

广西红壤区桉树林地土壤酸化特征及控酸技术初探

柯琴¹, 韦向向^{1, 2}, 赵隽宇¹, 覃祚玉¹, 宋贤冲¹, 曹继钊¹, 吴立潮^{3, 4}, 唐健^{1*}

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院 / 广西林用新型肥料研发中心, 广西 南宁 530002;
2. 广西大学林学院, 广西 南宁 530004; 3. 中南林业科技大学水土保持与荒漠化防治湖南省
高等学校重点实验室, 湖南 长沙 410004; 4. 中南林业科技大学经济林培育与
保护省部共建教育部重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 高强度连续种植桉树人工林的土壤酸度呈明显下降趋势, 土壤酸化已成为制约桉树林地土壤质量的主要障碍因子之一。然而, 单从活性酸角度无法全面评价桉树人工林土壤酸化状况, 同时缺乏桉树人工林土壤控酸技术研究。采集广西桂北红壤区桉树人工林土壤样品, 测定酸碱度、交换性酸含量、酸缓冲容量等指标, 分析土壤游离酸和潜在酸分布特征, 并以 3 种有机控酸剂 (腐植酸盐类、黄腐酸盐类和氨基寡糖类) 和 2 种无机缓冲剂 (磷酸二氢钾和磷酸氢二钾) 为备选材料, 两两搭配构建有机无机控酸体系, 筛选出缓冲能力较好的 3 种有机无机控酸体系, 开展控酸效果对比试验, 探讨上述 3 种控酸体系对土壤酸度的动态影响。结果表明, 广西红壤区桉树人工林土壤呈强酸性, pH 值范围为 4.50 ~ 4.85, 交换性 Al^{3+} 含量为 2.60 ~ 4.30 $cmol/kg$, 平均土壤酸缓冲容量为 38.90 $mmol/kg$ 。缓冲性能较好的 3 种有机无机控酸体系分别为 5:1 的氨基寡糖类 + 磷酸氢二钾、10:1 的黄腐酸盐类 + 磷酸二氢钾和 10:1 的腐植酸盐类 + 磷酸二氢钾, 上述 3 种控酸体系施用 30 d 后, 与空白对照相比, 土壤 pH 值分别提升 1.17、0.98 和 0.73, 增幅分别达 25.36%、21.24% 和 15.82%; 交换性 Al^{3+} 含量分别减少了 2.7、0.8、2.2 $cmol/kg$, 下降幅度达 74.07%、24.07% 和 62.04%。广西红壤区桉树人工林土壤呈强酸性, 土壤对外源酸稍敏感, 稍易受酸害。交换性 Al^{3+} 是主体致酸因子, 其含量高于作物铝胁迫临界点。综合考虑 3 种控酸体系对土壤酸度的影响, 氨基寡糖类与磷酸氢二钾配施对广西红壤区桉树人工林土壤控酸效果最佳, 后续田间试验效果有待进一步验证。

关键词: 红壤; 桉树人工林; 土壤酸化; 有机物料; 交换性酸

广西桉树以占全国 0.6% 的林地面积贡献全国 40% 的木材产量, 是保障国家木材和生态安全的重要树种。高强度连续种植广西桉树人工林土壤酸度呈明显下降趋势, 土壤酸化已成为制约桉树林地土壤质量的主要障碍因子之一^[1]。广西桉树种植区土壤类型以红壤为主, 受成土母质和高温多雨气候影响, 广西红壤区桉树人工林土壤普遍酸度较高, 有机质含量和养分有效性较低, 而近年来高强度短周期的经营模式进一步加剧了桉树林地土壤酸化程度, 加速了土壤养分流失。唐健等^[2]发现, 长期连栽模式下桉树人工林土壤呈酸化趋势, 酸碱度从

最初的 4.83 下降至 4.63, 下降幅度为 4.14%。段春燕等^[3]发现, 随着桉树林龄的增加土壤 pH 值呈下降趋势。赵隽宇等^[4]发现, pH 值是广西红壤区桉树人工林地肥力质量障碍度最高的指标, 障碍度高达 28.20%。土壤酸化通过增加土壤可溶性铝离子含量和改变土壤表面电荷性质, 导致钙、镁、钾等营养型盐基离子的淋失、磷元素有效性的降低、活化重金属元素对微生物活性的抑制以及氢离子和铝离子对植物的毒害作用, 深刻影响着营养物质的生物化学循环, 已成为制约红壤区桉树林地地力和生产力的主要障碍因子, 改善桉树人工林严重酸化土壤状况迫在眉睫。然而, 当前针对桉树人工林土壤酸化的相关研究仅涉及 pH 值这一活性酸指标, 而单从活性酸角度无法全面评价桉树人工林土壤酸化状况, 同时缺乏适用于桉树人工林土壤控酸技术的相关研究。因此, 本研究以探明桉树人工林土壤酸化特征为必要前提, 并在此基础上探索适用于广西红壤区桉树人工林酸化土壤的控酸增效技术, 对恢

收稿日期: 2024-02-20; 录用日期: 2024-06-06

基金项目: 广西林科院基本科研业务费项目 (林科 202308 号); 中央引导地方科技发展资金项目 (桂科 ZY21195026); 广西自然科学基金项目 (2022GXNSFBA035630)。

作者简介: 柯琴 (1997-), 硕士, 助理工程师, 主要从事土壤环境与人工林经营研究, E-mail: 2370620345@qq.com。

通讯作者: 唐健, E-mail: 21712104@qq.com。

复与提高桉树林地生产力、维持桉树人工林可持续发展具有重要意义。

目前用于克服土壤酸性障碍的改良剂品类繁多,主要包括无机改良剂和有机物料两大类。石灰^[5-7]、牡蛎壳粉^[8-10]等无机改良剂可直接通过酸碱中和降低土壤酸度,施用有机物料也是一种缓解土壤酸化的有效途径^[11-12],有机酸及其盐、胺基化合物等是有机物料中常见的有机化合物,其一方面通过矿化过程中有机阴离子的去羧基作用,消耗土壤中氢离子;另一方面释放盐基阳离子,置换吸附在土壤胶体表面的 H^+ 和 Al^{3+} ,提高土壤盐基饱和度和土壤缓冲性能,阻控土壤酸化;同时有机物料中的有机阴离子对磷元素具有活化作用,活性官能团对中、微量养分元素螯合能力强,有助于提高土壤养分有效性^[13]。胡敏等^[14]通过90 d土壤培养试验发现,施用有机肥可以显著提高土壤pH值、降低土壤交换酸总量、交换性氢离子和交换性铝含量。另外,也有研究采用无机-有机改良剂配施的方式缓解酸化状况^[15]。总体而言,不同控酸改良剂的成分、作用机理以及在不同土壤类型上的施用效果相差较大^[16-18],而适用于桉树林地的控酸技术有待进一步研究。

基于上述前人研究结果,本研究提出如下假设:(1)广西红壤区桉树人工林土壤酸化程度较为严重,交换性 Al^{3+} 是酸性土壤中交换性酸的主体。(2)有机无机结合构建的控酸体系有助于缓解桉树林地土壤酸化状况。为验证上述假设,本研究在广西红壤区选择12片典型桉树人工林地作为研究对象,从活性酸、潜性酸和土壤酸缓冲容量等多角度综合解析土壤酸化特征,并以3种有机控酸剂(腐植酸盐类、黄腐酸盐类和氨基寡糖类)和2种无机缓冲剂(磷酸二氢钾和磷酸氢二钾)为备选材料,构建并筛选出3种缓冲能力最佳的控酸体系,并采用控酸效果对比试验,探讨3种控酸体系对土壤酸度的动态影响,以期酸化严重桉树林地土壤的高效利用提供科学依据。具体研究目标,一是明确广西红壤区桉树人工林土壤酸化特征;二是探明有机无机结合构建的控酸体系对土壤酸度的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区柳州市三门江

林场,地处广西北部,地理坐标为 $24^{\circ}19'48''$ — $24^{\circ}25'12''N$, $109^{\circ}41'13''$ — $109^{\circ}41'20''E$,属于典型的低山丘陵地貌,海拔高度100~200 m,亚热带季风气候,年均气温 $20^{\circ}C$,年均降水量1300~1700 mm,年蒸发量1471~1750 mm。主要成土母岩类型包括砂岩、砂页岩、泥页岩、硅质岩,主要土壤类型为富铝湿润富铁土^[19]。研究区林分类型为桉树纯林,造林前均为常绿阔叶林,2006年经阔叶林采伐并炼山后开始造林,每间隔5~6年采伐一次并萌芽更新下一代。种植品种包括尾叶桉和尾巨桉,林分密度为1500株/hm²,年施肥量为750 kg/hm²,肥料种类为有机无机复合肥,有机质含量为15%,氮磷钾配方为 $m_N:m_P:m_K=15:6:9$ 。

1.2 土壤样品采集

2023年6—8月通过地理信息系统软件(Arcgis)在场内红壤桉树种植区布设12个采样点,每个采样点布设一个20 m×20 m的标准地,在每个标准地内采用“S”形取样法选取5个点位,使用土钻采集0~20 cm表层土壤,采集完成后将各点位土样取等量混合均匀,并采用“四分法”收集土样约1 kg运回实验室,经自然风干后过1.68 mm筛以备测定酸度指标。

1.3 室内控酸试验供试材料

供试土壤采集于上述12个采样点之一,采集深度为0~20 cm土层,基本理化性状为pH值4.82,有机质含量34.76 g/kg,全氮含量2.75 g/kg,全磷含量0.88 g/kg,全钾含量4.41 g/kg,碱解氮含量113.2 mg/kg,有效磷含量9.8 mg/kg,速效钾含量54.8 mg/kg。

室内控酸试验供试控酸原料包括腐植酸盐、黄腐酸盐类、氨基寡糖类3种有机物料;磷酸氢二钾和磷酸二氢钾2种无机缓冲物质,均为市售。

1.4 室内控酸试验设计

1.4.1 控酸体系筛选试验

以腐植酸盐类(F)、黄腐酸盐类(H)、氨基寡糖类(K)及其与磷酸二氢钾(X)/磷酸氢二钾(Y)搭配构成的缓冲体系作为备选控酸剂,采用盐酸滴定法测定各备选控酸体系缓冲容量,以筛选出缓冲性能最佳的控酸体系及配比。具体方法:取腐植酸盐类、黄腐酸盐类和氨基寡糖类各8 g分别溶于400 mL去离子水中,配制饱和溶液,另配制0.1 mol/L的磷酸二氢钾和磷酸氢二钾溶液,并分别取相应体积配制成体积比分别为5:1、10:1、15:1、20:1的缓冲体系,利用已知浓度盐酸进行滴定并

实时记录 pH 值变化, 计算并比较不同缓冲体系的缓冲容量, 即使缓冲溶液 pH 值降低 0.5 所添加氯化氢物质的量, 以筛选预期降酸效果最佳的 3 种控酸体系。

1.4.2 控酸效果对比试验

试验设置处理组和空白对照 (CK0), 处理组施加上述筛选的 3 种缓冲体系, 每种控酸体系用量为 10 g/kg, 空白对照为不施加有机控酸体系。试验在普通塑料桶 (半径 5 cm, 高 30 cm) 进行, 每桶分别装风干土 2 kg, 将风干土壤与有机控酸体系充分混匀后进行装柱, 装柱完成后并用去离子水将土壤含水量调节到土壤田间持水量的 70%, 塑料桶用保鲜膜封口, 并在保鲜膜中间留下几个小孔, 以便气体交换并减少水分损失, 将塑料桶置于 25℃ 恒温培养箱中进行培养。所有处理均设置 3 次重复, 共计 12 个土柱样品。试验共进行 30 d。于培养开始后的第 15、30 d 分别采集土壤样品, 样品经自然风干后过 1.68 mm 筛以备测定酸度指标。

1.5 土壤酸度指标检测

土壤 pH 值采用 (水土比 2.5:1) 电极法测定;

土壤交换性酸、氢离子及铝离子测定采用 1 mol/L 氯化钾淋洗、0.02 mol/L 氢氧化钠滴定法测定。

1.6 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据记录及制表, 采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析, 对比不同处理间的差异, 并通过 LSD 法进行显著性检验 ($P < 0.05$), 采用 Origin 2022 进行制图。

2 结果与分析

2.1 广西红壤区桉树人工林土壤酸化特征

由表 1 可知, 本研究样品采集点土壤 pH 值范围为 4.50 ~ 4.85, 均低于 5.0, 属于强酸性土壤。采样点土壤交换性酸含量范围为 4.70 ~ 6.20 cmol/kg, 平均值为 5.44 cmol/kg, 其中交换性 Al^{3+} 含量范围为 2.60 ~ 4.30 cmol/kg, 平均值为 3.53 cmol/kg, 占比范围为 54.00% ~ 73.00%, 表明广西红壤区桉树人工林土壤交换性酸均以交换性 Al^{3+} 为主, 交换性 H^+ 所占比例较小。采样点土壤酸缓冲容量范围为 35.53 ~ 43.96 mmol/kg, 平均值为 38.90 mmol/kg。

表 1 广西红壤区桉树林地土壤酸化特征描述性统计结果

酸化指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
pH 值	4.50	4.85	4.69	0.1354	0.0289
交换性酸总量 (cmol/kg)	4.70	6.20	5.44	0.5648	0.1038
交换性 Al^{3+} 含量 (cmol/kg)	2.60	4.30	3.53	0.5123	0.1450
交换性 H^+ 含量 (cmol/kg)	1.40	3.20	2.27	0.5821	0.2568
交换性 Al^{3+} / 交换性酸总量 (%)	54.00	73.00	64.83	0.0704	0.1086
酸缓冲容量 (mmol/kg)	35.53	43.96	38.90	2.7425	0.0705

注: $n=12$ 。

2.2 不同控酸体系缓冲性能比较

由表 2 可知, 腐植酸盐类、黄腐酸盐类饱和溶液加入任意浓度磷酸二氢钾后 pH 值均下降, 下降范围分别为 0.48 ~ 1.91、0.68 ~ 2.00, 而腐植酸盐类、黄腐酸盐类和氨基寡糖类饱和溶液加入任意浓度磷酸氢二钾后 pH 均上升, 上升范围分别为 0.32 ~ 0.37、0.09 ~ 0.11、2.09 ~ 2.49。与各有机物料单独施用相比, 各有机物料与磷酸氢二钾 / 磷酸二氢钾无机缓冲剂搭配可明显提高控酸体系的缓冲性能。其中缓冲容量最大的 3 种缓冲体系为 KY1 (5:1 的氨基寡糖类 + 磷酸氢二钾)、HX1 (10:1 的黄腐酸盐类 + 磷酸二氢钾) 和 FX1 (10:1 的腐植酸盐类 + 磷酸二氢钾), 缓冲容量分别为 0.2096、0.2075 和 0.1992 mmol。

2.3 不同控酸体系对土壤酸碱度的影响

土壤 pH 值是衡量土壤活性酸度大小的指标之一。分析结果 (图 1) 表明, 与 CK0 相比, 施用任何控酸体系均对土壤 pH 值有显著提升效果。施用控酸体系 15 d 后, 各处理的 pH 值比 CK0 提高了 0.90 ~ 1.48, 30 d 后, 各处理 pH 值比 CK0 提高了 0.98 ~ 1.17。比较不同处理之间 pH 值发现, 控酸体系施用 15 d 后, 土壤 pH 值提升效果最佳的处理为 KY1 (5:1 的氨基寡糖类 + 磷酸氢二钾), pH 为 6.28, 比 CK0 高 1.47, 增幅达 30.76%; 其次为 FX1 (10:1 的腐植酸盐类 + 磷酸二氢钾) 和 HX1 (10:1 的黄腐酸盐类 + 磷酸二氢钾), pH 分别为 5.70 和 5.51, 分别比 CK0 高 0.9 和 0.71, 增幅分别达 18.75% 和 14.72%。控酸体系施用 30 d 后, 对土

表 2 控酸体系缓冲容量

控酸体系	编号	pH 值	pH 值 -0.5	HCl (mmol)
腐植酸盐类 (单独)	F	9.57 ± 0.21a	9.07 ± 0.14a	0.0251 ± 0.0072c
10:1 腐植酸盐类 + 磷酸二氢钾	FX1	7.66 ± 0.32d	7.16 ± 0.11d	0.1992 ± 0.0357a
15:1 腐植酸盐类 + 磷酸二氢钾	FX2	8.61 ± 0.18c	8.11 ± 0.23c	0.0907 ± 0.0042b
20:1 腐植酸盐类 + 磷酸二氢钾	FX3	9.09 ± 0.25b	8.59 ± 0.19b	0.0722 ± 0.0102b
5:1 腐植酸盐类 + 磷酸氢二钾	FY1	9.89 ± 0.22a	9.39 ± 0.17a	0.0889 ± 0.0071b
10:1 腐植酸盐类 + 磷酸氢二钾	FY2	9.90 ± 0.24a	9.40 ± 0.21a	0.0957 ± 0.0112b
15:1 腐植酸盐类 + 磷酸氢二钾	FY3	9.94 ± 0.26a	9.44 ± 0.22a	0.0951 ± 0.0094b
黄腐酸盐类 (单独)	H	9.61 ± 0.28a	9.11 ± 0.15a	0.0604 ± 0.0065c
10:1 黄腐酸盐类 + 磷酸二氢钾	HX1	7.61 ± 0.15c	7.11 ± 0.14d	0.2075 ± 0.0253a
15:1 黄腐酸盐类 + 磷酸二氢钾	HX2	8.57 ± 0.23b	8.07 ± 0.24c	0.0933 ± 0.0076b
20:1 黄腐酸盐类 + 磷酸二氢钾	HX3	8.93 ± 0.21b	8.43 ± 0.12b	0.0803 ± 0.0084bc
5:1 黄腐酸盐类 + 磷酸氢二钾	HY1	9.70 ± 0.29a	9.20 ± 0.19a	0.0973 ± 0.0067b
10:1 黄腐酸盐类 + 磷酸氢二钾	HY2	9.72 ± 0.22a	9.22 ± 0.26a	0.1072 ± 0.0123b
15:1 黄腐酸盐类 + 磷酸氢二钾	HY3	9.70 ± 0.26a	9.20 ± 0.18a	0.1054 ± 0.0084b
氨基寡糖类 (单独)	K	5.17 ± 0.11b	4.67 ± 0.10b	0.1460 ± 0.0137b
5:1 氨基寡糖类 + 磷酸氢二钾	KY1	7.66 ± 0.20a	7.16 ± 0.23a	0.2096 ± 0.0164a
10:1 氨基寡糖类 + 磷酸氢二钾	KY2	7.41 ± 0.23a	6.91 ± 0.17a	0.1368 ± 0.0145b
15:1 氨基寡糖类 + 磷酸氢二钾	KY3	7.26 ± 0.21a	6.76 ± 0.17a	0.0779 ± 0.0069c

注: pH 值 -0.5 代表 pH 值下降 0.5; 缓冲容量指的是使缓冲溶液 pH 值降低 0.5 所添加氯化氢物质的量; 数据为平均值 ± 标准差; 小写字母不同表示同一类别控酸体系内不同比例间差异显著 ($P < 0.05$); $n=3$ 。

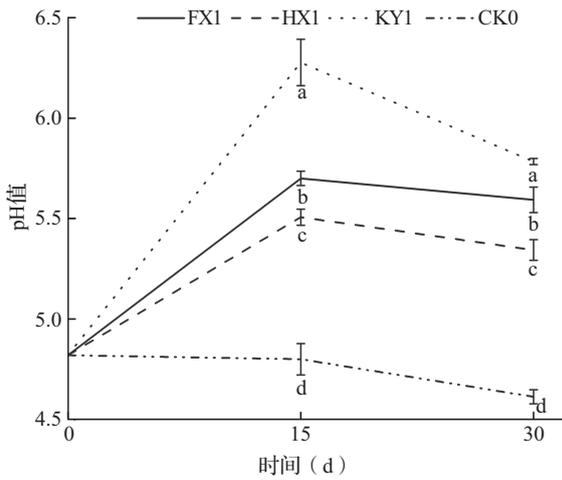


图 1 不同控酸体系处理下 30 d 内土壤酸碱度变化

注: 图中小写字母不同表示同一时间内不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

壤酸度改善效果由高到低排序依次为 KY1、FX1 和 HX1, 比 CK0 分别提升 1.17、0.98 和 0.73, 增幅分别达 25.36%、21.24% 和 15.82%。这一结果表明, 短期内 KY1 改善土壤酸化效果最佳。除此以外, 随着培养时间的延长, 各处理的土壤 pH 值和各控酸体系对 pH 值的提升幅度均呈略微下降趋势。

2.4 不同控酸体系对土壤交换性酸含量的影响

土壤酸除活性酸外还包括潜性酸, 是衡量土壤

酸度的容量指标, 也是进行土壤酸度调节的重要参考指标。由图 2 可知, 控酸体系施用 15 d 后, 各处理下土壤交换性酸总量在 1.8 ~ 4.8 cmol/kg, 施用 30 d 后, 土壤交换性酸总量范围在 1.5 ~ 4.5 cmol/kg。与 CK0 相比, 施用任意控酸体系均能降低土壤交换性酸总量。不论是施用 15 d 还是 30 d 后, KY1 效果最佳, 交换性酸总量仅为 1.5 ~ 1.8 cmol/kg, 比 CK0 减少了 3.5 ~ 3.9 cmol/kg, 下降幅度达 68.79% ~ 69.54%; 其次为 FX1, 交换性酸总量为 2.6 ~ 3.0 cmol/kg, 比 CK0 减少了 2.4 ~ 2.8 cmol/kg, 下降幅度达 47.68% ~ 47.98%; 最后为 HX1, 交换性酸总量为 4.5 ~ 4.8 cmol/kg, 比 CK0 减少了 0.5 ~ 1.0 cmol/kg, 下降幅度达 9.27% ~ 16.76%。

由图 2 可知, 4 种不同处理下交换性 Al^{3+} 占交换性酸的 45.24% ~ 79.17%, 而交换性 H^+ 所占比例较小, 说明交换性 Al^{3+} 是酸性土壤中交换性酸的主体, 是桂北桉树人工林土壤酸化的主要原因。与 CK0 相比, 施用控酸体系后土壤交换性 Al^{3+} 含量呈下降趋势, 说明控酸体系对土壤 Al^{3+} 的活化有抑制作用, 土壤交换性 Al^{3+} 从高到低依次为 HX1 > FX1 > KY1。其中 KY1 处理下交换性 Al^{3+} 含量仅为 0.9 ~ 1.1 cmol/kg, 比 CK0 减少了 2.6 ~ 2.7 cmol/kg, 下降幅度达 69.91% ~ 74.07%。

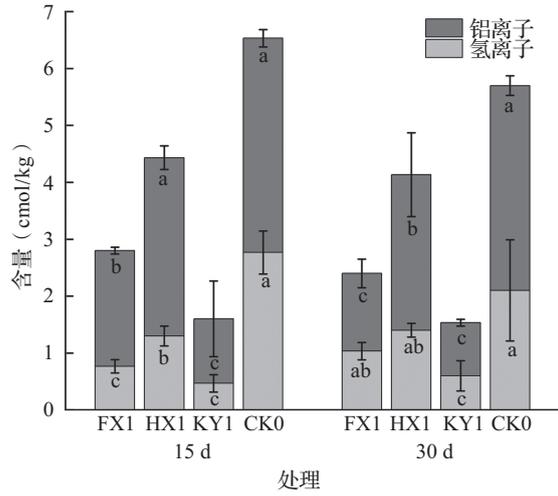


图2 不同控酸体系处理下15和30 d后土壤交换性总酸含量、交换性氢离子含量和交换性铝离子含量

为了进一步明确桂北桉树人工林土壤酸度与土壤交换性酸含量的关系，将全部样品土壤交换性酸与交换性H⁺、交换性Al³⁺含量进行回归拟合(图3)，分析表明，土壤交换性酸与交

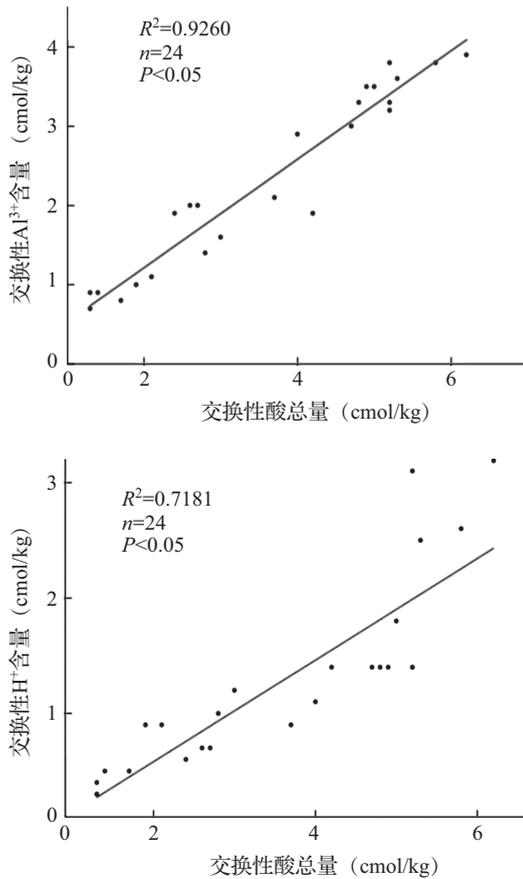


图3 土壤交换性酸总量与交换性氢离子、交换性铝离子含量拟合曲线

换性H⁺、交换性Al³⁺含量均呈显著正相关，且均达到极显著水平($P<0.01$)，其中与交换性H⁺含量相比，交换性Al³⁺含量与交换性酸总量拟合度更高， R^2 为0.9260，这进一步表明桂北桉树人工林土壤中土壤酸度主要由土壤交换性Al³⁺含量决定，而交换性H⁺对土壤酸度的贡献低于Al³⁺。

3 讨论

3.1 广西红壤区桉树人工林土壤酸化特征

本研究发现，广西红壤区桉树人工林0~20 cm土层土壤pH值范围为4.50~4.85，属于强酸性土壤，说明广西红壤区桉树人工林土壤酸化程度较为严重。在酸性矿质土壤中，土壤潜性酸是活性酸的主要来源，即土壤交换性致酸离子(H⁺和Al³⁺)^[20]。其中Al³⁺活性较强，容易对植物造成铝毒害，当土壤交换性Al³⁺含量>2 cmol/kg时，植物会出现铝胁迫^[21]。本研究中桉树林地土壤交换性Al³⁺含量范围为3.50~3.90 cmol/kg，说明广西红壤区桉树生长可能受到铝胁迫。土壤酸缓冲性能以土壤酸缓冲容量作为衡量指标，土壤酸缓冲容量越高，表明土壤酸碱系统越稳定，土壤对外源输入酸的敏感度越低，越有利于维持土壤肥力及环境质量。本研究中桉树林地平均土壤酸缓冲容量为38.90 mmol/kg，徐仁扣^[22]根据酸缓冲容量对土壤酸敏感性进行分级，依据该分级标准，广西红壤区桉树人工林土壤对酸敏感等级属于Ⅲ级，即对酸稍敏感，稍易受酸害。

本研究中土壤交换性Al³⁺含量占交换性总酸含量的54.00%~73.00%，明显高于交换性H⁺所占比例(表1)，同时交换性Al³⁺含量与交换性酸总量之间的拟合曲线 R^2 高达0.9260(图3)，说明交换性Al³⁺是广西红壤区桉树人工林土壤交换性酸的主体致酸因子，前人在农田^[23]、耕地^[24]、茶园^[25]等土地利用类型中也得到了类似结果，这是因为Al³⁺水解后会产生3个H⁺，导致土壤pH值降低。前人研究^[26]发现，交换性Al³⁺占交换性酸的比例会随着土壤pH值的降低而增加。蔡泽江^[27]发现，玉米-小麦轮作地红壤交换性Al³⁺占交换性酸的比例为82.5%~96.4%，明显高于本研究桉树林地土壤交换性Al³⁺占交换性酸的比例；pH值范围为4.14~4.42，明显低于本研究桉树林地土壤pH值，说明林地与耕地土壤酸化特征和酸化程

度均有所差异,这可以归结于耕地与林地经营模式的差异。耕地常采取一年多熟的高强度经营制度,而且养分输入多依赖于化肥施用,一方面磷肥中所含的酸性物质直接提高土壤酸度,另一方面铵态氮肥等生理酸性化肥输入后经 NH_4^+ 的硝化作用以及 NO_3^- 的淋溶作用后产生大量 H^+ 进入土壤溶液进而加剧土壤酸化^[28],同时高强度作物收获会从土壤中吸收大量碱性盐基离子进一步导致土壤酸化。而桉树林地的经营管理较为粗放,一般只在轮伐期前3~4年内每年进行一次施肥,养分输入来源除肥料外,同时还来源于林地凋落物以及采伐剩余物的养分和有机质归还^[29],而土壤有机质的增加可以抑制活性铝的释放^[30],提高土壤缓冲性能^[31]。

3.2 有机无机控酸体系对土壤酸化状况的影响

有机物料主要通过以下几方面稳定土壤酸碱度:一方面,具有较高比表面积的有机大分子通过吸附盐基离子提高阳离子交换量和盐基饱和度,从而提高土壤酸缓冲性能^[32];另一方面,有机质胶体表面呈化学碱性的活性基团(酚羟基、羟基和羧基等),可直接通过酸碱中和作用稳定土壤酸碱环境^[33-34];最后,有机物料在矿化分解过程中经脱羧反应消耗土壤中的 H^+ ,抑制土壤酸化^[35]。本研究通过有机物料与常用无机缓冲物质搭配构建有机无机控酸体系,并筛选出3种酸缓冲性能较好的控酸体系,分别为KY1(5:1的氨基寡糖类+磷酸氢二钾)、HX1(10:1的黄腐酸盐类+磷酸二氢钾)和FX1(10:1的腐植酸盐类+磷酸二氢钾)。

针对上述筛选出的3种控酸体系开展室内土柱试验,结果表明,3种有机无机控酸体系均能提高土壤pH值,减少酸性土壤交换性酸总量,尤其是交换性 Al^{3+} 含量,降低酸性土壤活性铝对林木的毒害作用,这与大多数人的研究^[16, 36-38]结果一致。有机无机控酸体系中有有机分子含有丰富的官能团,具有一定的酸缓冲性,同时磷酸二氢钾和磷酸氢二钾两种无机缓冲物质的补充进一步提高了整个控酸体系的缓冲性能(表2),形成一个相互转化的缓冲体系,减缓了土壤酸度的急剧变化。与其余处理相比,KY1处理下土壤pH值最高(图1),交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 和交换性酸总量均最低,说明氨基寡糖类与磷酸氢二钾搭配构建的有机无机控酸体系对广西红壤区桉树人工林土壤控酸效果最佳。这是因为氨基寡糖类分子化学基团丰富,其中氨基等碱性基团可直接与 H^+ 发生化学中和,同时羧基、

醇羟基等活性基团由于其较高的反应活性和较大的比表面积,对 Al^{3+} 具有强络合作用,促进土壤交换性 Al^{3+} 向有机络合态铝的转化,从而降低土壤交换性酸含量^[39-40]。除此以外,还有研究发现,氨基寡糖类易与铁、锰等微量元素产生螯合作用,可提高土壤微量元素养分有效性。

随着培养时间的延长,所有处理下土壤pH值均呈略微下降趋势(图1),这可能是由于土壤硝化作用生成 H^+ ^[41]。KY1处理施用15d后即可显著降低 Al^{3+} 含量,有效消除植物铝胁迫风险,且30d后未出现返酸趋势,说明氨基寡糖类与磷酸氢二钾配施对酸化桉树林地土壤铝胁迫风险的控制效果较为持续,但长期效果如何后续仍待进一步验证。施用控酸体系15d后FX1处理土壤交换性 Al^{3+} 含量为3.1 cmol/kg,高于铝胁迫临界值,施用30d后才降至1.4 cmol/kg,低于铝胁迫临界值,说明腐植酸盐类对土壤铝活化的抑制作用有一定的滞后性。HX1处理虽在施用控酸体系15和30d后均对交换性 Al^{3+} 含量产生一定抑制作用,但均未使交换性 Al^{3+} 含量降至铝胁迫临界值以下。

4 结论

广西红壤区桉树人工林土壤属于强酸性土壤,根据土壤酸缓冲容量判定酸敏感等级为Ⅲ级,即土壤对外源酸稍敏感,稍易受酸害;土壤交换性 Al^{3+} 是主体致酸因子,其平均含量高于作物铝胁迫临界点。通过有机物料与无机缓冲物质搭配构建有机无机控酸体系,并筛选出3种酸缓冲性能较好的控酸体系,分别为KY1(5:1的氨基寡糖类+磷酸氢二钾)、HX1(10:1的黄腐酸盐类+磷酸二氢钾)和FX1(10:1的腐植酸盐类+磷酸二氢钾)。经过为期30d的土柱试验,证明上述3种有机无机控酸体系均能显著提高土壤pH值,显著减少酸性土壤交换性酸总量,尤其是交换性铝离子含量,降低酸性土壤活性铝对林木的毒害作用,其中氨基寡糖类与磷酸氢二钾配施对土壤酸度改善效果最佳,且对铝胁迫风险的控制效果最为持续,可作为广西红壤区酸化桉树林地控酸增效技术措施,后续田间试验效果有待进一步验证。

参考文献:

- [1] Van B N, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton in acidification of soils and water [J]. Nature, 1984,

- 307 (5952): 599-604.
- [2] 唐健, 赵隽宇, 覃祚玉, 等. 1993—2018年广西桉树主产区土壤肥力演变特征分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(1): 94-99.
- [3] 段春燕, 何成新, 徐广平, 等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤养分及生物学特性[J]. 热带作物学报, 2019, 40(6): 1213-1222.
- [4] 赵隽宇, 石媛媛, 覃祚玉, 等. 南亚热带桉树人工林土壤肥力障碍因子评价[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(4): 205-214.
- [5] 胡现荣, 范存敏, 吴萍萍, 等. 石灰用量对酸化稻田土壤酸度和水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(8): 22-25.
- [6] 李艳春, 汪航, 李兆伟, 等. 几种改良措施对酸化茶园土壤理化性质和微生物群落结构的影响[J]. 茶叶科学, 2022, 42(5): 661-671.
- [7] 方克明, 肖欣, 王美玲, 等. 农用石灰在酸性及镉污染稻田中试效果[J]. 中国农学通报, 2021, 37(26): 93-97.
- [8] 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 等. 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5224-5233.
- [9] 丁希月, 王妍, 翁凌, 等. 煅烧牡蛎壳粉对荔枝园土壤酸化及果实品质的改良效果[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2022, 27(5): 408-416.
- [10] 李雁乔, 章骞, 黄永生, 等. 煅烧牡蛎壳粉对土壤酸化及琯溪蜜柚果实的改善效果[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2020, 25(4): 256-264.
- [11] Gruba P, Mulder J. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511(1): 655-662.
- [12] 潘晓莹, 时仁勇, 洪志能, 等. 富里酸对红壤酸度的改良及酸化阻控效果[J]. 土壤, 2020, 52(4): 685-690.
- [13] Jiang J, Wang Y, Yu M, et al. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils [J]. Chemical Geology, 2018, 501(30): 86-94.
- [14] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 不同调理剂对酸性土壤降酸效果及大麦幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 118-124.
- [15] 吴敏, 韦家少, 何鹏, 等. 腐殖酸类营养型改良剂改善火龙果果园土壤理化特性和幼茎养分含量[J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 211-216.
- [16] 谭智勇, 王喜英, 赵辉, 等. 改良剂对酸性植烟土壤化学性质、细菌群落结构和丰度的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(16): 240-246.
- [17] 盖淑杰, 陈宇帅, 张杭杭, 等. 土壤改良剂对茶园土壤环境和茶树生长影响研究进展[J]. 中国茶叶, 2023, 45(11): 31-40.
- [18] 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.
- [19] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] Fahrenhorst C, Botschek J, Skowronek A, et al. Application of gypsum and lime to increase cation adsorption of a Geric Ferralsol in the Brazilian Amazon region [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1999, 162(1): 41-49.
- [21] Kochian L V, Hoekenga O A, Pineros M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 459-493.
- [22] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
- [23] 时仁勇. 秸秆生物质炭, 生物质灰和有机肥改良红壤酸度和阻控红壤酸化的效果与机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [24] 胡敏. 恩施州耕地土壤酸化现状及石灰等土壤调理剂降酸效果初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [25] 袁大刚, 陈旋, 孙健, 等. 川西3种茶园土壤的酸度和酸碱缓冲能力及石灰需要量比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(4): 409-415.
- [26] 吴甫成, 彭世良, 王晓燕, 等. 酸沉降影响下近20年来衡山土壤酸化研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 219-224.
- [27] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [28] Poss R, Smith C, Hui F. Rate of soil acidification under wheat in a semiarid environment [J]. Plant and Soil, 1995, 177(1): 85-100.
- [29] Chen C, Weng Y, Huang K, et al. Decomposition of harvest residues and soil chemical properties in a *Eucalyptus urophylla* × *grandis* plantation under different residue management practices in southern China [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 529: 120756.
- [30] Li K, Lu H, Nkoh J N, et al. Aluminum mobilization as influenced by soil organic matter during soil and mineral acidification: a constant pH study [J]. Geoderma, 2022, 418: 115853.
- [31] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 465-472.
- [32] 江军, 曹楠楠, 俞梦笑, 等. 酸性森林土壤缓冲酸沉降关键机理研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 491-499.
- [33] 王娇, 王鸿斌, 赵兴敏, 等. 添加秸秆对不同有机含量土壤酸度及缓冲性能的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 361-368.
- [34] 张雅洁, 陈晨, 陈曦, 等. 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2155-2161.
- [35] Latifah O, Ahmed O H, Majid N M A. Enhancing nitrogen availability, ammonium adsorption-desorption, and soil pH



- buffering capacity using composted paddy husk [J]. *Eurasian Soil Science*, 2017, 50: 1483-1493.
- [36] 朱悦蕊, 林慧凌, 张誉龄, 等. 钾、镁配施改良茶园土壤酸化的效果及其作用路径 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42 (7): 1554-1560.
- [37] 刘禹池, 岳丽杰, 卢庭启, 等. 不同调酸措施对西南山地酸化土壤改良及玉米产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (1): 191-198.
- [38] 徐火忠, 吴林土, 李贵松, 等. 茶园土壤酸化修复技术研究进展 [J]. *中国茶叶*, 2023, 45 (1): 12-17.
- [39] 张葛, 窦森, 谢祖彬, 等. 施用玉米秸秆生物质炭对水稻土黑碳数量和结构特征的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (9): 1769-1774.
- [40] Qian L, Chen B. Interactions of aluminum with biochars and oxidized biochars: implications for the biochar aging process [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62 (2): 373-380.
- [41] Shi R, Ni N, Jackson N N, et al. Beneficial dual role of biochars in inhibiting soil acidification resulting from nitrification [J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 43-51.

Study on soil acidification characteristics and acid control technology of *Eucalyptus* forest in Guangxi red soil region

KE Qin¹, WEI Xiang-xiang^{1, 2}, ZHAO Jun-yu¹, QIN Zuo-yu¹, SONG Xian-chong¹, CAO Ji-zhao¹, WU Li-chao^{3, 4}, TANG Jian^{1*} (1. Guangxi Forestry Research Institute, Guangxi Research and Development Center for New Fertilizer, Nanning Guangxi 530002; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004; 3. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating in Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004; 4. Key Laboratory of Cultivation and Protection for Non-wood Forest Trees of Ministry of Education, Changsha Hunan 410004)

Abstract: In recent years, the pH value of *Eucalyptus* plantation soil in Guangxi decreased obviously, and soil acidification has gradually become the main obstacle factor restricting the soil quality of *Eucalyptus* plantation. However, soil acidification status of *Eucalyptus* plantation soil cannot be evaluated from the perspective of active acid alone, and soil acid control technology of *Eucalyptus* plantation is lacking. Based on the soil acidification characteristics of *Eucalyptus* plantation in Guangxi red soil region, the acid control system was constructed and the acid control effect of each acid control system was compared to provide a scientific basis for alleviating soil acidification of *Eucalyptus* plantation. Soil samples of *Eucalyptus* plantation in Guangxi red soil region were collected to determine pH value, exchangeable acid content and acid buffer capacity, and to analyze the distribution characteristics of free acid and potential acid in soil. With three organic acid control agents (humates, xanthulates and amino oligosaccharides) and two inorganic buffers (potassium dihydrogen phosphate and dipotassium hydrogen phosphate) as alternative materials, the organic-inorganic acid control systems were constructed by pairwise collocation. Three kinds of organic-inorganic acid control systems with the best buffer capacity were selected, and the dynamic effects of three kinds of acid control systems on soil acidity were measured by comparison of acid control effects. The results showed that the pH value of strongly acidic soil of *Eucalyptus* plantation in Guangxi red soil region ranged from 4.50 to 4.85, the content of exchangeable Al³⁺ was 2.60-4.30 cmol/kg, and the average buffer capacity of soil acid was 38.90 mmol/kg. The three organic-inorganic acid control systems with the best buffer performance were 5:1 amino oligosaccharides+dipotassium hydrogen phosphate, 10:1 xanthohuate+potassium dihydrogen phosphate and 10:1 humate+potassium dihydrogen phosphate. After 30 days of application of the above three acid reduction systems, compared with the blank control, soil pH value increased by 1.17, 0.98 and 0.73 units, respectively, increasing by 25.36%, 21.24% and 15.82%. The content of exchangeable Al³⁺ decreased by 2.7, 0.8 and 2.2 cmol/kg, respectively, by 74.07%, 24.07% and 62.04%. The soil of *Eucalyptus* plantation in the red soil region of Guangxi is strongly acidic. and it is slightly sensitive to exogenous acid and susceptible to acid damage. Exchangeable Al³⁺ is the main exchangeable acid, and its content is higher than the critical point of crop aluminum stress. *Eucalyptus* growth may be subjected to aluminum stress. Considering the effects of three acid control systems on soil acidity, the combined application of amino oligosaccharides and dipotassium hydrogen phosphate was the best for acid control of *Eucalyptus* plantation soil in Guangxi red soil region, and the results of subsequent field trials need to be further verified.

Key words: red soil; *Eucalyptus* plantation; soil acidification; organic materials; exchangeable acid