22.82%、34.03%,这可能是因为生物炭吸附了部分速效P。3种生物炭对基质pH均无显著影响。

2.2 不同处理对基质有效态重金属含量的影响

3种生物炭对基质有效态重金属含量的影响不同(图2)。SB基质有效态Cd、Pb、Cu、Zn、Ni含量较CK分别显著降低了25.75%、37.10%、29.53%、20.86%、14.69%;LB和RB仅使有效态Cu含量分别显著降低了11.66%和18.00%。可见污泥生物炭对基质有效态重金属的降低作用最显著。

2.3 不同处理对蓝花草生长和养分吸收的影响

不同生物炭对蓝花草生长均有一定促进作用(表4)。SB使蓝花草地上、地下及全株生物量较CK分别显著增长了49.20%、79.91%、54.80%。LB和RB使蓝花草地下生物量分别较CK显著增长了16.50%和36.30%,而地上、全株生物量与CK相比无显著差异。与CK相比,3种生物炭对蓝花草株高生长均无显著影响。

表4 不同处理对蓝花草株高和生物量的影响

Table 4 Effects of different treatments on plant height and biomass of *Ruellia simplex*

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	地上生物量 Aboveground biomass/g	地下生物量 Underground biomass/g	全株生物量 Total plant biomass/g
CK	106.67±1.86a	31.22±1.39b	6.97±0.04d	38.19±1.38b
SB	110.00±4.58a	46.58±1.32a	12.54±0.13a	59.12±1.22a
LB	106.00±1.53a	31.13±1.39b	8.12±0.23c	39.25±1.62b
RB	111.00±4.04a	34.00±2.62b	9.50±0.54b	43.49±3.14b

不同原料生物炭对蓝花草地上、地下部分养分吸收量影响不同(图3)。SB显著促进了蓝花草地上部N、P、K及地下部N、P的吸收,各指标较CK分别提升了70.35%、99.20%、64.91%、340.82%、280.06%。与CK相比,LB显著促进了蓝花草地上部N及地上、地下部K的吸收,各指标分别提升了68.77%、96.51%、127.55%。RB与CK相比显著促进了蓝花草地下部N及地上、地下部K的吸收,各指标分别增加了186.30%、96.11%、269.94%。LB和RB对地上、地下部P的吸收量无显著影响。与CK相比,3种生物炭均显著促进蓝花草全株对N、K的吸收,仅SB显著促进全株对P的吸收。

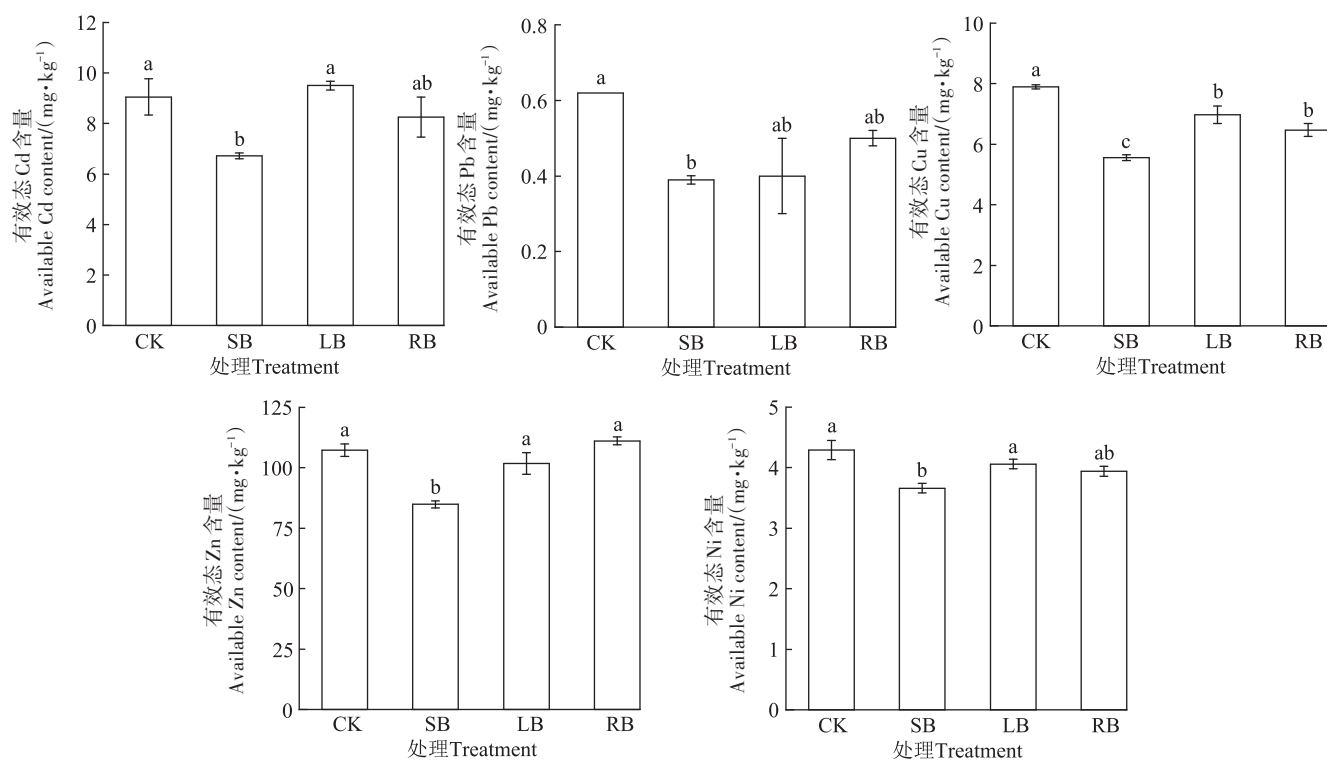


图2 不同处理对基质有效态重金属含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on available content of heavy metals in substrate

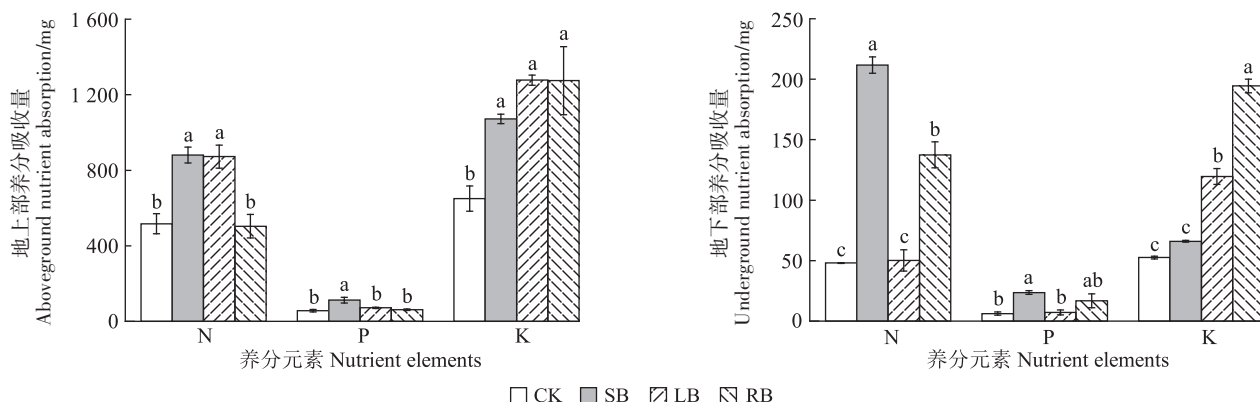


图3 不同处理对蓝花草养分吸收量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on nutrient absorption of *Ruellia simplex*

2.4 不同处理对基质改良和植物生长影响的综合评价

由表5可知,3种生物炭的改良效果综合排序为SB>LB>RB,可见污泥生物炭的综合改良效果最佳。与CK相比,污泥生物炭对pH、有效态Cd、有效态Pb、有效态Cu、有效态Zn、有效态Ni、全株生物量、单株N吸收量、单株P吸收量的促进作用更显著;而有机质含量、碱解N含量、速效K含量在LB下提升更显著;RB对容重、毛管持水量、速效P含量、株高、单株K吸收量的促进作用更显著。

表5 不同处理对基质改良与植物生长的模糊隶属函数值

Table 5 Membership function values of different treatments on substrate improvement and plant growth

指标 Index	CK	SB	LB	RB
容重	0.21	0.58	0.86	0.90
毛管持水量	0.51	0.71	0.63	0.93
pH	0.44	0.86	0.77	0.58
有机质	0.30	0.27	0.84	0.14
碱解N	0.32	0.40	0.85	0.15
速效P	0.66	0.24	0.04	0.97
速效K	0.03	0.03	0.97	0.65
有效态Cd	0.22	0.93	0.09	0.47
有效态Pb	0.02	0.69	0.67	0.38
有效态Cu	0.05	0.96	0.41	0.60
有效态Zn	0.20	0.92	0.37	0.07
有效态Ni	0.28	0.90	0.50	0.62
株高	0.23	0.44	0.19	0.50
全株生物量	0.08	0.94	0.12	0.29
单株N吸收量	0.15	0.90	0.66	0.26
单株P吸收量	0.06	0.73	0.21	0.21
单株K吸收量	0.10	0.45	0.65	0.71
平均值	0.23	0.64	0.52	0.50
综合排序	4	1	2	3

3 讨论

3.1 不同原料生物炭对基质理化性质的影响

生物炭疏松多孔的特性可有效改良土壤物理结构,提高通气性和持水性^[19]。本研究中由于水稻秸秆生物炭平均孔径相对较大,因此其对基质的容重、毛管持水量、总孔隙度的促进作用更显著。生物炭多呈碱性,可以通过吸附中和作用提高土壤pH^[20],但本研究中3种生物炭对基质pH的提升作用均不显著,这一方面可能与本试验生物炭添加量较少有关^[21],另一方面,生物炭对酸性土壤pH提升效应较碱性土壤更显著^[22],本试验添加污泥后基质呈碱性,因此添加生物炭可能对pH提升作用较小。生物炭的高碳组分会向土壤输入有机碳,增加有机质含量^[23]。在添加污泥生物炭、水稻秸秆生物炭后基质有机质无显著变化,仅添加凋落物生物炭显著提高了有机质含量,可能是因为凋落物生物炭中有机碳含量较高。此外,不同生物炭会影响土壤有机碳矿化速率,从而可能对有机质含量产生影响^[24]。

生物炭可以通过养分输入和吸持保肥来提高土壤养分水平^[7,25]。本研究中污泥生物炭仅显著提升基质全P含量,凋落物生物炭显著提升全N、全P、碱解N、速效K含量,水稻秸秆生物炭显著提升全P、全K、速效P、速效K含量。全量提升主要与生物炭中的养分含量高低有关,而有效量的变化则既与生物炭自身携带的有效养分有关,还与生物炭的吸附特性相关。需要注意的是,虽然添加污泥生物炭、凋落物生物炭后基质全P含量显著增加,但速效P含量却显著降低,仅水稻秸秆生物炭提高了基质速效P含量。其原因可能是添加污泥后基质中含有丰富的养分元素,

生物炭表面凹凸不平的结构和灰分会截留基质中的游离态P,形成的含P化合物被限制在生物炭孔隙中^[26],从而降低了基质速效P含量。水稻秸秆生物炭孔径较大,对P的吸附性能可能较弱;而大孔径更有利于微生物生境形成^[23],因此可能更有利于P的活化,从而提高土壤速效P含量。可见,生物炭对土壤基质的影响是一个极其复杂的过程,其作用机理需要依据生物炭类型进行深入探究。

3.2 不同原料生物炭对基质重金属有效性的影响

大量研究已证实生物炭可通过物理吸附、静电吸附、离子交换、沉淀作用、络合作用等将有效态重金属转化为更稳定的状态^[27-28]。如桑树(*Morus alba*)枝杆、木薯(*Manihot esculenta*)秆、甘蔗(*Saccharum officinarum*)渣生物炭主要通过提高土壤pH值来降低土壤有效态Cd含量,其中桑树枝杆生物炭的作用最显著^[29];香根草(*Vetiveria zizanioides*)生物炭则主要通过表面静电吸附和络合作用去除溶液中的Cd离子^[30]。本研究中生物炭对有效态重金属均有一定的降低效果,与前人的研究结果一致^[10],其作用机理可能为:一是生物炭表面的孔隙结构可通过物理吸附固定部分重金属^[31];二是生物炭表面官能团与重金属离子发生离子交换、表面络合等形成强相互作用,降低其迁移性^[30,32];三是有机质的提升促进了土壤团聚体的形成,可胶结凝聚重金属离子^[10]。

有效态重金属在土壤中迁移性强,具有较大的生物有效性和危害度^[27]。添加凋落物生物炭和水稻秸秆生物炭显著降低了有效态Cu含量,而污泥生物炭显著降低了基质有效态Cd、Pb、Cu、Zn、Ni含量,对重金属钝化效果更为显著,这可能与生物炭的孔隙大小有关,孔径越小,越有利于对重金属离子的吸附^[33]。本试验中污泥生物炭平均孔径(24.20 nm)相对较小,凋落物生物炭和水稻秸秆生物炭平均孔径(分别为34.72 nm和58.64 nm)显著高于污泥生物炭,污泥生物炭具有更强的吸附作用,因而添加污泥生物炭的基质中有效态重金属含量显著下降。

3.3 不同原料生物炭对植物生长的影响

污泥可为植物生长提供大量养分^[3],生物炭对土壤环境的进一步改良有利于植物根系生长,提高植物对养分的吸收水平^[34]。本研究中3种生物炭均显著促进了蓝花草地下生物量生长,且均明显促进蓝花草对养分元素的吸收,这与前人研究结果一致^[35]。但是,与对照相比,蓝花草地上生物量在添加凋落物生物炭、水稻秸秆生物炭条件下无显著变化,仅在添加

污泥生物炭时显著提升了49.20%,这一方面可能与养分吸收量有关^[2],在添加污泥生物炭条件下蓝花草对N、P的吸收量均较另外两种生物炭高,因而其生物量增长更显著;另一方面,植物在受到重金属胁迫时,叶片细胞膜结构会受损,光合作用会受到抑制,从而影响植物正常生长^[36],污泥生物炭对基质有效态Cd、Pb、Cu、Zn、Ni的降低在一定程度上减少了蓝花草对重金属的吸收,减缓了蓝花草体内的重金属胁迫,从而促使其地上生物量提高。

模糊隶属函数也表明,污泥生物炭对有效态重金属、植株生长等指标的提升作用更显著,而凋落物生物炭、水稻秸秆生物炭则对基质养分指标的促进作用更显著。综上可知,生物炭可通过提高蓝花草植物养分吸收、降低重金属生物有效性来促进其生长。

3.4 生物炭在污泥园林利用中的应用前景

近几年我国不断出台相关政策推进污泥无害化处置和资源化利用。本研究中模糊隶属函数综合评价结果显示,3种添加生物炭处理对基质改良和植物生长的效果均优于对照,且污泥生物炭最优,这说明添加生物炭有利于污泥在园林中推广利用并进一步提高污泥处置效率。施用生物炭除了具有其他改良剂(如蘑菇渣、粉煤灰、生石灰、钢渣等)的重金属钝化效果^[37-38],还有助于各种废弃物的资源化利用,如本研究中污泥生物炭是对污泥的进一步加工处置,而华南地区城市园林绿化与水稻种植过程中产生的大量凋落物与水稻秸秆可通过生物炭的形式重新回归土壤。同时,在目前碳中和背景下对生物炭的应用也能发挥重要的碳封存功能。然而,目前污泥生物炭的利用仍因重金属风险问题而受限^[28],但有学者认为污泥热解后重金属形态稳定,生物可利用性低,施入土壤后几乎不会增加污染^[39],本研究在盆栽试验条件下也证实了这一点,但在污泥园林利用中添加生物炭的长期效果和影响仍有待进一步探讨。

4 结论

(1)污泥生物炭、凋落物生物炭和水稻秸秆生物炭均可有效改良污泥-土壤混合基质的理化性质,提升其养分水平,但污泥生物炭和凋落物生物炭对基质速效P具有吸附作用。

(2)凋落物生物炭、水稻秸秆生物炭可显著降低基质中有效态Cu含量;污泥生物炭对重金属有效性降低效果更为突出,可显著降低有效态Cd、Pb、Cu、Zn、Ni含量。

(3)3种生物炭均可促进蓝花草地下生物量生长,提高植株对养分元素的吸收;污泥生物炭对蓝花草地上生物量提高作用更显著。

(4)模糊隶属函数结果表明3种生物炭对基质改良和植物生长影响的综合评价排序为污泥生物炭>凋落物生物炭>水稻秸秆生物炭>不添加生物炭,生物炭对改良污泥-土壤混合基质的理化性质、降低重金属有效性以及促进蓝花草生长均有较好的作用,其中污泥生物炭的综合效果最优。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-07-28)[2022-08-02]. <http://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/index.html>. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2020 urban and rural construction statistical yearbook[EB/OL]. (2021-07-28)[2022-08-02]. <http://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/index.html>.
- [2] 储双双, 童馨, 王文瑞, 等. 污泥堆肥对黄梁木幼苗生长和元素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1550-1556. CHU S S, TONG X, WANG W R, et al. Effects of sewage sludge compost on the growth and element uptake of *Neolamarkia cadamba* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1550-1556.
- [3] 刘强, 陈玲, 邱家洲, 等. 污泥堆肥对园林植物生长及重金属积累的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 870-875. LIU Q, CHEN L, QIU J Z, et al. Effects of sewage sludge compost on growth and heavy metal accumulation[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2010, 38(6): 870-875.
- [4] 赵广琦, 沈烈英, 王智勇, 等. 城市污泥堆肥对12种花灌木生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 87-90. ZHAO G Q, SHEN L Y, WANG Z Y, et al. Effect s of sewage sludge compost on the growth of 12 flowering shrubs[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(5): 87-90.
- [5] HUANG H J, YUAN X Z. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 991-998.
- [6] WU P, ATA-UL-KARIM S T, SINGH B P, et al. A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998—2018) [J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 23-43.
- [7] LI Z C, SONG Z L, SINGH B P, et al. The impact of crop residue biochars on silicon and nutrient cycles in croplands[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 673-680.
- [8] 谭春玲, 刘洋, 黄雪刚, 等. 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 333-342. TAN C L, LIU Y, HUANG X G, et al. Effect of biochar on soil microbial metabolic activities[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(3): 333-342.
- [9] 宋明言, 袁再健, 黄斌, 等. 生物炭对红壤团聚体吸附Cd的影响研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(12): 2402-2410. SONG Y Y, YU-AN Z J, HUANG B, et al. Studies on the influence of biochar on the adsorption of Cd onto red soil aggregates[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(12): 2402-2410.
- [10] 张华伟, 甄华杨, 岳士忠, 等. 水稻秸秆生物炭对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1068-1074. ZHANG H W, ZHEN H Y, YUE S Z, et al. Bioavailability of Cd in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(6): 1068-1074.
- [11] 周楫, 余亚伟, 蒋越, 等. 生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 987-993. ZHOU J, YU Y W, JIANG Y, et al. Effect of biochar on available heavy metals during sewage sludge composting and land application of compost[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 987-993.
- [12] TONG X, XU R. Removal of Cu(II) from acidic electroplating effluent by biochars generated from crop straws[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(4): 652-658.
- [13] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 57-63. CHEN F, ZHANG K K, GU S C, et al. Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(5): 57-63.
- [14] 李富荣, 李敏, 朱娜, 等. 水作和旱作施用改良剂对蔬菜-土壤系统中铅镉生物有效性的影响差异[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1477-1483. LI F R, LI M, ZHU N, et al. Comparing the effects of soil amendments on Pb and Cd bioavailability in water spinach under water submersion cultivation and dry farming conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1477-1483.
- [15] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君. 生物炭施用对矿区污染农田土壤上油菜生长和重金属富集的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 1057-1063. HOU Y W, CHI H F, BI L J. Effects of biochar application on growth and typical metal accumulation of rape in mining contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(6): 1057-1063.
- [16] 冯承婷, 赵强民, 甘美娜. 关于景观水体生态修复沉水植物生物量配置探讨[J]. 中国园林, 2019, 35(5): 117-121. FENG C T, ZHAO Q M, GAN M N. Discussion on biomass allocation of submerged plants in landscape water ecological restoration[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2019, 35(5): 117-121.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社: 2000. BAO S D. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] MA J F, UENO D, ZHAO F J, et al. Subcellular localisation of Cd and Zn in the leaves of a Cd-hyperaccumulating ecotype of *Thlaspi caerulescens*[J]. *Planta*, 2005, 220(5): 731-736.
- [19] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 161-172. CHEN F J, XIA H J, LIU F D, et al. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 161-172.
- [20] 吴愉萍, 王明湖, 席杰君, 等. 不同农业废弃物生物炭及施用量对土壤pH值和保水保氮能力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1):

- 87-92. WU Y P, WANG M H, XI J J, et al. The effects of different agricultural waste biochars and application rates on soil pH, water holding capacity and N adsorption[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1):87-92.
- [21] 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. 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.
- [22] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物炭对不同pH值土壤矿质氮含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19):166-173. LUO Y, ZHAO X R, LI G T, et al. Effect of biochar on mineral nitrogen content in soils with different pH values[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19):166-173.
- [23] MITCHELL P J, SIMPSON A J, SOONG R, et al. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81:244-254.
- [24] 李莹, 魏志超, 李惠通, 等. 生物炭对杉木人工林土壤碳氮矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2):314-321. LI Y, WEI Z C, LI H T, et al. Effect of biochar on C and N mineralization in soil from Chinese fir plantation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2):314-321.
- [25] 吴蔚君, 徐云连, 邢素林, 等. 生物炭对土壤氮磷转化和流失的影响[J]. *农学学报*, 2018, 8(9):20-26. WU W J, XU Y L, XING S L, et al. Effect of biochar on soil nitrogen and phosphorus transformation and loss[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(9):20-26.
- [26] SHI Y X X, YU Y C, CHANG E, et al. Effect of biochar incorporation on phosphorus supplementation and availability in soil: a review[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(2):672-686.
- [27] 石红蕾, 周启星. 生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(2):486-494. SHI H L, ZHOU Q X. Research progresses in the effect of biochar on soil-environmental behaviors of pollutants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2):486-494.
- [28] 王君, 陈炯, 桂丕, 等. 污泥炭化温度和时间对重金属形态及作物累积的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(5):54-60. WANG J, CHEN X, GUI P, et al. Effects of pyrolysis temperature and time on the speciation and bioaccumulation of heavy metals derived from sludge[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(5):54-60.
- [29] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同作物秸秆生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(10):2364-2369. HUANG Y F, CHEN G F, XIONG L M, et al. Effects of different crop straw biochars on cadmium absorption in rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(10):2364-2369.
- [30] 邓金环, 郜礼阳, 周皖婉, 等. 不同温度制备香根草生物炭对Cd²⁺的吸附特性与机制[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(2):340-349. DENG J H, GAO L Y, ZHOU W W, et al. Adsorption characteristics and mechanisms of Cd²⁺ in biochar derived from vetiver grass under different pyrolysis temperatures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):340-349.
- [31] TAN Z X, YUAN S N, HONG M F, et al. Mechanism of negative surface charge formation on biochar and its effect on the fixation of soil Cd[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384:121370.
- [32] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对Cd(II)的吸附机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11):2277-2283. LI L, LU Y C, LIU Y, et al. Adsorption mechanisms of cadmium(II) on biochars derived from corn straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2277-2283.
- [33] 丁文川, 朱庆祥, 曾晓岚, 等. 不同热解温度生物炭改良铅和镉污染土壤的研究[J]. *科技导报*, 2011, 29(14):22-25. DING W C, ZHU Q X, ZENG X L, et al. Biochars from different pyrolytic temperature amending lead and cadmium contaminated soil[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(14):22-25.
- [34] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8):1445-1451. ZHANG W M, MENG J, WANG J Y, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8):1445-1451.
- [35] PARK J H, CHOPPALA G K, BOLAN N S, et al. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals[J]. *Plant and Soil*, 2011, 348(1/2):439-451.
- [36] LI X L, ZIADI N, BELANGER G, et al. Cadmium accumulation in wheat grain as affected by mineral N fertilizer and soil characteristics[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(4):521-531.
- [37] 严兴, 侯毛宇, 李碧清, 等. 微生物发酵菌和生物炭及蘑菇渣对污泥堆肥效果的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(1):136-142. YAN X, HOU M Y, LI B Q, et al. Effects of microbial inoculant, biomass charcoal and mushroom residue on sludge composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(1):136-142.
- [38] 孟国欣, 查同刚, 巩潇, 等. 复合添加剂对污泥堆肥化重金属形态及生物有效性的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(1):182-190. MENG G X, ZHA T G, GONG X, et al. Effects of compound additives on forms and bioavailability of heavy metals in sludge composting[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(1):182-190.
- [39] HOSSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1):223-228.