

我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治^①

吴道铭, 傅友强, 于智卫, 沈 宏*

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要: 南方红壤区是我国农业生产的重要基地, 然而, 红壤酸化和铝毒导致该区耕地生产力和质量下降。本文整理分析了近 5 年南方红壤酸化的相关报道和广东主要酸雨区森林土壤的调查结果, 发现, 红壤酸化面积加大, 并且酸化程度和铝毒害日趋严重。本文还详尽阐述了导致南方红壤酸化加快和铝毒加重的主要因素, 如酸沉降加剧、化肥不合理使用以及农业集约化生产和单一化种植。在此基础上, 指出控制酸沉降、合理的施肥方式和作物栽培方式, 是防治红壤酸化的主要措施。

关键词: 红壤酸化; 铝毒; 酸沉降; 施肥

中图分类号: S156.6

我国南方红壤面积约 $5.7 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分布于广东、海南、广西、福建、台湾、江西、湖南等 15 个省区。该地区水、热、光资源丰富, 复种指数高, 有着巨大的农业生产潜力。然而, 由于长期对红壤资源的不合理开发利用, 加上红壤自身发育程度高和淋溶作用强烈, 红壤出现酸化并引起土壤铝活化、产生毒害, 已经成为该地区农业生产的重要限制因子^[1]。为了更好地指导南方红壤区的农业生产, 提高对南方红壤酸化的关注, 本文整理分析南方红壤酸化和铝毒现状、红壤酸化原因以及防治措施。

1 我国南方红壤酸化和铝毒现状

第二次全国土壤普查数据显示, 我国南方红壤 pH 处于 4.5 ~ 6.0, 酸性土壤的分布面积约 $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[2]。然而, 近 5 年来, 关于南方红壤酸化的报道日益增多。表 1 是国内近 5 年关于南方红壤酸化的报道。从表 1 可知, 南方红壤的酸化状况有加重的趋势, 主要表现在以下 4 方面。

(1) 土壤酸化面积增加。调查发现, 江苏环太湖地区有 $3.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ 耕地发生了酸化。与第二次全国土壤普查相比, 广东强酸性土壤由 473 km^2 增加至 $18\,097 \text{ km}^2$, 湖北酸性土壤面积增加近 10%, 鄱阳湖地区强酸性土壤甚至增加近 20%。

(2) pH 下降幅度大。一项长达 20 年的红壤耕地 pH

的定位观察试验发现, 红壤耕地 pH 每十年下降 0.8 个单位。江西兴国耕地土壤 pH 平均降幅为 0.94 个单位。

(3) 土壤酸化报道主要集中于农用土壤, 茶园、果园、菜地及水田土壤都有酸化趋势, 其中茶园土壤酸化最为严重。福建有 86.9% 的茶园土壤 pH 在 4.5 以下, 江苏则有 80.9%, 湖南甚至有 92.7% 的茶园土壤 pH 在 4.5 以下。

(4) 土壤过度酸化, 影响了农业生产。广东由于土壤 pH 太低, 大部分的菜园土壤都达不到无公害蔬菜产地的环境要求。湖南、福建、浙江和江苏等低丘红壤茶园发生严重酸化, 最适宜茶树种植的土壤面积不断减少, 其中湖南仅剩 10% 的丘岗茶园土壤最适宜茶树种植。重庆有 7.8% 的柑桔园土壤 pH < 4.8, 已经不适合柑桔的生长。

王登峰等^[22]报道, 广东酸性森林土壤的面积约占 99%, pH 为 3.5 ~ 5.5, 其中强酸性土壤占 30%。本课题组也对广东主要酸雨区的森林土壤进行取样分析, 发现, 这些土壤严重酸化, pH 均低于 5.0, 最低为 4.0, 其中位于广东中部的赤红壤酸化问题最为严重(尚未发表数据)。可见, 广东地区森林红壤已经发生严重酸化。结合郭治兴等^[14]调查, 如果不采取有效的防治措施, 本课题组预测未来十年内广东土壤 pH 平均值将降至 5.2, 全省将有 40% 土壤发生酸化, pH < 4.5 的强酸性土壤面积将达 $2.5 \times 10^3 \text{ km}^2$ (尚未发表数据)。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31172026、31071847), 高校教育博士点基金项目(20104404110016), 广东省高层次人才项目和留学回国择优基金项目资助。

* 通讯作者(hshen@scau.edu.cn)

作者简介: 吴道铭(1987—), 男, 广东湛江人, 博士研究生, 主要从事作物应对酸铝胁迫方面研究。E-mail: daomwu@stu.scau.edu.cn

表 1 近 5 年来国内与红壤酸化的相关报道
Table1 References on red soil acidification in recent five years in China

年份	报道内容	文献
2007	江西南昌和余江两个红壤地区分别有 45.8% 和 89.5% 的土壤 pH 下降, 下降达 0.5 个单位。	[3]
2008	红壤耕地 pH 值每十年下降 0.8 个单位, 并且近 10 年的下降速度加快, 其中江苏环太湖地区就有 $3.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ 耕地发生了酸化。	[4]
2008	江西兴国 645 km^2 耕地发生了酸化, 平均降幅为 0.94 个单位。	[5]
2008	浙江临安水稻田改种雷竹林 15 年后, 土壤 pH 由 5.57 下降到 3.18, 交换性 Al 由 3.85 mg/kg 上升 51 倍达到 197.6 mg/kg。	[6]
2008	桂西北环境移民安置区果园土壤 pH 为 3.5 ~ 5.5, 酸性土壤为 95.5%; 交换性 Al 含量为 123.95 ~ 282.56 mg/kg, 均值为 917.29 mg/kg; 土壤酸化和铅毒问题严重。	[7]
2009	湖南茶园 92.7% 的表层土壤 $\text{pH} < 4.5$ $\text{pH} < 4.0$ 的茶园面积由 1985 年的 36.9% 增加到了 43.2% $\text{pH} > 4.5$ 的茶园面积则由 1985 年的 11.7% 下降到了 0。	[8]
2010	调查湖南省 10 个丘岗茶园发现, 仅 1 个茶园的土壤处于茶树生长的适宜 pH 范围, 3 个茶园土壤的 pH 在 4.5 以下, 平均低于 4.0; 交换性 Al 为 3.15 ~ 6.52 cmol/kg。	[9]
2010	广东主要菜田土壤 pH 为 3.15 ~ 8.45, 平均 pH 为 5.71, 大部分的菜田土壤都达不到无公害蔬菜产地的环境要求。	[10]
2010	福建茶园土壤 pH 在 4.5 以下的茶园占 86.9%, 其中 pH 低于 4.0 的严重酸化茶园占 28%。	[11]
2011	与第二次土壤普查相比, 广西天等县耕地土壤 pH 总体平均下降 0.73 个 pH 单位, 微酸性至强酸性土壤样点所占百分比由 9.8% 上升到 55.8%。	[12]
2011	对比鄱阳湖地区多目标区域地球化学调查数据与第二次土壤普查资料发现, 强酸性土壤由 58.22% 上升到 78.44%, 弱酸性土壤达到 16.20%。	[13]
2011	与第二次土壤普查相比, 广东土壤 pH 平均值由 5.7 降至 5.44, 最小值下降到 3.31, 分别有 25.8% 赤红壤和 26.6% 红壤的 pH 出现下降; 强酸性土壤由 473 km^2 增加至 18 097 km^2 。	[14]
2011	佛山菜地土壤 pH 为 4.45 ~ 6.48, 平均值为 5.65 $\text{pH} < 4.5$ 的土样占 1.8% pH 介于 4.5 ~ 5.5 的占 30.9%, pH 介于 5.5 ~ 6.5 的占 67.3%; 菜地酸化严重。	[15]
2011	江苏茶园土壤表层土壤 pH 为 3.66 ~ 5.13, 均值为 4.19; $\text{pH} < 4.0$ 的茶场占 42.8%, pH 在 4.0 ~ 4.5 的占 38.1%, $\text{pH} > 4.5$ 的占 19.1%; 茶园土壤存在严重的酸化现象。	[16]
2011	重庆有 84.6% 植桔土壤 pH 呈下降趋势, 平均降幅为 9.6%, 56.8% 的柑桔园土壤 pH 小于 6.5 $\text{pH} < 5.5$ 的为 32.7%; 7.8% 的柑桔园土壤 $\text{pH} < 4.8$, 不适合柑桔的生长。	[17]
2011	福建浦城水田土壤 pH 下降明显, 酸性土壤比例从第二次土壤普查的 34.5% 上升到 2005 年的 95.8%。	[18]
2012	与第二次土壤普查相比, 湖北 $\text{pH} < 6.5$ 土壤由 53.9% 上升为 63.0%, 强酸性土壤上升了 4.3%。	[19]
2012	浙江富阳设施栽培基地的土壤 pH 从 1980 年的 6.82 下降到 2009 年的 5.58。	[20]
2012	浙江杭州茶园表层土壤(0 ~ 20 cm)酸化严重, 最低的 pH 为 4.0, 并且有明显的深层化趋势。	[21]

红壤酸化与铝毒伴生。铝通常以对植物没有毒害的难溶性铝硅酸盐或氧化铝形式存在于土壤中。在酸性条件下, 特别是土壤 $\text{pH} < 5$ 时, 难溶性铝转变成交换性铝(主要是 Al^{3+} 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$), 并呈指数增加。研究表明, 当土壤交换性铝含量大于 2 cmol/kg 时, 植物会出现铝毒害症状, 主要表现为破坏根尖结构, 抑制根系的伸长和影响根系吸收功能, 进而影响植物生长和作物产量^[23]。本课题组研究也发现, 土壤活性铝含量为 4.4 cmol/kg 时, 大豆生长明显受抑制, 根系变短, 根冠表皮脱落、结构坏死, 叶片出现脉间失绿白化的综合缺素症状(图 1)。通过分析广东省主要酸雨区的森林土壤交换性铝含量, 发现受调查森林土壤的交换性铝含量均大于 2 cmol/kg, 变化幅

度为 2.3 ~ 8.4 cmol/kg; 其中赤红壤的交换性铝含量普遍高于红壤和砖红壤。红壤酸化和铝毒害加重, 导致红壤生产力和质量下降, 不利于红壤地区生产的可持续发展。目前, 关于南方红壤铝毒报道不是很多, 这可能与社会对这方面的认识和重视不够有关, 其原因可能有以下 4 方面。

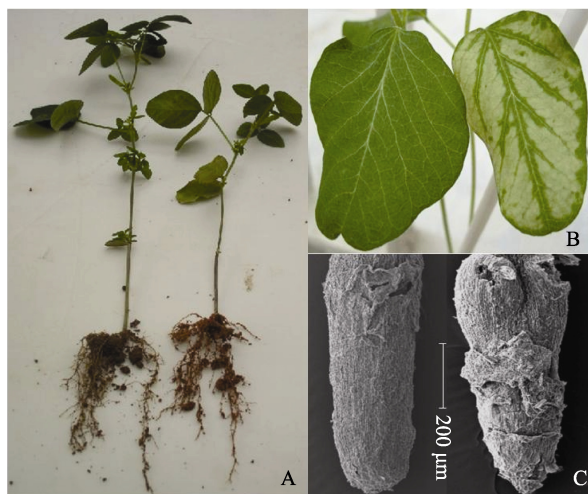
(1) 铝毒害直接表现在影响植物根系生长, 而生产上影响植物根系生长因素很多, 铝的毒害作用容易被忽视。

(2) 铝毒害导致作物产量和质量下降的原因主要是铝毒影响植物根系生长后间接影响作物对养分吸收, 植物遭受铝毒害在田间没有表现出固定的外观性状, 而是间接表现出某种元素(如镁、钙)或者多种

元素缺乏症状,从而导致农民将铝毒害误认为是土壤中某些元素的缺乏。

(3) 除少数铝富集植物外,植物将吸收的铝大部分累积在根系,较少部分运输到地上部,累积在果实和籽粒的铝更少。再加上铝对人体健康的影响作用不及某些重金属严重,社会对铝毒关注较少。

(4) Al^{3+} 是一个重要的致酸因子,在红壤酸化过程中扮演重要角色,以致大部分报道只关注到 Al^{3+} 致酸作用而缺乏 Al^{3+} 对植物毒害作用的认识。



0.7 cmol/kg Al^{3+} 4.4 cmol/kg Al^{3+} 0.7 cmol/kg Al^{3+} 4.4 cmol/kg Al^{3+}

图1 种植在交换性铝含量不同的土壤中的大豆植株(A)、叶片(B)及根尖(C)图片

Fig. 1 Photographs of soybean plants (A), leaves (B) and roots (C) growing in soils with or without Al toxicity

2 南方红壤加速酸化和铝毒产生的主要原因及防治措施

土壤酸化始于土壤溶液中活性 H^+ 进入土壤胶体,并与胶体吸附的盐基离子发生交换,致使盐基离子发生淋溶损失;盐基离子饱和度下降后,土壤胶体上活性 H^+ 又不断增多,并随之出现交换性铝,导致土壤酸化^[24]。自然条件下,土壤酸化过程很缓慢。近30年来,南方红壤酸化加快,主要与工业和生活大量排放 SO_2 和 NO_x 致使酸沉降加剧、大量且不合理使用化肥及长期单一种植和集约化农业生产有关(图2)。

2.1 酸沉降加剧

酸沉降加剧是引起土壤 pH 下降的一个重要因素^[25],也是导致我国南方红壤加速酸化的主要因素之一^[1, 26-27];初步估计,酸沉降对农田土壤酸化贡献率为 23% ~ 40%,对丘陵红壤酸化贡献率有 50%,对森林土壤酸化贡献率则超过 90%^[7, 13-14, 22, 26]。酸沉降将 H^+ 、S 和 N 等致酸物质带入土壤中并导致土壤 H^+ 浓度升高、固相铝活化及盐基离子流失^[28];

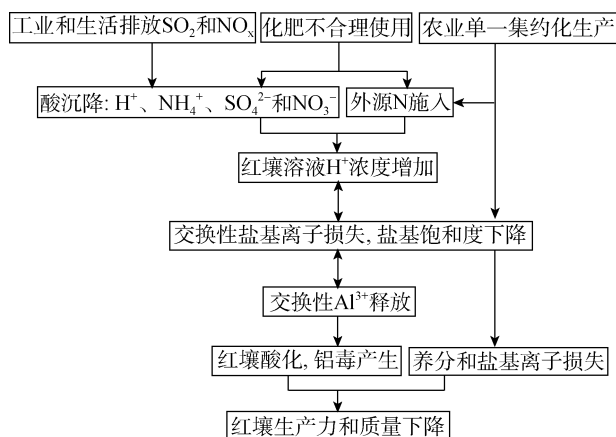


图2 红壤酸化和铝毒产生模式图

Fig. 2 Model illustrating soil acidification and aluminum toxicity occurred in red soil

由于红壤盐基饱和度低,对酸的缓冲性能弱,酸沉降对红壤酸化作用更为明显。华南地区近十年来酸沉降不断加剧,土壤 pH 呈不断下降趋势,这与该地区 SO_2 和氮氧化物(NO_x)排放量增加密切相关^[29-32]。由于酸沉降影响,鼎湖山常绿阔叶林土壤整个剖面(0 ~ 60 cm) pH 都小于 4.5^[33],0 ~ 20 cm 土层的土壤 pH 由第二次土壤普查时的 4.60 ~ 4.75 下降到 3.84 ~ 4.02^[34],表现出强酸性;土壤中盐基离子大量溶出并流失,固相铝活化明显。湖南衡山土壤剖面 pH 下降了 0.3 ~ 1.1 个单位,并且交换性铝增加了 1.1 ~ 4.3 cmol/kg^[35],部分土壤已产生铝毒害,严重影响了山上植物的生长及生态安全。我们对广东省主要酸雨区森林土壤调查结果也表明,酸沉降明显降低了森林土壤的 pH 并加重铝毒害,在这些调查对象中广东中部森林土壤的酸化和铝毒害状况明显较南部和北部的严重;这可能与这些地区的社会经济发展快于两侧、致酸物质排放多于两侧、酸沉降比两侧更严重有一定关系^[36]。酸沉降加剧使森林土壤酸化、铝毒害加重,从而影响林木生长,对经济、生态和社会效益造成很大损失。如受土壤酸化和铝毒影响,重庆南山 754 hm^2 马尾松林整片衰亡^[37]。

控制酸沉降的关键是控制致酸物质的排放。“十一五”期间,国家通过普及烟气脱硫设施以及淘汰关停落后产能,减少了 2.3×10^7 t SO_2 排放^[38],一定程度上缓解酸沉降。然而,仅仅控制 SO_2 排放是不够的。 NO_x 和 NH_3 等化合物的大量排放也会加快土壤酸化。如果不进一步加强控制 NO_x 和 NH_3 的排放,从 2005 年到 2020 年,发电厂和机动车排放的 NO_x 将会增加 30%,农业化肥使用和畜牧业排放的 NH_3 将会增加 57%。尽管 SO_2 排放减少,而 NO_x 和 NH_3 排放增加,三者的共同影响,致使到 2020 年中国境内

土壤酸化面积仍达 22.3%^[39]。可见,控制我国土壤酸化,控制 NO_x和 NH₃ 等化合物的排放和沉降已经成为非常紧迫的任务,政府需要采取更为有效的控制措施。

2.2 化学肥料不合理施用

长期不合理使用化肥特别是生理酸性肥料,忽视了有机物料的合理还田,打破了土壤原有的物质循环与平衡,导致盐基饱和度降低,从而致使酸性离子大量累积,土壤 pH 不断下降。化肥氮是引起土壤酸化的主要因素之一。连续 20 年大量施用氮肥已导致我国南方红壤表层 pH 明显下降;其中种植粮食作物的土壤下降了 0.23 个单位,种植经济作物的土壤下降了 0.3 个单位^[40]。表 2 是 4 个不同地方长期定位施肥

对红壤 pH 和交换性铝含量影响的汇总。从表 2 可知,长期单一施用尿素会导致红壤 pH 下降,最大下降值为 1.56 个单位;也会增加土壤交换性铝含量,最大增加值为 6.54 cmol/kg,是原始值的 40 倍。尿素、过磷酸钙和氯化钾的配施也会导致红壤 pH 下降和土壤交换性铝含量增加,但变化幅度均比单一施用尿素小。氮肥的大量施用也会导致农田 NH₃ 排放增加,进而加剧酸沉降。文帮勇等^[13]调查发现,江西鄱阳湖地区每年因施肥、大气干湿沉降和灌溉输入到农田的氮素分别为 123.84、74.13 和 11.02 kg/hm²,因人为氮带入农田的 H⁺ 为 18.67 kg/hm²。大量外源的 H⁺ 输入,导致该地区强酸性土壤由第二次土壤普查时 58.22% 上升为 78.44%。

表 2 长期定位施肥对红壤 pH 和交换性铝的影响
Table 2 Effects of long-term located fertilization on pH values and exchangeable Al concentrations in red soil

项目		江西进贤 ^[41]	湖南望城 ^[42]	湖南祁阳 ^[43]	江西鹰潭 ^[44]
供试土壤		第四纪红色黏土	第四纪红土发育水稻土	硅铁质红壤	第四纪红色黏土
试验年份		1981—2007	1981—2007	1990—2008	1996—2008
初始值	pH	6.0	6.6	5.7	3.9
	交换性铝	-	-	0.17	3.71
不施肥	pH	5.9(↓0.1)	5.76(↓0.84)	5.71(↑0.01)	-
	交换性铝	-	-	0.33(↑0.16)	-
单施氮肥	pH	5.2(↓0.8)	-	4.14(↓1.56)	-
	交换性铝	-	-	6.71(↑6.54)	-
施氮磷钾肥	pH	5.7(↓0.3)	5.33(↓1.27)	4.42(↓1.28)	5.46(↑1.56)
	交换性铝	-	-	5.51(↑5.34)	0.82(↓2.89)
单施有机肥	pH	6.4(↑0.4)	-	6.62(↑0.92)	6.20(↑2.3)
	交换性铝	-	-	0(↓0.17)	0.05(↓3.66)
氮磷钾+有机肥	pH	6.2(↑0.2)	5.61(↓0.99)	5.92(↑0.22)	-
	交换性铝	-	-	0.11(↓0.06)	-
氮磷钾+秸秆	pH	-	5.39(↓1.21)	4.59(↓1.11)	-
	交换性铝	-	-	5.54(↑5.37)	-

注: pH 测定水土比为 2.5:1, 交换性铝单位为 cmol/kg; 氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 钾肥用氯化钾, 有机肥用猪粪; 化肥种类与 相同, “氮磷钾+有机肥”处理中不施磷肥, 秸秆为稻草; 化肥种类与 相同, 秸秆为小麦和玉米秸秆; 磷肥用钙镁磷肥, 其他与 相同; 各列括号中数据指与初始值比较, ↑表示上升, ↓表示下降。

化肥的合理配施,如碱性肥料和酸性肥料及有机和无机合理配施,可以减少和中和人为带入的 H⁺, 并补充盐基离子,进而减缓甚至遏制土壤酸化。从表 2 长期单位施肥实验数据可以看出,以钙镁磷肥作为磷肥施用会提高土壤 pH, 提高幅度达 1.56 个单位;单施有机肥均会提高土壤 pH 和减少土壤交换性铝含量;有机肥与氮磷钾合理配施减缓土壤酸化,甚至会提高土壤 pH;“氮磷钾+秸秆还田”处理也在一定程度上减缓了土壤酸化。可见,有机物料的合理还田减缓了土壤酸化,这些有机物料包括稻草、大豆叶柄、紫云英、花生秆、菜枯、豆科绿肥和生物黑炭等^[45-51]。

这些有机物料氮和灰化碱的含量是影响土壤酸度改良的主要原因;灰化碱含量高而氮含量较低的物料可以显著增加土壤交换性盐基含量,从而显著提高红壤 pH 和降低红壤交换性铝含量^[51]。

提高氮肥利用效率、减少氮肥使用量,在降低氮肥使用成本的同时也减缓了土壤中 N 转化与 NO₃⁻ 淋失而导致的土壤酸化。提高氮肥使用效率需要注意到“3R”,即合适的比例(right application rate)、合适施用时间(right application time)和合适施用方式(right application method)^[40]。氮肥深施或将氮肥施在作物根附近^[52],或进行氮肥时期运筹^[53-54],即通过明确作

物不同生育期土壤中氮时空及作物需氮量动态变化规律而运筹氮肥施肥量和形式,都可以提高氮肥利用率和减少氮肥损失,一定程度上减缓了土壤酸化。

碱性物料的适当使用,也可以减少或中和人为带入的 H^+ ,对红壤酸化和铝毒也有较好的防治效果。石灰石粉能明显提高表层土壤 pH,并控制 4 年内表层土壤交换性铝含量都接近零,其中石灰石粉投放量为 15 t/hm^2 时效果最明显^[55]。段雷等^[56]在重庆铁山坪森林土壤上一次性投加石灰石和菱镁矿,也发现,5 年后两者都能明显提高土壤 pH,提高幅度为 $0.03 \sim 0.31$,并增加土壤的盐基饱和度。碱渣和赤泥能将红壤 pH 由 4.5 提高到 $5.8 \sim 6.3$,土壤 Al 的饱和度降到 15% 以下^[57]。需要注意的是,这些碱性物料含有一定量重金属元素,在生产应用中需要进一步处理和规范使用,并评估其环境风险。

2.3 农业集约化生产和单一化种植

张桃林等^[3]发现,近 20 年来在农业集约化生产条件下,江西省南昌市郊区和余江县两个红壤地区分别有 45.8% 和 89.5% 的土壤 pH 下降,下降幅度达 0.5 个单位。与大田作物相比,蔬菜集约化生产采用封闭保护性耕作,施肥量大且施肥次数频繁,一般经过 8~10 年耕作,土壤 pH 即可降低 1 个单位以上,并且露天和温室交替耕作酸化速度加快^[58-60]。这表明,农业集约化生产一定程度上导致了土壤酸化。其原因主要有:集约化生产导致土壤盐基离子大量损失,每一季作物收获都会带走大量的盐基养分,而生产过程中又不注意合理补充归还,导致土壤盐基饱和度和酸碱缓冲性能不断下降;大量使用氮肥,为了追求高产出,生产中投入大量氮肥,致使土壤碳氮比下降、土壤氮素硝化作用加速、农田 NH_3 排放增多和大气 NH_4^+ 沉降加剧等。除集约化生产外,农业单一化种植也会引起土壤酸化。表 1 中的相关报道指出,由于长期单一种植茶树,湖南、福建和江苏等省份的茶园土壤发生了严重酸化,适宜茶叶种植的土壤面积不断减少;长期种植果树也导致广西和重庆等地的果园土壤酸化和铝毒问题日趋严重。叶绍明等^[61]发现,种植桉树第 1 代、第 2 代、第 3 代表层土壤的 pH 分别为 4.70、4.49、4.35。刘国群等^[6]采集分析了不同种植年限的雷竹林土壤,发现,0、5、10 和 15 年种植年限的雷竹林土壤 pH 分别为 4.84、3.76、3.76 和 3.18,交换性铝含量为 3.85、86.6、91.0 和 197.6 mg/kg 。这些结果表明,长期单一种植经济作物如茶树、桉树和雷竹等会导致土壤 pH 显著下降而交换性铝含量显著增加。可能的原因有:长期单一种植经济作物,严重影响了土壤结构、通透性和水分状况;

经济作物对养分需求大,长期单一种植会导致盐基养分过度流失;这些作物分泌化学物质,长期累积,导致根际土壤性质发生改变。

轮作、间作、互作等多样化种植以及合理休耕,可以改善土壤的通透性和水分状况,减缓农业生产对土壤的压力,从而减缓土壤酸化和铝毒。黄国勤等^[62]通过 5 年水稻和旱地作物轮作试验,发现,轮作大大增强土壤通透性,有效阻止土壤次生潜育化和土壤酸化,提高土壤 pH。黎健龙等^[63]进行茶树间种大豆并将其秸秆还田,发现,土壤 pH 上升,升幅达 0.12 个单位,交换性铝含量下降了 0.27 cmol/kg 。经过长期进化适应,一些植物自身已经形成有效的耐酸铝机制,如分泌有机酸^[23,37]或将铝无毒化富集^[64]。夏汉平等^[65]在粤西某矿区经过 5 年连续种植百喜草后,0~20 cm 的土壤中活性铝含量由原来的 1.2 g/kg 下降到 0.6 g/kg ,土壤中铝毒害明显减轻。我们研究也发现,与普通品种相比,转 *ALMT1* 基因的大麦在铝毒胁迫下能分泌出大量苹果酸,表现出很强的耐酸铝特性(图 3)。如果能将耐酸铝植物与普通作物进行合理轮作、间作或互作,可以提高土壤酸化和铝毒较为严重耕地上作物产量,还可以有效改善这些耕地土壤酸化和铝毒害状况。

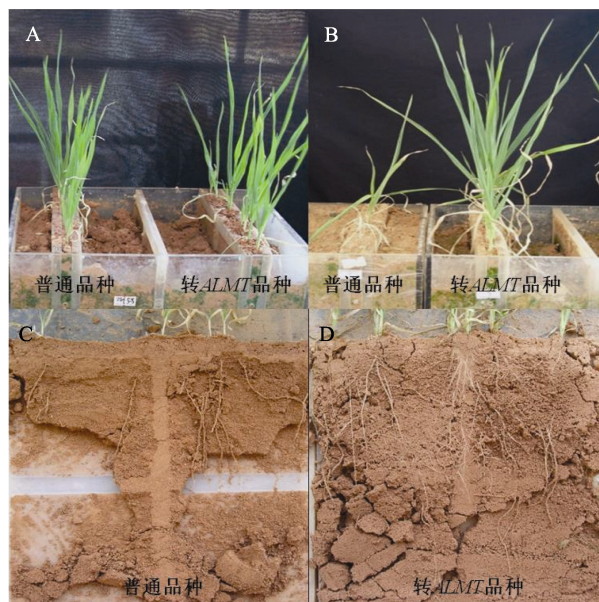


图 3 pH 5.7(A)、pH 4.1(B)土壤中不同大麦品种地上部及 pH 4.1(C、D)土壤中不同大麦品种根系照片

Fig. 3 Photographs of different rye genotypes growing in pH 5.7 (A) and pH 4.1 (B) soils, and that of roots (C, D) growing in pH 4.1 soil

3 小结

红壤地区是我国热带、亚热带经济林果、经济作物及粮食生产的重要基地,而土壤酸化和铝毒害加重

等加速了红壤质量和生态系统的退化,给我国农业生产、社会经济发展及生态环境造成很大影响^[1]。红壤退化与防治的研究工作已开展多年,各方面工作也取得一定成效^[26-27]。然而,当前红壤退化形势依然严峻,并呈加速趋势。防治红壤酸化和铝毒害加重,保护红壤质量与生态系统,任重而道远:需要全面认清红壤酸化现状;需要建立红壤保护相关法规、红壤资源的动态监测预警及红壤质量评价制度;需要系统研究红壤酸化过程及其变化趋势、酸铝对植物毒害以及植物耐酸铝机制,并将红壤酸化与农业生产、生态环境、社会发展及人类健康等系统联系起来,寻求科学合理的防治方法;需要国土资源、城乡规划、环境保护及农业等相关部门和高校、研究所、企业等协调配合,信息共享,共同决策;需要向群众普及保护红壤知识,并调动他们的积极性,配合各项防治措施的落实。这样,红壤地区的生产得以可持续。

参考文献:

- [1] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-40, 388-422
- [2] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 860-874
- [3] 张桃林, 潘剑君, 刘绍贵, 王兴祥, 李忠佩. 集约农业利用下红壤地区土壤肥力与环境质量变化及调控——江西省南昌市郊区和余江县案例研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 584-591
- [4] 全国农业技术推广服务中心, 中国农科院资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究——国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 254-275
- [5] 程先富, 陈梦春, 郝李霞, 史学正. 红壤丘陵区农田土壤酸化的时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1 348-1 351
- [6] 刘国群, 庄舜尧, 李国栋, 桂仁意, 方伟. 不同种植年限下雷竹林土壤中铝的形态变化[J]. 土壤, 2008, 40 (6): 1 013-1 016
- [7] 刘勋鑫. 桂西北砂页岩红壤活性铝形态的空间变异性研究(硕士学位论文)[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008
- [8] 傅海平, 张亚莲, 常硕其, 刘红艳, 王华. 湖南省茶叶研究所茶园土壤养分现状及 20 余年变化研究[A]. 茶叶科技创新与产业发展学术研讨会论文集[C]. 浙江: 中国茶叶学会, 2009: 165-173
- [9] 黄运湘, 曾希柏, 张杨珠, 林志灵, 孙楠, 王道龙. 湖南省丘岗茶园土壤的酸化特征及其对土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 633-638
- [10] 郭巨先, 陈琼贤, 曹健, 赫新洲, 李强, 李妙汉, 高惠楠. 广东主要菜田土壤养分状况及施肥建议[J]. 中国蔬菜, 2010(8): 41-45
- [11] 杨冬雪, 钟珍梅, 陈剑侠, 姜能座, 林小鸣, 王义祥, 郭伟, 李翠萍. 福建省茶园土壤养分状况评价[J]. 海峡科学, 2010(6): 129-131
- [12] 农光标, 黄绍富, 张美英, 凌庆伟. 广西天等县耕地土壤酸化的初步研究[J]. 南方农业学报, 2011, 42(2): 177-181
- [13] 文帮勇, 杨忠芳, 侯青叶, 杨晓燕, 尹国胜, 袁存堤. 江西鄱阳湖地区土壤酸化与人为源氮的关系[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 562-568
- [14] 郭治兴, 王静, 柴敏, 陈泽鹏, 詹振寿, 郑武平, 魏秀国. 近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 425-430
- [15] 关共凑, 陈楠纬, 丘佳营, 梁自强, 龙毅鹏. 佛山市城郊菜地土壤养分状况及对策[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2011, 29(6): 10-14
- [16] 张倩, 宗良纲, 曹丹, 肖峻, 蔡燕茹, 汪张懿. 江苏省典型茶园土壤酸化趋势及其制约因素研究[J]. 土壤, 2011, 43(5): 751-757
- [17] 温明霞, 石孝均, 聂振朋, 周鑫斌. 重庆市柑桔园土壤酸碱度及金属元素含量的变化特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 191-199
- [18] 刘志华. 水稻土酸化原因与改良对策[J]. 福建农业, 2011(7): 8-9
- [19] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 戴志刚, 李小坤. 水田土壤肥力现状及变化规律分析——以湖北省为例[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 319-330
- [20] 何旭华, 蒋玉根, 许杰, 裘希雅, 顾万帆, 徐君, 俞乐清, 应国平, 刘志农. 富阳市 30 年来设施农业土壤养分的变化[J]. 浙江农业科学, 2012(1): 104-107
- [21] 吴士文, 索炎炎, 张峥嵘, 卢升高. 南方茶园土壤酸化特征及交换性酸在水稳性团聚体中的分布[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 195-199
- [22] 王登峰, 薛春泉, 刘志武. 广东省森林生态状况监测报告(2002)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 14-43
- [23] Kochian LV, Hoekenga OA, Piñeros MA. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency[J]. Ann. Rev. Plant. Biol., 2004, 55: 459-493
- [24] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学. 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 171-173
- [25] Van Breemen N, Driscoll CT, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters[J]. Nature, 1984, 307: 599-604
- [26] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 190-205
- [27] 何园球等. 红壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 369-375
- [28] Lawrence GB, David MB, Shortle WC. A new mechanism for calcium loss in forest-floor soils[J]. Nature, 1995, 378: 162-164
- [29] Richter A, Burrows JP, Nüss H, Granier C, Niemeier U. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. Nature, 2005, 437: 129-132
- [30] Liu JG, Diamond J. China's environment in a globalizing world[J]. Nature, 2005, 435: 1 179-1 186
- [31] Liu JG, Diamond J. Revolutionizing China's environmental protection[J]. Science, 2008, 319: 37-38

- [32] Tang J, Xu XB, Ba J, Wang SF. Trends of the precipitation acidity over China during 1992—2006[J]. Chinese Sci. Bull., 2010, 55(17): 1 800–1 807
- [33] 刘菊秀, 周国逸, 褚国伟, 张倩媚. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸度对土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 763–767
- [34] Liu KH, Fang YN, Yu FM, Liu Q, Li FR, Peng SL. Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China[J]. Pedosphere, 2010, 20(3): 399–408
- [35] 吴甫成, 彭世良, 王晓燕, 陈咏淑. 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
- [36] 伍世丰. 珠三角酸雨污染特征及其影响因素初步分析(硕士学位论文)[D]. 广州: 暨南大学, 2011
- [37] 沈仁芳. 铝在土壤-植物中的行为及植物的适应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1–26
- [38] 中华人民共和国环境保护部. 2010 年中国环境状况公报[EB/OL]. [2011-6-3]. <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2010zkgb/>
- [39] Zhao Y, Duan L, Xing J, Larssen T, Nielsen CP, Hao JM. Soil acidification in China: Is controlling SO₂ emissions enough[J]? Environ. Sci. Technol., 2009, 43(21): 8 021–8 026
- [40] Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, Christie P, Goulding KWT, Vitousek PM, Zhang FS. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1 008–1 010
- [41] Huang S, Zhang WJ, Yu XC, Huang QR. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China[J]. Agr. Ecosyst. Environ., 2010, 138: 44–50
- [42] 聂军, 杨曾平, 郑圣先, 廖育林, 谢坚, 向艳文. 长期施肥对双季稻区红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1 453–1 460
- [43] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
- [44] 王小兵, 骆永明, 李振高, 刘五星, 何园球. 长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响: 酸度[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 98–102
- [45] 李艳. 施用豆科绿肥对砖红壤酸度及交换性能的动态影响(硕士学位论文)[D]. 海口: 海南大学, 2011
- [46] 吴志丹, 尤志明, 江福英, 王峰, 王成己, 张文锦. 生物黑炭对酸化茶园土壤的改良效果[J]. 福建农业学报, 2012, 27(2): 167–172
- [47] 和利钊, 张杨珠, 刘杰, 廖超林, 黄运湘. 不同施肥处理对侵蚀性红壤酸性和交换性能的修复效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(1): 86–91
- [48] 魏岚, 杨少海, 邹献中, 巫金龙, 宁建凤. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(1): 77–81
- [49] 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[J]. 土壤, 2007, 39(2): 322–324
- [50] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 三种植物物料对两种茶园土壤酸度的改良效果[J]. 土壤, 2009, 41(5): 764–771
- [51] 王宁. 酸性土壤的有机改良研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009
- [52] Ju XT, Xing GX, Chen XP, Zhang SL, Zhang LJ, Liu XJ, Cui ZL, Yin B, Christie P, Zhu ZL, Zhang FS. From the cover: Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 2009, 106(9): 3 041–3 046
- [53] 夏晓亮, 石祖梁, 荆奇, 戴延波, 姜东, 曹卫星. 氮肥运筹对稻茬小麦土壤硝态氮含量时空分布和氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 490–496
- [54] 石丽红, 纪雄辉, 朱校奇, 李洪顺, 彭华, 刘昭兵. 提高超级杂交稻库容量的施氮数量和时期运筹[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1 274–1 281
- [55] 张桃林. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 90–138
- [56] 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全, 赵大为, 张冬保. 酸化森林土壤投加石灰石和菱镁矿 5a 后的化学性质变化[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1 758–1 764
- [57] 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
- [58] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 843–850
- [59] Shi WM, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2009, 83: 73–84
- [60] 范庆锋, 张玉龙, 陈重, 张玉玲, 王丽娜. 保护地土壤酸度特征及酸化机制研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 466–471
- [61] 叶绍明, 温远光, 杨梅, 梁宏温. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 246–251
- [62] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 王淑彬, 刘隆旺, 赵其国. 稻田轮作系统的生态学分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 69–78
- [63] 黎健龙, 涂攀峰, 陈娜, 唐劲驰, 王秀荣, 年海, 廖红, 严小龙. 茶树与大豆间作效应分析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2 040–2 047
- [64] González-Santana IH, Márquez-Guzmán J, Cram-Heydrich S, Cruz-Ortega R. *Conostegia xalapensis* (Melastomataceae): an aluminum accumulator plant[J]. Physiol. Plant., 2012, 144(2): 134–145
- [65] 夏汉平, 黄娟, 李志安, 孔国辉. 一种清除土壤铝毒害的植物修复方法: 中国, 100586594C[P]. 2012–2–3

Status of Red Soil Acidification and Aluminum Toxicity in South China and Prevention

WU Dao-ming, FU You-qiang, YU Zhi-wei, SHEN Hong^{*}

(College of Resources and Environment, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The large areas of red soils in south China are critical food-producing and industrial crops producing regions for China. However, agriculture therein is seriously limited by the growing soil acidification and aluminum toxicity. Evidences indicate that soil acidification and aluminum toxicity is more and more serious in recent years. Soil acidification and aluminum toxicity in this area are mainly caused by acid deposition, fertilization, intensive agriculture and monoculture. Recent reports in red soil acidification and aluminum toxicity in south China, and its major cause were analyzed in depth in this review. Furthermore, preventive measures, such as controlling acid precipitation, applying reasonable fertilization and crop cultivation measures were suggested.

Key words: Red soil acidification, Aluminum toxicity, Acid precipitation, Fertilization