

周惠民,李 畅,何丽斯,等. 生物质炭对杜鹃花生长及城市绿地土壤环境的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(5):172-178.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.05.023

# 生物质炭对杜鹃花生长及城市绿地土壤环境的影响

周惠民,李 畅,何丽斯,刘晓青,孙晓波,郭臻昊,苏家乐

(江苏省农业科学院休闲农业研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室,江苏南京 210014)

**摘要:**以盆栽试验方式设置生物质炭添加量为 0% (C0)、1% (C1)、2% (C2)、4% (C3)、6% (C4)、8% (C5) 和 10% (C6) 7 个处理,测定分析根际土壤理化特征、养分含量以及杜鹃花根系发育及养分积累等相关参数,研究生物质炭对嗜酸性杜鹃花生长和城市绿地土壤环境的影响。结果表明,与 C0 相比,高用量生物质炭(C4、C5 和 C6)土壤添加下根际土壤 pH 值显著下降(7.32% ~ 10.14%),土壤有机质、全氮、有效磷和有效钾含量显著提高;杜鹃花叶片 SPAD 值和总干质量分别提高 164% ~ 209% 和 37.6% ~ 69.8%;植株氮、磷和钾总积累量分别提高 68.3% ~ 125.0%、71.9% ~ 96.8%、59.6% ~ 83.7%;群体成花率 > 30%。添加低(C1)、中(C2 和 C3)用量生物质炭对杜鹃花营养生长的促进作用优于生殖生长,且对土壤理化性质的改良效应弱于高用量生物质炭。综上,高用量生物质炭的施用可较好地提高土壤肥力、优化土壤环境,并提高叶片叶绿素含量、促进杜鹃花生殖生长从而实现土壤改良与景观优化的共赢。

**关键词:**生物质炭;土壤性质;杜鹃花;生长发育;城市绿地

**中图分类号:**S685.210.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)05-0172-07

随着城市化进程的加快,越来越多的研究关注到城市绿地土壤质量,其直接决定城市绿化以及景观建设的成败<sup>[1]</sup>。绿地土壤受到严重的人为干扰,导致一些土壤不能支持景观植物的健康生长,例如大量水泥、砖石等建筑垃圾的混入使土壤 pH 值一般呈强碱性;落叶清扫等管理措施导致有机物来源切断而引起土壤有机质含量偏低;人为的践踏导致土壤容重高于根系穿插的临界值等<sup>[2-3]</sup>。杜鹃花(*Rhododendronsimsii*)是一种嗜酸的多年生木本植物,也是重要的园林和盆栽花卉,已广泛种植于公园、绿化带、居民区等城市绿地。虽然杜鹃花植物根系有一类菌根真菌(杜鹃花类菌根)可以辅助其在恶劣的土壤环境下生长,但不断下降的土壤质量已导致杜鹃花成花率低,长势弱,甚至大量死

亡<sup>[4-5]</sup>。因此,需要合适的土壤改良方法以提高杜鹃花在城市绿地中的生存率及生长势。

生物质炭是农业废弃生物质(秸秆、木屑、畜禽粪便等)在限氧条件下经过热裂解产生的一种富含碳素(C)的材料,近年来生物质炭对污染农田土壤的修复与改良以及对农作物、果蔬等产量与品质的影响已有大量的研究报道<sup>[6]</sup>。大量田间试验研究表明,添加生物质炭可以提高土壤肥力,增加土壤团粒结构,改善土壤理化性质,促进作物养分吸收并提高作物生产力<sup>[7-10]</sup>。生物质炭的原料、生产条件(裂解温度等)及施用量都是影响其功能发挥的重要因子<sup>[11]</sup>。Liu 等通过整合分析研究表明,作物的增产效应伴随着生物质炭施用量的增加而增强<sup>[7]</sup>;Zhou 等研究发现,虽然生物质炭的施用量对土壤 qCO<sub>2</sub> 含量无显著影响,但随着生物质炭施入量的提高,土壤中 qCO<sub>2</sub> 含量呈降低的趋势<sup>[12]</sup>;张登晓研究发现,生物质炭施用量与其对土壤有效磷的效应呈显著正相关关系<sup>[13]</sup>。笔者前期研究表明,生物质炭的热裂解温度会影响其对杜鹃花生长和土壤性质的效应,发现 350 ℃ 和 550 ℃ 制备的生物质炭对杜鹃花生长有显著的促进作用,而 700 ℃ 生物质炭对杜鹃花生长有一定的抑制作用<sup>[14]</sup>。虽然前期已初步探明了不同热裂解温度生物质炭对杜鹃花组培幼苗生长的影响,然而低温生物质炭对杜鹃花生长的适宜添加量仍不清楚,对于不同生物

收稿日期:2022-04-11

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(22)3061];国家自然科学基金(编号:41807100);江苏省林业科技创新与推广专项(编号:LYKJ[2021]06);核心种源攻关项目(编号:JBCS[2021]095);江苏省林业发展专项(编号:苏财资环[2022]18号);江苏现代农业(花卉)产业技术体系(编号:JATS[2022]101);中央财政林业科技推广示范资金项目(编号:苏[2021]TG06号)。

作者简介:周惠民(1990—),女,江苏东台人,博士,助理研究员,主要从事杜鹃花栽培、城市退化土壤改良等研究。E-mail:zing1018@163.com。

通信作者:苏家乐,硕士,研究员,主要从事花卉新品种选育与栽培技术研究。E-mail:sujl66@aliyun.com。

质炭用量对杜鹃花生长以及城市绿地土壤环境的影响仍需进一步研究。

因此,本研究拟以一年生杜鹃扦插苗为试验材料,添加不同量的生物质炭,分析杜鹃花根际土壤 pH 值、有机质含量、养分含量以及杜鹃花根系生长发育、干物质量和养分吸收的变化特征,旨在初步探明低温生物质炭对城市土壤环境及杜鹃花生长的影响,为低温生物质炭在城市绿地土壤的改良应用提供理论基础和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所选取的杜鹃花品种为胭脂蜜,为江苏省农业科学院具有自主知识产权的新品种;试验所用盆栽土壤采集于江苏省南京市紫金山南麓绿化带,采回表土(0~20 cm)后挑拣出石块等杂物,磨碎后过 10 目筛备用。土壤的类型为黄棕壤,土壤 pH 值为(土水质量比=1:2.5)7.50,容重为 1.52,有机质含量为 7.15 g/kg,全氮含量为 0.42 g/kg,速效磷含量为 20.8 mg/kg,速效钾含量为 93.0 mg/kg。试验所选用的低温生物质炭由南京三聚企业管理有限公司提供,原料为水稻酒糟,裂解温度为 450 ℃,热裂解时间为 1 h,炭化产率为 38.7%。酒糟生物质炭主要的理化性质如下:pH 值为 5.82,有机碳含量为 674 g/kg,全氮含量为 2.7%,全磷含量为 0.76%,全钾含量为 0.90%。

### 1.2 试验设计

本试验生物质炭的施用量设计为 7 个用量水平(单因素),即不施生物质炭(对照)和施用生物质炭(烘干质量)占比为 1%、2%、4%、6%、8% 和 10% 的处理,分别标为 C0、C1、C2、C3、C4、C5 和 C6。本试验于 2018 年 4 月至 2019 年 4 月在江苏省农业科学院杜鹃花研究室智能温室中进行。首先,将土壤和不同比例的生物质炭充分混匀后装入盆中,盆栽土壤每盆质量为 0.5 kg(干质量计)。再顺沿花盆内壁加入去离子水,充分润湿土壤,使土壤湿度达到田间最大持水量。最后,静置 24 h,在每盆各栽植 2 棵生长势基本一致的一年生杜鹃花扦插苗。每个处理设 8 次重复,随机排列放置,统一按照杜鹃花常用管理措施管理,室温保持在 20~30 ℃。在 3—5 月每月施用 1 次市售肥花多多平衡肥( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  10%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  10%, $\text{P}_2\text{O}_5$  20%, $\text{K}_2\text{O}$  20%)1 次;9—11 月施用花多多促花肥( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  5%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$

5%, $\text{P}_2\text{O}_5$  30%, $\text{K}_2\text{O}$  20%)1 次。市售肥花多多水溶肥每次稀释 500 倍使用,每盆每次 150 mL。

### 1.3 样品采集及分析

栽入 365 d 后收集植物样品(分为地上部分和地下部分),收集前选择一晴朗天气用叶绿素测定仪对当年生新叶测量叶片叶绿素含量(SPAD 值),并同时测量植株株高,统计每植株花朵数量。收集样品时,每处理随机选择 8 株采集根系,用蒸馏水缓慢冲洗去除根表土粒,并在根系下方放置 100 目细筛,以便收集被水流冲洗掉的根系。将收集到的杜鹃花根系利用根系扫描仪(Epson Expression 1640XL)扫描后获得清晰的杜鹃花根系图像,并进一步根据根系图像分析软件(WinRhizo Pro. 2009c)分析获得其根系总根长、根系表面积、根尖数、根系体积等相关数据。

其余样品采集时沿盆土表面剪下地上部,将根系从盆内取出,小心剥除外围土壤,仅留下根表 0~2 mm 的土粒,轻轻抖动根部采集根际土壤,部分放置于 4 ℃ 冰箱,部分自然风干。将取过根际土壤的根系和地上部分进一步冲洗干净,吸干水分后置于烘箱,105 ℃ 下杀青 0.5 h,再用 65 ℃ 烘干至恒质量,分别称量地上部和地下部干质量。植株样品烘干、粉碎后过 100 目筛,用于养分元素含量分析。植株全氮含量的测定采用  $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$  消煮、半微量凯氏定氮法;全磷含量的测定采用钒钼黄比色法;全钾含量的测定采用  $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$  消煮、火焰光度计法<sup>[15]</sup>。

土壤 pH 值、有机质含量和养分指标的测定参照鲍士旦的方法<sup>[16]</sup>,盆栽鲜土过 2 mm 筛,利用悬浊液电位测定法( $m:V=1:2.5$ )测定土壤 pH 值;碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量;乙酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量;浓硫酸消煮-半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量;浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量。

### 1.4 数据处理

所有试验数据和图表均利用 Excel 2016 软件进行处理,不同处理间差异利用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析,利用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验( $\alpha=0.05$ )。所有测定的数据均以“平均值±标准差”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭对根际土壤 pH 值及养分的影响

添加不同用量的低温生物质炭对根际土壤 pH

值、有机质及养分含量的影响见表 1。与对照相比, C2、C3、C4、C5 和 C6 处理均显著降低了根际土壤 pH 值,下降范围为 0.25 ~0.79 个单位。与土壤 pH 值结果相反,C2、C3、C4、C5 和 C6 处理均显著提高了根际土壤有机质含量及全氮含量,且增幅随生物质炭施入量的增加而提高。对照处理下根际土壤

的速效磷及速效钾含量均值分别为 21.5 mg/kg 和 102 mg/kg,仅 C3、C4、C5 和 C6 处理提高了杜鹃花根际土壤速效磷含量,增幅为 26.0% ~52.6%;C4、C5 和 C6 显著提高了根际土壤速效钾含量,增幅为 41.2% ~87.3%。

表 1 不同用量生物质炭对根际土壤 pH 值、有机质、全氮、有效磷和有效钾含量的影响

处理	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	有效钾含量 (mg/kg)
C0	7.79 ±0.01a	12.4 ±0.95e	0.45 ±0.07e	21.5 ±1.65d	102 ±12.5d
C1	7.64 ±0.12ab	21.6 ±1.08de	0.74 ±0.08de	23.2 ±1.05cd	109 ±1.73d
C2	7.54 ±0.09b	26.6 ±3.22d	1.13 ±0.21cd	23.2 ±3.57cd	108 ±18.50d
C3	7.36 ±0.01c	47.3 ±5.02c	1.58 ±0.27c	27.1 ±1.87bc	124 ±13.00cd
C4	7.22 ±0.05cd	60.8 ±8.21b	2.56 ±0.28b	29.7 ±4.58ab	144 ±18.50bc
C5	7.07 ±0.12de	79.3 ±5.46a	3.26 ±0.23a	32.8 ±0.28a	153 ±16.50b
C6	7.00 ±0.17e	81.6 ±8.79a	2.80 ±0.53ab	29.4 ±2.37ab	191 ±3.21a

注:表中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。

2.3 生物质炭对杜鹃花生长势的影响

由图 1 可知,除 C6 处理,C1、C2、C3、C4 和 C5 处理均显著提高了杜鹃花株高,分别较对照增高了 36.4%、26.6%、18.9%、13.7% 和 27.3% (图 1-a)。添加生物质炭下叶片 SPAD 值均显著增高,增幅范围达到 108% ~209%,说明生物质炭的施入有利于叶片光合作用的进行(图 1-b)。同时,所有施用梯度的生物质炭处理显著提高了杜鹃花地上部分的干质量,其中,C1 处理较对照增幅最大,达到 100% (图 1-c);所有施用梯度的生物质炭也显著提高了杜鹃花地下部分干质量,其中,C5 处理较对照增幅最大,达到 119% (图 1-d)。

表 2 为生物质炭对杜鹃花群体开花情况的影响。因试验所用胭脂蜜扦插苗较小,植株成花率不高。其中,不添加生物质炭处理及 C1 处理,群体均无花;C2 和 C3 处理下,成花率很低(12.5% ~18.8%);C4 处理下,成花率为 31.3%;C5 和 C6 处理下,成花率达到 50% 及以上,总花朵数分别为 18 和 21 朵。

2.4 生物质炭对杜鹃花根系生长发育的影响

表 3 为生物质炭对杜鹃花根系生长发育的影响。与 CK 相比,生物质炭施入下杜鹃花总根长均显著提高,增幅分别为 28.1%、53.3%、61.1%、76.4%、77.0% 和 62.2%;与生物质炭对总根长的影响相似;与 CK 相比,生物质炭施入下根尖数增幅为 39.0% ~90.9%。根表面积增幅为 74.6% ~

119.6%,尤其以施入量为 8% 的生物质炭处理(C5)对根系的促生效果最为显著。

2.5 生物质炭对杜鹃花养分吸收的影响

生物质炭对杜鹃花地上部分和地下部分植株养分浓度的影响见图 2。由图 2 可知,生物质炭对植株地上部和地下部的影响并不完全一致。与 CK 相比,C5 和 C6 处理显著提高了地上部分 N、P 和 K 的浓度,增幅分别为 12.1% ~38.0%、30.7% ~37.1% 和 18.2% ~22.6% (图 2-a);C3 ~C6 处理显著提高了地下部分 N 浓度,增幅为 37.4% ~96.5%,对 P 和 K 的浓度无显著影响(图 2-b)。

图 3 为生物质炭添加对杜鹃花养分吸收的影响。施入生物质炭植株地上部分 N、P 和 K 的总积累量均高于 CK,增幅分别为 51.9% ~93.1%、64.9% ~104% 和 45.4% ~99.9% (图 3-a);施加不同用量生物质炭对地下部分养分吸收的影响并不一致,其中,与 CK 相比,生物质炭处理均显著提高了地下部分 N 积累量,增幅为 107% ~271%;除 C3 处理,C1、C2、C4、C5 和 C6 处理均显著提高了根系对 P 的吸收,增幅为 63.9% ~103.0%;C1、C2、C4 和 C5 处理显著提高了根系对 K 的吸收,增幅分别为 66.8%、93.3%、98.2% 和 109.0% (图 3-b)。综合地上部分与地下部分的数据,施加不同用量生物质炭处理均显著提高了植株整体对 N、P 和 K 的吸收。其中,C5 处理下植株 N 积累量最高,较对照提高了 125.0%;C1 处理下植株 K 积累量最高,较对

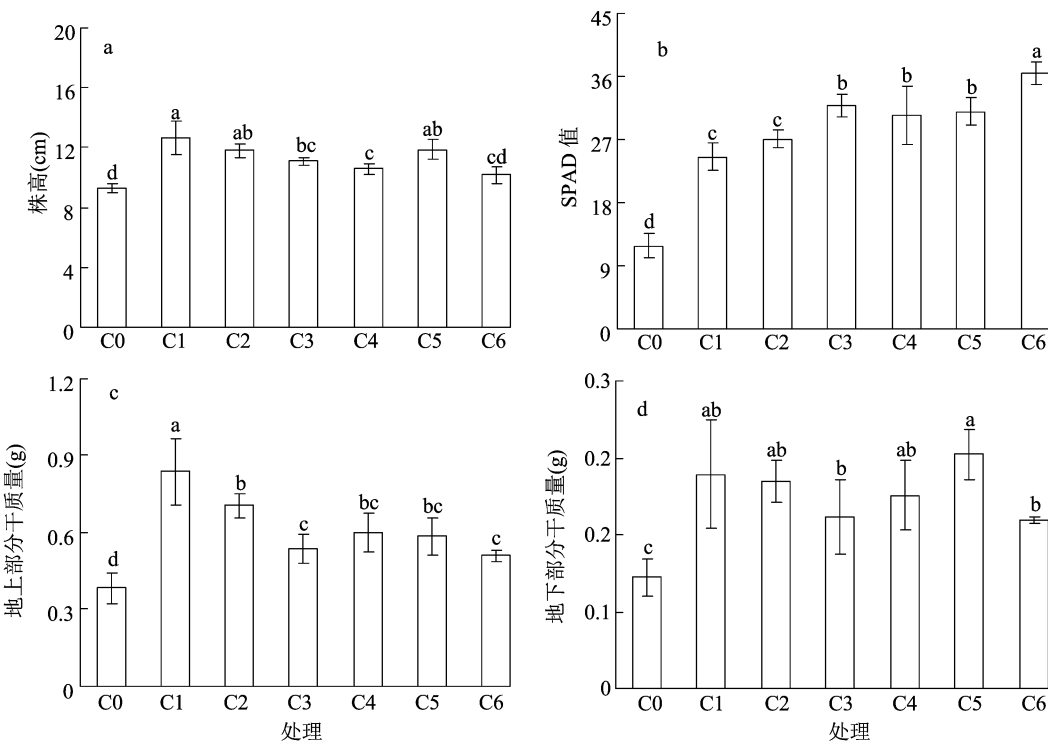


图1 不同施用量生物质炭对杜鹃花株高(a)、SPAD值(b)、地上部分干质量(c)及地下部分干质量(d)的影响

表 2 不同施用量生物质炭对杜鹃花成花情况的影响		
成花质量	成花率 (%)	花朵总量 (朵)
C0	0	0
C1	0	0
C2	12.5	3
C3	18.8	6
C4	31.3	11
C5	50.0	18
C6	55.0	21

注:成花率 = 开花植株样本数/总体样本 × 100%。

表 3 不同用量生物质炭对杜鹃花幼苗根系生长的影响			
处理	根长 (cm)	根表面积 (cm <sup>2</sup> )	根尖数 (个)
C0	115.2 ± 12.2c	24.0 ± 2.03d	472 ± 27c
C1	147.6 ± 21.1b	41.9 ± 5.09c	656 ± 60b
C2	176.6 ± 14.4a	44.7 ± 1.79bc	765 ± 107ab
C3	185.6 ± 10.7a	43.7 ± 3.87bc	767 ± 90ab
C4	203.2 ± 17.3a	48.5 ± 3.49ab	896 ± 75a
C5	203.9 ± 16.2a	52.7 ± 3.47a	901 ± 129a
C6	186.8 ± 20.6a	43.8 ± 2.80bc	823 ± 82a

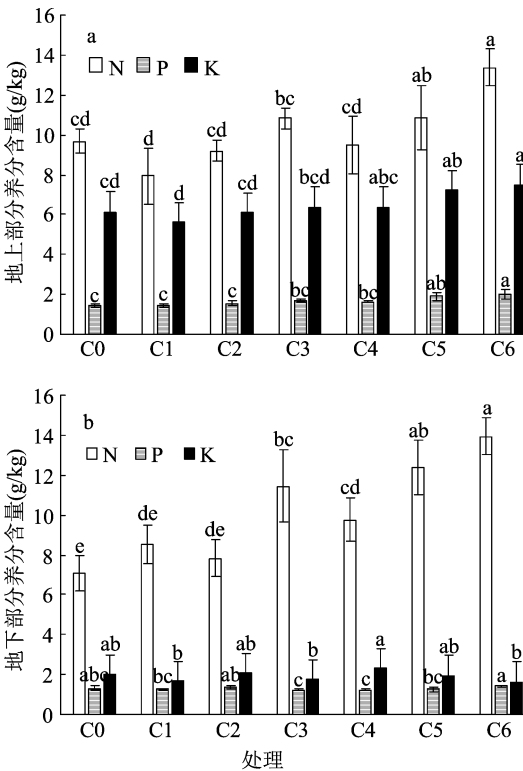


图2 不同用量生物质炭对杜鹃花地上部分(a)和地下部分(b)养分浓度的影响

### 3 讨论

3.1 生物质炭对杜鹃花根际土壤理化性质的影响  
城市化直接影响土壤资源的数量和质量,人为

照提高了 96.9%;所有生物质炭处理下植株 P 吸收量较对照提高幅度相似,均值为 84.0% (图 3 - c)。

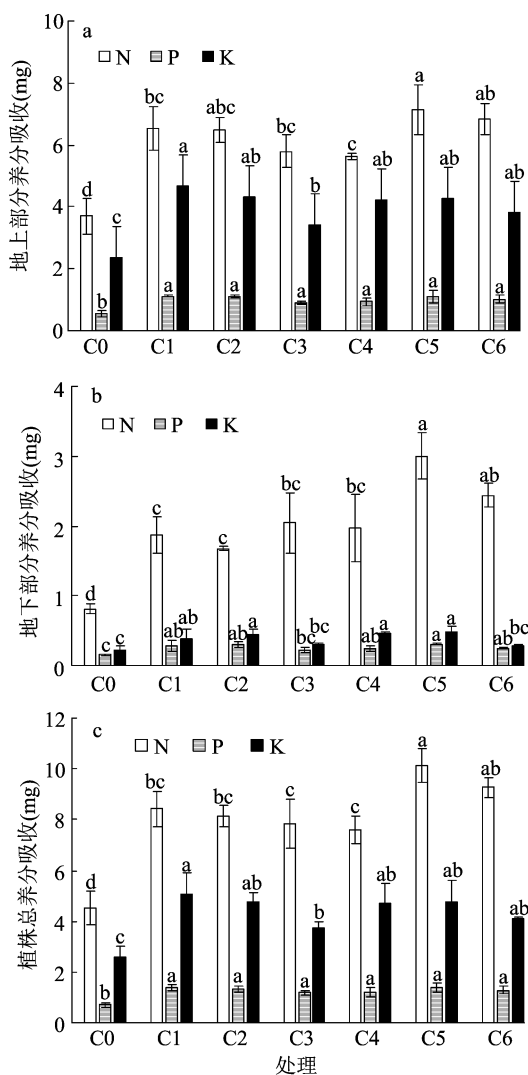


图3 不同用量生物质炭对杜鹃花地上部分(a)和地下部分(b)以及植株总体(c)养分吸收的影响

活动引起的环境的剧烈变化会使城市土壤质量不断下降<sup>[13]</sup>。根据全国第二次土壤普查养分等级分级标准<sup>[17]</sup>,本试验采集的城市绿地土壤有机质和全氮含量仅达到 V 级标准;土壤容重也已超过植物根系穿插的临界值,已不能满足植物的生长需求。此外,绿地土壤 pH 值虽为弱碱性,但在城市绿化应用中,有许多园林植物均为嗜酸性植物,如杜鹃、茉莉、栀子等。土壤 pH 值偏高会直接影响嗜酸性植物对养分的吸收利用,导致其根系不健康,生长势衰弱。因此,城市绿地土壤的质量问题已成为限制园林植物生长的主要限制因子。

生物质炭施用产生的效益并不是广泛存在的,生物质炭在农业生态系统中的功能发挥受到土壤条件的限制<sup>[18]</sup>。通常情况下,生物质炭具有的较高 pH 值可以提高土壤 pH 值,而生物质炭的 pH 值同

样也受原料和裂解温度的影响。以作物秸秆和家禽粪便为主原料的生物质炭 pH 值较高;此外,在裂解过程中,温度越高, pH 值也越大<sup>[19-20]</sup>。因杜鹃花为多年生嗜酸性木本植物,本试验选取的是低温酒糟生物质炭,其 pH 值呈弱酸性,施入土壤后可显著降低土壤的 pH 值。生物质炭具有疏松多孔,且自身带有易分解的有机物质以及一些可溶性养分等优良特质,施入土壤后短期内可降低土壤容重,对土壤有机质及养分含量有提高的作用,这在很多文献中均有报道<sup>[21-24]</sup>。本研究发现,施入量为 2% 及其以上的生物质炭处理均提高了杜鹃花根际土壤有机质含量;施加不同用量生物质炭均显著提高了根际土壤全氮含量;且增幅随用量的增加而提高。这与张登晓通过整合分析的研究结果<sup>[13]</sup>相似,该研究发现生物质炭施入后会影响土壤氮素循环过程,并增加土壤中与氮素循环相关的酶活性,对土壤中氮素的周转也具有促进作用。然而,在不同的土壤条件下,生物质炭对土壤磷素的调节作用会表现出不同的效果<sup>[25]</sup>,已有研究表明生物质炭对酸性土壤中土壤磷素有效性的调控效应优于碱性土壤<sup>[26-27]</sup>。这可能与土壤中磷素易与矿质元素离子结合而形成稳定态从而进一步被固定有关,酸性土壤中的  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  离子以及碱性土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子均易与土壤中的磷结合而形成沉淀<sup>[28]</sup>。通常,与酸性土壤相比,磷素在碱性土壤中更易被沉淀固定,这可能是本试验中土壤有效磷仅在高用量生物质炭施用下才显著提高的原因。

### 3.2 生物质炭对杜鹃花根系发育及生长势的影响

根系是植物重要的器官,承担着固着与支持、吸收水分与养分、合成必需氨基酸等功能,其生长与发育情况会直接影响植株本体的营养状况和产量水平<sup>[29]</sup>。Backer 等通过盆栽试验研究表明,生物质炭添加后可以在苗期刺激玉米的根系发育,从而可从土壤中吸收更多的氮,进一步促进植株地上部分的生长<sup>[30]</sup>。本研究发现,不同用量的生物质炭施入后均显著促进了杜鹃花的根系发育,包括根系总根长、总表面积、总根尖数的增加,健壮的根系进一步促进了植株的养分吸收,并在生物质炭为 8% 的用量下效应最优。原因可能有 2 个方面:一方面,生物质炭自身会携带许多类似激素的物质(乙烯等),在施入后可能会释放到土壤中被植物根系吸收,从而促进植株根系的生长发育<sup>[31]</sup>;另一方面,随着生物质炭用量的增加,可进一步通过降低土壤 pH 值

以及增加土壤有效养分为杜鹃花提供更为适宜的生长环境和充足的营养,促进杜鹃花根系的生长发育。此外,生物质炭施入后可改善土壤结构,例如促进土壤团聚化、增加土壤通气性、降低土壤容重等,从而提高根系对土壤中矿质营养的利用效率,促进植物根系的生长<sup>[32]</sup>。

本研究发现,各生物质炭添加水平下杜鹃花株高均显著提高,特别是添加量为 1% 生物质炭土壤提高杜鹃花株高的幅度达到 36.4%。且杜鹃花功能叶片 SPAD 值随施炭量的增加而提高;成花率和成花量也随施炭量的增加而提高。结合城市园林应用,中用量以及高用量生物质炭土壤(4% ~ 10%)添加下杜鹃花叶片 SPAD 值更高,成花量更多,观赏价值更大。Lou 等通过液相色谱对生物质炭浸提液中的成分进行分析,研究发现生物质炭能提高小白菜叶片 SPAD 值及促进光合的原因是生物质炭中存在一些微量元素之间或可共同协作;另一方面,生物质炭对根系的促生作用可使根系为叶片输送更多的矿质营养、水分、酶等光合作用的底物,从而优化了光合特性的相关指标<sup>[31]</sup>。此外,叶片中提供充足的氮素可促进多种重要含氮化合物的形成、叶绿素的合成以及相关酶活性和光合作用的增强<sup>[33]</sup>。本试验中,C5 和 C6 显著提高了地上部分的氮浓度,在一定程度上也有利于光合作用的进行。

### 3.3 生物质炭对杜鹃花生物量及养分吸收的影响

本研究发现,各生物质炭施用量下均显著提高了杜鹃花地上部分及地下部分干物质质量。其中,8% 浓度生物质炭施入下杜鹃花地下部分干质量最高,较对照处理提高了 111%。已有研究表明,生物质炭的施入能显著提高作物、蔬菜以及水果的产量和质量,其中,增质增效的主要原因可能是土壤肥力的改善<sup>[34-35]</sup>。Liu 等通过大田试验发现,生物质炭可通过直接增加玉米穗的大小以及间接促进玉米根系生长发育和养分吸收来增加玉米产量<sup>[36]</sup>。本研究发现,生物质炭的施用显著促进了杜鹃花根系发育。此外,一些研究报告报道了生物质炭还可以通过增加叶绿素含量和提高光合速率来促进植物生长<sup>[37]</sup>。

本研究结果表明,施入不同用量的生物质炭不仅可提高杜鹃花生物量,而且可提高杜鹃花的养分含量。这与 Biederman 等的研究结果<sup>[38]</sup>类似,生物质炭施入土壤能够增加作物对养分的吸收量,并提高作物的养分利用效率。虽然各生物质炭添加水平下杜鹃花养分积累量(N、P 和 K)均显著提高,但

低用量(C1)及中用量(C2 和 C3)生物质炭处理更有利于杜鹃花的营养生长,而高用量(C4、C5 和 C6)生物质炭处理更侧重于促进杜鹃花的生殖生长。并且,养分积累量的增加并不随生物质炭施入量的增加呈上升趋势,这可能与生物质炭较强的吸附能力有关。此外,杜鹃花拥有的特殊内生菌根(杜鹃花类菌根)对其克服恶劣环境、加强养分吸收和促进生长起着重要作用<sup>[39]</sup>。前期研究结果表明生物质炭的施入增加了菌根侵染率<sup>[14]</sup>。土壤养分可直接或间接影响真菌侵染以及菌根共生体系发育等,随着土壤肥力的提高,菌根侵染率通常会有下降的趋势<sup>[40]</sup>。因此,本研究中低用量的生物质炭也可能通过促进杜鹃花类菌根的生长从而提高杜鹃花养分吸收,而高用量的生物质炭可能不影响菌根真菌侵染率。

## 4 结论

低温酒糟生物质炭施用于城市绿地土壤后可降低杜鹃花根际土壤的 pH 值、提高土壤有机质和全氮含量,并能够显著提高杜鹃花根系指标、叶绿素含量、生物量,促进植株养分吸收。其中,添加高用量生物质炭(6% ~ 10%)可同时提高土壤速效养分含量,且生物质炭的施入比例为 8% 时,杜鹃花的根系发育情况最好,氮、磷养分含量最高,杜鹃花扦插苗的成花率可达到 50%。因此,在养分贫瘠的碱性城市绿地土壤中施用高用量生物质炭可以达到土壤改良和景观营造的协调共赢。本研究的结果为农业废弃物资源化利用、城市土壤环境的改善以及杜鹃花的园林应用提供了理论及实践依据。

### 参考文献:

- [1] Lehmann A, Stahr K. Nature and significance of anthropogenic urban soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(4): 247 - 260.
- [2] Papa S, Bartoli G, Pellegrino A, et al. Microbial activities and trace element contents in an urban soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 165(1): 193 - 203.
- [3] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 539 - 546.
- [4] 魏翔莺. 杜鹃花类菌根形成及效应表达过程中的差异基因分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2016: 1 - 10.
- [5] 张杰. 杜鹃花栽培基质研究现状[J]. *现代农业科技*, 2015(18): 163 - 165, 176.
- [6] 潘根兴, 卞荣军, 程琨. 从废弃物处理到生物质制造业: 基于热裂解的生物质科技与工程[J]. *科技导报*, 2017, 35(23): 82 - 93.
- [7] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions - a meta -

- analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1): 583 – 594.
- [8] 张登晓, 周惠民, 潘根兴, 等. 城市园林废弃物生物质炭对小白菜生长、硝酸盐含量及氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1569 – 1576.
- [9] 胡广宇, 宋 畅. 不同热解温度园林废弃物生物质炭对设施连作番茄产量、品质及青枯病的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(23): 156 – 161.
- [10] 蒋欣梅, 薛冬冬, 于锡宏, 等. 玉米秸秆生物炭对镉污染土壤中小白菜生长的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(4): 1000 – 1006.
- [11] Crombie K, Mašek O, Cross A, et al. Biochar – synergies and trade – offs between soil enhancing properties and C sequestration potential [J]. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(5): 1161 – 1175.
- [12] Zhou H M, Zhang D X, Wang P, et al. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: a Meta – analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 239: 80 – 89.
- [13] 张登晓. 生物质炭对作物生产力、农田温室气体排放及土壤养分转化的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 1 – 20.
- [14] Zhou H M, Li X Y, Li C, et al. Biochar pyrolyzed at low temperature enhanced acidophilous plant growth by promoting rhizospheric microbes in a slightly alkaline urban soil[J]. *Biochar*, 2021, 3(4): 603 – 614.
- [15] 刘 敏, 纪立东, 王 锐, 等. 施用生物质炭条件下减施氮肥对玉米生长和土壤的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(19): 216 – 222.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 5 – 50.
- [17] 李晓英, 周惠民, 李 畅, 等. 城市不同功能区绿地土壤理化性质及微生物生物量的分布特征[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 874 – 880.
- [18] Abiven S, Schmidt M W I, Lehmann J. Biochar by design [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 326 – 327.
- [19] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105 – 112.
- [20] 刘丽珠, 范如芹, 卢 信, 等. 农业废弃物生物质炭在设施栽培中应用的研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(6): 1434 – 1440.
- [21] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443 – 449.
- [22] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 469 – 475.
- [23] Anderson C R, Condon L M, Clough T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Pedobiologia*, 2011, 54(5/6): 309 – 320.
- [24] 丁 玮, 阳树英, 刘 洋. 化肥减量配施生物炭对镉污染水稻土壤真菌群落的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(15): 210 – 215.
- [25] Scott H L, Ponsonby D, Atkinson C J. Biochar: an improver of nutrient and soil water availability – what is the evidence? [J]. *CAB Reviews*, 2014, 9(19): 1 – 19.
- [26] Lentz R D, Ippolito J A. Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1033 – 1043.
- [27] Parvage M M, Ulén B, Eriksson J, et al. *Phosphorus* availability in soils amended with wheat residue char[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(2): 245 – 250.
- [28] Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 54 – 60.
- [29] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1541 – 1551.
- [30] Backer R G M, Saeed W, Seguin P, et al. Root traits and nitrogen fertilizer recovery efficiency of corn grown in biochar – amended soil under greenhouse conditions[J]. *Plant and Soil*, 2017, 415(1): 465 – 477.
- [31] Lou Y M, Joseph S, Li L Q, et al. Water extract from straw biochar used for plant growth promotion: an initial test[J]. *Bioresources*, 2016, 11(1): 249 – 266.
- [32] Bruun E W, Petersen C T, Hansen E, et al. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(1): 109 – 118.
- [33] 张金政, 周美英, 李晓东, 等. 氮素水平与光强互作对‘蓝伞’玉簪生长和光合特性的影响[J]. *园艺学报*, 2007, 34(6): 1497 – 1502.
- [34] 张 萌, 魏全全, 肖厚军, 等. 生物质炭对贵州黄壤朝天椒减氮的生物效应及氮肥利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1201 – 1209.
- [35] 史 雷, 张 然, 马 龙, 等. 小麦产量及土壤性状对施用生物质炭的量化响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(7): 1273 – 1283.
- [36] Liu X Y, Wang H D, Liu C, et al. Biochar increases maize yield by promoting root growth in the rainfed region [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(10): 1411 – 1424.
- [37] 吴志庄, 王道金, 厉月桥, 等. 施用生物炭肥对黄连木生长及光合特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 992 – 997.
- [38] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta – analysis [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 202 – 214.
- [39] Wei X Y, Chen J J, Zhang C Y, et al. Differential gene expression in *Rhododendron fortunei* roots colonized by an ericoid mycorrhizal fungus and increased nitrogen absorption and plant growth [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1594.
- [40] 向 丹, 徐天乐, 李 欢, 等. 丛枝菌根真菌的生态分布及其影响因子研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3597 – 3606.