

# 4种改良材料对城市绿地酸性土壤的改良效果\*

苏 杨 张俊涛 李 铤 梁春梅

(广州市林业和园林科学研究院 / 广东省计量认证实验室, 广东 广州 510405)

**摘要** 针对部分城市绿地土壤偏酸的问题, 研究选用生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥、生物炭4种改良材料, 分别设置3个梯度(40、80、160 g·kg<sup>-1</sup>)的添加量, 开展室内土培试验。通过监测土壤pH值、EC值、有效磷、速效钾、有机质的动态变化, 研究4种改良材料对偏酸土壤的改良效果。结果表明, 4种材料对酸性土壤的pH值均有显著的提升效果。在相同剂量下, 提升效果依次为: 生石灰>磷矿粉>园林废弃物堆肥>生物炭, 且改良效果均可以维持170 d以上。4种材料在改善土壤pH值的同时, 还能有效提升土壤中有效磷的含量, 其中生石灰提升效果最为显著。生物炭和园林废弃物堆肥能同时有效提升土壤速效钾和有机质的含量, 高添加量的生石灰甚至会降低土壤速效钾和有机质的含量。

**关键词** 城市绿地; 酸性土壤; 生石灰; 磷矿粉; 园林废弃物堆肥; 生物炭

**中图分类号:** S731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2021) 04-0062-07

## Effects of Four Amendments on Acidic Soils of Urban Green Space

SU Yang ZHANG Juntao LI Ting LIANG Chunmei

(Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture / Guangdong Provincial Metrology Certification Laboratory, Guangzhou, Guangdong 510405, China)

**Abstract** In order to ameliorate the soil acidification of some urban green space, a series of pot experiments were carried out in this study. Four amendments, i.e., quicklime, phosphate rock, garden waste compost, and biochar, with different gradients (40, 80, and 160 g·kg<sup>-1</sup>) were applied. The effects of four amendments were obtained according to the dynamic changes of pH, electrical conductivity (EC), available phosphorus, available potassium, and organic matter of acidic soils. The results showed that the four amendments application significantly improved the soil pH. Under the same dosage, the order of improving effect was as follows: quicklime > phosphate rock > green waste compost > biochar. The effect of the amendments on the pH improvement could be maintained for more than 170 days. It suggested that the amendments could not only improve the soil pH, but also effectively increase the content of available phosphorus in soils, among which effect of quicklime was particularly significant. Moreover, biochar and garden waste compost could effectively improve the contents of available potassium and organic matter at the same time, however high dosage of quicklime could even reduce these contents in soils.

**Key words** urban green space; acidic soils; quicklime; phosphate rock; garden waste compost; biochar

\* 基金项目: 2019年广州市公共服务类地方标准制定项目, 广州市林业和园林局预算项目(2061900000139)。

第一作者: 苏杨(1993—), 女, 主要从事土壤质量调查评价与改良、植物栽培技术工作, E-mail: 510368284@qq.com。

通信作者: 张俊涛(1981—), 男, 正高级工程师, 主要从事土壤质量评估和修复改良工作, E-mail: 350965652@qq.com。

城市绿地土壤是自然土壤和人为活动的混合物，为林业和园林植物提供生长介质和养分，是城市绿地生态系统功能的基础，为宜居城市提供关键的生态系统服务<sup>[1]</sup>。然而人类活动改变了绿地土壤的原始成分和自然结构，引发了一系列土壤问题，导致绿地土壤质量下降，土壤酸化问题就是其中之一。调查发现，广州市部分城市绿地土壤呈酸性（4.5~5.5）<sup>[2]</sup>，酸性土壤中的H<sup>+</sup>不仅对植物的生长产生直接的毒害作用，还会降低土壤微生物活性<sup>[3]</sup>，导致植物长势衰弱，进而影响绿地景观和生态效益。已酸化的土壤很难通过自身作用得以恢复，因此城市绿地酸性土壤的改良研究具有十分重要的意义。

目前对于酸性土壤的改良材料有很多，传统的改良材料有有机肥<sup>[4]</sup>、生石灰<sup>[5-6]</sup>等碳酸钙类肥料等，矿物和工业废弃物（如磷矿粉<sup>[5]</sup>）以及园林和农业废弃物相关产品（如园林废弃物堆肥<sup>[7]</sup>和生物炭<sup>[8]</sup>）等作为新兴改良材料也在酸性土壤改良研究中展现出了良好的效果。本研究针对部分城市绿地土壤偏酸的问题，选用生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥、生物炭4种材料作为改良材料，揭示其对酸性土壤pH值的改良效果及其对土壤EC值、有效磷、速效钾和有机质的影响，为高效改良城市绿地酸性土壤提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试的酸性土壤（pH<5.5）采自广东广州海珠国家湿地公园。

供试的生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥、

生物炭均为市售产品，其中，生石灰（CaO）、磷矿粉采购自泰州市长浦化学试剂有限公司，园林废弃物堆肥、生物炭采购自广州市生升农业股份有限公司。

供试土壤和4种供试材料的基本化学性质见表1。

### 1.2 试验设计

试验于2020年5—11月在广州市林业和园林科学研究院温室大棚内进行。采用室内土培试验，设置13个处理组：不添加改良材料（记为CK），生石灰添加量（质量比，下同）分别为40、80、160 g·kg<sup>-1</sup>（分别记为S40、S80、S160），磷矿粉添加量分别为40、80、160 g·kg<sup>-1</sup>（分别记为L40、L80、L160），园林废弃物堆肥添加量分别为40、80、160 g·kg<sup>-1</sup>（分别记为F40、F80、F160），生物炭添加量分别为40、80、160 g·kg<sup>-1</sup>（分别记为D40、D80、D160），每组处理设置3个重复。将土壤与改良材料搅拌均匀装入种植盆（口径18 cm，高度13 cm），放置于温室大棚（25℃）培育，第1天各处理组浇透水，采集初始样品，前49天每隔7 d（即第7、14、21、28、35、42、49天）各采集样品1次，第50天至170天每隔30 d（即第80、110、140、170天）各采集样品1次，每次采集20 g样品，全部样品均检测pH值，第1天和49天的样品补充检测EC值、有效磷、速效钾和有机质。

### 1.3 测定指标与方法

土壤pH值采用电位法测定<sup>[9]</sup>，EC值采用电导法测定<sup>[10]</sup>，有效磷含量采用碳酸氢钠—钼锑抗比色法测定<sup>[11]</sup>，速效钾含量采用乙酸铵提取—火

表1 供试土壤和4种改良材料的基本化学性质  
Tab.1 Basic chemical properties of the tested soil and four amendments

材料 Materials	pH	EC /(mS·cm <sup>-1</sup> )	有效磷 /(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P	速效钾 /(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K	有机质 /(g·kg <sup>-1</sup> ) Organic matter
酸性土壤	4.8 ± 0.3	0.19 ± 0.05	10.3 ± 0.8	163.5 ± 5.2	22.1 ± 1.8
生石灰	12.2 ± 0.1	7.74 ± 0.42	1.7 ± 0.2	99.8 ± 8.1	1.6 ± 0.3
磷矿粉	9.0 ± 0.1	0.09 ± 0.01	18.7 ± 1.7	25.2 ± 2.3	4.4 ± 0.2
园林废弃物堆肥	7.7 ± 0.1	2.04 ± 0.02	32.7 ± 0.1	2 206.7 ± 30.9	92.6 ± 3.3
生物炭	9.5 ± 0.1	1.64 ± 0.32	1 248.7 ± 117.3	12 133.1 ± 467.8	129.6 ± 3.4

注：表中所示数值为平均值 ± 标准误。Note: the data indicate mean ± standard error.

焰光度计法测定<sup>[12]</sup>, 有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定<sup>[13]</sup>。

#### 1.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 21.0 软件对试验数据进行统计分析, 对不同处理的土壤理化指标进行单因素方差分析, 并用 Duncan 法进行两两比较; 图形绘制采用 Excel 2010。

## 2 结果与分析

### 2.1 4种改良材料不同施加量对城市绿地酸性土壤 pH 值的影响

图 1a 表明, 在第 1 天, S40、S80、S160 处理样品的 pH 值达到 12.6、12.8、12.9, 较 CK 分别上升了 9.0、9.2、9.3 个单位; 随后整体呈下降趋势, 至第 170 天时, S40、S80、S160 处理样品的 pH 值降至 7.8、8.1、8.3, 较第 1 天时分别下降了 4.8、4.6、4.5 个单位, 较第 49 天时分别下降了 0.4、0.3、1.4 个单位; 在此期间, CK 的 pH 值在 4.4~5.3 间变化, 与土壤背景值相当。此外, S40、S80 处理样品的 pH 值前 49 d 分别在 7.2~12.6、

8.5~12.8 范围内波动, 第 49 天至第 170 天则基本稳定在 7.7~8.3、7.9~8.5; S160 处理样品的 pH 值前 110 d 在 9.7~12.9 范围内波动, 第 110 天至第 170 天则基本稳定在 8.2~8.3, 但仍略高于广州市地方标准《园林种植土》(DB4401/T 36-2019)<sup>[14]</sup> 中 7.5 的上限值, 因此在使用生石灰这类强碱性材料时, 应注意控制添加量 (低于  $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 并给予一定的稳定时间。对每个采样点各处理组的 pH 值进行显著性差异分析, 结果表明 S40、S80、S160 处理样品的 pH 值均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 说明添加生石灰可以有效提升酸性土壤的 pH 值并维持 170 d 以上; 而在第 170 天时, S80 和 S160 之间 pH 值无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 应该是土壤中存在有机或无机酸碱缓冲物质, 对 pH 值有一定的调节作用<sup>[15]</sup>。

图 1b 表明, 在第 1 天, L40、L80、L160 处理样品的 pH 值为 8.0、7.8、8.1, 所有磷矿粉处理组的 pH 值均显著高于 CK, 较 CK 分别上升了 4.4、4.2、4.5 个单位; 随后出现波动, 但幅度不大, 整个试验期 (170 d) 基本保持稳定, 至

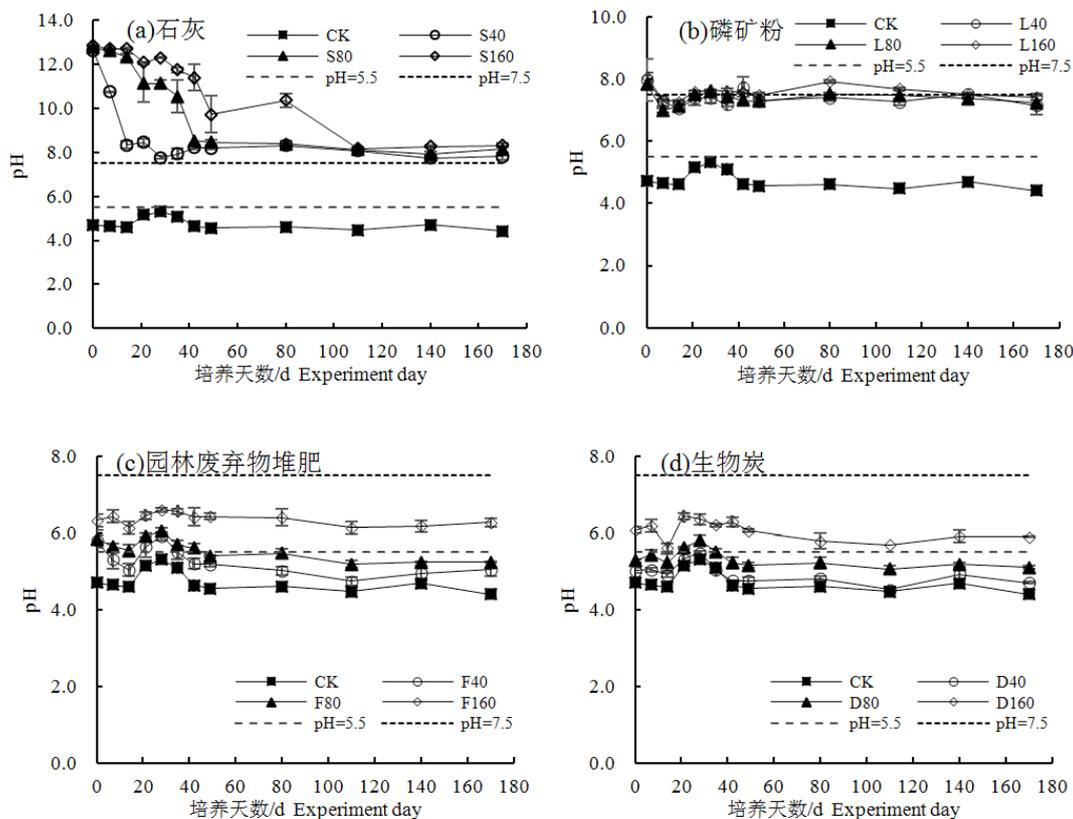


图 1 不同改良材料对酸性土壤 pH 值的影响

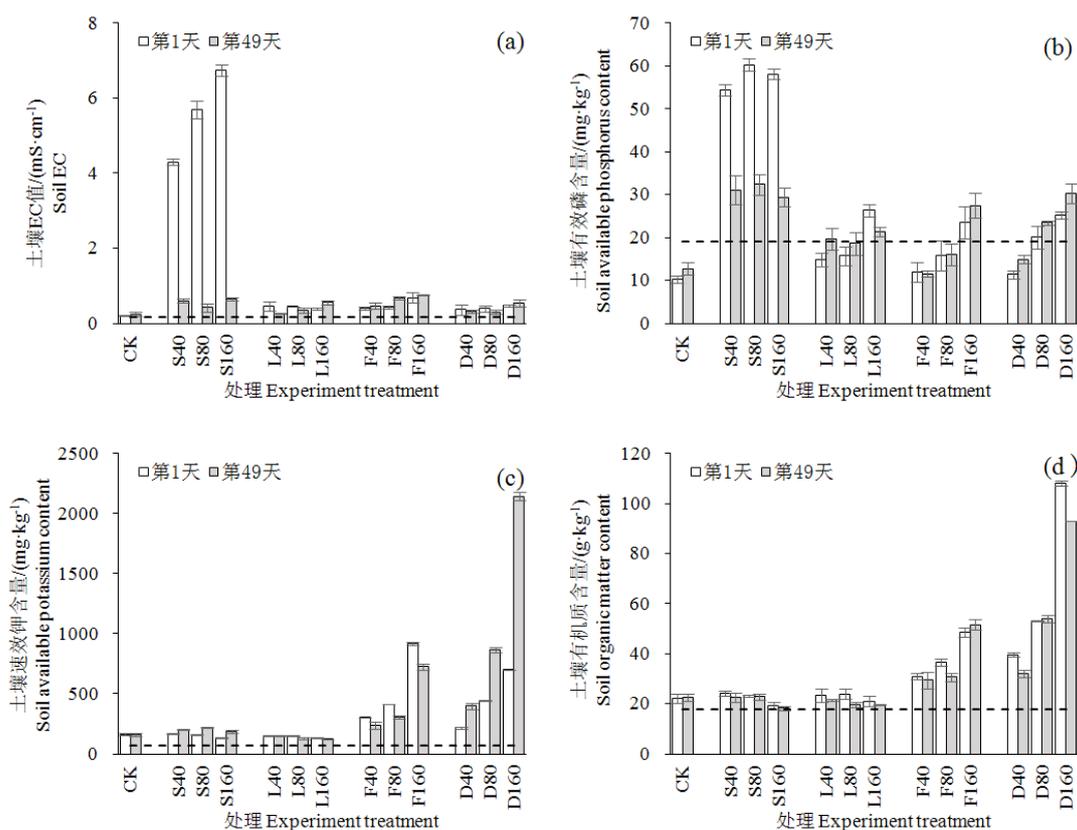
Fig.1 Effects of different amendments on acidic soil pH

第 170 天, L40、L80、L160 处理样品的 pH 值为 7.1、7.2、7.4, 较第 1 天时分别下降了 0.8、0.6、0.6 个单位, 仍显著高于 CK, 这是因为磷矿粉中含有一定量的  $\text{CaO}^{[16]}$ , 溶解时会消耗土壤中的  $\text{H}^+$ , 同时磷矿粉溶解时释出的  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  和  $\text{F}^-$  会置换出土壤胶体表面的羟基, 使得土壤 pH 值升高<sup>[17]</sup>。由此可见, 施用磷矿粉可以有效改善酸性土壤的酸碱度, 使其达到广州市地方标准《园林种植土》对通用种植土 pH 值的要求 (5.5~7.5), 并且反应过程比较平缓。

图 1c 表明, 在第 1 天, F40、F80、F160 处理样品的 pH 值分别为 5.8、5.9、6.3, 较 CK 分别上升了 2.2、2.3、2.7 个单位; 随后出现小幅波动, 49 d 后渐趋稳定, 基本保持不变, 至第 170 天时, F40、F80、F160 处理样品的 pH 值分别为 4.7、5.1、5.9; 在整个试验期内, 所有添加园林废弃物堆肥处理组的 pH 值均显著高于 CK, 但只有 F160 处理整个试验期的 pH 值符合广州市地方标准《园

林种植土》对通用种植土 pH 值的要求。园林废弃物堆肥能够提升土壤 pH 值是因为有机物分解过程中脱去的  $-\text{NH}_2$  在土壤中进一步形成  $\text{NH}_3$  和  $\text{NH}_4^+$ , 消耗了土壤中的部分  $\text{H}^+$ ; 使局部土壤产生还原环境, 引起 Fe、Mn 氧化物还原, 产生  $\text{OH}^-^{[17,18]}$ 。可见, 施用园林废弃物堆肥可以改善酸性土壤的酸碱度, 但必须达到一定用量 ( $160 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 以上作用才会显现。

图 1d 表明, 在第 1 天, D40、D80、D160 处理样品的 pH 值为 5.0、5.3、6.1, 较 CK 分别上升了 1.4、1.7、2.5 个单位; 随后出现波动, 49 d 后渐趋稳定, 至第 170 天时, D40、D80、D160 处理样品的 pH 值分别为 4.7、5.1、5.9; 在整个试验期内, 所有添加生物炭处理组的 pH 值均显著高于 CK, 但只有 D160 处理整个试验期的 pH 值符合广州市地方标准《园林种植土》对通用种植土 pH 值的要求。研究表明, 生物炭能够提升土壤 pH 值主要有以下三方面的原因: 一是自身含有较强的碱



注: 图中所示数值为平均值 ± 标准误。CK 代表对照组; S、L、F、D 分别代表生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥和生物炭。

Note: the data indicate mean ± standard error. The control group is represented by CK, while quicklime, phosphate rock, garden waste compost, and biochar by S, L, F and D, respectively.

图 2 不同改良材料对酸性土壤 EC 值和养分的影响

Fig.2 Effects of different amendments on acidic soil EC and nutrient content

性物质<sup>[19]</sup>，二是生物炭在生产过程中形成的碱性氧化物或碳酸盐可与土壤中的 $H^+$ 及Al单核羟基化合物发生反应，降低土壤可交换性酸<sup>[20]</sup>，三是生物炭对土壤中 $NH_4^+$ 吸附作用会抑制硝化反应进而减少质子的产生<sup>[20]</sup>，间接提升土壤pH值。可见，施用生物炭可以改善酸性土壤的酸碱度，但其用量须达到 $160\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上作用才会显现。

## 2.2 4种改良材料不同施加量对城市绿地酸性土壤的EC值和养分的影响

在研究4种改良材料不同施加量对城市绿地酸性土壤pH值影响的同时，选取第1天和第49天（各处理的pH值基本达到稳定）补充检测了各处理样品的EC值、有效磷、速效钾和有机质含量，进一步分析4种改良材料对城市绿地酸性土壤EC值和养分的影响。

检测结果（图2a）表明，4种改良材料对土壤EC值均有一定的影响，且影响程度会随时间及改良材料用量而变化；第1天时，除D40外，其他处理组的EC值均显著高于CK组（ $P<0.05$ ），其中，生石灰处理组提升幅度最大，甚至3个生石灰处理组均超出了广州市地方标准《园林种植土》所要求的EC值的上限（ $0.80\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ）；第49天时，生石灰和园林废弃物堆肥以及高添加量的磷矿粉（L160）和生物炭（D160）处理组的EC值显著高于CK（ $P<0.05$ ），而低添加量的磷矿粉（L40、L80）和生物炭（D40、D80）与CK无显著性差异（ $P>0.05$ ），说明经过49d的反应过程，生石灰和园林废弃物堆肥仍对土壤的EC值有提升作用，且不会超过广州市地方标准《园林种植土》所要求的EC值的上限，但低添加量的磷矿粉和生物炭对于提升土壤EC值已没有显著效果。

图2b显示，第1天时，S40、S80、S160的有效磷含量显著高于其他处理组（ $P<0.05$ ），第49天时，S40、S80、S160的有效磷含量较第1天分别降低23.4、28.0、28.7 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，但仍高于其他处理，并且高于广州市地方标准《园林种植土》中二级种植土有效磷的限值（ $19.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），说明生石灰在提升酸性土壤pH值的同时，可以在一定时间内增加土壤有效磷含量，这可能与生石灰在提升酸性土壤pH值的同时使P的主要吸附基-活性Fe、Al产生沉淀，从而降低了土壤对P的吸附有关<sup>[21]</sup>。

添加磷矿粉的3个处理L40、L80、L160在第

1天和第49天时有效磷含量均高于CK，仅L40在第1天时未达显著水平，第49天时L40、L80、L160有效磷含量较第1天分别升高了4.8、2.9 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和降低了5.0 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，基本达到广州市地方标准《园林种植土》中二级种植土有效磷的限值（ $19.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），说明磷矿粉在提升酸性土壤pH值的同时，可以增加土壤有效磷含量，这与其本身含有一定量的有效磷有关（表1）。然而，磷矿粉在提高土壤有效磷含量上没有表现出优于其他处理组的效果，这主要是由于其所含的磷元素大多以硅钙质的形式存在，在自然条件下难以快速的转化为有效磷<sup>[22]</sup>。

添加园林废弃物堆肥的3个处理F40、F80、F160在第1天时有效磷含量均高于CK，其中F80、F160有效磷含量更是显著高于CK（ $P<0.05$ ），F40、F80、F160在第49天时有效磷含量较第1天分别降低了0.5 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、升高了0.3、4.0 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，仅F160显著高于CK且高于广州市地方标准《园林种植土》中二级种植土有效磷的限值（ $19.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），说明高添加量（ $160\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上）的园林废弃物堆肥才能较长期地增加土壤有效磷含量，这与其对pH值的影响结果一致。

添加生物炭的3个处理D40、D80、D160在第1天时有效磷含量均高于CK，其中D80、D160有效磷含量显著高于CK（ $P<0.05$ ），D40、D80、D160在第49天时有效磷含量较第1天分别升高了3.6、3.4、5.0 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中D80、D160显著高于CK且高于广州市地方标准《园林种植土》中二级种植土有效磷的限值（ $19.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），说明生物炭用量达到一定量时可以显著提升土壤有效磷含量。

图2c显示，第1天时，S160的速效钾含量显著低于CK，而S40、S80与CK无显著性差异，第49天时，S40、S80、S160的速效钾含量较第1天分别提高31、59、53 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，且均高于CK，说明生石灰在前期提升酸性土壤pH值的同时，降低了速效钾的含量，而随着土壤pH值的回落，速效钾含量又逐渐增加，这是由于生石灰造成土壤溶液中K/Ca比例失调，增加土壤对钾的固定，导致初期土壤速效钾含量降低<sup>[23]</sup>，而随着培养时间延长，土壤潜在酸对生石灰进行中和，土壤pH值降低，又促使土壤释放出一定的速效钾<sup>[24]</sup>，提升了土壤中速效钾的含量。

添加磷矿粉的 3 个处理 L40、L80、L160 在第 1 天和第 49 天时速效钾含量均低于 CK, 且随着磷矿粉用量的增加其速效钾含量基本呈降低的趋势, 这可能是由于磷矿粉本身速效钾含量较低, 同时还含有一定量的  $\text{CaO}^{[16]}$ , 在加重土壤对钾固定的同时无法向其提供更多的钾离子, 从而导致土壤速效钾含量的降低。

添加园林废弃物堆肥的 3 个处理 F40、F80、F160 在第 1 天和第 49 天时速效钾含量均显著高于 CK, 从第 1 天到第 49 天, F40、F80、F160 速效钾含量分别降低了 64、108、193  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 说明园林废弃物堆肥在加入初期能显著提升土壤的速效钾含量, 且随着其用量的增加, 速效钾含量增幅扩大, 但是随着时间的推移, 效果有所下降。

添加生物炭的 3 个处理 D40、D80、D160 在第 1 天和第 49 天时速效钾含量均显著高于 CK, 从第 1 天到第 49 天, D40、D80、D160 速效钾含量分别升高了 180、423、1 444  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 说明生物炭在初期能显著提升土壤的速效钾含量, 随着其用量的增加, 速效钾含量增幅扩大, 且随着时间的推移, 能够向土壤中释放更多的速效钾。

图 2d 显示, 第 1 天和 49 天时, S40、S80、S160 和 L40、L80、L160 的有机质含量均与 CK 的无显著性差异 ( $P>0.05$ ), 甚至 S160 处理样品中有机质含量还低于 CK, 但未达显著水平, 说明添加生石灰和磷矿粉在改善酸性土壤酸碱度的同时, 不会增加有机质含量甚至高用量的生石灰还会降低其有机质含量; 而 F40、F80、F160 和 D40、D80、D160 的有机质含量第 1 天和 49 天时均显著高于 CK ( $P<0.05$ ), 说明园林废弃物堆肥和生物炭在改善酸性土壤酸碱度的同时, 还会增加其有机质含量, 并且随着园林废弃物堆肥和生物炭用量的增加, 有机质含量增幅扩大。有研究表明, 高添加量的生石灰会加速有机质的分解, 促进结构比较简单的有机物的矿化, 从而降低土壤中有机质的含量<sup>[25]</sup>。而堆肥和生物炭由于其本身有机质含量高, 所以能显著提升土壤中的有机质含量, 特别是生物炭的加入为微生物提供了良好的生存环境, 促进了微生物的活动进而促进土壤腐殖质的分解, 从而进一步提升土壤有机质含量<sup>[26]</sup>。

### 3 结论与讨论

生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥、生物炭 4 种改良材料均可提高酸性土壤 pH 值, 但不同材料及其不同用量对酸性土壤的改良效果存在差异, 其中, 添加生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥、生物炭 40、80、160  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  分别可提升酸性土壤 pH 值 3.6~5.1、2.7~2.9、0.6~1.8、0.2~1.5 个单位; 在相同剂量下, 4 种改良材料对酸性土壤 pH 值的提升效果排序为: 生石灰 > 磷矿粉 > 园林废弃物堆肥 > 生物炭。

生石灰施入土壤前期 pH 值变化较剧烈, 一定时间后渐趋稳定, 这与张瑶等<sup>[6]</sup>、胡敏等<sup>[21]</sup> 研究结果一致, 所以在使用生石灰这类强碱性材料改良酸性土壤时, 应注意控制添加量 (低于 40  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 并给予一定的稳定时间, 而其他 3 种材料加入后 pH 值变化较平缓, 不需要太长时间即达稳定; 4 种材料对酸性土壤 pH 值的改良效果均可以维持 170 d 以上。

4 种材料在改善土壤 pH 值的同时还能有效提升土壤中有有效磷的含量, 这与前人<sup>[5,21,27]</sup> 的研究结果一致, 其中生石灰提升效果最为显著, 磷矿粉、园林废弃物堆肥、生物炭次之; 生物炭和园林废弃物堆肥能同时有效提升土壤速效钾和有机质的含量, 生物炭的提升效果尤为显著, 相反的, 生石灰和磷矿粉不能提升土壤速效钾和有机质的含量, 高添加量的生石灰甚至会降低土壤速效钾和有机质的含量。

在改良城市绿地酸性土壤酸碱度方面, 生石灰、磷矿粉、园林废弃物堆肥、生物炭 4 种材料表现出了不同的能力, 同时又各具其他功效: 生石灰能有效提升土壤中有有效磷的含量, 还可有效缓解酸性土壤中 Al 和其他重金属毒害, 补充 Ca、Mg 营养, 改善土壤结构<sup>[28]</sup>; 磷矿粉虽然短期内不能提供大量的有效磷, 但其肥效时间长, 能够有效促进植物生长<sup>[22]</sup>; 园林废弃物堆肥产品含有大量有机质和营养成分, 可减少无机肥料的使用量<sup>[29]</sup>, 提高土壤的保水透水能力<sup>[30]</sup>, 促进植物健康生长并有效降低造林成本<sup>[27]</sup>, 在安全、经济和保护生态环境方面具有明显的优势, 具有发展和推广潜力; 生物炭可增加有效磷、速效钾等含量, 有效吸附土壤养分, 可减少 Al 毒侵害, 为微生物群落提供生存空间与营养物质, 还可增加土壤的

孔隙度和持水性,改善了植物根系的生长环境<sup>[31]</sup>。所以,在改良城市绿地酸性土壤过程中,应结合土壤的其他理化性质选择合适的改良材料,或者按一定比例进行混施,以提高整体效果。

### 参考文献

- [1] ZHU W, EGITTO B, YESILONIS I D, et al. Soil carbon and nitrogen cycling and ecosystem service in cities[M]. // CRAUL J P. Urban soils. CRC Press, 2017: 121-136.
- [2] 卢琰,冯宏,甘海华.广州城市公园绿地土壤肥力及酶活性特征[J].水土保持学报,2007(1):160-163.
- [3] 郇恒福.不同土壤改良剂对酸性土壤化学性质影响的研究[D].儋州:华南热带农业大学,2004.
- [4] 解开治,徐培智,严超,等.不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J].中国农学通报,2009,25(20):160-165.
- [5] 王宇函,吕波,张林,等.不同土壤改良剂对酸性铝富集红壤毒性缓解效应的差异[J].华中农业大学学报,2019,38(2):73-80.
- [6] 严锦申.生石灰施用量对酸性土壤改良效果及对烤烟产质量的影响[D].广州:华南农业大学,2016.
- [7] 刘强,胡华良,苏柳,等.不同有机物料对铝毒土壤上油菜生长的缓解效应研究[J].井冈山大学学报(自然科学版),2010,31(2):22-25.
- [8] 李阳,李心清,王兵,等.四种改良剂对酸性黄壤土壤酸度和肥力的影响[J].地球与环境,2016,44(6):683-690.
- [9] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1239-1999 森林土壤pH值的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [10] 北京农业大学土壤及植物营养系. LY/T 1251-1999 森林土壤水溶性盐分析[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [11] 中国林业科学研究院林业研究所. LY/T 1232-2015 森林土壤磷的测定[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [12] 中国林业科学研究院林业研究所. LY/T 1234-2015 森林土壤钾的测定[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [13] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1237-1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [14] 广州市林业和园林科学研究院. DB4401/T36-2019 园林种植土[S/OL]. [2019-12-16].<http://scjgj.gz.gov.cn/sofpro/bmyyqt/gzq/gzzjjweb/hdweb/dfbz/gzdfbzxq.jsp?id=e008a16a8ace4071a5670add4e435ea9>. 2019.
- [15] 胡敏,向永生,鲁剑巍.石灰用量对酸性土壤酸度及大麦幼苗生长的影响[J].中国农业科学,2016,49(20):3896-3903.
- [16] 胡红青,黄巧云,李学垣,等.磷矿粉缓解酸性土壤铝毒的研究[J].中国农业科学,1995(2):51-57.
- [17] 朱端卫,董元彦,李学垣.低品位磷矿粉对酸性土壤化学性质的影响[J].土壤通报,1991(6):257-259.
- [18] ALVARENGA P, Gonçalves A P, FERNANDES R M, et al. Evaluation of composts and liming materials in the phytostabilization of a mine soil using perennial ryegrass[J]. Science of the Total Environment, 2008, 406(1-2): 43-56.
- [19] YUAN J H, XU R K, WANG N, et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars[J]. Pedosphere, 2011, 21(3): 302-308.
- [20] 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.
- [21] 胡敏,向永生,鲁剑巍.石灰用量对酸性土壤pH值及有效养分含量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(4):72-77.
- [22] 蒋柏藩.中国磷矿农业利用的研究[J].中国农业科学,1988(4):62-67.
- [23] 张龙辉,李源环,邓小华,等.施用石灰和绿肥及生物有机肥后的酸性土壤pH和理化性状动态变化[J].中国烟草学报,2019,25(3):60-66.
- [24] 梅旭阳,高菊生,杨学云,等.红壤酸化及石灰改良影响冬小麦根际土壤钾的有效性[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1568-1577.
- [25] 刘琼峰,蒋平,李志明,等.湖南省水稻主产区酸性土壤施用石灰的改良效果[J].湖南农业科学,2014(13):29-32.
- [26] 花莉,金素素,洛晶晶.生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J].生态环境学报,2012,21(11):1795-1799.
- [27] 于丹丹,贾黎明,李宇,等.土壤改良剂对废弃砂石坑造林地土壤性质和银杏生理特性的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(9):56-61.
- [28] 蔡东,肖文芳,李国怀.施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(9):206-213.
- [29] 高俊扬.生物有机肥料在菠菜上的应用效果研究[J].现代农业科技,2010(1):112;114.
- [30] 刘恩玺,高桥辉昌,刘彩霞.树木剪枝堆肥与传统堆肥对土壤化学性质的影响[J].林业与环境科学,2016,32(2):68-72.
- [31] 郇礼阳,林威鹏,张凤姬,等.生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J].广东农业科学,2021,48(1):35-44.