

朱洁怡, 冯嘉仪, 盛晗, 等. 凋落物生物炭施用量对翠芦莉污泥适应性及重金属吸收的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(4): 504-512.
ZHU Jieyi, FENG Jiayi, SHENG Han, et al. Effects of litter biochar addition on sludge adaptability and heavy metal uptake of *Ruellia simplex*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(4): 504-512.

凋落物生物炭施用量对翠芦莉污泥 适应性及重金属吸收的影响

朱洁怡¹, 冯嘉仪¹, 盛 晗¹, 彭维新¹, 吴道铭¹, 张学平², 金玲玲³, 曾曙才¹

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

3 华南农业大学 数学与信息学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究凋落物生物炭不同添加量对种植在污泥+土壤混合基质中的翠芦莉 *Ruellia simplex* 生长及重金属吸收累积的影响, 以为城市污泥和园林废弃物资源化利用提供参考依据。【方法】通过盆栽试验, 分析添加 0、1.5%、3.0% 和 4.5% 凋落物生物炭 [占基质的质量分数 (w), 分别记为 CK、F_{1.5}、F_{3.0} 和 F_{4.5}] 对翠芦莉生长、根系形态和生理以及养分和重金属吸收累积的影响。【结果】与 CK 相比, F_{1.5} 处理显著增加翠芦莉株高、根系生物量、地上部生物量及全株生物量。植株生物量随 w 增加呈逐渐下降趋势, F_{4.5} 处理翠芦莉生物量显著低于 CK, 表现出“低促高抑”的特点。翠芦莉总根长、根表面积、平均直径、根体积在 F_{1.5} 处理中达到最大, 且均随 w 增加而逐渐减小。各处理中, F_{1.5} 处理根系可溶性蛋白和丙二醛 (MDA) 含量均最低, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性最大; 翠芦莉根系 SOD 活性随 w 增加呈下降趋势, 但可溶性蛋白和 MDA 含量的变化趋势相反。与 CK 相比, 各处理均不同程度提高了翠芦莉地上部及根部对 N、P、K 的吸收, 不同程度降低了翠芦莉植株 Cd、Cu 含量, 提高了 Pb、Ni 含量, N、P、K、Cd、Cu、Pb 累积量均随 w 增加呈下降趋势; F_{1.5} 处理的翠芦莉植株 N、P、K、Cd、Cu、Pb、Ni 累积量均显著大于 CK。【结论】添加 w 为 1.5% 的凋落物生物炭可以显著促进翠芦莉生长和 Pb、Cu、Cd、Ni 的吸收累积, 过量添加会抑制植物生长并影响其对基质中重金属的吸收效果, 在实际应用中应合理控制生物炭的施用量。

关键词: 生物炭; 施用量; 翠芦莉; 植物生长; 重金属吸收; 土壤修复

中图分类号: S682.19; X703; X53

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)04-0504-09

Effects of litter biochar addition on sludge adaptability and heavy metal uptake of *Ruellia simplex*

ZHU Jieyi¹, FENG Jiayi¹, SHENG Han¹, PENG Weixin¹, WU Daoming¹, ZHANG Xueping², JIN Lingling³, ZENG Shucal¹

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Forestry Science Research Institute of Foshan, Foshan 528222, China; 3 College of Mathematics and

Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of different addition amounts of litter biochar on growth, heavy metal absorption and accumulation of *Ruellia simplex* planted in the sludge + soil mixed matrix, and provide a

收稿日期: 2022-10-08 网络首发时间: 2023-03-31 10:47:09

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230331.0913.002.html>

作者简介: 朱洁怡, 硕士研究生, 主要从事园林生态学研究, E-mail: yi953699379@qq.com; 通信作者: 金玲玲, 副教授, 硕士, 主要从事应用数学研究, E-mail: jinlingling@scau.edu.cn; 曾曙才, 教授, 博士, 主要从事森林生态学研究, E-mail: sczeng@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (31971629)

reference for the resource utilization of municipal sludge and garden waste. 【Method】 A pot experiment was conducted to analyze the effects of adding 0 (CK), 1.5% (F_{1.5}), 3.0% (F_{3.0}) and 4.5% (F_{4.5}) of litter biochar on growth, root morphology, physiology, nutrient and heavy metal uptake and accumulation of *Ruellia simplex*. 【Result】 Compared with CK, F_{1.5} significantly increased plant height, root biomass, shoot biomass and whole plant biomass. The plant biomass decreased gradually with the increase of biochar addition. The biomass of F_{4.5} was significantly lower than that of CK, showing the characteristic of “low promotion and high inhibition”. Total root length, root surface area, average diameter and root volume of *Ruellia simplex* reached the maximum in F_{1.5} treatment, and all of them gradually decreased with the increase of biochar addition. Among all treatments, the contents of soluble protein and malondialdehyde (MDA) in roots of F_{1.5} were the lowest, and the activity of superoxide dismutase (SOD) was the highest. The SOD activity of roots showed a downward trend with the increase of biochar addition, while the change trends of soluble protein and MDA contents were opposite. Compared with CK, all treatments increased the uptakes of N, P and K of *R. simplex* shoots and roots to different degrees, reduced the contents of Cd and Cu in *R. simplex* plant to different degrees, and increased the contents of Pb and Ni. The accumulative amounts of N, P, K, Cd, Cu, and Pb in *R. simplex* plant showed a downward trend with the increase of biochar addition, and the accumulative amounts of N, P, K, Cd, Cu, Pb and Ni of F_{1.5} were significantly higher than those of CK. 【Conclusion】 The addition of 1.5% litter biochar significantly promoted *R. simplex* growth, absorption and accumulation of Pb, Cu, Cd and Ni, but excessive addition would inhibit plant growth and affect the repair effect of substrate. Therefore, the applied amount of biochar should be controlled reasonably in the practical application process.

Key words: Biochar; Applied amount; *Ruellia simplex*; Plant growth; Heavy metal absorption; Soil remediation

城市污水产生量随城市发展逐年增加, 污水处理厂产生的污泥 80% 以上没有得到合理处置^[1]. 污泥中含有大量病原菌、重金属、有机污染物等有害物质, 如果不对其加以合理处置将会对土壤和地下水造成二次污染^[2]; 除了有害物质, 污泥中还富含有机质、N、P、K 等营养物质^[3]. 如何将污泥经过减量、稳定化和无害化处理后作为资源利用已成为热点问题. 目前, 我国污泥的处理方式主要有土地利用、卫生填埋和焚烧处理, 其中, 园林绿化利用是污泥土地利用的主要方式^[4]. 将污泥用作园林土壤改良剂, 不仅可以解决污泥堆放问题, 还可以有效地改善土质、增加土壤肥力并促进植物的生长^[5], 为污泥资源化利用提供了更多可能. 然而, 污泥中富含的重金属是园林绿化利用的关键限制因素^[6], 降低污泥重金属风险成为提高污泥资源利用率的有效途径.

生物炭作为一种新型高效廉价的多功能材料, 具有含炭量高、孔隙结构丰富、比表面积大等特点, 能够有效吸附土壤重金属, 在土壤改良和植物生长方面具有重要作用^[7]. 研究表明在污泥中施用生物炭对重金属具有显著的钝化效果^[8], 可以显著降低重金属有效态含量, 有助于缓解重金属毒害作用, 实现污泥的资源化利用. 高山榕 *Ficus altissima* 是华南地区乡土树种, 在园林绿化中种植历史悠久

且面积大, 其凋落物产量大, 含有许多植物生长所需的营养物质^[9]. 将高山榕凋落物制备成生物炭, 可以有效减轻因堆积或焚烧带来的环境污染问题, 将其添加到经污泥改良的园林土壤中, 可以降低重金属活性, 减少环境污染风险, 同时也能增加土壤碳封存、提高土壤肥力^[10]. 植物修复技术具有成本低、对土壤扰动小且不会造成二次污染等优势, 被广泛应用于重金属污染土壤修复^[11]. 翠芦莉 *Ruellia simplex* 是爵床科 *Acanthaceae* 单药花属 *Aphelandra* 草本植物, 具有较高观赏价值, 生态适应性强, 在园林绿化中应用广泛, 具有抗逆性强、生长迅速、耐旱、耐湿、耐轻度盐碱、吸收重金属能力强等特点, 是土壤重金属修复的优良材料^[12]. 本文以高山榕凋落物为原料制作生物炭, 采用盆栽试验, 使用生物炭和植物对污泥混合土壤进行联合修复, 通过向污泥+土壤的混合基质中添加不同量的凋落物生物炭, 分析其对翠芦莉生长及重金属吸收积累的影响, 以期为园林废弃物利用和污泥资源化处置提供参考.

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤采自佛山市林业科学研究所树木园,

土壤类型为赤红壤,采集深度 20~60 cm,除去枯枝落叶、石块等杂物,置于室内通风处,20 d 后风干,过 4 mm 筛备用。供试污泥取自清远市绿由环保科

技有限公司的生活污水污泥,污泥经 60 d 堆肥处理后,在薄膜上摊开反复翻晒混匀,适当磨碎后过 4 mm 筛备用。供试土壤和污泥的基本性质见表 1。

表 1 供试基质的基本性质
Table 1 Basic properties of experimental materials

材料 Material	pH	w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)							
		有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	Cu	Pb	Cd	Ni	
		Organic matter	Total N	Total P	Total K	Available N	Available P	Available K					
土壤 Soil	5.77	15.41	0.70	0.38	2.71	26.83	15.27	65.23	17.31	29.56	0.18	10.10	
污泥 Sewage sludge	7.52	96.54	7.35	4.81	6.43	428.50	611.08	413.27	423.66	48.51	19.88	47.96	

高山榕落叶凋落物取自佛山市林业科学研究所。将高山榕落叶在 80 ℃ 的烘箱内烘干 12 h,然后放入连续热解装置 (BCP-05, 辽宁省能源研究所) 中制备生物炭。将制备好的凋落物生物炭适当压碎过 2 mm 筛,充分混匀后备用。凋落物生物炭基本性质: N、C、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 的质量分数分别为 1.255 0%、66.705 0%、3.480 0%、0.001 4%、0.010 8%、0.000 4% 和 0.024 8%, C/N 为 53、C/H 为 19, 阳离子交换量 (CEC) 21.570 cmol/kg, 比表面积 2.080 m²/g, 总孔容积 0.013 cm³/g, 平均孔径 34.721 nm, pH 为 12.5。

翠芦莉购于广州市芳村花博园,选择植株健壮、长势良好、高 30~40 cm 的半年生幼苗用于试验。栽培用盆为高 19.5 cm、口径 22 cm 且底部带孔的塑胶花盆。

1.2 盆栽试验

2019 年 10 月至 2020 年 6 月,在佛山市林业科学研究所温室大棚进行盆栽试验。污泥和赤红壤按照质量比 1:1 混合均匀作为栽培基质,每盆基质 3 kg,凋落物生物炭的添加量按质量分数 (w) 设置 4 个处理: 0 (不添加凋落物, CK)、1.5% (F_{1.5})、3.0% (F_{3.0}) 和 4.5% (F_{4.5})。平衡 3 周,每个处理共 9 次重复 (9 盆),其中 3 盆用于测定种植前基质理化性质;另外 6 盆种植植物 (每盆种植 1 株),并从中选择 3 盆长势一致的植株用于测定植物生长发育、重金属指标及根系生理指标。植物生长期间定期浇水,保持土壤含水量在田间持水量的 70% 左右,大棚温度控制在 25~30 ℃。

1.3 测定项目与方法

种植前和收苗时分别采用米尺和游标卡尺测量植株株高和地径。试验结束后将整株植物挖出带回实验室,自来水冲洗干净根部后,再用去离

子水冲洗 3 遍并置于室内晾干。用双光源扫描仪扫描植物根系,然后用根分析软件 WinRHIZO Pro 2005b (Regent Instruments Inc) 分析根长、根表面积、根体积等形态指标。将地上部分和根剪断,分别装入信封,放入烘箱 105 ℃ 杀青 30 min, 70 ℃ 烘至恒质量,用电子天平称根和地上部生物量,用不锈钢粉碎机将植物样品粉碎,密封保存备用。

植物养分和重金属测定:用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解植物样品获得待测液,植物全氮 (N) 含量使用凯氏定氮仪测定,全磷 (P) 含量采用钼锑抗比色法测定,全钾 (K) 含量用原子吸收分光光度计测定。植物可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定,超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑光化还原法测定,丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 显色法测定。植物体内重金属元素 Cu、Pb、Cd、Ni 含量采用 HNO₃-HClO₄ (质量比 8:2) 消煮-原子吸收分光光度计测定^[13]。植物各部位及全株元素累积量、全株元素含量计算公式如下:

各部位元素累积量=各部位生物量×各部位元素含量;

全株元素累积量=根累积量+地上部累积量;

全株元素含量=全株元素累积量/全株生物量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2008 对数据进行整理,利用 Origin 2021 软件进行数据处理和作图。采用 SPSS 19.0 进行统计分析,采用单因素 (One-way ANOVA) 和 Duncan's 法进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 凋落物生物炭对翠芦莉生长的影响

不同生物炭添加量对翠芦莉在污泥+土壤混合基质中的生长有显著影响 (表 2)。F_{1.5} 处理的翠芦

表 2 凋落物生物炭添加量对翠芦莉生长的影响¹⁾

Table 2 Effect of litter biochar application on the growth of *Ruellia simplex*

处理 Treatment	株高/cm Plant height	生物量/g Biomass		
		根部 Root	地上部 Above ground	全株 Whole plant
CK	106.67±1.86b	6.97±0.04b	31.22±1.39b	38.19±1.38b
F _{1.5}	124.00±4.51a	16.45±0.90a	50.72±2.35a	67.17±3.25a
F _{3.0}	104.67±2.33b	8.16±0.24b	29.80±1.99b	37.96±2.11b
F _{4.5}	98.00±3.79b	5.11±0.10c	20.73±0.64c	25.84±0.72c

1)表中数据为平均值±标准误, 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($n=3, P<0.05$, Duncan's法)

1)The data were mean±standard error, and the different lowercase letters after data of the same column indicated significant differences among treatments ($n=3, P<0.05$, Duncan's test)

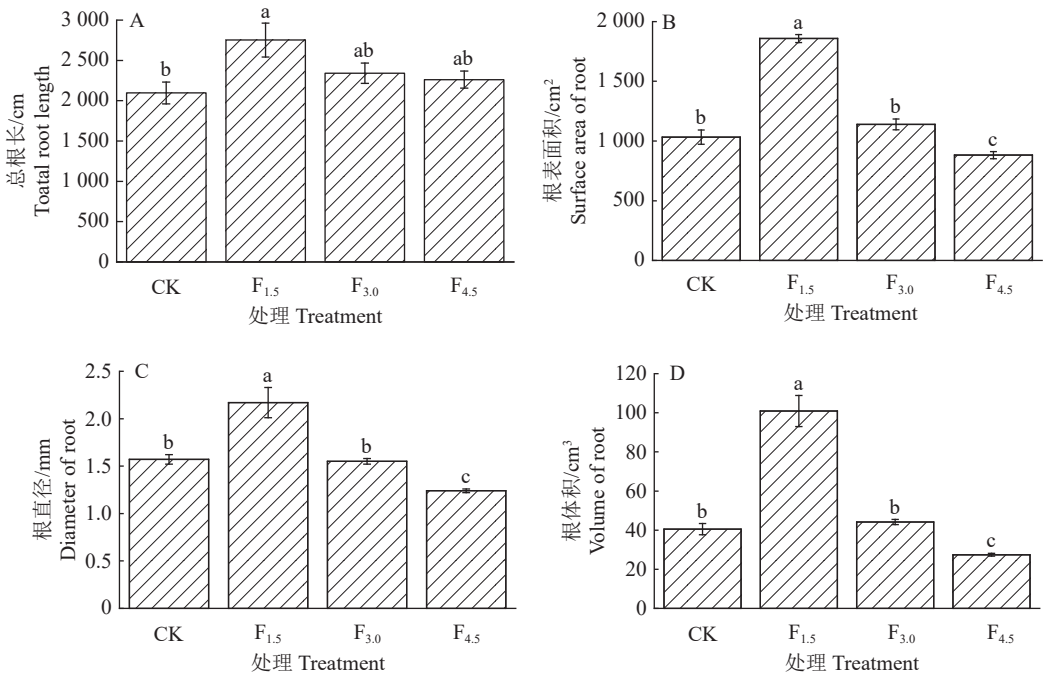
莉株高为 124.00 cm, 较 CK 增加了 16.25%, 显著大于 CK 和其他处理, 其他处理间差异不显著。与 CK 相比, F_{1.5} 处理显著促进翠芦莉根部、地上部及全株的生物量增长, 增幅分别为 136.01%、62.46% 和 75.88%。翠芦莉根部、地上部及全株生物量随着生物炭添加量的增加显著下降, F_{4.5} 处理各指标均显著低于 CK, 分别比 CK 下降 26.69%、33.60% 和 32.34%。

2.2 凋落物生物炭对翠芦莉根系形态及生理特性的影响

F_{1.5} 处理的翠芦莉总根长、根表面积、直径和体积均显著大于 CK(图 1), 分别是 CK 的 1.31、1.80、

1.38 和 2.49 倍; F_{3.0} 处理的植株总根长、根表面积、直径、体积均与 CK 无显著差异; F_{4.5} 处理的植株根表面积、直径和体积显著低于 CK。随着生物炭添加量的增加, 翠芦莉的根表面积、直径和体积均呈逐渐下降的趋势。

由图 2 可知, 在不同生物炭添加量处理下, 翠芦莉根系可溶性蛋白和 MDA 含量均随着生物炭添加量增加呈上升趋势, 而 SOD 活性则呈明显下降趋势。F_{1.5} 处理的翠芦莉根系可溶性蛋白和 MDA 含量显著低于 CK 和其他处理, 比 CK 分别降低 26.04% 和 36.82%, SOD 活性显著高于 CK 和 F_{4.5} 处理, 比 CK 和 F_{4.5} 分别提高了 148.74% 和 100.91%。

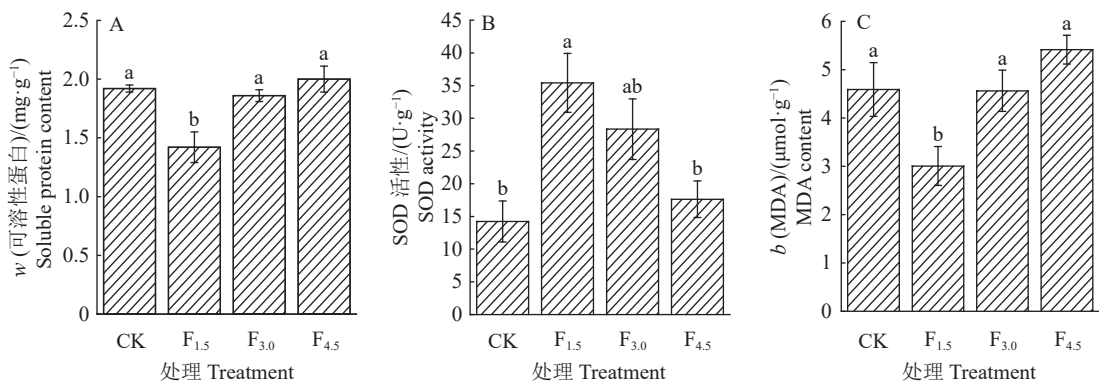


各图中柱子上方不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters on bars of each figure indicated significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

图 1 凋落物生物炭添加量对翠芦莉根系形态的影响

Fig. 1 Effect of litter biochar addition on the morphology of *Ruellia simplex* roots



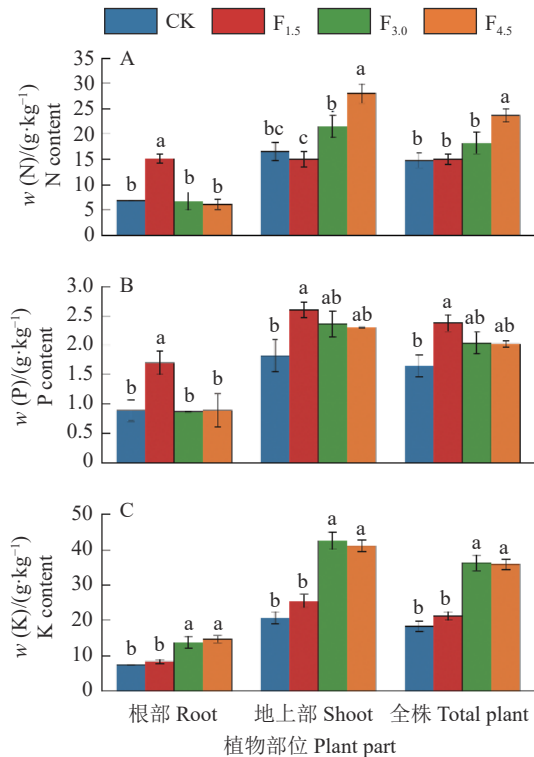
各图中柱子上方不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on bars of each figure indicated significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

图 2 凋落物生物炭添加量对翠芦莉根系生理的影响

Fig. 2 Effect of litter biochar addition on the physiology of *Ruellia simplex* roots

2.3 凋落物生物炭对翠芦莉养分吸收和累积的影响

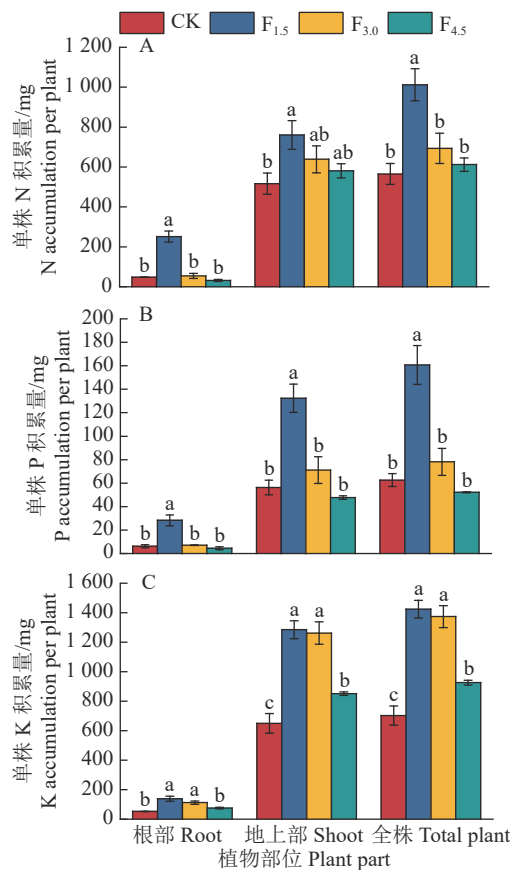
凋落物生物炭不同程度促进了翠芦莉对 N、P、K 的吸收 (图 3)。与 CK 相比, F_{1.5} 处理显著地提高了翠芦莉根部 N 含量及根部、地上部、全株 P 含量 (分别是 CK 的 2.20、1.91、1.43 和 1.44 倍), 对 K 含量无显著影响。与 CK 相比, F_{3.0}、F_{4.5} 处理显著地增加了植株根部、地上部和全株 K 含量, F_{4.5} 处理的全株 N 含量最大。



各图中相同植物部位柱子上方不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on bars of the same plant part in each figure indicated significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

图 3 凋落物生物炭添加量对翠芦莉养分含量的影响
Fig. 3 Effect of litter biochar addition on the nutrient content of *Ruellia simplex*

由图 4 可知, F_{1.5} 处理翠芦莉根部、地上部及全株的 N、P、K 积累量在所有处理中均为最大值且显著高于 CK。F_{3.0} 处理显著增加了翠芦莉根部、地上部及全株 K 积累量, 比 CK 分别提高 113.24%、94.14% 和 95.57%。与 CK 相比, F_{4.5} 处理显著增加



各图中相同植物部位柱子上方不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on bars of the same plant part in each figure indicated significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

图 4 凋落物生物炭添加量对翠芦莉单株养分积累量的影响
Fig. 4 Effect of litter biochar addition on the nutrient accumulation per plant of *Ruellia simplex*

地上部和全株 K 积累量, 比 CK 分别提高 30.94% 和 31.88%, 但对植株 N、P 积累量及根部 K 积累量无显著影响。

2.4 凋落物生物炭对翠芦莉吸收累积重金属的影响

与 CK 相比, 各处理均显著降低了翠芦莉根部 Cd、Cu 以及地上部 Cu 的含量 (表 3), 降幅为 34%~52%; 显著提高了地上部 Pb 含量, 增幅为 196%~293%; 根部 Pb 和地上部 Cd 含量与 CK 相比无显著差异。各处理地上部及 F_{3.0} 和 F_{4.5} 处理根部 Ni 含量均显著高于 CK, F_{1.5} 处理根部 Ni 含量与 CK 无显著差异。从全株来看, 各处理翠芦莉 Cd、

Cu 含量均小于 CK, F_{3.0} 处理翠芦莉 Cd 含量 (w 为 $1.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最小, F_{4.5} 处理 Cu 含量 (w 为 $17.72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最小; 各处理翠芦莉 Pb、Ni 含量均显著大于 CK, F_{1.5} 处理 Pb 含量 (w 为 $2.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最大, F_{4.5} 处理 Ni 含量 (w 为 $15.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最大。

由表 4 可知, F_{1.5} 处理翠芦莉根部、地上部及全株 Cd 积累量均显著大于其他处理, 分别是 CK 的 1.54、1.71 和 1.59 倍, F_{3.0} 和 F_{4.5} 处理根部和全株 Cd 积累量显著低于 F_{1.5} 和 CK。F_{1.5} 处理翠芦莉地上部和全株 Cu、Pb 积累量显著高于其他处理, 各处理根部 Pb 积累量无显著差异。翠芦莉根部、地上

表 3 凋落物生物炭添加量对翠芦莉植株不同部位重金属含量的影响¹⁾

Table 3 Effect of litter biochar addition on heavy metal content in different organ of <i>Ruellia simplex</i>					$w/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
植株部位 Plant part	处理 Treatment	Cd	Cu	Pb	Ni
根部 Root	CK	7.21±0.34a	56.66±2.04a	2.46±0.44ab	1.58±0.05b
	F _{1.5}	4.75±0.42b	21.71±0.78d	1.49±0.02b	1.66±0.08b
	F _{3.0}	3.58±0.77b	42.17±2.31b	2.70±0.36a	3.95±1.08a
	F _{4.5}	3.48±0.83b	30.27±0.83c	3.54±0.29a	5.57±0.49a
地上部 Shoot	CK	0.62±0.13a	34.18±1.01a	0.60±0.21b	1.04±0.13c
	F _{1.5}	0.64±0.04a	25.33±0.03b	2.36±0.29a	6.88±0.25b
	F _{3.0}	0.51±0.05a	13.78±0.66c	1.86±0.08a	4.37±0.48b
	F _{4.5}	0.66±0.09a	14.62±0.95c	1.78±0.14a	18.00±1.85a
全株 Total plant	CK	1.83±0.20a	38.26±0.78a	0.95±0.17b	1.14±0.10c
	F _{1.5}	1.65±0.10ab	24.44±0.22b	2.65±0.62a	5.61±0.18b
	F _{3.0}	1.16±0.18b	19.94±1.27c	2.04±0.05a	4.25±0.48b
	F _{4.5}	1.22±0.24ab	17.72±0.59c	2.13±0.14a	15.54±1.45a

1)表中数据为平均值±标准误, 相同部位同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($n=3, P<0.05$, Duncan's法)
1)The data were mean ± standard error, and different lowercase letters after data of the same plant part on the same column indicated significant differences among treatments ($n=3, P<0.05$, Duncan's test)

表 4 凋落物生物炭添加量对翠芦莉单株不同部位重金属积累量的影响¹⁾

Table 4 Effect of litter biochar addition on heavy metal accumulation of different organ per plant of <i>Ruellia simplex</i>					μg
植株部位 Plant part	处理 Treatment	Cd	Cu	Pb	Ni
根部 Root	CK	50.19±2.34b	394.90±14.08a	17.17±3.17a	11.02±0.37b
	F _{1.5}	77.42±3.57a	356.59±19.31ab	24.46±1.24a	27.27±2.24ab
	F _{3.0}	29.18±6.22c	343.72±17.47b	21.85±2.22a	32.46±9.53a
	F _{4.5}	17.82±4.35c	154.64±1.50c	18.17±1.82a	28.57±2.97a
地上部 Shoot	CK	19.11±3.19b	1064.96±26.15b	19.39±7.71c	32.84±5.42c
	F _{1.5}	32.61±2.36a	1284.56±58.40a	118.66±12.16a	348.21±9.23a
	F _{3.0}	15.43±2.06b	407.97±7.45c	55.54±6.04b	130.48±18.18b
	F _{4.5}	13.60±1.61b	304.05±27.27c	37.07±3.77bc	373.33±41.08a
全株 Total plant	CK	69.36±5.50b	1459.86±39.96b	36.56±7.61c	43.86±5.05c
	F _{1.5}	110.03±1.22a	1641.16±75.46a	178.24±44.55a	375.48±9.89a
	F _{3.0}	44.61±8.20c	751.69±10.13c	77.39±5.11b	162.94±26.08b
	F _{4.5}	31.42±5.76c	458.69±26.41d	55.24±5.13bc	401.90±40.26a

1) 表中数据为平均值±标准误, 相同部位同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($n=3, P<0.05$, Duncan's法)
1) The data were mean±standard error, and different lowercase letters after data of the same plant part on the same column indicated significant differences among treatments ($n=3, P<0.05$, Duncan's test)

部和全株 Cd、Cu、Pb 累积量均随着生物炭添加量增加而降低。

3 讨论与结论

3.1 凋落物生物炭添加量对植物生长和养分吸收的影响

本试验结果表明,在污泥+赤红壤基质中添加适量(w 为 1.5%)凋落物生物炭可以显著促进翠芦莉株高和生物量的增长,这与 Agbna 等^[14]关于不同添加量生物炭对番茄 *Solanum lycopersicum* 生长影响的研究结果一致。可能是因为生物炭通过改变土壤孔隙度和团聚体结构、调节土壤酸碱度等改善了土壤微环境^[15],从而促进了植物生长。翠芦莉株高及各部分生物量随着施炭量增加呈逐渐降低的趋势,且 $F_{4.5}$ 处理显著低于 CK,呈现低浓度促进高浓度抑制的特点,这与朱自洋等^[16]发现添加低浓度(w 为 1%~5%)生物炭可以显著促进黑麦草 *Lolium perenne* 的生长、高浓度($w>15\%$)的生物炭抑制黑麦草生长的研究结果一致。原因可能与高浓度生物炭对土壤水分和养分的吸附作用过强且与植物产生竞争作用,从而抑制植物根系对养分、水分的吸收有关^[17];此外,施用过量生物炭可能会改变土壤酸碱度、提高土壤碳氮比并对土壤微生物群落产生影响^[18],进而改变植物根系生长条件。

生物炭在改善土壤环境的同时也提高了养分的有效性,进而促进植株对养分的吸收利用。本研究发现,施用生物炭不同程度提高翠芦莉各器官 N、P、K 的含量,其中, $F_{1.5}$ 处理的全株 N、K 含量显著高于 CK。这可能是因为生物炭本身富含较多的可溶性矿质养分并具有较强的吸附力,在增加土壤中速效养分含量的同时减少矿质养分离子的迁移和淋失,从而提高了植物对养分的利用率^[19]。翠芦莉全株 P 含量随着施氮量增加呈现先增加后下降趋势, $F_{1.5}$ 处理的翠芦莉植株 P 含量达到最大,这与孙海妮等^[20]研究结果较为吻合。出现这种现象的原因可能是低浓度的生物炭可以通过其表面官能团与土壤 Fe 和 Al 氧化物等矿物的 P 吸附位点之间产生竞争从而降低 P 的吸附、增加土壤中有效 P 含量^[21];随着施炭量增大,土壤中 C/N 增大,引起土壤中有效 P 的生物固定和化学固定^[22],降低了植物可利用 P 含量。

3.2 凋落物生物炭添加量对植物根系形态和生理特性的影响

根系形态对植物吸收养分的能力起着决定性作用,良好的根系发育可以增大根系与土壤的接触

面积,促进植物对养分的吸收,进一步提高地上部光合产物的形成及干物质的积累^[23]。有研究表明,生物炭可以增加植物根系总根长、直径和根体积等,根系形态的改善与生物炭具有较大的比表面积和丰富的孔隙结构有关^[24]。在本试验中, $F_{1.5}$ 处理的翠芦莉根系形态得到显著改善,随着生物炭添加量增加,翠芦莉的根直径、根体积和根表面积逐渐减小,在高浓度时受到明显抑制,这与唐光木等^[25]发现施用过量的生物炭 ($45.0\times10^3\text{ kg/hm}^2$) 抑制棉花 *Gossypium spp.* 根系发育的结果一致。说明添加适量的生物炭可以促进植物根系生长,但过量施用则不利于植物根系形态建成。本研究还发现,不同添加量生物炭对翠芦莉的根系形态和植株生长的影响相似,表明生物炭对植株生长的作用与根系形态的变化密切相关。

根系与生物炭之间存在直接或间接的交互作用,生物炭可能会吸附或释放影响根系分泌物的化学信号,从而刺激和干扰根系生理进程,并对植物根系形态和整体生长产生影响^[26]。研究表明不同添加量生物炭均可以提高娜塔栎 *Quercus nuttallii* 的根系可溶性蛋白含量^[27]。本研究结果显示, $F_{1.5}$ 处理的翠芦莉根系可溶性蛋白含量显著低于 CK,其他处理与 CK 差异不显著。这可能是由于 $F_{1.5}$ 处理的植物根系生长最好,造成根系量最大,从而稀释根系中的可溶性蛋白含量。本试验中,翠芦莉根系的 SOD 活性随生物炭添加量增加呈现下降趋势,这与朱奕豪等^[28]关于生物炭添加量对百合 *Lilium brownii* var. *viridulum* 根系生理特性影响的结果一致。原因可能是适量生物炭诱导了保护酶活性的提高,随着生物炭添加量的增加污染物含量增大,过量的活性氧不能有效被清除,当植株内部氧化物积累到一定程度时导致酶活性降低^[29]。MDA 是植物在逆境下膜脂氧化的主要产物,其含量越高表示植物受伤害程度越严重^[30]。本研究结果显示, $F_{1.5}$ 处理的翠芦莉根系 MDA 含量最小,说明植物在此时根系受到伤害最小,根系抵御不利环境的能力最强。

3.3 凋落物生物炭添加量对植物重金属吸收累积的影响

在本试验中,随着生物炭添加量的增加翠芦莉植株 Cu、Cd 含量均低于 CK,表明翠芦莉在生物炭作用下受 Cd、Cu 的毒害影响逐渐减小,这可能是因为生物炭对重金属具有较强的吸附作用。有研究表明生物炭可以通过吸附固定土壤中的重金属、减小土壤中重金属可交换态比例,从而达到修复土

壤、减少植物对重金属吸收的效果^[8, 31]。董盼盼等^[32]发现芦苇 *Phragmites australis* 生长期内添加生物炭加强了对重金属 Pb 的固定作用。本文添加生物炭后翠芦莉植株 Pb、Ni 含量均高于 CK, 说明植物和生物炭之间存在拮抗作用, 翠芦莉对 Pb、Ni 的吸收作用强于生物炭对 Pb、Ni 的固定作用。王军等^[33]研究发现, 添加不同比例的污泥生物炭后, 黑麦草中的 Pb、Ni 含量均高于 CK, 主要是由于土壤中的重金属含量和形态以及土壤理化性质导致的。本研究中 F_{4.5} 处理翠芦莉植株 Ni 含量最高 (w 为 $15.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 是 CK 的 13.63 倍, 推测 F_{4.5} 处理促进翠芦莉对 Ni 的吸收, 但植物生长势最差, 从而导致体内 Ni 含量升高, 这对植物生长产生不良影响。本研究中翠芦莉体内 Cd、Pb、Cu 总积累量均呈现先增加后下降的趋势, 这与植株生物量变化相符, 说明除了植物重金属含量外, 生物量同样影响植株对重金属积累的效果。一般来说, 在重金属未对植物产生毒害作用的情况下, 生物量越大的植物对重金属的累积作用越强, 对基质的修复效果越好^[34]。F_{1.5} 处理中的生物量和植株 Cd、Cu、Pb、Ni 的积累量均为所有处理中最大值, 且这 4 种重金属的积累量较 CK 的增长幅度均最大, 显示出该处理下植株未受毒害的同时对污泥具有较好的耐受性, 且有较强的重金属吸收积累能力。

3.4 结论

在污泥质量分数高达 50% 的基质中翠芦莉能够正常生长, 说明其对污泥适应性较强。施用适量的生物炭 (w 为 1.5%), 能显著改善翠芦莉生长并增加重金属吸收累积, 但过高施用量 (w 为 4.5%) 会对翠芦莉的生长和根系发育产生抑制作用, 进而影响其吸收重金属的能力。因此, 在实际利用过程中应合理控制生物炭的施入量才能达到促进植物生长和修复土壤的最佳效果。在本研究中, 城市污泥在园林绿化中得到资源化利用, 园林凋落物通过制成生物炭既实现了碳封存, 施入污泥土壤基质后又改良了基质性质, 并促进了植物生长及重金属提取, 达到了城市污泥、凋落物资源化利用和污泥重金属修复的目的, 是一条城市废物处置的可持续发展路径。

参考文献:

[1] YANG G, ZHANG G, WANG H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China[J]. *Water Research*, 2015, 78: 60-73.

[2] HU Y, XU F, CHEN X, et al. Research progress on resource utilization of municipal sludge[J]. *Meteorological*

and Environmental Research, 2019, 10(2): 64-66.

[3] 陈学民, 王惠, 伏小勇, 等. 赤子爱胜蚓处理污泥对其性质变化的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(6): 1421-1425.

[4] 余杰, 陈同斌, 高定, 等. 中国城市污泥土地利用关注的典型有机污染物[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2365-2369.

[5] 赖明丽, 董晓全, 谢姗宴, 等. 污泥施用下园林植物生长适应性和重金属吸收[J]. *华南农业大学学报*, 2022, 43(4): 47-57.

[6] YUE Y, CUI L, LI Q M, et al. Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth[J]. *Chemosphere*, 2017, 173: 551-556.

[7] CORNELISSEN G, KUKULSKA Z, KALAITZIDIS S, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(13): 3632-3640.

[8] 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.

[9] 卢晓蓉. 不同添加量凋落物及生物质炭对土壤有机碳矿化和微生物群落结构的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.

[10] SARMAH M, BORGOHAIN A, GOGOI B B, et al. Insights into the effects of tea pruning litter biochar on major micronutrients (Cu, Mn, and Zn) pathway from soil to tea plant: An environmental armour[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442(129970): 1-16.

[11] OLADOYE P O, OLOWE O M, ASEMOLAYE M D. Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature[J]. *Chemosphere*, 2022, 288: 132555.

[12] 王淑民, 陈能海, 刘向国, 等. 粉煤灰钝化污泥对园林黄壤改良的效果[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(10): 1097-1103.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[14] AGBNA G H D, SHE D L, LIU Z P, et al. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 222: 90-101.

[15] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 472-476.

[16] 朱自洋, 段文焱, 陈芳媛, 等. 干旱土壤中生物炭对黑麦草生长的促进机制[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 352-359.

[17] KOCSIS T, KOTROCZÓ Z, KARDOS L, et al. Optimization of increasing biochar doses with soil-plant-microbial functioning and nutrient uptake of maize[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 20(101191): 1-9.

[18] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对东北冷凉区水稻秧

苗根系形态建成与解剖结构的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(1): 72-81.

[19] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156-161.

[20] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 159-167.

[21] MORALES M M, COMERFORD N, GUERRINI I A, et al. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar-soil mixtures[J]. Soil Use & Management, 2013, 29(3): 306-314.

[22] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 85-92.

[23] PURAKAYASTHA T J, BERA T, BHADURI D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security[J]. Chemosphere, 2019, 227: 345-365.

[24] JABBOROVA D, MA H, BELLINGRATH-KIMURA S D, et al. Impacts of biochar on basil (*Ocimum basilicum*) growth, root morphological traits, plant biochemical and physiological properties and soil enzymatic activities[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 290(110518): 1-7.

[25] 唐光木, 侯艳艳, 潘金龙, 等. 棉秆生物炭对棉花根系特性及生理代谢的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(3): 370-378.

[26] 刘悦, 黎子涵, 邹博, 等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1030-1038.

[27] 许樊蓉, 唐盛兰, 吴文, 等. 生物炭添加对娜塔栎容器苗生长和营养状况的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022(7): 76-84.

[28] 朱奕豪, 朱彦霖, 曹兴, 等. 生物炭对百合生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2017(7): 92-98.

[29] 李阳, 黄梅, 沈飞, 等. 生物炭对小麦种子萌发与幼苗生长的植物毒理效应[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 234-242.

[30] 任怀新, 王冬梅, 王慧, 等. 生物炭对盐碱胁迫下黑麦草和紫花苜蓿光合及抗氧化特征的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 116-123.

[31] WU D, PENG W, BAO L, et al. Biochar alleviating heavy metals phytotoxicity in sludge-amended soil varies with plant adaptability[J]. Environmental Research, 2022, 215(114248): 1-10.

[32] 董盼盼, 张振明, 张明祥. 生物炭-植物联合修复对土壤重金属 Pb、Cd 分布效应[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 280-286.

[33] 王军, 刘程, 金鹏, 等. 污泥基生物炭对黑麦草生长特性及重金属累积的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(15): 79-82.

[34] NISSIM W G, PALM E, MANCUSO S, et al. Trace element phytoextraction from contaminated soil: A case study under Mediterranean climate[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(9): 9114-9131.

【责任编辑 周志红】