

蔡泽江, 徐明岗, 张 璐, 等. 红壤幼龄桔园套种豆科牧草后土壤酸度变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 308–313.

CAI Ze-jiang, XU Ming-gang, ZHANG Lu, et al. Change of red soil acidity from legume cultivation in a young citrus orchard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 308–313.

红壤幼龄桔园套种豆科牧草后土壤酸度变化特征

蔡泽江^{1,2}, 徐明岗^{1*}, 张 璐^{1,2}, 王伯仁^{1,2}, 文石林^{1,2}, 申华平^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站, 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182)

摘 要: 基于 2010—2011 年开展的幼龄桔园套种豆科牧草对土壤酸度影响试验, 以当地常规管理模式为对照, 分析了种植圆叶决明和罗顿豆对土壤 pH、交换性酸、铝的影响, 及其与土壤养分含量的关系, 并结合室内培养试验分析豆科牧草影响红壤酸度的主要因素。结果表明, 与试验之初相比, 套种圆叶决明处理 0~20 cm 土壤 pH 升高了 0.19 个单位, 而罗顿豆处理土壤 pH 无显著变化。与常规模式相比, 套种圆叶决明处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤 pH 分别升高了 0.26 个和 0.39 个单位, 而 0~20 cm 土壤交换性酸、铝含量分别降低了 $1.25 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.35 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 土壤交换性酸、铝均降低了 $1.07 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤交换性铝含量与土壤全氮呈显著负相关 ($P < 0.05$), 而土壤全氮与土壤有机质和有效磷均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。室内培养试验表明, 豆科牧草的灰化碱含量和还田量是影响其改良红壤酸度的两个主要因素。可见, 在酸性红壤上套种圆叶决明和罗顿豆未加剧表层 (0~40 cm) 土壤酸化, 相反套种圆叶决明对红壤酸度具有一定的缓解效果。

关键词: 红壤酸化; pH; 交换性酸; 圆叶决明; 罗顿豆

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)02-0308-06 **doi:** 10.11654/jaes.2016-0829

Change of red soil acidity from legume cultivation in a young citrus orchard

CAI Ze-jiang^{1,2}, XU Ming-gang^{1*}, ZHANG Lu^{1,2}, WANG Bo-ren^{1,2}, WEN Shi-lin^{1,2}, SHEN Hua-ping^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. Hengyang Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang Agro-ecosystem of National Field Experimental Station, Qiyang 426182, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of two common legumes (*Chamaecrista rotundifolia* and *Lotononis bainesii*) on the acidification of red soil compared with conventional management. A field experiment (2010—2011) and an incubation experiment were conducted and changes in soil pH, exchangeable acidity, and exchangeable aluminum, as well as their relationships with soil nutrient concentrations were determined. After two-year planting, *Chamaecrista rotundifolia* significantly increased soil pH by 0.19 units at the 0~20 cm depth compared with initial soil pH, but no significant change for *Lotononis bainesii* treatment. As compared with the control, soil pH increased by 0.26 and 0.39 units for 0~20 cm and 20~40 cm depths, respectively, in *Chamaecrista rotundifolia* treatment; *Chamaecrista rotundifolia* significantly decreased soil exchangeable acidity and exchangeable aluminum at the 0~20 cm depth by $1.25 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.35 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and at the 20~40 cm depth by $1.07 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ for both parameters. Soil exchangeable aluminum was negatively correlated with soil total nitrogen, while soil total nitrogen was positively correlated with soil organic matter and available phosphorus. Incubation experiment showed that ash alkalinity content and application rates determined the effects of legumes on soil acidity. Results indicated that the cultivation of legumes in orchard did not accelerate acidification of soil at the 0~40 cm depth, and some legume species such as *Chamaecrista rotundifolia* could ameliorate the acidification of the red soil.

Keywords: red soil acidification; pH; exchangeable acidity; *Chamaecrista rotundifolia*; *Lotononis bainesii*

收稿日期: 2016-06-20

作者简介: 蔡泽江 (1982—), 男, 河北迁西人, 硕士, 助理研究员, 主要从事红壤酸化防治与改良研究。E-mail: caizejiang@caas.cn

* 通信作者: 徐明岗 E-mail: mgxu@caas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41301309); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (IARRP-2015-4); 国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB441001)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (41301309); National Nonprofit Institute Research Grant of CAAS (IARRP-2015-4); The National Basic Research Program (2014CB441001)

近年来,红壤酸化较为严重,与第二次土壤普查(pH大多在6.0~6.5)相比,土壤pH大约下降了0.2~0.5个单位^[1-2]。土壤pH降低导致Al、Mn等植物毒害元素活性增加,Ca、Mg等营养元素缺乏,从而使植物生长受到限制,严重影响甚至制约了农林业的持续发展^[3-4]。豆科牧草具有种类多、用途广、生长快、产量高、利用年限长等优点,种植豆科牧草已经成为开发利用红壤丘陵荒地,防治水土流失,恢复土壤肥力,改善生态环境条件,促进农、牧业生产的有效途径^[5]。其中,圆叶决明(*Chamaecrista rotundifolia*)和罗顿豆(*Lotononis bainesii*)耐酸性强,是湘南丘陵区酸性红壤上的主要引种类型^[6]。

前人研究表明豆科牧草对土壤酸化具有促进作用^[7-10]。如澳大利亚和新西兰长期种植豆科牧草导致大面积土壤酸化,其主要原因是豆科牧草从土壤中吸收大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 等无机阳离子并释放质子,从而酸化土壤^[9-10]。徐仁扣等^[8]通过14年长期定位试验研究表明,相比小麦-小麦,小麦-羽扇豆轮作显著加速了土壤酸化,土壤pH降低了0.94~1.62个单位。但前人的研究多集中在澳大利亚干旱半干旱地区(年降雨量500 mm或以下),且初始土壤pH较高(pH 6.8)^[11]。而种植豆科牧草是否加剧我国亚热带湿润地区(年降雨量>1200 mm)酸性红壤(pH<5)的酸化过程还鲜为人知,明确其对红壤酸化的影响,对当地农林业的可持续发展具有极其重要的作用。因此,本研究基于2010—2011年开展的幼龄桔园套种不同作物对土壤酸度影响试验,研究了2种豆科牧草(圆叶决明和罗顿豆)对土壤pH、交换性酸、铝的影响,及其与土壤养分含量的关系,并通过室内培养试验揭示豆科牧草影响红壤酸度的主要因素,旨在为红壤酸化防治提供指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于湖南省祁阳县,中国农业科学院衡阳红壤实验站内(111°52'32"E, 26°45'12"N),海拔高度约为150 m,年平均温度18.0℃,最高温度36.6~40.0℃,大于或等于10.0℃的积温5600℃,年均降雨量1250 mm,年蒸发量1470 mm,无霜期约为300 d,年日照时数1610~1620 h。柑桔园于2007年开垦,12月移栽桔苗,为等高梯田种植,面积2 hm²,属典型红壤丘陵坡地。桔园施肥、病虫害防治等管理措施均按当地习惯进行。试验地处丘岗中部,成土母质为第四纪

红壤(属于硅铁质红壤),土壤中粘土矿物以高岭石为主。试验开始时0~20 cm土壤基本性质为:pH值4.77,有机质12.9 g·kg⁻¹,全氮0.87 g·kg⁻¹,全磷0.45 g·kg⁻¹,碱解氮92.4 mg·kg⁻¹,速效磷5.1 mg·kg⁻¹,速效钾156 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验开始于2010年4月,2011年11月完成。研究共设3个处理:常规管理模式、套种圆叶决明、套种罗顿豆,其中以当地常规管理模式清耕种植和自然生草为对照,试验地采用随机区组设计。选择长势均匀的3棵柑桔树为1个小区,小区面积为40.5 m²,其中常规模式6次重复(清耕种植和自然生草各3次重复),豆科牧草处理均3次重复。各处理桔树施肥量相同,其中尿素(含N 46%)为0.23 kg N·棵⁻¹、过磷酸钙(含P₂O₅ 12.5%)为0.13 kg P₂O₅·棵⁻¹、氯化钾(含K₂O 60%)为0.12 kg K₂O·棵⁻¹。圆叶决明和罗顿豆于2010年4月16日播种(或移栽),施肥量分别为N 30 kg·hm⁻²、P₂O₅和K₂O各75 kg·hm⁻²,2011年不施肥。圆叶决明和罗顿豆于每年10月底刈割,测其鲜重、干重,并还田。土壤样品于豆科牧草刈割后采集,每个小区按“之”字型用土钻取0~20 cm和20~40 cm具有代表性的样点5个,混合均匀,自然风干后,磨细过1 mm筛备用。

1.3 培养试验

用于培养试验的土壤、圆叶决明和罗顿豆均采自试验桔园。土壤自然风干,圆叶决明和罗顿豆65℃烘干,磨碎、过2 mm筛备用。称取风干土414 g(相当于400 g烘干土)于1 L塑料瓶中,分别称取豆科牧草(圆叶决明或罗顿豆)2、4、8 g与土壤充分混匀,最终豆科牧草添加量分别为0.5%、1%和2%,以不添加豆科牧草处理为对照,每个处理3次重复。用去离子水将土壤含水量调节至田间持水量的80%。瓶口盖上parafilm封口膜,并在封口膜上均匀扎5个小孔,以便气体交换并减少水分损失。将瓶子置于(25±1)℃恒温培养。通过重量法补充土壤损失的水分。各处理在培养的第28 d测定土壤pH,交换性酸、铝和交换性盐基离子含量。

1.4 样品分析

土壤pH测定方法为电位法,水土比为5:1。土壤交换性酸、铝采用1.0 mol·L⁻¹氯化钾溶液淋溶提取,0.02 mol·L⁻¹氢氧化钠中和滴定法测定。土壤交换性盐基离子用1 mol·L⁻¹中性(pH 7)乙酸铵浸提,钾、钠采用火焰光度法测定,钙、镁采用原子吸收分光光度

法测定。土壤有机质通过重铬酸钾容量法-外加加热法测定;土壤全氮测定方法为半微量凯氏定氮法。土壤碱解氮、有效磷和有效钾测定分别采用碱解扩散法、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提铝锑抗比色法和 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 中性乙酸铵浸提火焰光度法。具体测定步骤参考土壤农化分析(第三版)^[12]。

1.5 数据处理

图和数据采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行。采用 Tukey 多重比较分析不同处理间的差异。

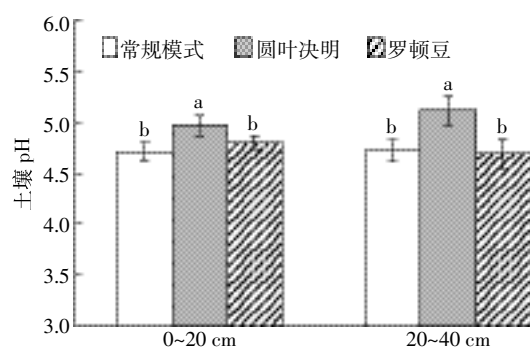
2 结果与分析

2.1 土壤 pH

幼龄桔园套种圆叶决明和罗顿豆对土壤 pH 的影响如图 1 所示。与试验之初相比,常规模式和罗顿豆处理 0~20 cm 土层土壤 pH 没有显著变化,且二者间无显著差异,而套种圆叶决明处理 0~20 cm 土层土壤 pH 平均升高了 0.19 个单位,且显著高于常规模式处理。与常规模式相比,套种圆叶决明处理 20~40 cm 土层土壤 pH 升高了 0.39 个单位,而套种罗顿豆处理土壤 pH 无显著变化。

2.2 土壤交换性酸、铝

土壤交换性酸、铝的变化趋势与土壤 pH 相反(图 2)。常规模式处理土壤交换性酸、铝含量最高,套种圆叶决明和罗顿豆具有降低土壤交换性酸、铝的趋势。与常规模式相比,套种圆叶决明 0~20 cm 土层土壤交换性酸、铝分别降低了 $1.25 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.35 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$,而交换性氢增加了 $0.10 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$;套种罗顿豆处理 0~20 cm 土层土壤交换性酸、铝和氢分别比常规模式处理降低了 0.51 、 $0.45 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different treatments. The same below

图1 幼龄桔园套种豆科牧草后的土壤 pH

Figure 1 Change in red soil pH from legume cultivation in a young citrus orchard

和 $0.06 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2a)。与常规模式相比,套种圆叶决明 20~40 cm 土层土壤交换性酸、铝均降低了 $1.07 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$,而交换性氢无变化;套种罗顿豆处理 20~40 cm 土层土壤交换性酸、铝分别比常规模式处理降低了 $0.81 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.77 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2b)。

2.3 土壤养分

由表 1 可知,与常规模式相比,套种圆叶决明在短期内均显著增加了 0~20 cm 土层有机质、碱解氮和有效磷含量;罗顿豆处理 0~20 cm 土层有机质和有效钾含量显著高于常规模式处理。与常规模式相比,套种豆科牧草对 20~40 cm 土层养分含量的影响不显著。

2.4 土壤酸度与土壤养分的相关性

将 3 个处理 12 个小区 2 个土壤层次的土壤酸度与土壤养分含量做相关分析表明(表 2),土壤交换性酸、铝与土壤 pH 均呈极显著负相关,相关系数(r)均为 -0.57 。土壤交换性酸、铝与土壤全氮含量均呈显著负相关(r 分别为 -0.42 和 -0.45)。土壤交换性氢与土壤碱解氮含量呈显著正相关, r 为 0.42 。土壤有机质含量与土壤全氮、碱解氮和有效钾含量分别呈极显著、极显著和显著正相关(r 分别为 0.54 、 0.63 和 0.41)。

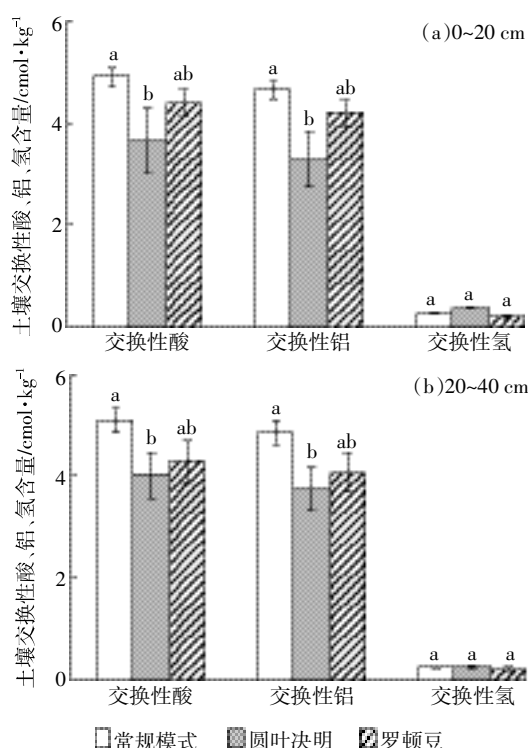


图2 幼龄桔园套种豆科牧草后的土壤交换性酸、铝、氢含量

Figure 2 Changes in soil exchangeable acidity, aluminum and hydrogen from legume cultivation in a young citrus orchard

表 1 幼龄桔园套种豆科牧草后土壤养分含量变化

Table 1 Changes in soil nutrient concentrations from legume cultivation in a young citrus orchard

处理 Treatments	土壤有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹		全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹		碱解氮 Available nitrogen/mg·kg ⁻¹		有效磷 Available phosphorus/mg·kg ⁻¹		有效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
常规模式 Conventional management	13.1±0.9b	12.7±2.5a	1.0±0.1a	0.9±0.2a	57.4±4.2b	55.3±6.7a	1.9±1.5b	4.8±3.3a	159.5±38.1b	122.7±27.1ab
圆叶决明 <i>Chamaecrista rotundifolia</i>	15.7±1.2a	12.2±1.2a	1.1±0.2a	0.9±0.1a	74.1±6.2a	57.7±2.7a	5.0±1.4a	1.4±1.2a	111.0±32.2b	71.5±26.1b
罗顿豆 <i>Lotononis bainesii</i>	15.4±1.2a	12.3±0.6a	1.1±0.1a	1.0±0.2a	65.4±4.7ab	51.8±0.8a	2.2±0.7b	4.2±0.7a	225.5±67.5a	176.0±24.5a

注: 同列不同小写字母表示处理间的差异在 $P<0.05$ 水平显著; ±值表示标准误差。下同。

Note: Different letters indicate significant ($P<0.05$) difference between the treatments in the same column; Values in the table are presented as means±standard deviation. The same below.

表 2 土壤酸度与土壤养分含量的相关系数($r, n=24$)Table 2 The correlation between soil acidity and soil nutrients($r, n=24$)

	交换性酸 Exchangeable acidity/ cmol(+)·kg ⁻¹	交换性铝 Exchangeable aluminum/ cmol(+)·kg ⁻¹	交换性氢 Exchangeable hydrogen/ cmol(+)·kg ⁻¹	土壤有机质 Soil organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Available nitrogen/ mg·kg ⁻¹	有效磷 Available phosphorus/ mg·kg ⁻¹	有效钾 Available potassium/ mg·kg ⁻¹
pH	-0.57**	-0.57**	0	0.24	0.22	0.20	-0.14	-0.26
交换性酸 Exchangeable acidity		0.99**	0.10	-0.17	-0.42*	-0.35	0	0
交换性铝 Exchangeable aluminum			0	-0.20	-0.45*	-0.37	0	0
交换性氢 Exchangeable hydrogen				0.32	0.22	0.42*	0.30	-0.39
土壤有机质 Soil organic matter					0.54**	0.63**	0.22	0.41*
全氮 Total nitrogen						0.33	0.62**	0.35
碱解氮 Available nitrogen							0.14	0
有效磷 Available phosphorus								0.10

注: “*”表示显著相关($P<0.05$), “**”表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: “*” Significant at the 0.05 probability level; “**” significant at the 0.01 probability level.

土壤全氮与土壤有效磷含量呈极显著正相关, r 为 0.62。

3 讨论

3.1 豆科牧草对土壤酸度的影响

本研究表明幼龄桔园套种圆叶决明能显著提高 0~40 cm 土壤 pH, 降低土壤交换性酸、铝含量。这与前人的研究结果相反, Loss 等^[13]和 Dolling^[14]均研究发现, 在澳大利亚半干旱地区长期种植豆科牧草加剧了土壤酸化, 且土壤酸化程度与豆科牧草的种植年限和土壤起始 pH 有关。豆科牧草酸化土壤的机理: 一是豆科牧草为了满足自身生长的需要从土壤中吸收营养离子, 且吸收的阳离子多于阴离子(称为过量阳离子, 即吸收的阳离子量减去吸收的阴离子量), 为了维持电荷平衡, 根系向土壤中分泌质子, 酸化土壤^[11], 由

此可见, 豆科牧草对土壤酸化的影响与其根系的吸收面积有关, Loss 等^[13]研究表明种植豆科牧草后土壤酸化主要发生在 20 cm 以下土层, 而表层土壤未发生酸化; 二是豆科牧草固定的氮经微生物的矿化分解生成铵态氮, 生成的铵态氮在硝化微生物的作用下氧化成硝态氮, 同时释放出质子, 酸化土壤^[15]。若豆科牧草归还土壤, 其体内积累的碱随着有机残体的矿化分解而释放出来, 从而中和土壤酸度, 同时伴随盐基阳离子的释放。Tang 等^[16]的研究表明, 由于豆科牧草的吸收作用, 下层土壤发生酸化, 而将豆科牧草还田可有效降低表层土壤酸度。

豆科牧草还田后, 首先发生土壤与豆科牧草残体间的质子转移, 此过程是不受生物活性控制的化学过程; 当土壤 pH 低于豆科牧草残体有机官能团的 pKa 值时, 就会形成质子从低 pH 值的土壤到豆科牧草残

体间的缓冲体系,土壤 pH 升高,反之添加豆科牧草残体会降低土壤 pH^[17]。本研究表明,圆叶决明和罗顿豆的 pH 值分别为 4.90 和 5.04, 高于土壤起始 pH 4.77, 因此形成从土壤到豆科牧草残体间的质子移动,土壤 pH 升高(表 3)。豆科牧草改良土壤酸度的能力主要取决于其碱含量,在数量上等于有机阴离子量或过量阳离子量,也可通过灰化碱滴定法测定^[18]。有机阴离子的去羧基作用是植物体内碱释放的主要过程,一方面去羧基作用消耗了土壤中的 H⁺(其中 1 mol 羧基消耗 1 mol H⁺),中和土壤酸度,另一方面释放了与有机阴离子结合的盐基阳离子,增加了土壤盐基阳离子含量^[16]。本研究所选的圆叶决明和罗顿豆的灰化碱含量分别为 44.8 cmol(+) $\cdot$ kg⁻¹ 和 65.9 cmol(+) $\cdot$ kg⁻¹,其还田后碱的释放可中和土壤酸度(表 3)。室内培养试验也证明,添加豆科牧草后土壤交换性钙、镁、钾、钠含量均显著升高,且变幅随豆科牧草添加量的增加而增大,可见,豆科牧草本身碱含量是其改良土壤酸度的主要因素之一(表 4)。另外,本研究所选土壤为强酸性红壤,起始 pH 为 4.77,而硝化微生物的最适 pH 为 8.5,过酸会降低硝化微生物的活性和硝化速率,从而减少由硝化作用释放的质子数量,而减弱氮对土壤的酸化作用^[15,19]。总之,随着土壤 pH 的升高,豆科牧草对红壤酸度的影响取决于土壤与豆科牧草残体间的质子移动,有机阴离子的去羧基作用,以

及有机氮的氨化和硝化过程等综合作用^[16-18]。

3.2 豆科牧草添加量及其化学性质对土壤酸度的影响

本研究表明,幼龄桔园套种罗顿豆具有降低土壤交换性酸、铝的趋势,但对土壤 pH 值的影响不显著,其改良土壤酸度的效果差于圆叶决明处理,这可能与罗顿豆的还田量(3208 kg $\cdot$ hm⁻²)较少有关。室内培养试验也证明,添加豆科牧草改良红壤酸度的效果随豆科牧草添加量的增加而增大,可见豆科牧草添加量(或还田量)是影响豆科牧草改良红壤酸度的又一主要因素(表 4)。另外,罗顿豆含氮量较高,还田后在微生物的作用下矿化分解,生成的硝态氮在一定程度上减弱其对红壤酸度的改良效果,而关于添加豆科牧草对红壤氮转化过程的影响,及其与土壤酸度变化的关系还有待进一步研究。

相关分析表明,土壤 pH 与交换性酸、铝均呈极显著负相关,而与交换性氢不相关。可见,套种豆科牧草提高土壤 pH,降低交换性铝含量是降低土壤交换性酸的主要原因之一。Cai 等^[3]通过长期定位试验研究表明,当土壤 pH<5.6 时,土壤交换性铝是交换性酸的主要形式。另外,尽管土壤交换性铝与土壤有机质相关性不显著,但套种豆科牧草,尤其是圆叶决明处理,每年干重约 5366 kg $\cdot$ hm⁻² 的有机物料还田,相对较高的土壤有机质含量(15.7 g $\cdot$ kg⁻¹),其对铝具有的络合作用,也可能在一定程度上降低了土壤交换性铝含

表 3 供试豆科牧草化学性质

Table 3 Chemical property of the two legumes

有机物料 Organic materials	pH	灰化碱 Ash alkalinity/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	全钙 Total calcium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	全镁 Total magnesium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	全钾 Total potassium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	全钠 Total sodium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/%	全氮 Total nitrogen/%
圆叶决明 <i>Chamaecrista rotundifolia</i>	4.90 $\pm$ 0.02	44.8 $\pm$ 0.2	16.0 $\pm$ 0.5	11.5 $\pm$ 0.6	21.5 $\pm$ 2.9	0.5 $\pm$ 0.0	0.14 $\pm$ 0.00	1.92 $\pm$ 0.05
罗顿豆 <i>Lotononis bainesii</i>	5.04 $\pm$ 0.01	65.9 $\pm$ 1.8	20.8 $\pm$ 1.3	14.5 $\pm$ 0.7	40.7 $\pm$ 2.0	1.0 $\pm$ 0.0	0.16 $\pm$ 0.00	2.54 $\pm$ 0.07

表 4 添加豆科牧草培养后土壤性质变化

Table 4 Changes in soil chemical properties after legume residues amendment

处理 Treatments	添加量(m/m) Application rates/%	pH	交换性酸 Exchangeable acidity/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	交换性铝 Exchangeable aluminum/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	交换性氢 Exchangeable hydrogen/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	交换性钙 Exchangeable calcium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	交换性镁 Exchangeable magnesium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	交换性钾 Exchangeable potassium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹	交换性钠 Exchangeable sodium/ cmol(+) $\cdot$ kg ⁻¹
CK	0.0	4.52 $\pm$ 0.04d	5.71 $\pm$ 0.27a	5.32 $\pm$ 0.30a	0.39 $\pm$ 0.10a	0.83 $\pm$ 0.04cd	0.15 $\pm$ 0.02d	0.44 $\pm$ 0.07d	0.00 $\pm$ 0.00c
圆叶决明 <i>Chamaecrista rotundifolia</i>	0.5	4.69 $\pm$ 0.05ab	5.44 $\pm$ 0.16ab	5.13 $\pm$ 0.20ab	0.32 $\pm$ 0.09a	0.86 $\pm$ 0.01cd	0.15 $\pm$ 0.04d	0.70 $\pm$ 0.03c	0.07 $\pm$ 0.03a
	1.0	4.71 $\pm$ 0.03ab	5.09 $\pm$ 0.07bc	4.86 $\pm$ 0.14b	0.23 $\pm$ 0.10a	1.03 $\pm$ 0.08bc	0.24 $\pm$ 0.04bc	0.81 $\pm$ 0.02c	0.08 $\pm$ 0.00a
	2.0	4.75 $\pm$ 0.01a	4.42 $\pm$ 0.39de	4.14 $\pm$ 0.35cd	0.29 $\pm$ 0.10a	1.10 $\pm$ 0.11ab	0.30 $\pm$ 0.03ab	1.04 $\pm$ 0.07b	0.08 $\pm$ 0.00a
罗顿豆 <i>Lotononis bainesii</i>	0.5	4.60 $\pm$ 0.02c	5.26 $\pm$ 0.14b	4.90 $\pm$ 0.23ab	0.36 $\pm$ 0.12a	0.80 $\pm$ 0.07d	0.20 $\pm$ 0.02cd	0.72 $\pm$ 0.02c	0.05 $\pm$ 0.00b
	1.0	4.61 $\pm$ 0.02c	4.71 $\pm$ 0.27cd	4.37 $\pm$ 0.25c	0.34 $\pm$ 0.05a	0.89 $\pm$ 0.07bcd	0.24 $\pm$ 0.03bc	0.95 $\pm$ 0.02b	0.05 $\pm$ 0.00b
	2.0	4.66 $\pm$ 0.02bc	4.09 $\pm$ 0.14e	3.79 $\pm$ 0.21d	0.30 $\pm$ 0.09a	1.27 $\pm$ 0.05a	0.35 $\pm$ 0.02a	1.33 $\pm$ 0.02a	0.08 $\pm$ 0.00a

量^[20]。本研究表明,土壤交换性铝与土壤全氮呈显著负相关,而土壤有机质与土壤全氮和碱解氮含量均呈极显著正相关,也间接证明提高土壤有机质含量对增加土壤全氮含量、降低土壤交换性铝含量具有重要意义。

4 结论

(1)酸性红壤上套种圆叶决明和罗顿豆未加剧表层(0~40 cm)土壤酸化,相反圆叶决明处理显著提高表层土壤 pH,降低交换性酸、铝含量,对红壤酸度具有一定的缓解效果。

(2)豆科牧草对红壤酸度的影响与豆科牧草灰化碱含量、还田量,以及土壤起始 pH 有关,豆科牧草的氮含量高可减弱其对红壤酸度的改良效果;提高土壤 pH、有机质和全氮含量是土壤交换性铝降低的主要因素之一。

(3)本研究只基于 2 年的田间观测和短期室内培养试验,而关于 2 种豆科牧草对红壤酸度的长期效应以及对红壤剖面酸度的影响还有待于进一步监测;另外,豆科牧草对红壤氮转化过程的影响,及其与红壤酸度变化的关系也有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 111-113.
ZENG Xi-bai. Acidification of red soils and control methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(3): 111-113.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260-270.
- [4] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78.
CAI Ze-jiang, SUN Nan, WANG Bo-ren, et al. Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 71-78.
- [5] 文石林, 董春华. 湘南红壤丘陵区牧草栽培潜力及发展模式建议[J]. 热带农业科学, 2011, 31(1): 24-27.
WEN Shi-lin, DONG Chun-hua. Potential of forage grass cultivation in hilly red soil region of southern Hunan and proposals of development mode[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2011, 31(1): 24-27.
- [6] 文石林. 红壤丘陵区耐酸牧草筛选与铝毒控制技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012: 31-45.
- [7] Shen J, Tang C, Rengel Z. Root-induced acidification and excess cation uptake by *N₂-fixing Lupinus albus* grown in phosphorus-deficient soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1): 69-77.
- [8] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 2(5): 385-388.
XU Ren-kou, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 2(5): 385-388.
- [9] Tang C, Unkovich M J, Bowden J W. Factors affecting soil acidification under legumes. III. Acid production by *N₂-fixing legumes* as influenced by nitrate supply[J]. *New Phytologist*, 1999, 143(3): 513-521.
- [10] Bolan N S, Hedley M J, White R E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures[J]. *Plant and Soil*, 1991, 134(1): 53-63.
- [11] Coventry D R, Farhoodi A, Xu R K. Managing soil acidification through crop rotations in southern Australia[C]//Rengel Z ed. *Handbook of Soil Acidity*. Marcel Dekker, Inc.: New York, 2003.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agrochemistry[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] Loss S P, Ritchie G S P, Robson A D. Effect of lupins and pasture on soil acidification and fertility in Western Australia[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1993, 33(4): 457-464.
- [14] Dolling P J. Effect of lupins and location on soil acidification rates[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1995, 35(6): 753-763.
- [15] De Vries W, Breeuwsma A. The relation between soil acidification and element cycling[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1987, 35(3): 293-310.
- [16] Tang C, Sparling G P, McLay C D A, et al. Effect of short-term legume residue decomposition on soil acidity[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1999, 37, 561-573.
- [17] Xu R K, Coventry D R. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(1): 113-119.
- [18] Butterly C R, Kaudala B J, Baldock J A, et al. Contribution of soluble and insoluble fractions of agricultural residues to short-term pH changes[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(5): 718-727.
- [19] 王欲鹏, 陈坚, 华兆哲, 等. 硝化菌群在不同条件下的增殖速率和硝化活性[J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(1): 64-68.
WANG Xin-peng, CHEN Jian, HUA Zhao-zhe, et al. The optimum growth and nitrification conditions of nitrifying bacteria[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1999, 5(1): 64-68.
- [20] Haynes R J, Mokolobate M S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59(1): 47-63.