

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.018

文慧颖, 吴华勇, 董岳, 等. 不同土地利用方式下南亚热带赤红壤酸化特征. 土壤, 2023, 55(2): 372–378.

## 不同土地利用方式下南亚热带赤红壤酸化特征<sup>①</sup>

文慧颖<sup>1,2</sup>, 吴华勇<sup>1</sup>, 董岳<sup>1,2</sup>, 冯文娟<sup>1</sup>, 卢瑛<sup>3</sup>, 胡月明<sup>3</sup>, 张甘霖<sup>1,2,4\*</sup>

(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 中国科学院大学, 北京 100049; 3 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 4 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 土地利用方式是影响土壤酸化的重要因素, 研究不同土地利用方式下赤红壤酸化特征可为缓解和治理赤红壤区土壤酸化提供依据。本研究采集了 4 种土地利用方式(菜地、果园、水田、林地)的赤红壤区土壤样品, 测定了表层(0~20 cm)和表下层(20~40 cm)土壤的理化性状, 结合田间调查和统计数据分析了不同土地利用方式下土壤酸化特征及成因。结果表明: 果园表层土壤 pH 显著低于林地, 果园表下层土壤 pH 显著低于水田和林地; 菜地、果园土壤交换性  $Al^{3+}$  含量显著高于水田和林地; 果园表层土壤的盐基饱和度与阳离子交换量均显著低于自然林地, 菜地表下层土壤盐基饱和度显著低于水田; 与水田和林地相比, 菜地和果园的酸化更严重, 酸缓冲能力更低。不同土地利用下施肥、复种指数以及耕作方式上的差异可能是造成气候与母质相似地区土壤酸化差异的主要原因。

**关键词:** 土壤酸化; 土地利用方式; 土壤 pH; 赤红壤

中图分类号: S153 文献标志码: A

### Acidification Characteristics of Lateritic Red Soil Under Different Land Use Types in Typical Subtropical Region

WEN Huiying<sup>1,2</sup>, WU Huayong<sup>1</sup>, DONG Yue<sup>1,2</sup>, FENG Wenjuan<sup>1</sup>, LU Ying<sup>3</sup>, HU Yueming<sup>3</sup>, ZHANG Ganlin<sup>1,2,4\*</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Land use type is an important factor affecting soil acidification. Study on the acidification characteristics and differences of lateritic red soil under different land use types is the premise of mitigating and controlling soil acidification in lateritic red soil region. In this study, four land use types (vegetable lands, orchards, paddy fields, woodlands) of lateritic red soil were selected, soil physical and chemical properties were measured at different depths (surface: 0–20 cm; subsurface: 20–40 cm), and then the acidification characteristics and causes of lateritic red soil under different land use types were analyzed with the combination of field investigation. The results show that pH of orchards is significantly lower than that of woodlands in the surface layer, and significantly lower than that of paddy fields and woodlands in the subsurface layer. Exchangeable  $Al^{3+}$  content is significantly higher in vegetable lands and orchards than those of paddy fields and woodlands. In surface layer, base saturation (BS) and CEC of orchards are significantly lower than those of woodlands. In subsurface layer, BS of paddy fields is significantly higher than that of vegetable lands ( $P<0.05$ ). Compared with paddy fields and woodlands, vegetable lands and orchards have more serious acidification and worse acid buffering capacity. Differences in fertilization, multiple cropping index and tillage methods may be responsible for soil acidification under different land uses.

**Key words:** Soil acidification; Land use types; Soil pH; Lateritic red soil

赤红壤成土母质多为酸性深成岩花岗岩<sup>[1]</sup>, 在高温多雨条件下, 矿物化学风化速度快, 多形成风化程度高、盐基饱和度低的土壤<sup>[2]</sup>。广东省赤红壤区耕地面积约为 195 万公顷, 约占全省耕地总面积的 74%,

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(U1901601, 41977003)资助。

\* 通讯作者(glzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 文慧颖(1997—), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤地理学。E-mail: wenhuiying@issas.ac.cn

是华南重要的农业生产基地，主要耕地类型为水田、水浇地、旱地<sup>[3]</sup>。近几十年来，珠江三角洲地区经济快速发展，带来了包括土壤酸化在内的一系列突出环境问题<sup>[4]</sup>。土壤酸化是土壤内部产生的  $H^+$  或外部输入的  $H^+$  消耗土壤酸缓冲物质的过程<sup>[5]</sup>，是我国农业土地利用的主要环境问题之一<sup>[6]</sup>。严重的土壤酸化使土壤难以以为植物生长提供充足的养分元素和正常的生长环境，从而降低作物生产力<sup>[7]</sup>和作物产量<sup>[8]</sup>。当前，赤红壤区土壤酸化问题对区域农业生产和生态环境构成了严重威胁。

土地利用方式是影响土壤 pH 的重要因素<sup>[9]</sup>。不同的土地利用方式因地上部植物移除量及肥料用量等管理方式不同，从而对土壤酸化产生不同的影响<sup>[10]</sup>。袁宇志等<sup>[11]</sup>研究发现，2010 年广州市流溪河流域不同耕地类型土壤的 pH 大小为水浇地>水田>旱地。韩天富等<sup>[9]</sup>通过监测点数据分析发现除华南地区外，我国土壤 pH 变化表现为旱地>水旱轮作>水田。姬钢等<sup>[12]</sup>发现南方红壤区不同植被下的土壤 pH 存在显著差异。Li 等<sup>[13]</sup>发现 1981—2012 年，西南紫色丘陵区水田和果园的土壤比山地和草地的土壤酸化严重。前人研究多基于历史数据，分析大范围地区不同土地利用方式下的土壤 pH 变化，而对气候与母质相似地区不同土地利用方式对土壤酸化的影响特征和机制研究较少。因此，考虑到土壤酸化对农业生态系统产生的巨大影响，理解当前不同土地利用方式下的土壤酸化特征与成因可为制定土壤可持续性管理措施提供理论依据。本研究选择亚热带典型赤红壤区——广州市增城区作为研究区，通过分析增城区不同土地利用方式(菜地、果园、水田、自然林地)下土壤理化性质，探究不同土地利用方式下土壤的酸化现状；结合野外田间调查和统计数据解析不同土地利用对土壤酸化的影响，以期对赤红壤区土壤酸化改良提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省广州市增城区(113°32'E ~ 114°00'E, 23°05'N ~ 23°37'N)。该区域属热带海洋性季风气候，四季分明，光照充足，雨量充沛。市区年平均气温 21.6 °C，年均降水量 1 720 mm，降水分布不均，主要集中在 4—6 月。增城区地势北高南低，山地以低山为主，丘陵地主要分布在中南部，南部是三角洲平原与河谷平原。成土母质主要是花岗岩<sup>[1]</sup>。耕地利用类型以水田、菜地、果园为主，主要作物有

水稻、香蕉、荔枝、木瓜和龙眼等。

### 1.2 样品采集与测定

在增城区共采集 115 个样点，菜地、果园、水田和自然林地的样点数量分别为 45、46、10 和 14 (图 1)。每个样点按照“随机”“等量”“多点混合”的原则选取 5 个钻孔点，使用不锈钢土钻采集表层 0 ~ 20 cm 与表下层 20 ~ 40 cm 深度的土壤样品。采样时调查了耕种历史、施用肥料类型和数量、种植作物等信息。样品自然风干后，手动除去根茬和石块等杂物，混匀后研磨过 2、0.25 和 0.149 mm 孔径的尼龙筛作为待测样品。

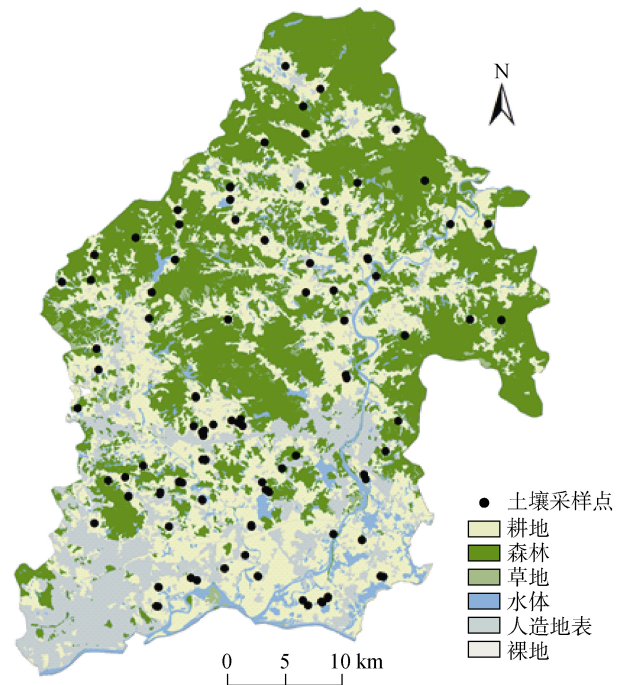


图 1 土壤采样点分布图

Fig. 1 Soil sampling points

制备水土比为 2.5 : 1 ( $V : m$ ) 的土壤悬液测定土壤 pH。用 pH 7.0 的 1.0 mol/L 乙酸铵溶液提取土壤交换性盐基离子，用 ICP-AES (Optima 8000, PerkinElmer) 测定  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Na^+$  的含量。用乙酸铵法在 pH 7.0 条件下测定土壤阳离子交换量 (CEC)。用 1 mol/L KCl 制备提取液，0.02 mol/L NaOH 滴定提取液至酚酞终点，测定总可交换酸度 ( $Al^{3+}$  和  $H^+$ )。将 1 mL 的 3.5% NaF 添加到 100 mL 提取液中，用 0.02 mol/L NaOH 将混合溶液滴定至酚酞终点，测定可交换性  $H^+$ 。可交换性酸度和可交换性  $H^+$  之差即是可交换性  $Al^{3+}$  ( $Al_{KCl}$ )<sup>[14]</sup>。铝饱和度 ( $Al_{sat}$ ) 计算：

$$Al_{sat} (\%) = \frac{Al_{KCl}}{CEC} \times 100$$

### 1.3 数据处理

运用 Excel 2010、SPSS 23.0、Origin Pro 2018 和 ArcGIS 10.7 软件对数据进行统计、分析与绘图。采用独立样本 t 检验方法对不同土地利用方式的土壤理化性质进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

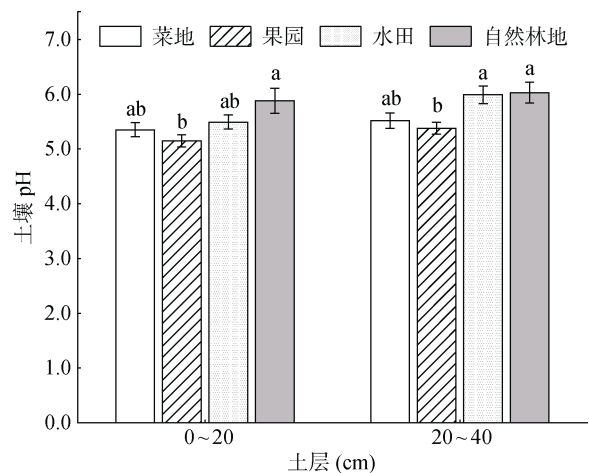
### 2.1 不同土层土壤 pH 特征

研究区以酸性土壤 ( $4.5 < \text{pH} < 5.5$ ) 与微酸性土壤 ( $5.5 < \text{pH} < 6.5$ ) 占比较高(表 1), 其中, 0 ~ 20 cm 土层中, 土壤 pH 为 3.19 ~ 7.36, 平均值为 5.34; 20 ~ 40 cm 土层中, 土壤 pH 为 3.42 ~ 7.77, 平均值为 5.59, 且 0 ~ 20 cm 土层土壤 pH 显著低于 20 ~ 40 cm 土层 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同土地利用方式下不同土层土壤 pH 特征

菜地、果园、水田和自然林地表层和表下层土壤 pH 存在显著差异(图 2)。在两个土层深度条件下, 果园土壤 pH 均显著低于自然林地土壤 ( $P < 0.05$ ); 果园

表下层土壤 pH 显著低于水田土壤 ( $P < 0.05$ ); 菜地表层与表下层土壤 pH 与其他利用方式的土壤间无显著差异。



(图柱上方小写字母不同表示不同土地利用方式间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下图同)

图 2 不同土地利用方式下不同土层土壤 pH

Fig. 2 Soil pH at different soil layers under different land use types

表 1 不同土层土壤 pH 特征

Table 1 General status of soil pH at different soil layers

土层 (cm)	样点数	最小值	最大值	各级占比(%)					均值
				强酸性	酸性	微酸性	中性	微碱性	
0 ~ 20	115	3.19	7.36	13.04	48.70	30.43	7.83	0	5.34 ± 0.08 b
20 ~ 40	115	3.42	7.77	6.09	41.74	37.39	13.04	1.74	5.59 ± 0.08 a

注: 小写字母不同表示不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 不同土地利用方式下不同土层土壤交换性酸特征

在表层和表下层土壤中, 菜地和果园的土壤交换性  $\text{Al}^{3+}$  含量以及 Al 饱和度均显著高于水田和自然林地 ( $P < 0.05$ )(图 3)。不同土地利用方式下表层和表下层土壤交换性  $\text{H}^+$  含量均无显著差异(图 3)。

4 种土地利用方式下表层和表下层土壤 pH 均与交换性酸 ( $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{H}^+$ ) 之间存在极显著反指数关系 ( $P < 0.001$ )(图 4)。当土壤 pH  $< 5.5$  时, 土壤交换性  $\text{Al}^{3+}$  随着土壤 pH 的降低而迅速增加; 同时, Al 饱和度也随着土壤 pH 的升高而呈指数下降趋势。菜地和果园表层和表下层土壤 Al 饱和度均值在 25% ~ 35% (图 3), 且菜地和果园土壤 Al 饱和度均显著高于水田 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 不同土地利用方式下不同土层土壤交换性盐基离子特征

土壤交换性盐基离子含量大小为  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ (表 2)。果园表层土壤盐基饱和度显著低于水田与自然林地土壤, 且其交换性盐基离子总量显

著低于水田土壤 ( $P < 0.05$ ); 菜地表层土壤交换性盐基离子总量与盐基饱和度均显著低于水田土壤 ( $P < 0.05$ )。果园表层土壤 CEC 显著低于水田与自然林地土壤, 4 种土地利用方式下表下层土壤 CEC 之间无显著差异。

## 3 讨论

### 3.1 不同土地利用方式下赤红壤区典型土壤酸化特征

本研究区中 4 种土地利用方式下的土壤以酸性与微酸性为主, 且表层的土壤 pH 显著低于表下层, 表明当前表层土壤酸化程度比表下层更为严重。果园表层和表下层土壤 pH 均显著低于自然林地, 且果园表层土壤盐基饱和度和 CEC 均显著低于自然林地, 表明当前果园的酸化程度比自然林地严重。作为决定土壤酸缓冲能力的关键因素<sup>[15-16]</sup>, 果园土壤盐基饱和度和 CEC 均较低, 这意味着果园土壤的酸缓冲能力低于自然林地土壤。当外部酸性物质输入时, 果园比自然林地更易发生土壤酸化。此外, 虽然没有在菜

地和自然林地之间发现土壤 pH 的显著差异,但菜地表层和表下层的土壤交换性  $Al^{3+}$  均显著高于自然林地,表明当前菜地的潜在酸化程度比自然林地严重。由于没有发现水田和自然林地之间各酸化特征的显著差异,因此水田和自然林地之间的土壤酸化程度没有差异。

本研究中菜地与果园土壤潜性酸均以交换性  $Al^{3+}$  为主,约占总酸度的 80%,而交换性  $H^+$  占比低 (<10%)。菜地与果园表层和表下层土壤 Al 饱和度均值为 25%~35%,部分果园土壤 Al 饱和度甚至已经超过 60%,这表明菜地与果园土壤可能存在 Al 毒的风险,从而对植物生长产生不利影响,因为当 Al 饱和度达到 60% 或更高时,土壤溶液中 Al 浓度将会急剧增加,致使植物产量显著下降<sup>[17]</sup>。同时,在表层和表下层中,菜地和果园土壤交换性  $Al^{3+}$ 、Al 饱和度均高于水田,而酸缓冲能力(交换性盐基离子)均小于水田。因此,旱作土地利用方式下土壤酸化比水田更为严重。而由于没有发现菜地和果园之间各酸化

特征的显著差异,因此菜地和果园之间的土壤酸化程度没有差异。

### 3.2 不同土地利用方式下赤红壤区典型土壤酸化差异成因

研究发现氮肥过量施用、植物对阴阳离子的差异吸收以及大气酸沉降是土壤酸化的主要原因<sup>[6, 18]</sup>。大气酸沉降在促进陆地生态系统土壤酸化方面发挥着重要的作用<sup>[19-20]</sup>。广东省是我国酸雨最严重的省份之一,且占全国酸雨控制区的 16%<sup>[19]</sup>。陈璇等<sup>[20]</sup>与 Huang 等<sup>[21]</sup>分别发现氮、硫沉降是导致广州土壤酸化的重要驱动因素。但在本研究中,各土地利用方式的土壤拥有相同的气候环境,因此,大气酸沉降不是造成不同土地利用方式下赤红壤酸化差异的主要原因。

氮肥施用能有效提高作物产量,但长期过量施用可加速土壤酸化<sup>[6]</sup>。增城区 2020 年的化肥施用量较 2010 年增长了 60% 左右<sup>[22]</sup>。尿素水解后  $NH_4^+$  硝化作用会导致  $H^+$  的净累积<sup>[23]</sup>,若硝化作用产生的  $NO_3^-$  全部被植物根系吸收,则会外排 2 个  $OH^-$ ,不会导致

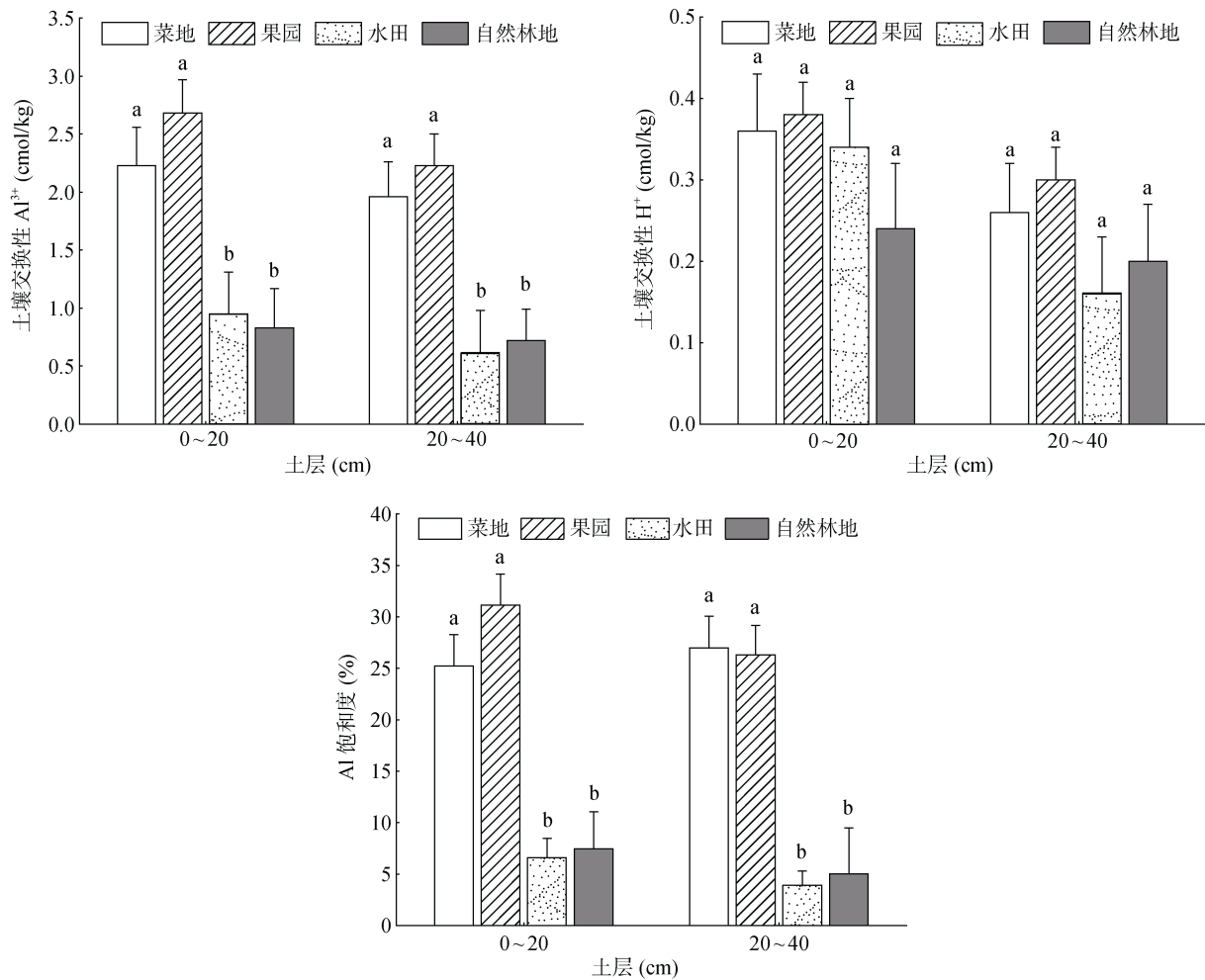


图 3 不同土地利用方式下不同土层土壤交换性酸含量和 Al 饱和度  
Fig. 3 Soil exchangeable acidity and Al saturation at different soil layers under different land use types

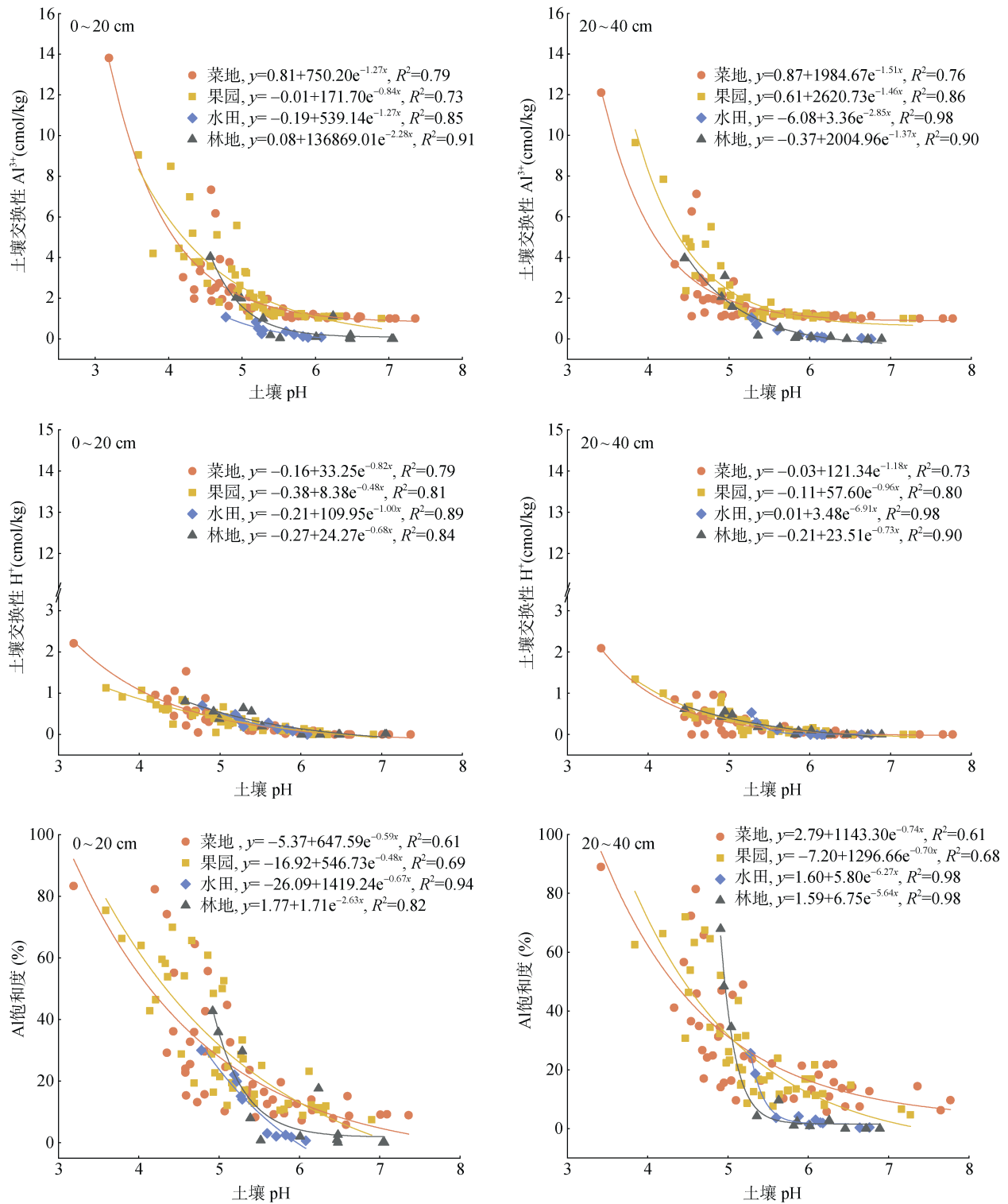


图 4 不同土地利用方式下土壤交换性酸含量及 Al 饱和度与土壤 pH 的关系

Fig. 4 Relationship between soil exchangeable acidity, Al saturation and soil pH at different soil layers under different land use types



表 2 不同土地利用方式下不同土层土壤交换性离子及相关指标  
Table 2 Soil exchangeable base cations contents and related indicators at different soil layers under different land use types

土层 (cm)	土地利用 方式	交换性盐基离子 (cmol/kg)				盐基离子总量 (cmol/kg)	盐基饱和度 (%)	CEC (cmol/kg)
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>			
0~20	菜地	5.49 ± 0.48 bc	0.74 ± 0.05 b	0.58 ± 0.03 ab	0.61 ± 0.06 ab	7.42 ± 0.54 b	67.32 ± 2.88 bc	10.65 ± 0.48 ab
	果园	4.43 ± 0.34 c	0.69 ± 0.05 b	0.68 ± 0.02 a	0.50 ± 0.05 b	6.29 ± 0.40 b	61.71 ± 2.78 c	9.39 ± 0.33 b
	水田	7.95 ± 1.02 a	1.05 ± 0.13 a	0.63 ± 0.07 a	0.75 ± 0.08 a	10.37 ± 1.23 a	84.78 ± 2.61 a	11.93 ± 1.16 a
	自然林地	6.85 ± 1.34 ab	0.93 ± 0.12 ab	0.48 ± 0.06 b	0.43 ± 0.05 b	8.69 ± 1.47 ab	77.63 ± 5.96 ab	11.74 ± 1.36 a
20~40	菜地	4.65 ± 0.50 b	0.62 ± 0.05 b	0.57 ± 0.04 ab	0.36 ± 0.03 b	6.21 ± 0.56 b	64.16 ± 2.95 b	9.16 ± 0.54 a
	果园	5.18 ± 0.49 ab	0.74 ± 0.06 ab	0.69 ± 0.02 a	0.40 ± 0.03 b	7.02 ± 0.54 ab	66.03 ± 2.69 ab	9.60 ± 0.39 a
	水田	7.39 ± 0.94 a	0.97 ± 0.14 a	0.58 ± 0.06 ab	0.59 ± 0.10 a	9.53 ± 1.20 a	86.10 ± 3.20 a	10.75 ± 1.14 a
	自然林地	6.08 ± 1.22 ab	1.01 ± 0.13 a	0.49 ± 0.06 b	0.41 ± 0.08 b	8.00 ± 1.39 ab	75.25 ± 6.55 ab	9.98 ± 1.31 a

注: 表中同列数据小写字母不同表示同一土层不同土地利用方式间差异显著( $P < 0.05$ )。

土壤酸化,但在热带高温多雨的环境下,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和交换性盐基离子同步淋失,导致交换性 Al 和质子的净累积,最终造成土壤酸化<sup>[2]</sup>。同时,氮的添加还会降低 2:1 型黏土矿物的数量并增加 1:1 型黏土矿物的数量,从而降低土壤的酸缓冲能力<sup>[24]</sup>。本研究的野外调查发现,菜地和果园种植历史大多在 20 年及以上,过量施肥现象非常普遍。因此,与没有受到人为扰动的自然林地相比,施肥等人为因素是造成菜地和果园酸化程度比自然林地严重的主要原因。

菜地和果园更高的施氮量也可能是造成旱作土壤酸化更为严重的原因。蔬菜的种植需要大量的化肥尤其是氮肥的投入来保障其高产<sup>[25]</sup>。相关数据显示,我国蔬菜地的氮肥施用量是大田作物的数倍甚至数十倍<sup>[26]</sup>,广东省蔬菜种植氮肥用量高且利用率低<sup>[27]</sup>。而水田土壤的周期性排水和淹水过程使得其土壤 pH 变化相对复杂<sup>[28]</sup>。水稻生长期间的淹水耕作所导致 Fe、S 以及 CO<sub>2</sub> 的氧化还原等生物地球化学过程会中和土壤中的 H<sup>+</sup>,并维持水田土壤 pH 的相对稳定<sup>[29]</sup>;且土壤反硝化速率会在淹水条件下增加,从而消耗 H<sup>+</sup>并在一定程度上提高土壤 pH<sup>[30]</sup>。不同土地利用方式下这种酸化程度的差异也意味着,在条件适宜的情况下,如能实现水田和蔬菜种植的有序轮作,将可能缓解目前这种较快的土壤酸化趋势。

植物通常会吸收更多的盐基离子,在得不到全部归还的条件下将导致土壤酸化<sup>[31]</sup>。从 2005 年到 2020 年,增城区蔬菜产量增加了 23.4%<sup>[22]</sup>,蔬菜产量的提高意味着大量交换性盐基从土壤中被带走,表明土壤中交换性盐基离子被大量去除。因此,作物对交换性盐基离子的吸收在促进土壤酸化过程中发挥了重要作用,同时也是造成旱作土壤酸化严重的另一个原因。在本研究中,蔬菜较粮食作物有更高的产量和复种指

数,增城区 2020 年的蔬菜产量( $3.17 \times 10^4$  kg/(hm<sup>2</sup>·a))远高于稻谷产量( $5.27 \times 10^3$  kg/(hm<sup>2</sup>·a))<sup>[22]</sup>,且增城区的蔬菜种植多为一年三熟至一年四熟,这表明由于蔬菜的种植与收获,菜地土壤中的交换性盐基离子被大量去除。此外,与水田作物相比,果树的生物量也更大,因此需要更多的营养元素,包括 Ca、Mg 与 K 等盐基离子<sup>[18]</sup>。植物对盐基离子的吸收会直接导致土壤中 H<sup>+</sup> 的生成,同时,土壤交换性盐基离子含量的下降也会降低土壤酸缓冲能力。研究表明,长期作物收获带走大量的盐基离子能够使我国农田每年增加 H<sup>+</sup> 15 ~ 20 kmol/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。植物也会通过对土壤中盐基离子的再分配对土壤交换性盐基离子含量变化起到至关重要的作用<sup>[32]</sup>。因此,在典型赤红壤区,菜地更高的产量和复种指数会通过农作物带走更多的盐基离子,加之秸秆还田较少,农作物的收获带走大量的盐基养分而得不到有效及时补充,从而使土壤酸化趋势加剧。通过有效的盐基离子归还平衡养分输入和输出,如秸秆还田措施,也是减缓土壤酸化的重要途径。

## 4 结论

典型赤红壤区以弱酸性和酸性土壤为主。表层土壤的酸化程度比表下层更严重。与水田和自然林地的土壤相比,菜地和果园土壤酸化情况更严重、酸缓冲能力更弱。潜性酸以交换性 Al<sup>3+</sup> 为主,约占总酸度的 80%,Al 的水解是增城区农田土壤酸度的主要来源。菜地与果园表层和表下层土壤 Al 饱和度均值为 25% ~ 35%,土壤存在 Al 毒风险。氮肥过量施用、复种指数高等人为因素是土地利用方式影响酸化的主要途径。水田和蔬菜的有序轮作、秸秆还田等措施有助于提高土壤酸缓冲能力以及盐基离子的归还,从

而缓解土壤酸化。

### 参考文献:

- [1] 罗薇. 东莞、增城荔枝园土壤基本性质的研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 47–52.
- [2] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, et al. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3790–3801.
- [3] 骆世明, 李华兴, 胡月明. 广东赤红壤区现代农业试验研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [4] 荆继红, 孙继朝, 韩双平, 等. 珠江三角洲地区酸雨及酸化地下水分布特征[J]. 上海地质, 2010, 31(2): 8–12.
- [5] van Breemen N, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters[J]. *Nature*, 1984, 307(5952): 599–604.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [7] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification—A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 601–611.
- [8] Baquy M A A, Li J Y, Jiang J, et al. Critical pH and exchangeable Al of four acidic soils derived from different parent materials for maize crops[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1490–1499.
- [9] 韩天富, 柳开楼, 黄晶, 等. 近 30 年中国主要农田土壤 pH 时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2137–2149.
- [10] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, et al. Responses of soil buffering capacity to acid treatment in three typical subtropical forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564: 1068–1077.
- [11] 袁宇志, 郭颖, 张育灿, 等. 亚热带典型小流域景观格局对耕地土壤酸化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1): 90–99.
- [12] 姬钢, 徐明岗, 文石林, 等. 不同植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2639–2645.
- [13] Li Q Q, Li S, Xiao Y, et al. Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. *Catena*, 2019, 175: 278–285.
- [14] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [16] 查宇璇, 冉茂, 周鑫斌. 烟田土壤酸化原因及调控技术研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(2): 211–218.
- [17] Fox R H. Soil pH, aluminum saturation, and corn grain yield[J]. *Soil Science*, 1979, 127(6): 330–334.
- [18] Li Q Q, Li A W, Yu X L, et al. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134320.
- [19] 郑超, 郭治兴, 袁宇志, 等. 广东省不同区域农田土壤酸化时空变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 593–601.
- [20] 陈璇, 章家恩, 向慧敏, 等. 2008—2018 年广东省酸雨的变化趋势研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1198–1204.
- [21] Huang J, Zhou K J, Zhang W, et al. Sulfur deposition still contributes to forest soil acidification in the Pearl River Delta, South China, despite the control of sulfur dioxide emission since 2001[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(13): 12928–12939.
- [22] 广州市统计局. 广州统计年鉴—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [23] Cai Z J, Gao S D, Hendratna A, et al. Key factors, soil nitrogen processes, and nitrite accumulation affecting nitrous oxide emissions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(6): 1560–1571.
- [24] 沈月. 辽宁耕地棕壤酸化特征及其机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [25] 龚巍巍, 张宜升, 何凌燕, 等. 菜地氨挥发损失及影响因素原位研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 345–350.
- [26] 吴腾超, 蓝增全, 胡正义, 等. 不同氮肥用量对滇池柴河流域蔬菜地土壤氨挥发及作物产量的影响[J]. 现代农业科技, 2015(3): 205–208.
- [27] 王荣萍, 余炜敏, 李淑仪, 等. 华南地区主要蔬菜氮肥肥料利用率研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(25): 34–39.
- [28] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615–1621.
- [29] 黄锦法, 曹志洪, 李艾芬, 等. 稻麦轮作田改为保护地菜田土壤肥力质量的演变[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 19–25.
- [30] Minasny B, Hong S Y, Hartemink A E, et al. Soil pH increase under paddy in South Korea between 2000 and 2012[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 205–213.
- [31] Zeng M F, de Vries W, Bonten L T C, et al. Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7): 3843–3851.
- [32] Dong Y, Yang J L, Zhao X R, et al. Contribution of different proton sources to the acidification of red soil with maize cropping in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2021, 392: 114995.