

有机物料对酸化山核桃林地土壤的改良作用

石红静¹, 马闪闪¹, 赵科理¹, 叶立前², 李 皓³, 沈 颖¹, 赵伟明³, 叶正钱¹

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省临安市湍口镇人民政府, 浙江 临安 311325; 3. 浙江省杭州市林业科学研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 为探讨有机物料对山核桃 *Carya cathayensis* 林地酸性土壤的改良效果, 通过室内培养的方式, 研究不同添加剂量下, 沼渣、肥得力、黄腐酸钾、竹炭等对山核桃林地酸性土壤性质的影响; 通过大田试验, 研究竹炭、肥得力、黄腐酸钾等对山核桃林生长及产量的影响。结果表明: 有机物料能显著降低土壤酸度, 提高土壤 pH 值 ($P < 0.05$), 经过培养后土壤 pH 值由 pH 4.41 升至 pH 5.17, 上升了 17.00%; 有效地降低了土壤交换性酸与交换性铝, 增加土壤交换性盐基, 其中交换性铝由 $3.94 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $0.72 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅高达 81.70%。有机物料也增加了土壤有机质、有效磷、速效钾和碱解氮质量分数, 其中有机质和碱解氮分别增加了 100.70% 和 104.70%; 有效磷和速效钾增加更加显著, 最终值达到 $22.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $230.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且随着有机物料施用量的增加, 对酸性土壤的改良效果更好。黄腐酸钾对土壤酸度的改良效果优于其他物料, 且不同用量的效应存在较大差异, 在 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量时对土壤性质的影响最为明显。大田试验结果表明: 所用有机物料显著改善了山核桃生长状况, 提高了 42.00%~58.00% 的产量, 与对照相比达到了极显著性差异水平 ($P < 0.01$)。图 8 表 3 参 17

关键词: 森林土壤学; 山核桃; 有机物料; 土壤酸化; 改良作用

中图分类号: S714.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)04-0670-09

Effect of organic materials on improvement of *Carya cathayensis* forest acidic soil

SHI Hongjing¹, MA Shanshan¹, ZHAO Keli¹, YE Liqian², LI Hao³, SHEN Ying¹, ZHAO Weiming³, YE Zhengqian¹

(1. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Tuankou People's Government in Lin'an City of Zhejiang Province, Lin'an 311325, Zhejiang, China; 3. Hangzhou Academy of Forestry, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: To study the effects of different organic materials (namely biogas residue; Feideli, a commercial organic fertilizer; potassium humate; and bamboo-char) for improving acidic soils in a *Carya cathayensis* forest, an incubation experiment and a field study were carried out. In the incubation experiment, mixtures of soil with each of the organic materials at three application rates (0, 1 and $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) were incubated at $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Each treatment were replicated 4 times. Completely randomized design was used. Soil samples were collected at 0, 10, 20, 30, 60 and 90 d. Based on the incubation experiment, bamboo-char, Feideli and potassium humate were used in the field experiment, at the rate of $2 \text{ kg} \cdot \text{tree}^{-1}$, and the blank was as ck. Four treatments with 6 replicates were randomly designed. Results showed that application of organic materials not only improved soil pH from 4.41 to 5.17 and soil exchangeable base content, but also significantly decreased ($P < 0.05$) soil acidity. Also, soil exchangeable Al was reduced from $3.94 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $0.72 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, a decrease of 81.70%. Mean-

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-09-14

基金项目: 浙江省科学技术公益项目(2015C33051); 国家自然科学基金资助项目(41201323); 浙江省林业科研成果推广项目(2013B13); 浙江农林大学科学研究发展基金资助项目(2005FR053)

作者简介: 石红静, 从事土壤与环境研究。E-mail: 1114963937@qq.com。通信作者: 叶正钱, 教授, 博士, 从事土壤、植物营养与环境生态研究。E-mail: 634688180@qq.com

while, organic material increased the content of soil available N, P, K, and soil organic matter (SOM) with SOM increasing 100.70% and N increasing 104.70%; soil available P reached 22.34 mg·kg⁻¹ and K attained 230.83 mg·kg⁻¹ or more than doubling. Results from the field experiment showed that organic materials significantly improved growth and nut yield ($P<0.05$), and the nut yield increase was in the order of potassium humate > Feideli > bamboo-char. Overall, the effect of potassium humate was more effective than other organic materials on soil acidity improvement. [Ch, 8 fig. 3 tab. 17 ref.]

Key words: forest soil science; *Carya cathayensis*; organic materials; soil acidification; soil improvement

山核桃 *Carya cathayensis* 属胡桃科 Juglandaceae 山核桃属 *Carya*, 是中国特有的名优干果和木本油料植物, 果实具有营养保健、美容及药用等价值^[1], 主要分布在浙江与安徽交界的天目山系周围(29°~31°N, 118°~120°E), 包括浙江临安、淳安、安吉、建德和安徽宁国、歙县、旌德、绩溪等县市^[2]。随着人们生活水平的提高, 山核桃受到广大消费者的青睐, 产品供不应求, 栽植面积也在不断扩大, 已成为产区推动经济发展的支柱产业。山核桃适宜生长的土壤酸碱度为微酸性及以上^[2]。然而, 随着山核桃经济价值的提高, 广大农户为了获得高产, 过度施用化学肥料, 缺乏对有机肥的使用, 造成土壤养分不平衡, 土壤酸化日渐严重。近年来土壤酸化引起的林地退化加剧已经成为影响山核桃生长、产量和品质的一个主要因子^[3]。传统改良土壤酸度的方法是施加石灰、白云石粉等无机矿物, 但是长期使用这类无机矿物会引起表层土壤板结和养分失衡, 不利于山核桃树的生长。一些植物物料在某种程度上能够中和土壤的酸度。植物物料导致土壤 pH 值变化的方向和大小取决于植物物料中灰化碱和氮的质量分数, 土壤的初始 pH 值以及植物物料分解的速度和程度也对中和效果有影响^[4]。同时, 加入植物物料还可以通过有机物对铝的络合作用降低酸性土壤中铝的毒害^[5]。相关研究表明^[6-7], 有机肥能明显降低酸性土壤酸性, 降低土壤交换性酸和活性铝的量, 提高阳离子交换量和土壤交换性盐基, 增加土壤肥力, 被认为是廉价、无污染、温和的改良剂。袁金华等^[8]研究表明, 生物炭在土壤中存留的时间较长, 可以使红壤和黄棕壤土壤 pH 值升高, 土壤交换性酸和交换性铝下降, 土壤中盐基和盐基饱和度上升, 有毒形态铝显著下降等。利用有机物料改良酸性土壤已有研究, 但以往多在农业土壤上进行, 对山核桃林地酸性土壤的研究未见报道。本研究采用沼渣和市场上出售的有机肥、生物炭(竹炭)为材料, 通过施用不同种类及用量的有机物料, 探究它们影响土壤基本化学性质的原因与机制和对山核桃退化土壤的改良作用, 为山核桃生产以及科学经营提供切实可行的方法和理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自浙江省临安市龙岗镇林坑村因严重衰败而变成荒地的山核桃林地土壤。采样深度为 0~20 cm。新鲜土壤样品经自然风干, 过 2.00 mm 筛, 供土壤 pH 值和土壤有效氮磷钾养分测定; 过 0.15 mm 筛, 供土壤有机质的分析测定。试验所用有机物料分别为沼渣、肥得力、黄腐酸钾和竹炭, 其中肥得力、黄腐酸钾和竹炭均为市购产品, 且肥得力为生物有机肥。试验所用土壤和有机物料基本性质见表 1 和表 2。

1.2 试验设计

1.2.1 室内培养试验 采用上述 4 种有机物料进行土壤培养试验。考虑到有机物料作为有机肥施用的推荐用量和土壤改良的用量(用量大)以及实验室条件等因素, 确定有机物料的添加量分别为 0, 1.00, 10.00 g·kg⁻¹, 相当于田间用量分别为 0, 1.27, 12.70 t·hm⁻²^[7]。共 9 个处理: 对照, 在培养土壤中不添加任何有机物料; 10.00 g·kg⁻¹ 沼渣(T₁); 1.00 g·kg⁻¹ 沼渣(T₂); 10.00 g·kg⁻¹ 肥得力(T₃); 1.00

表 1 供试土壤的基本性质
Table 1 Basic properties of tested soils

采样深度/cm	pH 值	有机质/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	交换性氢/ (cmol·kg ⁻¹)	交换性铝/ (cmol·kg ⁻¹)
0~20	4.45	22.15	147.00	4.80	34.00	0.28	4.25

表2 供试有机物料的基本性质

Table 2 Basic properties of used organic materials

有机物料	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	氮/(g·kg ⁻¹)	磷/(g·kg ⁻¹)	钾/(g·kg ⁻¹)
肥得力	7.65	259.49	5.41	4.49	9.20
竹炭	9.46	698.95	6.40	0.75	4.86
黄腐酸钾	6.16	352.67	10.32	4.53	13.81
沼渣	5.55	279.10	17.00	2.00	13.35

g·kg⁻¹ 肥得力(T₄); 10.00 g·kg⁻¹ 黄腐酸钾(T₅); 1.00 g·kg⁻¹ 黄腐酸钾(T₆); 10.00 g·kg⁻¹ 竹炭(T₇); 1.00 g·kg⁻¹ 竹炭(T₈)。重复 4 次·处理⁻¹。将 600.00 g 风干土壤与有机物料充分混匀后置于 1.50 L 塑料杯中, 并用去离子水将土壤含水量调节到土壤田间持水量的 70%, 塑料杯用保鲜膜封口, 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。然后将塑料杯放置于 25 ℃ 的恒温培养箱中培养, 称量 1 次·周⁻¹ 并补充水分, 以保持土壤含水量恒定^[7]。在培养开始后的第 0, 10, 20, 30, 60, 90 天取新鲜土样, 取湿土 100.00 g·次⁻¹ 后放回继续培养。土壤样品经风干、过筛后供分析测定。

1.2.2 大田试验 基于上述培养试验的结果, 根据目前市场上产品情况, 选用竹炭、肥得力和黄腐酸钾等 3 种有机物料进行了退化山核桃酸性土壤的改良试验。于龙岗镇林坑村严重退化山核桃林中布置本大田定位试验(2014 年 3 月至 2015 年 9 月), 山核桃为 40~50 年生。试验处理如下: 对照, 未使用任何肥料, 竹炭 2.00 kg·株⁻¹(T₁'), 肥得力 2.00 kg·株⁻¹(T₂'), 黄腐酸钾 2.00 kg·株⁻¹(T₃')。重复 6 次·处理⁻¹。于 2014 年 3 月, 在山核桃树冠垂直投影轮廓处(滴水线), 开沟深度约 20 cm, 将预先称好的肥料进行沟施。各株处理树的四周, 株、行间至少保留 1 列树不作任何施肥处理, 以便隔离保护。记录 2014 年和 2015 年山核桃生长、产量情况。

1.3 分析方法

采用土壤常规分析方法进行样品分析。土壤 pH 值经 V(土):V(水)=1.0:2.5 混合浸提-pH 计电位法测定; 土壤有效氮、有效磷、有效钾分别采用碱解扩散法、Olsen 法和醋酸铵浸提-火焰光度法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤交换性酸、氢离子及铝离子测定采用 1.00 mol·L⁻¹ 氯化钾淋洗, 0.02 mol·L⁻¹ 氢氧化钠滴定法。有机物料 pH 值参照土壤方法测定; 氮、磷、钾采用硫酸-过氧化氢消煮样品, 分别用蒸馏法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定^[7]。

1.4 数据分析

用 Excel 2010 进行简单数据处理; SPSS 20.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 有机物料对土壤有机质的影响

有机物料可以增加土壤有机质质量分数, 且不同有机物料导致土壤有机质质量分数升高的幅度不同, 其升高幅度随有机物料加入量的增加而增加(图 1)。在培养过程中, 对照处理土壤有机质变化很小; 添加不同有机物料后土壤有机质增加的量和随培养时间发生的变化表现出不同特点, 竹炭的变幅最小; 其他 3 种有机物料都有较大波动, 但趋势基本一致。在培养试验的 6 个阶段, 不同处理间土壤有机质的增加达到了极显著差异。初始阶段(10 d), 土壤有机质呈极显著上升趋势, 其中 10.00 g·kg⁻¹ 用量黄腐酸钾增幅达 21.20%(P<0.01)。在 90 d 时, 以沼渣处理为例, 当加入量为 10.00 g·kg⁻¹ 时, 土壤有机质由对照的 22.13 g·kg⁻¹ 上升到 44.79 g·kg⁻¹, 增加了 102.40%(P<0.01)。从图 1 中也可看出: 各有机物料处理中 10.00 g·kg⁻¹ 用量沼渣处理使土壤有机质上升最多, 1.00 g·kg⁻¹ 用量的竹炭处理最少。

2.2 有机物料对土壤碱解氮的影响

土壤碱解氮的动态变化如图 2 所示。施加有机物料的处理土壤碱解氮质量分数始终比对照处理高, 这说明有机物料能显著增加土壤中碱解氮质量分数, 且随着有机物料施加量增加而增加。从整个培养周期看, 随着培养时间的增加, 施加沼渣处理的变化幅度比较平缓, 且 10.00 g·kg⁻¹ 用量和 1.00 g·kg⁻¹ 用量之间的差距大; 其他处理的土壤碱解氮随着培养时间呈现比较明显的上升趋势。在整个培养过程中, 各有机物料处理后土壤碱解氮总体处于上升趋势, 在培养最后阶段(60~90 d), 10.00 g·kg⁻¹ 用量黄腐酸

钾的作用优于其他处理,肥得力与黄腐酸钾接近,沼渣处理提升较少,竹炭最小。施加 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 黄腐酸钾处理对土壤碱解氮的增加效果最大,在培养结束时,与对照相比增加了 104.70% ($P < 0.05$),而 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 沼渣处理影响效果最小。

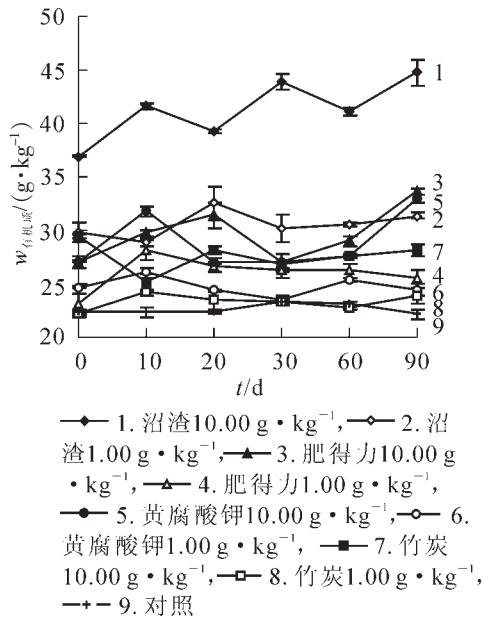


图 1 土壤有机质培养过程中的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of soil organic matter content affected by different organic materials

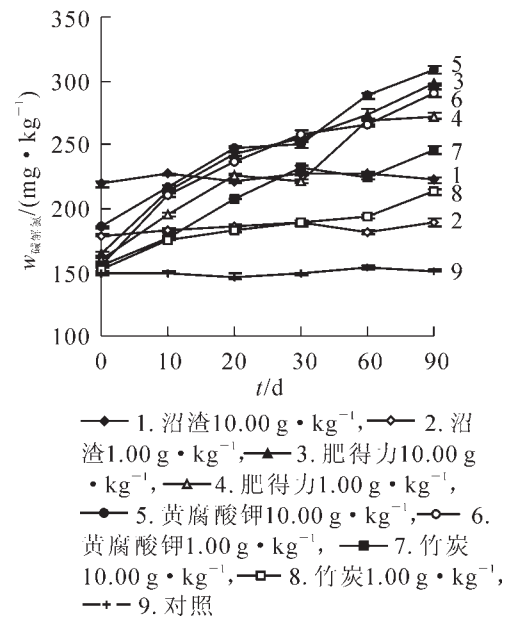


图 2 土壤中碱解氮培养过程中的动态变化

Figure 2 Dynamic changes of soil available nitrogen affected by different organic materials

2.3 有机物料对土壤有效磷的影响

添加不同有机物料后,有机物料处理的土壤有效磷质量分数始终比对照处理高,说明有机物料能显著增加土壤有效磷质量分数,且随着有机物料施加量增加而增加(图 3)。在培养过程中,初始阶段(0~10 d)土壤有效磷的变化最显著,以 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 黄腐酸钾和 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 肥得力处在最高水平,分别达到 $15.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $14.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其后有些处理上升趋势变缓。在低用量($1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下,10 d 后土壤有效磷基本维持不变。在培养的不同阶段,不同有机物料处理间效果达到极显著差异($P < 0.01$)。从整个培养周期看,黄腐酸钾对有效磷的增加效果是最好的,且 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量比 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量对土壤有效磷有着更好地增加效果。这表明,在农业生产中,要适量增加有机物料的施加量,从而达到更好的改良效果。

2.4 有机物料对土壤速效钾的影响

图 4 为加入有机物料后土壤在培养过程中速效钾的变化趋势。有机物料处理的土壤速效钾质量分数比对照处理显著提高,且也是随着有机物料施加量增加而增加。在整个培养期间,各处理土壤速效钾的变幅较小,基本稳定。但是不同有机物料种类和用量对土壤速效钾的贡献差异大,以 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 黄腐酸钾处理对速效钾的提升最为显著,且其 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量和 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量的差距在几个处理中最为明显,这可能与黄腐酸钾物料中自身钾较高有关。但是 $10.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量沼渣处理之间差距却比较小。沼渣的含钾水平与黄腐酸钾无差异,说明还受其他原因影响。山核桃林地大多土壤速效钾偏低^[3],在生产中应选择含钾量高且对土壤速效钾质量分数增加多的,从而能起到更好的作用。

2.5 有机物料对土壤 pH 值的影响

山核桃土壤加入不同有机物料进行培养后对土壤 pH 值的影响如图 5 所示。有机物料处理的土壤 pH 值始终比对照处理高,这说明有机物料可以有效地提高土壤的 pH 值。随着培养时间的变化,对照处理土壤 pH 值变化甚微;添加有机物料的土壤 pH 值经历快速上升(0~10 d),然后变缓(10~20 d),最后变化都较小,趋于稳定(20~90 d)等阶段。从图 5 中也可看到:不同有机物料导致土壤 pH 值升高的幅度不同,且随着有机物料施用量增加而升高。这表明在生产应用中,这些有机物料提前几天施用会达到

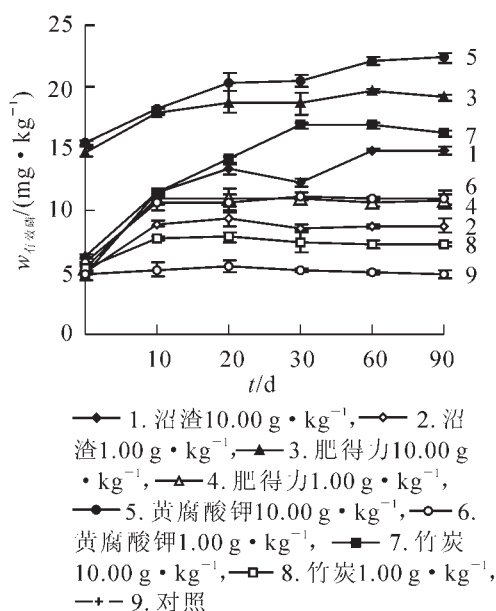


图3 添加有机物料后土壤有效磷随时间的变化趋势

Figure 3 Dynamic changes of soil available phosphorus affected by different organic materials

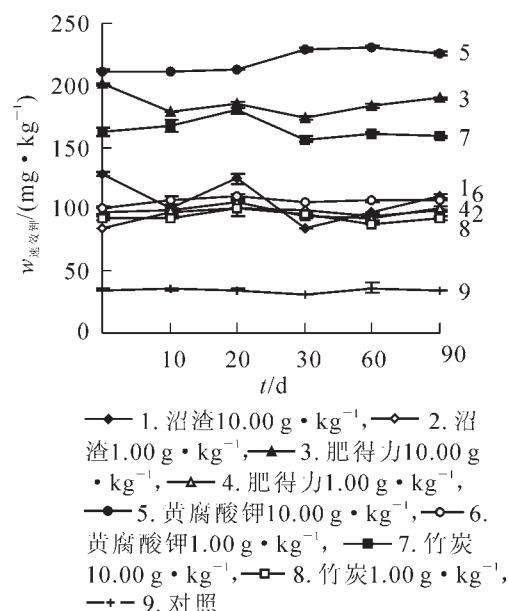


图4 土壤中速效钾的动态变化趋势

Figure 4 Dynamic changes of soil available potassium affected by different organic materials

更好的改良效果。在整个培养过程中, 10~90 d 中施加肥得力对酸性土壤的改良均比添加其他几种有机物料的效果更加明显。虽然随时间推移, 不同处理的土壤 pH 值出现一定的波动变化, 但整体比较稳定。如以培养结束时(90 d)的数据进行分析, 与对照处理相比 10.00 g·kg⁻¹ 用量的肥得力处理使土壤 pH 值上升最多, pH 值升高了 0.76 个单位, 竹炭、黄腐酸钾次之, 沼渣最少。

2.6 有机物料对土壤铝活性的影响

土壤交换性铝主要是指以静电引力被吸附于土壤固相表面的交换性铝离子, 是酸性土壤中常见的交换性阳离子, 也是土壤各类形态铝转化的重要环节, 其包含有可使植物中毒的大量高活性单体铝离子, 常用来反映土壤中是否存在铝毒。图 6 显示: 经有机物料处理的土壤交换性铝质量摩尔浓度显著下降, 各个处理始终比对照处理低, 且随着有机物料用量的增加铝活性下降程度更加显著, 这表明有机物料的添加对土壤铝的降低有重要的作用。与有机物料对土壤 pH 值的作用相似, 从图 6 中可以看到: 在初始阶段(0~10 d)土壤交换性铝下降幅度最大, 降幅高达 168.20%(10.00 g·kg⁻¹ 黄腐酸钾), 其后土壤交换性铝下速度势变缓。在整个培养过程中, 可以看到 10.00 g·kg⁻¹ 黄腐酸钾和 10.00 g·kg⁻¹ 肥得力处理对铝的降低效果最佳, 两者与 1.00 g·kg⁻¹ 用量的差距也是最大的, 在生产中一定的范围内, 有机物料对土壤交换性能的影响程度随有机物料加入量的增加而增大。以肥得力为例, 当加入量为 10.00 g·kg⁻¹ 时, 土壤的活性铝由对照的 3.89 cmol·kg⁻¹ 降低到 0.72 cmol·kg⁻¹, 下降了 81.50%。同时, 这一变化趋势与这些改良剂增加土壤 pH 值的趋势基本一致, 可见 pH 值提高可以有效地降低土壤铝活性, 进而可以减少土壤交换性酸总量, 起到良好的改善酸性土壤的作用^[47]。

2.7 有机物料对土壤交换性酸的影响

各种有机物料的添加均降低了酸化山核桃林地土壤交换性酸质量摩尔浓度(图 7), 其变化趋势与土壤活性铝下降趋势、土壤 pH 值的上升变化基本一致。各个处理始终低于对照处理, 且随着有机物料用量的增加下降程度更加显著。其中肥得力、黄腐酸钾的添加使土壤交换性酸最终降至 1.27 和 1.42 cmol·kg⁻¹, 比对照降低了 70.30%和 66.80%。从整个培养周期来看, 有机物料的添加对土壤交换性酸质量摩尔浓度的影响在培养初期最显著, 尤其是 0~10 d 阶段, 出现急剧下降的趋势, 10.00 g·kg⁻¹ 用量肥得力处理下降幅最大, 降幅高达 95.60%。此后有机物料处理降幅变缓, 到 30 d 以后只有 10.00 g·kg⁻¹ 用量肥得力处理的土壤交换性酸继续呈下降态势, 其他各有机物料处理的土壤交换性酸基本不变。

2.8 不同有机物料对山核桃林果实产量的影响

作物的产量受多种因素影响, 植物叶片作为最重要的营养器官, 担负着光合作用以及将光合产物输

Figure 7 Dynamic changes of soil exchangeable acid affected by different organic materials

3 讨论

有机物料添加后, 土壤 pH 值的变化主要是由于有机物料中碱性物质的释放以及土壤中的氮转化过程决定的^[7]。有研究表明: 植物物料对土壤酸度的改良效果受以下几方面因素的影响: ①植物物料中灰化碱的释放直接中和土壤的酸度; ②微生物分解植物物料, 有机氮矿化消耗质子, 提高了土壤的 pH 值; ③矿化产生的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的硝化作用会释放质子, 导致土壤 pH 值降低。本次培养试验施加有机物料的处理, 在短时间内土壤 pH 值有明显地上升, 到后期 pH 值趋于稳定, 这与有机物料自身 pH 值较高有一定关系。有机物料也能提高土壤有机质, 试验中添加有机物料的各个处理有机质均高于对照处理, $10.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 用量处理比 $1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 用量处理提升效果更加明显, 其中 $10.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 用量沼渣处理的效果最好, 这可能与沼渣中有机质质量分数有关。

有机物料中含有一定量的矿质养分, 可以显著提高土壤养分水平。试验结果表明: 有机物料可以不同程度地提高土壤的碱解氮、有效磷和速效钾质量分数。肥得力作为一种生物有机肥, 可以增加土壤中的微生物数量, 同时也为土壤微生物提供丰富的碳源和生长物质, 从而加速物料的分解和养分释放, 提高土壤肥力。竹炭作为一种生物炭, 可以增加土壤对氨(NH_3)和铵(NH_4^+)的吸收^[9], 减少二氧化氮的排放以及硝酸根(NO_3^-)的流失, 从而影响氮循环^[10-11]。本试验的土壤为酸性土壤, 铁、铝活性高, 易与磷形成难溶性的铁磷和铝磷, 甚至有效性更低的闭蓄态磷, 使土壤磷绝大部分转化为固定态磷^[12]。加入有机物料后, 土壤 pH 值增加, 活性铁、铝减少。添加有机物料不仅降低土壤对磷的吸附能力, 而且降低吸附磷在土壤表面的键合能力, 使吸附磷的有效性提高^[13]。此外, 有机质在分解过程中产生有机酸不仅能促进土壤中磷的活化, 而且还能减少无机磷的固定, 提高无机磷肥的效果^[14-15]。本试验供试土壤原始有效磷质量分数较低, 通过添加有机物料提高了土壤有效磷水平, 以 $10.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 用量的沼渣和肥得力效果最佳。施加不同用量的有机物料也提高了土壤速效钾水平, 这可能由于有机物料本身含有大量的钾元素, 如黄腐酸钾等。从培养曲线来看, 培养期间土壤速效钾水平基本稳定, 表明有机物料中的钾都是速效的, 与有机物料的矿化没有关系, 统计结果也显示有机质质量分数与速效钾没有相关性(表 3)。大田试验中山核桃生长及产量情况表明: 黄腐酸钾、肥得力对山核桃土壤的改良效果好于竹炭, 意味着这些土壤改良剂的改良作用不仅仅在于土壤酸和铝的中和, 还与其他土壤肥力性质的改良有关。与竹炭相比, 黄腐酸钾、肥得力主要与传统有机肥性质接近, 其中的有机质易于矿化, 而竹炭则稳定。有机肥的矿化可能更有利于改善山核桃根际土壤理化性质和微生物环境, 有待进一步研究。

通过对整个培养试验所有土壤的各个性质指标进行相关性分析(表 3)可以看出, 许多指标之间存在不同程度的相关关系。土壤有机质、氮、磷、钾相互之间, 大多达到显著或极显著正相关性; 土壤的氮、磷、钾与 pH 值之间呈极显著的正相关, 相关系数比较高, 表明有机物料在改良土壤酸性的同时, 能够给土壤提供丰富的速效养分。除了与土壤有机质没有显著相关外, 土壤交换性铝与其他几个化学指标之间都达到极显著负相关, 随着土壤氮、磷、钾、pH 值水平的提高, 土壤交换性铝质量摩尔浓度下降。交换性酸与土壤氮、磷、钾、pH 值之间达到极显著负相关, 与交换性铝则具有极显著正相关($P<0.01$)。

表 3 山核桃土壤化学性质相关性分析

Table 3 Relationships among soil chemical properties of *Carya cathayensis* forests

指标	碱解氮	有效磷	速效钾	有机质	pH 值	交换性铝	交换性酸总量
有效磷	0.743**	1					
速效钾	0.547**	0.854**	1				
有机质	0.293*	0.330*	0.231	1			
pH 值	0.683**	0.664**	0.471**	0.178	1		
交换性铝	-0.802**	-0.908**	-0.779**	-0.197	-0.758**	1	
交换性酸总量	-0.821**	-0.889**	-0.751**	-0.204	-0.773**	0.967**	1

说明: ** 表示在置信度(双侧)为 0.01 时, 相关性达到极显著水平; * 表示在置信度(双侧)为 0.05 时, 相关性达到显著水平。

加入不同有机物料后土壤交换性铝变化趋势与土壤 pH 值的变化是相关的, 土壤 pH 值升高后, 可溶性铝溶解度降低, 使得铝离子(Al^{3+})发生沉淀。从试验结果中可以看出: 有机物料对交换性铝的降低

幅度随有机物料施入量的增加而变大。铝是土壤中非常活跃的元素, 随着 pH 值的增加, 铝会发生一系列的水解、聚合、沉淀等反应, 同时铝具有较强的配位能力, 能与多种阴离子形成配位络合物, 从而提高铝的可溶性。有机物料的添加可以有效地降低土壤交换性酸与铝饱和度, 主要是中和了土壤酸度、增加土壤 pH 值, 从植物物料中释放的盐基离子增加土壤交换性盐基离子质量摩尔浓度^[16]。在达到动态平衡的自然条件下, 酸性土壤的酸度主要由交换性铝引起, 交换性氢所占比例较小^[17]。从试验结果看, 土壤中交换性铝占交换性酸的 90.00% 以上, 这主要是土壤有机质对交换性酸的贡献, 添加有机物料使有机质增加, 同时有机质与铝络合也可有效地降低交换性铝的质量摩尔浓度。有机物料的添加可以增加养分释放, 显著提高土壤养分, 提高土壤 pH 值, 改善土壤微生物的碳源利用, 增强土壤生物活性, 从而提升土壤品质。

4 结论

有机物料资源丰富, 种类繁多, 廉价易得, 比较适合山核桃林地土壤, 对山核桃土壤的肥力性质有显著影响, 可以有效地改良酸性土壤。可以概括为: ①添加有机物料可调节土壤酸度, 能明显提高土壤 pH 值, 同时也可增加土壤有机质、有效磷、速效钾和碱解氮的质量分数, 且随着施用量的增加, 效果更加显著。②有机物料的添加可以有效地降低土壤交换性铝, 可以有效缓解土壤铝对植物的毒害。③大田试验结果表明, 所用有机物料显著改善山核桃生长状况, 提高产量。

5 参考文献

- [1] 吴伟文, 麻耀强, 吴伟志. 论杭州市山核桃产业的发展与对策[J]. 浙江林业科技, 2003, **23**(3): 57 – 60.
WU Weiwen, MA Yaoqiang, WU Weizhi. About development and countermeasures for hickory nut [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2003, **23**(3): 57 – 60.
- [2] 洪游游, 唐小华, 王慧. 山核桃林土壤肥力的研究[J]. 浙江林业科技, 1997, **17**(6): 1 – 8.
HONG Youyou, TANG Xiaohua, WANG Hui. Study on soil fertility of *Carya cathayensis* forests [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 1997, **17**(6): 1 – 8.
- [3] 张春苗, 张有珍, 姚芳, 等. 临安山核桃主产区土壤 pH 值和有效养分的时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(6): 845 – 849.
ZHANG Chunmiao, ZHANG Youzhen, YAO Fang, *et al.* Temporal and spatial variation of soil pH and nutrient availability for *Carya cathayensis* orchards in Lin'an [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, **28**(6): 845 – 849.
- [4] XU Renkou, COVENTRY D R. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil [J]. *Plant Soil*, 2003, **250**(1): 113 – 119.
- [5] 姜军, 徐仁扣, 李九玉, 等. 2 种植物物料改良酸化茶园土壤的初步研究[J]. 土壤, 2007, **39**(2): 322 – 324.
JIANG Jun, XU Renkou, LI Jiuyu, *et al.* Preliminary study on amelioration of an acid soil from a tea garden by plant materials [J]. *Soils*, 2007, **39**(2): 322 – 324.
- [6] 谢少华, 宗良纲, 褚慧, 等. 不同类型生物质材料对酸化茶园土壤的改良效果[J]. 茶叶科学, 2013, **33**(3): 279 – 288.
XIE Shaohua, ZONG Lianggang, CHU Hui, *et al.* Effects of different biomass materials on the amelioration of acidic tea garden soil [J]. *J Tea Sci*, 2013, **33**(3): 279 – 288.
- [7] 王磊, 汪玉, 杨兴伦, 等. 有机物料对强酸性茶园土壤的酸度调控研究[J]. 土壤, 2013, **45**(3): 430 – 436.
WANG Lei, WANG Yu, YANG Xinglun, *et al.* Use of crop residues to ameliorate soil acidity in a tea garden soil [J]. *Soils*, 2013, **45**(3): 430 – 436.
- [8] 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.
YUAN Jinhua, XU Renkou. Effects of rice-hull based biochar regulating acidity of red soil and yellow brown soil [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2010, **26**(5): 472 – 476.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 30 – 163.
- [10] WANG Jinyang, PAN Xiaojian, LIU Yinglie, *et al.* Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production [J]. *Plant Soil*, 2012, **360**(1/2): 287 – 298.

- [11] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, **39**(2): 278 – 284.
ZHOU Zhihong, LI Xinqing, XING Ying, *et al.* Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. *Earth Environ*, 2011, **39**(2): 278 – 284.
- [12] 李际会, 吕国华, 白文波, 等. 改性生物炭的吸附作用及其对土壤硝态氮和有效磷淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2012, **33**(2): 220 – 225.
LI Jihui, LÜ Guohua, BAI Wenbo, *et al.* Effect of modified biochar on soil nitrate nitrogen and available phosphorus leaching [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2012, **33**(2): 220 – 225.
- [13] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(8): 979 – 984.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cuncang, *et al.* Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2013, **21**(8): 979 – 984.
- [14] 马良, 徐仁扣. pH 和添加有机物料对 3 种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(6): 596 – 599.
MA Liang, XU Renkou. Effects of regulation of pH and application of organic materials on adsorption and desorption of phosphorus in three types of acid soils [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2010, **26**(6): 596 – 599.
- [15] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. 土壤学报, 1991, **28**(1): 7 – 13.
ZHAO Xiaoqi, LU Rukun. Effect of organic manures on soil phosphorus adsorption [J]. *Acta Pedol Sin*, 1991, **28**(1): 7 – 13.
- [16] HOLFORD I C R, MATTINGLY G E G. The high-and low-energy phosphate adsorbing surfaces in calcareous soils [J]. *Europ J Soil Sci*, 1975, **26**(4): 407 – 417.
- [17] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. 土壤, 2009, **41**(6): 932 – 939.
LI Jiuyu, WANG Ning, XU Renkou. Amelioration of industrial by-products on soil acidity in red soil [J]. *Soils*, 2009, **41**(6): 932 – 939.