

长期施用猪粪对红壤酸度的改良效应^①

龙光强^{1,3}, 蒋瑀霁^{1,2}, 孙波^{1,2*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 国家红壤改良工程技术研究中心, 中国科学院红壤生态站, 江西鹰潭 335211; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤酸化严重限制了我国南方红壤区土壤的农业利用。本研究应用江西鹰潭红壤生态实验站长期猪粪养分淋失试验, 分析了不同施肥处理 (对照处理: $N\ 0\ kg/hm^2$; 低量有机肥: $N\ 150\ kg/hm^2$; 高量有机肥: $N\ 600\ kg/hm^2$; 高量有机肥+石灰处理: 有机肥 $N\ 600\ kg/hm^2$ + 石灰 $3\ 000\ kg/(hm^2\cdot 3a)$) 长期施用对红壤酸度的改良效应。研究结果表明, 9 年高量有机肥施用中土壤 pH 值平均每年上升 0.085 个单位, 而低量有机肥施用对土壤 pH 没有显著影响。有机肥长期施用增加了土壤盐基离子浓度, 其中 Ca、Mg 增加幅度较大, 使得长期施肥后土壤盐基以 Ca 为主, 其次是 Mg, 而 K、Na 比例较低。长期有机肥施用有效降低了红壤旱地表层土壤交换性酸含量, 尤其是对交换性铝含量的降低程度较大, 且随施肥量的增加而增大, 在施肥 4 年后可基本消除铝毒。高量施肥基础上的石灰添加进一步提高了土壤 pH 值, 加快了土壤酸度改良。红壤旱地猪粪施用显著提高了玉米产量, 达到酸度改良效果的最低猪粪用量为 $Ca\ 162\ kg/hm^2$ 。在施肥初期添加一次石灰, 将土壤 pH 值迅速提高, 然后通过有机肥对 pH 的稳定作用保持和逐步提高土壤 pH, 可在最短时间、用最少投入消除土壤酸害。

关键词: 有机肥; 红壤; 酸度改良; 盐基离子; 交换性酸

中图分类号: S156.6

红壤是我国南方 14 省 (区) 的主要土壤类型, 总面积约 218 万 hm^2 , 占全国耕地面积 28%, 是我国粮食、经济作物、肉类产品的重要生产基地^[1]。红壤区光、热、水资源丰富, 自然条件优越, 土壤资源生产潜力大。然而, 土壤酸性强、养分 (P、Ca、Mg、Mo) 缺乏和毒害元素 (Al、Mn、H) 的存在, 导致红壤地力低下, 制约了红壤区资源潜力的发挥^[2]。

长期以来, 石灰施用被认为是改良土壤酸性和抑制铝生物毒害的重要措施^[3]。然而, 在南方红壤区长期大量施用石灰将引起土壤板结、复酸化作用和阳离子不平衡, 而且成本较高^[4]。已有的研究发现有机废弃物, 如木屑木灰、炉渣污泥、秸秆、畜禽粪便等对改良土壤酸度也有良好效果^[5-9]。我国畜禽粪便资源数量巨大, 1980 年以来, 全国畜禽存栏数以猪当量表示每 10 年增加约 3 亿头, 畜禽粪便产生量从 1980 年的 6.9 亿 t 增加到 2002 年的 27.5 亿 t。以江西省余江县为例, 2008 年出栏生猪近 50 万头, 每天产生粪便量达 275 万升, 年排泄物中氮含量近 500 万 kg。施用畜禽粪便可以改善土壤肥力、供给作物养分, 是一种良好

的土壤酸性改良剂。

针对南方红壤旱地的土壤酸性改良, 目前我国已经开展了大量的无机改良试验研究。孟赐福等^[10-11]就石灰的改良效果及其维持年限、对作物产量的影响做了详细的报道。关于有机肥对红壤酸性的改良, 早期研究主要集中于不同肥料种类间改良效果的比较, 证实了相比于化肥施用加剧土壤酸化, 有机肥施用具有良好的酸性改良效应^[12], 但是这些研究未能定量阐明有机肥不同用量和施用年限对土壤酸度的改良效应和改良机制。因此, 本研究针对南方丘陵区红壤旱地, 在中国科学院鹰潭红壤生态实验站设置猪粪长期施用田间试验, 包括不同有机肥施用量以及有机肥配合施用石灰的处理, 研究有机肥长期施用对红壤酸度的改良效应及其机理, 为利用常规有机肥改良红壤酸度、提高生产力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2002 年 4 月至 2010 年 12 月在江西省鹰潭

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB100506)、国家科技支撑计划项目 (2011BAD41B01) 和中国科学院知识创新领域前沿项目 (ISSASIP1109) 资助。

* 通讯作者 (bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 龙光强 (1983—), 男, 贵州道真人, 博士研究生, 主要从事农田养分循环研究与模型模拟。E-mail: ynaulong2316@163.com

市中国科学院红壤生态实验站 (116°55'30" E, 28°15'20" N) 进行。试验区为赣东北山区向鄱阳湖平原的过渡地带, 地形主要为低丘岗地, 海拔高 35 ~ 56 m。站区所在地属中亚热带湿润季风气候, 年均温 17.6℃, 年降水 1 795 mm, 降水多集中于 3—6 月。地带性土壤类型为红壤。

1.2 试验设计

为有效地测定盐基离子淋失, 试验所用大型排水采集器 (lysimeter) 为 2 m × 2 m × 1.5 m 的水泥池, 底部密封并用软皮管与外部容器连接以收集渗漏水。土壤为第四纪红黏土发育的红壤 (黏化湿润富铁土), 按发生层分层填装, 试验区四周设置 1 m 宽保护行。试验前表层土壤 (0 ~ 20 cm) 基本性质为: 有机质 6.0 g/kg, 全氮 0.29 g/kg, 速效磷 0.02 g/kg, 速效钾 48.45 mg/kg, pH 4.90。

从 2002 年 4 月到 2010 年 12 月, 每年 4 月初至 7 月中旬在小区内种植玉米 (山东登海系列), 密度为 50 000 株/hm², 玉米收获后至次年 4 月休闲。试验用有机肥为当地养殖场的新鲜猪粪, 含水量 80% 左右, 平均 pH 为 7.72, 全氮 32.9 g/kg (干基, 下同), 全钾 14.0 g/kg, 全磷 20.2 g/kg, 全碳 306.5 g/kg。根据猪粪中全氮含量设置 4 个不同施肥处理: ①不施肥对照 (CK); ②低量有机肥 (LM, N 150 kg/(hm²·a)); ③高量有机肥 (HM, N 600 kg/(hm²·a)); ④高量有机肥+石灰 (HML, N 600 kg/(hm²·a) + 石灰 3 000 kg/(hm²·3a))。每个处理 3 次重复, 以顺序区组排列。

各处理有机肥均以基肥形式在播种前一次性施入土壤表层, 然后与表土一起耕翻、耙匀。

1.3 样品的采集及测定

土样和渗漏水样: 用土钻钻取 0 ~ 15 cm 表层土壤供土壤养分测定。用于指标测定的水样和土样在作物生长期每 1 ~ 2 周采集一次, 闲置期每月采集一次, 施肥和收获前后增加采样频次。同时每天收集渗漏水记录渗漏水重量以计算 Ca、Mg、K 淋失量。

植株样: 7 月玉米收获后, 记录各小区产量。植株样风干后测定各组分 (秸秆、根、籽粒) 全钾, 并以此计算作物钾吸收量。

样品分析方法: 猪粪样品中 Ca、Mg、K、Na 用硝酸-高氯酸提取, 土壤交换性 Ca、Mg、K、Na 用乙酸铵提取, 之后与渗漏水水样相同, 均用火焰光度法测定 K、Na, 用原子吸收分光光度法测定 Ca、Mg^[13]。土壤 pH 在 2.5:1 的水土比下直接用 pH 计读取。土壤交换性氢、铝用氯化钾交换-中和滴定法测定^[13]。

植株全钾用硫酸-高氯酸法提取, 用火焰光度法测定^[13]。

盐基离子淋失计算: $K(Ca, Mg) \text{ 淋失量} = \text{渗漏水体积} \times \text{水样中 } K(Ca, Mg) \text{ 浓度}$ 。

数据的统计分析用 Excel 和 SPSS 17.0 软件。

2 结果与分析

2.1 长期有机肥施用下红壤 pH 变化

红壤旱地上有机肥长期施用对表层土壤 (0 ~ 15 cm, 下同) pH 值的影响因施肥量不同而各异。在同一年份内, 土壤 pH 的季节变化相对于年际变化很小, 因此将一年内测定的所有 pH 值进行平均, 作为该年份的平均 pH 值, 以此比较不同施肥量和施肥年限对土壤 pH 的影响。如图 1 所示, 在 9 年施肥中, CK, LM 处理土壤表层 pH 值在 4.7 ~ 5.0 之间波动, 低量有机肥施用并没有引起土壤 pH 值的增加。而在 HM 处理中, 高量有机肥的长期施用引起土壤 pH 值逐年增加, 平均每年约上升 0.085 个 pH 单位, 到施肥第 9 年达 5.9。在高量有机肥施用下添加石灰 (HML 处理) 使土壤表层 pH 值迅速上升, 到施肥第 7 年土壤已趋于中性, 有效地改良了土壤酸性。值得注意的是, 从 HM 与 HML 两个处理的变化趋势来看, 高量有机肥长期施用后土壤 pH 值不断趋近于中性, 土壤酸度对大多数作物生长已经不构成明显限制, 同时其酸性有接近 HML 处理的趋势。

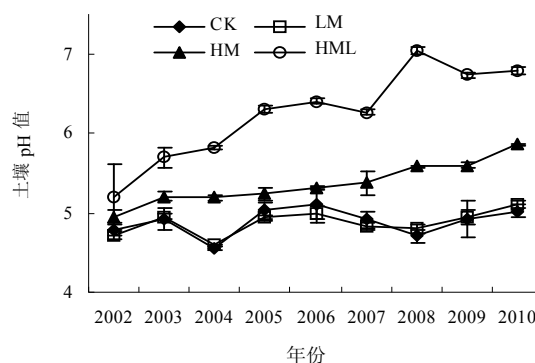


图 1 红壤长期有机肥施用下 pH 变化

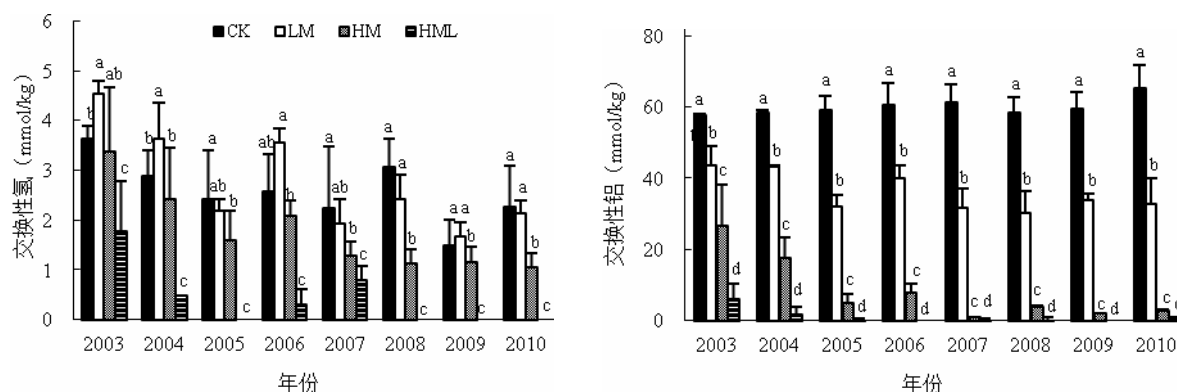
Fig.1 pH changes of surface soil under long-term manure application

2.2 长期有机肥施用对红壤交换性酸的影响

土壤交换性酸, 即交换性氢铝, 是对作物最有害的一种酸度形态, 其存在表明土壤中交换性盐基十分贫乏, 其位置被交换性氢铝代替。总体上, 长期有机肥施用有效降低了红壤旱地表层土壤交换性酸含量 (图 2)。对于土壤交换性氢, 低量有机肥施用的效果

不明显,连续施肥后仍不会引起土壤交换性氢的下降。然而,在高量有机肥施用中,土壤交换性氢迅速降低,到施肥第4年后稳定在 1.5 mmol/kg 左右。高量有机肥施用下添加石灰极大地降低了土壤交换性氢,从第4年开始含量接近于零。土壤交换性铝随着施肥量的增

加而降低,但在时间尺度上则表现为低量有机肥的施用效果有限,而高量有机肥处理在施肥前4年迅速降低,此后稳定在 2~4 mmol/kg 左右。添加石灰对降低土壤交换性铝有极为明显的效果,其含量从施肥第2年后一直低于 1 mmol/kg。



(同一年份中不同字母表示不同处理差异达到 $P < 0.05$ 水平,下同)

图2 表层土壤交换性氢和铝年际变化

Fig.2 Changes of exchangeable hydrogen and aluminum of surface soil under long-term manure application

2.3 长期有机肥施用下红壤盐基离子变化及平衡

从施肥试验第2年开始,连续8年测定有机肥施用下作物收获后土壤表层交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 和 Na^{+} 的浓度,其年际变化如图3所示。总体上,有机肥长期施用提高了土壤盐基离子浓度,与CK处理相比,经9年施肥或石灰添加,LM、HM、HML处理交换性盐基总量依次增加了1.3、3.4和5.3倍。 K 为作物生长的大量营养元素,加之其交换性形态是作物可吸收的最有效形态,因此土壤交换性钾含量先是缓慢上升,然后稳定或略有下降,LM处理由于肥料中补充的 K 较少,下降更明显。在有机肥长期施用下红壤交换性钙、镁、钠均呈现逐年上升的趋势,浓度随施肥量的增多而增加,以交换性钙增加幅度最高。相比于CK,9年后HM处理交换性钙增加了4倍多,接近 8 cmol/kg, HML处理由于石灰施用直接向土壤输入 Ca , 交换性钙增加了近7倍,高达 12 cmol/kg; LM、HM和HML处理中交换性镁含量分别是CK的3.2、7.1和7.6倍。而交换性钾、钠的增加量不超过2倍。总之,4种交换性阳离子中,交换性钙镁的增加幅度相对较大,是阳离子交换总量增加的主要原因。

猪粪 K 、 Ca 、 Mg 、 Na 浓度分别为 15.6、29.5、7.1、2.9 g/kg。4个处理平均每年通过有机肥输入土壤的 Na 为CK 0 kg/hm², LM处理 14 kg/hm², HM处理 55

kg/hm², HML处理 55 kg/hm², 远低于其他盐基成分。而且,施肥对土壤 Na 含量的影响不大,因此这里仅计算了 Ca 、 Mg 、 K 的平衡。每种盐基成分的平衡量为施肥/石灰输入量减去输出量(包括作物吸收和渗漏淋失量)的差值,意味着对土壤中该元素的耗竭(负值)或者补充(正值),详见表1,其作物吸收量计算中植株各组分 Ca 、 Mg 浓度,石灰中的 Ca 、 Mg 含量参考先前的研究结果^[14-15]。对比不同盐基组分发现,在同一施肥水平下,施肥对土壤 Ca 的补给最高,其物质的量分别是 Mg 补给量的近2倍, K 补给量的7倍。可见施肥对土壤盐基离子的补充主要是 Ca , 它是有机肥施用提高土壤 pH 的关键元素。这些进入土壤的盐基成分去向各异,其中 K 为大量营养元素,主要被作物吸收利用, Mg 绝大部分残留于土壤,少部分被作物吸收利用,而 Ca 渗漏淋失量和土壤残留量几乎各占一半,作物吸收比例较低,尽管如此,残留于土壤的绝对量仍然是 Ca 远高于其他组分。

考虑到 K 为作物大量营养元素,对土壤交换性盐基总量的贡献有限,通过补施化肥满足作物需求即可。同样,作物对 Mg 的需求量不高,且即使在大量施肥下对土壤盐基总量的贡献也较小。而 Ca 作为有机肥施用提高土壤盐基离子总量中贡献最大的元素,可代换大量的交换性氢铝消除酸害,因此,这里以 Ca 为标准来确定可补充土壤盐基离子、改良酸性的有机肥最低

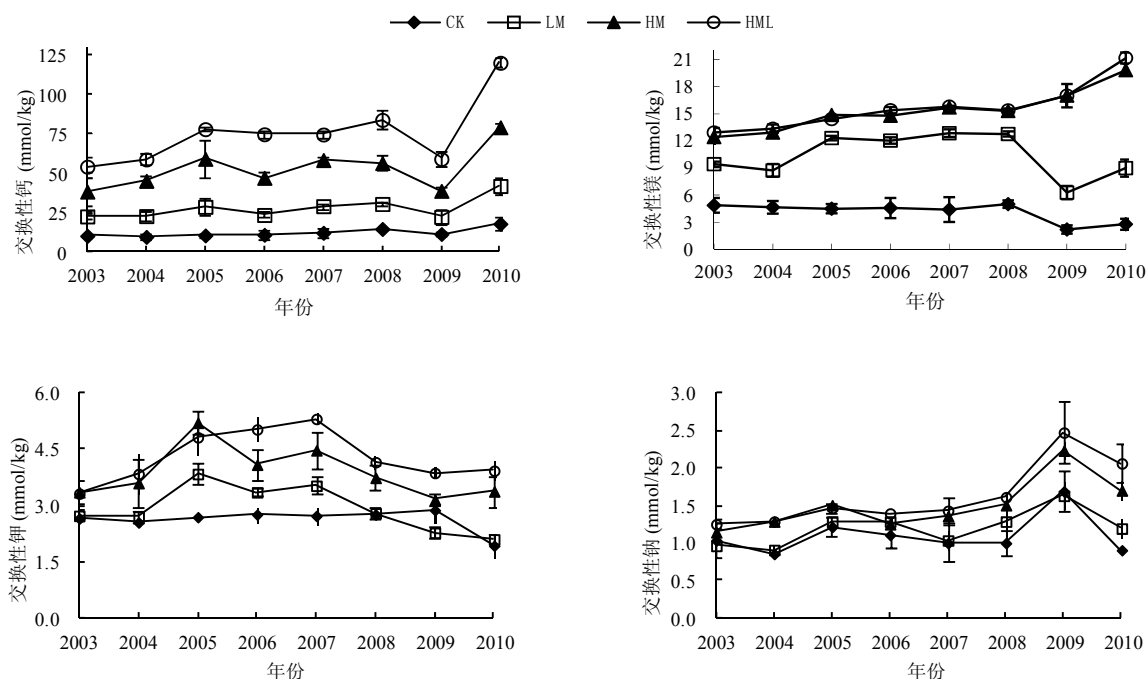


图 3 长期有机肥施用下土壤表层盐基离子浓度变化

Fig. 3 Concentration changes of base cations of surface soil under long-term manure application

表 1 长期有机肥施用下红壤 Ca、Mg、K 平衡

Table 1 Balances of Ca, Mg and K under long-term manure application

收支平衡	Ca (kg/hm ²)				Mg (kg/hm ²)				K (kg/hm ²)			
	CK	LM	HM	HML	CK	LM	HM	HML	CK	LM	HM	HML
输入	0	139	557	942	0	33.4	134	139	0	59.3	237	237
作物吸收	1.7	19	39	40	1.1	15	30	31	5.9	69	180	170
渗漏淋失	127	117	243	216	2.4	4.2	9.2	22	17	13	17	19
平衡	-129	3.24	276	686	-3.5	15	94	87	-24	-23	39	48

用量。经土壤 Ca 平衡量对施肥量进行回归分析, 得出关系: $Y_{Ca} = 0.708X_{Ca} - 114.5$ ($0 \leq X_{Ca} \leq 557$, $R^2 = 0.993$, $p < 0.01$)。式中 X 表示通过有机肥施用输入土壤的 Ca (kg/hm²), Y 表示该施肥量下的 Ca 平衡量 (kg/hm²)。通过该回归方程计算可得, 当有机肥用量高于 Ca 162 kg/hm² 时, 可在满足作物吸收和淋失外产生盐基元素盈余, 对土壤 Ca 进行补充, 因此保证土壤酸性改良效应的最低有机肥用量为 Ca162 kg/hm²。

2.4 长期有机肥施用对作物产量的影响

从 CK 产量看出, 红壤旱地在不施肥情况下, 玉米基本绝收, 多数年份产量为零 (图 4)。施肥显著提高了玉米产量, LM、HM 和 HML 处理玉米年均产量分别为 3 679, 6 714 和 7 261 kg/hm²。在施

肥前 4 年作物产量变异较大, 且添加石灰处理具有更高的作物产量, 随后 HML 和 HM 间的产量差异消除。

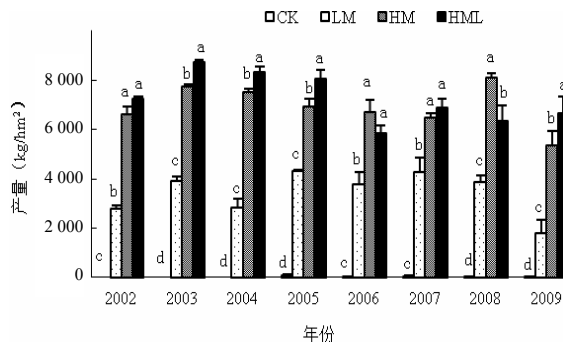


图 4 长期有机肥施用下红壤玉米产量

Fig.4 Yields of maize in red soil under long-term manure application

3 讨论

3.1 有机肥改良红壤酸度的机制

土壤酸化过程的实质是土壤中氢离子和铝离子数量的增加, 致酸离子与土壤胶体表面吸附的盐基离子进行交换, 促进了交换性盐基离子淋洗损失, 同时吸附在颗粒表面的氢离子又进一步溶解矿物晶格表面的铝, 加剧土壤酸化^[16]。土壤酸度改良实际上是土壤酸化的人为逆过程, 它通过降低土壤交换性氢铝含量, 增加盐基离子浓度, 降低土壤 pH。我们的结果与先前的研究结论一致, 表明在红壤上施用有机肥能够有效地改善红壤酸度^[17-19]。

有机肥施用对土壤酸度的改良效应, 是几种不同机制共同作用的结果。首先, 有机肥通常为碱性, 其施用可直接中和土壤表层部分质子提高 pH 值; 随着畜禽粪便等有机肥的施用, 大量盐基离子被带入土壤中, 释放溶解后极大地增强了土壤溶液的离子强度和阳离子交换量, 使土壤碱化^[5]。这种直接的中和作用和阳离子输入改良土壤酸度的过程, 是不受生物活性控制的化学过程, 作用迅速, 为有机肥改良土壤酸性的重要机制之一^[12]。其次, 有机肥施用提高土壤 pH 与有机肥中有机物分解的生物化学过程有关。有机肥中有机物质在矿化过程中, 产生大量的有机酸、腐殖质, 它们包含如羟基、苯酚等官能团, 可消耗土壤中质子氢, 与土壤中羟基铝、铁水合氧化物发生配位体交换, 降低土壤酸度^[19-20]。而且在有机物分解过程中产生平衡阳离子的大量有机酸, 如草酸、柠檬酸、苹果酸, 这些富含羧基的有机酸在进一步脱羧释放 CO₂ 过程中将消耗 H⁺^[21]。Helyar 等^[22]认为, 有机肥施入土壤后, 其中的有机氮在氨化作用中产生一个 OH⁻ 离子, 在硝化作用中生成 2 个 H⁺, 因此从有机氮到硝态氮的转化过程实际上是一个酸化的过程。但是这并未考虑氨挥发和铵态氮的植物吸收, 它降低了进入硝化作用的氮含量, 使得不同反应过程参与的物质的量不同。因此, 有机肥在矿化分解到硝化过程中对土壤 pH 的最终贡献有待进一步研究。

蔡泽江^[12]指出有机肥对土壤酸度的长期效果取决于它的质子消耗能力和随后过程中硝化产生的酸, 大量有机肥施用是否会引起土壤 pH 值的进一步增加需要长期试验的继续观测。本研究未跟踪测定与土壤酸性改良有关的生物化学过程, 但 LM 处理相比于 CK 处理提高了土壤有机质含量, 而 pH 并未上升, 因此我们推论, 这些与生物化学有关的过程对土壤酸度改良的贡献有限。Xu 等^[23]认为红壤酸度主要是盐基离子

(特别是 Ca) 淋失损失与凋落物、施肥等输入间收支差异的结果。本研究所用猪粪 pH 为 7.1~8.5, 其大量施用可迅速中和土壤表层的部分酸度。更为重要的是, 随着高量猪粪施用, 大量盐基离子随之进入土壤, 占据了土壤胶体上的交换位点, 增强了缓冲性能, 提高了土壤 pH 值。通过相关分析发现, 在 HM 和 HML 处理中, 土壤 pH 值和土壤 Ca、Mg、Na 的浓度显著相关 ($r>0.60$, $P<0.01$), 其中与 Ca、Mg 的相关性最高 ($r>0.68$, $P<0.01$)。从平衡量计算和土壤盐基离子变化可明显看出, 4 种盐基离子中, K、Na 在土壤的残留小, Ca、Mg 残留量高, 尤其 Ca, 是盐基总量增加的最主要贡献者。因此, 我们认为红壤旱地长期大量猪粪施用中, 提高土壤酸性的关键在于有机肥中大量 Ca 和 Mg 残留土壤中, 提高了土壤盐基离子含量。此外, 在高量施肥下添加石灰仅仅增加了 Ca、Mg 的输入量, 并未输入更多的有机物, 土壤 pH 却仍然增加也间接说明 pH 增加是 Ca、Mg 离子增加的效果。根据这一推论, LM 处理尽管土壤有机质增加, 但施肥带入的 Ca、Mg 基本被淋失和作物吸收, 因此对土壤 pH 上升的贡献必将有限, 这和试验测定结果相符。

3.2 施肥量、施肥年限对红壤酸度改良的影响

土壤酸度对作物生长的限制主要表现在盐基离子的缺乏和交换性酸对植物生长的毒害。通常认为有机肥施用解除铝毒危害是由于: ①直接提高了土壤 pH 值消耗交换性铝; ②有机肥分解产生有机酸与土壤溶液中单体铝形成铝-有机复合体从而降低活性铝比例^[24]。与 CK 相比, 低量有机肥 LM 处理中土壤 pH 值并没有发生改变, 然而交换性铝显著降低。经相关分析显示, 施肥处理交换性铝与土壤有机质含量显著负相关 ($P<0.01$), 相关系数绝对值均高于 0.6。这充分说明在红壤旱地上有机肥猪粪的施用降低铝毒主要与铝-有机复合体的形成有关。秦瑞君等^[25]研究表明在红壤旱地上种植玉米, 当交换性铝高于 4.45 cmol/kg 时将对根系生长产生毒害, 而高于 4.8 cmol/kg (铝毒害临界值) 时玉米将不能正常生长。据此, 受铝毒的影响, 不施有机肥情况下 (CK) 在红壤中种植玉米将不能正常生长, 产量接近于零; 而低量有机肥施用即可将土壤交换性铝降至临界值以下, 连续施肥 4 年后可解除铝毒。高量有机肥施用第一年即可将交换性铝降至毒害范围以下, 到施肥第 4 年交换性铝低于 7 mmol/L, 完全消除了铝毒危害。

我们的研究发现, 有机肥对土壤酸度的改良效应因施肥用量不同而各异。当用量过低 (LM) 时, 即使长期的有机肥施用也不能提高土壤 pH。先前的研究^[12]

表明,在红壤旱地上每年施用 $N\ 300\ kg/hm^2$ 的有机肥后,土壤 pH 值 18 年后增加了 0.92,年均增加 0.05 个单位。本研究中 HM 处理 ($N\ 600\ kg/hm^2$) 土壤 pH 年均增加 0.08。因此,综合来看,通过有机肥施用改良土壤酸度需在一定施肥剂量以上方可产生效果。在此剂量以上范围的施肥将逐年增加土壤 pH,且增加的幅度随施肥量增加而升高。本研究中,通过线性回归方法我们确定了红壤旱地单作玉米系统中有机肥酸度改良的最低用量为 $Ca\ 162\ kg/hm^2$,即当采用有机肥改良并稳定土壤 pH 值时,施肥量必须高于这一阈值,才能通过有机肥施用使土壤盐基离子逐年累积,土壤酸度得到逐渐改良。Ca 为作物生长的中量营养元素,在红壤旱地上大量有机肥施用下作物吸收仅占输入量的小部分,Ca 的主要去向为渗漏淋失和土壤残留固定,不同作物间的吸收差异对其平衡量的影响是有限的,因此我们推断本研究中酸度改良的最低有机肥用量,对其他作物将有一定的适用性,当然其具体效果仍待进一步研究验证。

先前的研究表明^[26],红壤旱地多数作物,每年每季施用 $N\ 120\ kg/hm^2$, $P\ 60\ kg/hm^2$, $K\ 90\ kg/hm^2$,可以获得最佳的丰产效益。本研究中,当通过猪粪施用达到酸性改良效果输入 $Ca\ 162\ kg/hm^2$ 后,同时将带入土壤 $N\ 181\ kg/hm^2$, $P\ 77\ kg/hm^2$, $K\ 111\ kg/hm^2$,可以满足多数作物对大量营养元素的需求。当然,有机肥中各营养元素与 Ca 之间的含量比例并不固定一致,因此针对畜禽粪便种类和地域的差异,今后需要开展更多详细的研究工作以指导生产实践应用。

先前大量的试验证明,石灰施用可以显著提高土壤 pH 值,降低交换性酸含量^[10,27]。我们的研究发现,在高量有机肥施用显著增加土壤 pH 后,石灰添加仍可进一步提高土壤 pH 值,这主要与石灰添加进一步增加了土壤盐基离子钙的含量有关^[6]。研究证明玉米的酸害 pH 值为 5.9,当土壤 pH 小于酸害 pH 值时随土壤 pH 的降低作物产量呈直线下降,土壤 pH 对作物生长产生明显限制作用^[12,25]。据此,本研究中 HM 处理在连续施肥第 7 年后土壤 pH 值接近于玉米的酸害 pH 值,若是添加石灰,则在第 3 年即可消除土壤酸害。因此建议有机肥施用过程中,在施肥初期添加一次石灰,将土壤 pH 值迅速提高,然后通过有机肥对 pH 的稳定作用保持和逐步提高土壤 pH,以最短时间和最少投入消除土壤酸害。

3.3 猪粪长期施用的综合效应

目前,土壤酸化已成为全球土壤退化的重要形式之一。一般地,在高温多雨的热带亚热带地区由于盐

基离子的大量淋失,土壤酸化较为严重^[22]。加之近年来工业污染、汽车尾气排放等带来的酸沉降,以及大量化肥氮的施用等人类活动的影响,土壤酸化越来越突出^[28]。施用有机肥,可间接减少化肥施用及其带来的酸化影响^[12]。改良酸度的最终目的是提高土壤生产力。红壤旱地生产力低下,除了土壤酸度的限制,土壤养分含量低、结构不良等也是其重要的原因。有机肥施用在改良了土壤酸性的同时,由于大量 N、P、K 等营养元素和有机物的输入有效地改善了土壤综合肥力,可显著地提高作物产量。因此在酸化、贫瘠的红壤上,有机肥与其他如石灰矿渣等酸性改良剂相比有其独特的优势,是红壤区首选的土壤酸化改良剂。另一方面,随着我国养殖业的进一步发展,畜禽粪便排放将进一步增加,其中大量养分未经合理利用而流入水体、大气,已经造成严重的环境污染^[29]。畜禽粪便的农业利用可以消纳大量养殖业废弃物,实现有机肥资源的循环利用,降低其直接排放带来的面源污染,是农业可持续发展的重要途径。

然而,有机肥的不合理施用将会造成土壤、大气、水体的污染。先前研究表明,在本试验高量施肥第 4 年后,130 cm 处的渗漏水硝酸盐浓度在 15 mg/L 左右,给地下水饮用造成了安全风险^[30]。畜禽粪便中含有一定量抗生素、重金属等,其大量农田施用将可能带来土壤抗生素、重金属的残留甚至淋溶至地下水,如抗生素四环素、土霉素、硫胺类,重金属 Cu、Zn、Cd 等均发现在农田土壤中有残留积累的现象^[31]。此外,研究证实施用有机肥,尤其是过量施用,可促进土壤中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体的排放^[32]。这些有机肥施用后的环境效应需要在进一步的工作中详细研究,以便为红壤旱地有机肥施用做出更为准确全面的认识和评价。

4 结论

通过有机肥施用改良红壤旱地酸度需在一定施肥剂量以上,高于这一施肥量的有机肥施用将逐年增加土壤 pH,且增加的幅度随施肥量增加而升高。有机肥长期施用可增加土壤盐基离子含量,其中 Ca、Mg 的增加幅度较高,使得长期施肥后土壤盐基以 Ca 为主,其次是 Mg,而 K、Na 比例较低。长期有机肥施用有效降低了红壤旱地表层土壤交换性酸含量,尤其是交换性铝含量的下降幅度较大,连续 4 年猪粪施用即可消除土壤交换性铝对玉米生长的毒害。

红壤旱地有机肥施用显著提高了玉米产量。发挥红壤酸度改良效果的最低猪粪用量为 $Ca\ 162\ kg/hm^2$,

在该施肥量下可同时为作物生长提供较充足的 N、P、K 养分。在施肥初期添加一次石灰, 将土壤 pH 值迅速提高, 然后通过有机肥对 pH 的稳定作用保持和逐步提高土壤 pH, 可用最短时间和最少投入消除土壤酸害。

参考文献:

- [1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [2] 孟赐福, 水建国, 吴益伟, 傅庆林. 红壤旱地施用石灰对土壤酸度, 油菜产量和肥料利用率的长期影响. 中国油料作物学报, 1999, 21(2): 45-48
- [3] Haynes RJ. Lime and phosphate in the soil-plant system. Adv. Agron., 1984, 37: 249-315
- [4] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 吴益伟. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙, 镁及土壤酸度的影响. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129-136
- [5] Materechera SA, Mkhabela TS. The effectiveness of lime, chicken manure and leaf litter ash in ameliorating acidity in a soil previously under black wattle (*Acacia mearnsii*) plantation. Bioresource Technology, 2002, 85: 9-16
- [6] Ortiz Escobar ME, Hue NV. Temporal changes of selected chemical properties in three manure amended soils of Hawaii. Bioresource Technology, 2008, 99: 8 649-8 654
- [7] Naramabuye FX, Haynes RJ, Modi AT. Cattle manure and grass residues as liming materials in a semi-subsistence farming system. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 124: 136-141
- [8] Mao J, Xu RK, Li JY, Li XH. Dicyandiamide enhances liming potential of two legume materials when incubated with an acid Ultisol. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1 632-1 635
- [9] Li JY, Wang N, Xu RK, Tiwari D. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation. Pedosphere, 2010, 20(5): 645-654
- [10] 孟赐福, 吴益伟, 水建国, 周梅芳. 施用石灰对红壤旱地土壤酸度和油菜产量的影响. 中国油料, 1995, 17(2): 39-43
- [11] 孟赐福, 水建国, 方承先. 红壤施用石灰对玉米产量和肥料利用率的影响. 浙江农业学报, 1998, 10(1): 23-27
- [12] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素. 北京: 中国农业科学院, 2010
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [14] 席冬梅, 邓卫东, 毛华明, 高宏光. 云南省反刍家畜主要饲料中钙、磷、钾和镁的含量与分布. 畜牧与兽医, 2005, 37(2): 28-29
- [15] 何春根, 殷兵, 董莉, 徐鹏, 许文华, 项小龙. X 射线荧光光谱法测定白云石、石灰石中氧化钙、氧化镁、氧化硅. 江西冶金, 2008, 28(5): 29-31
- [16] 于天仁, 陈志诚. 土壤发生中的化学过程. 北京: 科学出版社, 1990
- [17] 姜军, 徐仁扣, 李九玉, 赵安珍. 两种植物物料改良酸化茶园土壤的初步研究. 土壤, 2007, 39(2): 322-324
- [18] 徐仁扣, Coventry DR. 某些农业措施对土壤酸化的影响. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385-388
- [19] Mokolobate MS. An Evaluation of the Use of Organic Amendments to Ameliorate Aluminum Toxicity and Phosphorus Deficiency in an Acid Soil (M.S. Thesis). Pietermaritzburg, South Africa: University of Natal, 2001
- [20] Hue NV, Amien I. Aluminum detoxification with green manures. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1989, 20: 1 499-1 511
- [21] Yan F, Schubert S, Mengel K. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic acids. Soil Biol. Biochem., 1996, 28: 617-623
- [22] Helyar KR, Porter WM. Soil acidification // Robson AD. Soil Acidity and Plant Growth. Sydney: Academic Press, 1989: 61-101
- [23] Xu RK, Zhao AZ, Li QM, Kong XL, Ji GL. Acidity regime of the red soils in a subtropical region of southern China under field conditions. Geoderma, 2003, 115: 75-84
- [24] Haynes RJ, Mokolobate MS. 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. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2001, 59: 47-63
- [25] 秦瑞君, 陈福兴. 湘南红壤作物苗期铝中毒的研究. 植物营养与肥料科学, 1999, 5(1): 50-55
- [26] 李志玉, 郭庆元, 涂学文. 红壤旱地施用氮磷钾肥对不同作物的增产效果及对土壤肥力的影响研究. 土壤肥料, 2002(2): 22-24
- [27] 王文军, 郭熙盛, 武际, 朱宏斌. 施用白云石对酸性黄红壤作物产量及化学性质的影响. 土壤通报, 2006, 37(4): 723-726
- [28] Wallace A. Soil acidification from use of too much fertilizer. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25: 87-92
- [29] 张振都, 吴景贵. 畜禽粪便的资源化利用研究进展. 广东农业科学, 2010(1): 135-138
- [30] 王秀丽, 孙波. 红壤旱地施用有机肥的氮素淋失过程. 土壤学报, 2008, 45(4): 745-749
- [31] 史奕, 赵牧秋, 王俊, 宋玉芳. 设施菜地土壤-植物系统中有机肥源抗生素的影响研究进展. 环境科学学报, 2010, 29(增): 240-244
- [32] Zheng XH, Wang MX, Wang YS, Shen R, Li J, Heyer J. Characters of greenhouse gas emissions from crop lands of southeast China. World Resource Review, 1999(11): 229-246

Effects of Long-term Application of Pig Manure on Ameliorating Acidity of Red Soil

LONG Guang-qiang^{1,3}, JIANG Yu-ji^{1,2}, SUN Bo^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 National Engineering Research and Technology Center for Red Soil Improvement, Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Acid soil infertility is a major factor that limits crop production in red soil regions of southern China. The effects of 9-year pig manure application on amelioration of acidity on red soil (Udic Ferralsols) was studied in field lysimeter experiment with maize monoculture under different application rates of manure, i.e. N 0, 150 and 600 kg/hm² for CK, LM and HM treatment, respectively, and with lime addition 3 t/hm² lime every 3 years based on N 600 kg/hm² for HML treatment. The results showed that soil pH increased year by year with increment of 0.085 in HML while manure application did not influence pH in LM. The application of pig manure increased the contents of soil base cations, especially Ca²⁺, followed by Mg²⁺. With the increase of manure application rates, the exchangeable acidity of red soil, particularly exchangeable aluminum, was obviously reduced and aluminum toxicity was eliminated after 4-year manure application. Ulteriorly, lime addition increased soil pH and reduced exchangeable acidity in comparison with HM. The manure application increased significantly corn yield on red soil. The minimal amount of manure was Ca 162 kg/hm², over which pig manure application would increase soil pH. Lime addition once in the early years under long-term manure application would eliminate acid soil infertility with the least investments in the shortest time due to the increase and stabilization of manure on soil pH.

Key words: Pig manure, Red soil, Amelioration of soil acidity, Soil base cations, Exchangeable acidity