



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2303532

引用格式: 谢珊, 陈祖拥, 舒英格, 等. 贵州典型茶园土壤酸化及其养分变化特征[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(19): 8025-8035.

Xie Shan, Chen Zuyong, Shu Yingge, et al. Characteristics of soil acidification and nutrient changes in typical tea plantations in Guizhou[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(19): 8025-8035.

农业科学

贵州典型茶园土壤酸化及其养分变化特征

谢珊¹, 陈祖拥^{1,2*}, 舒英格¹, 刘方², 刘元生^{1,2}, 杨丽¹, 龙天雨¹

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学环境与资源研究所, 贵阳 550025)

摘要 茶树长期宿根连作使得茶园土壤酸化严重、养分失衡, 导致茶叶产量和品质下降, 制约中国茶产业的可持续发展。对贵州省茶叶主产区 17 个乡镇 21 个茶园土壤剖面及相邻林地进行调查取样, 分析茶园土壤剖面酸度和养分特征。结果表明: 茶园土壤 0~20、20~40、40~60 cm 3 个土层土壤平均 pH 为 4.28、4.44、4.63, 土壤酸化明显, 呈现出强酸性至极强酸性的特征; 其中, 0~20 cm 土层土壤酸化最为严重, 其土壤 pH < 4.5 的样品比例高达 71.4%, 比相邻林地高出 23.8%。茶园土壤养分自表层向下逐步降低; 与林地比较, 表层茶园土壤有机质下降, 而全氮、碱解氮明显增加; 当 pH < 4.5 后, 除有效铁外, 表层土壤其他养分均易流失。与林地比较, 茶园土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢含量增加, 在 0~20 cm 土层中含量较高, 分别达 10.25、9.44、0.81 cmol/kg; 而阳离子交换量和交换性钙、镁含量则呈下降趋势。相关性分析表明, 茶园土壤 pH 与全氮、碱解氮、有效磷、有效铁、交换性酸和交换性铝存在显著或极显著的负相关关系, 而与盐基饱和度、交换性钙镁离子含量存在极显著正相关关系; 当 pH 低于 5.2 时, 尤其是低于 4.5 后, 土壤 pH 主要受到交换性酸的影响; 而高于 5.2 后, pH 主要受到盐基饱和度的影响, 且主要取决于钙镁离子含量的高低。

关键词 茶园; 土壤 pH; 酸化特征; 土壤肥力

中图分类号 S158.2; **文献标志码** A

Characteristics of Soil Acidification and Nutrient Changes in Typical Tea Plantations in Guizhou

XIE Shan¹, CHEN Zu-yong^{1,2*}, SHU Ying-ge¹, LIU Fang², LIU Yuan-sheng^{1,2}, YANG Li¹, LONG Tian-yu¹

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Environment and Resources Institute, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] Tea (*Camellia sinensis*) long-term lodging continuous crop makes the tea garden soil acidification serious, nutrient imbalance, leading to a decline in tea yield and quality, restricting the sustainable development of China's tea industry. In the primary tea-producing regions of Guizhou Province, the soil profiles and surrounding forest lands of 21 tea gardens in 17 townships were examined, sampled, and studied for their acidity and nutrient properties. The analysis revealed that the three soil layers in a tea garden had average pH values of 4.28, 4.44, and 4.63 respectively. The soil acidification was evident, with characteristics ranging from highly acidic to strong acidity. The greatest extent of acidification was seen in the 0~20 cm soil layer, where 71.4% of samples had pH levels below 4.5, which was 23.8% higher than those of the nearby nutrients in the soil of tea gardens. In tea gardens, soil nutrients gradually deplete as one descends. Compared with the forest land, the organic matter of the surface tea garden soil decreased, while the total nitrogen and alkaline hydrolyzable nitrogen increased significantly. Other soil nutrients, in addition to the available iron, are easily lost in the topsoil when the pH value is below 4.5. While the amount of cation exchange and the amount of exchanged calcium and magnesium were declining, the content of exchange acid, aluminum, and hydrogen in tea garden soil increased when compared to forest land. The content was highest in the 0~20 cm soil layer, at 10.25, 9.44, and 0.81 cmol/kg, respectively. The results of a correlation analysis revealed a considerable or very significant inverse relationship between soil pH and available total nitrogen. The results of correlation analysis demonstrated a significant or very significant negative correlation between soil pH and total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, available iron, exchange acid, and exchange aluminum, along with a very

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-12-21

基金项目: 贵州大学人才引进基金(贵大人基合字[2017]47号)

第一作者: 谢珊(1999—), 女, 苗族, 贵州瓮安人, 硕士研究生。研究方向: 土壤资源利用与改良。E-mail: 673372740@qq.com。

* 通信作者: 陈祖拥(1983—), 男, 汉族, 广西桂平人, 博士, 高级实验师。研究方向: 土壤资源利用与改良。E-mail: qingfeng340@126.com。

significant positive correlation with salt saturation and exchange calcium and magnesium ion content. When the pH value was lower than 5.2, particularly if it had dropped lower than 4.5, the exchange acid had the primary influence on the soil pH value, but the pH value was mainly affected by the salt base saturation, especially when it rose beyond 5.2, and was major influenced by the concentration of calcium and magnesium ions.

[**Keywords**] tea plantations; pH; acidification characteristics; soil nutrients

茶树源于中国西南部,是中国重要经济作物之一。贵州作为全国植茶省份之一,茶园面积较大,截至2022年底,贵州茶园种植面积为 $4.72 \times 10^5 \text{ hm}^2$,茶叶产量高达24.6万t^[1]。早在1980年,就有研究报道显示,贵州桐子坡部分土壤植茶超过十年,土壤pH从5.2下降到4.1^[2];到2012年时,贵州茶园土壤平均pH=4.6^[3];在2020年,颜鹏等^[4]研究表明贵州茶园土壤pH在最适范围4.5~5.5所占比例仅为18.9%,而低于4.5的比例高达78.1%;且贾宽宽^[5]研究发现植茶剖面0~100cm的土层土壤pH平均值变化范围为4.31~4.56。Huang等^[6]研究表明,无人因素干扰下,降低土壤pH 1个单位需要100年左右,可见,植茶大大缩短了其变化的时间,且茶园土壤酸化的问题一直受到学者们的关注。耿赛攀等^[7]研究发现化肥能够快速提供养分供茶树吸收利用,相较于土壤和劳动力的贡献率,施肥对茶叶增产作用的贡献率高达41%。因而茶叶产品市场需求的不断扩大促使了茶农对大量化肥的施用。氮肥的施用被证实可以提升茶叶产量和品质,然而高氮肥量的施用并不能保证其完全供以茶树利用,一般只有30%~35%的利用率,易引起硝酸盐污染和N₂O温室气体排放增加的风险,且会减少茶叶中茶多酚的浓度,影响茶叶质量^[8-10]。加之茶树生物化学循环中的富铝特性和氮素的硝化作用,长期植茶导致土壤酸化严重,对茶园可持续经济效益产生影响^[11],而强酸性的土壤环境会造成土壤板结、盐基养分离子淋失、养分失衡、根系活动减弱、有益微生物群落减少等问题,土壤保肥性能降低,影响茶树养分吸收,导致茶园生态系统服务价值逐年下降^[12-13]。

茶树为喜酸植物,其适宜生长的土壤pH在4.5~6.0的范围内,pH为5.5最为合适,但土壤pH<4.0时,会抑制茶树的正常生长^[11]。为确保贵州茶产业的可持续发展,有必要切实摸清贵州茶叶主产区茶园土壤酸化情况,及酸化茶园土壤养分状况,以便为贵州茶园的高产优质提供科学依据。经文献检索可见,目前国内外针对茶园土壤的酸化的研究,多集中在土壤表层酸化现象,且样本数较少。现以贵州20多个茶园主产区为研究对象,从土壤剖面、相邻自然土等方向着手,系统分析茶园土壤酸化成因,及土壤酸化对土壤养分的影响,探讨贵州茶园土壤剖面酸化特征和影响因素,为贵州茶园发

展管理的优化及茶叶优产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

于2021年3月在贵州省茶叶主产区21个茶园采集样品,根据各茶园整体茶区情况及地形地貌特征选定具有代表性茶园样点,并以相邻林地作为对照,挖掘发育完整的土壤剖面,采样土层深度分别为0~20、20~40、40~60cm。采样时避开土壤表层的枯枝落叶,土样风干后研磨过2mm和0.149mm筛,测定土壤pH、阳离子交换量、盐基离子、交换性酸、有机质以及土壤微量元素等指标。本研究采集茶园和相邻林地共42个剖面,共获得126个土壤样品。

1.2 测定项目与方法

茶园土壤样品分析参照土壤农化分析方法^[14],土壤pH测定采用水浸提电位计法(水土质量比2.5:1);土壤有机质测定采用重铬酸钾外容量法-加热法;土壤全氮测定采用半微量开氏法;土壤碱解氮测定采用碱解扩散法;土壤有效磷测定采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾测定采用NH₄OAc浸提-火焰光度计法;土壤阳离子交换量测定采用1mol/L乙酸铵交换法;土壤交换性Ca²⁺和Mg²⁺测定采用1mol/L乙酸铵交换-原子吸收分光光度法,土壤交换性K⁺和Na⁺测定采用1mol/L乙酸铵交换-火焰光度法;交换性酸采用1mol/LKCl交换-中和滴定法测定,淋洗液消耗的标准NaOH量为交换性酸总量,加入足量的NaF时消耗的碱量为交换性H⁺,两者之差即为交换性Al³⁺;土壤有效态铁、锰、铜、锌采用DTPA-TEA浸提-AAS法。

1.3 数据统计与分析

采用Excel 2020进行数据整理,利用SPSS 26.0进行统计数据分析、差异显著性检验,通过LSD法进行多重比较($\alpha = 0.05$)。利用Origin Lab 2022b作图。不同土壤利用类型土层之间的指标差异性比较采用平均数±标准差进行分析。

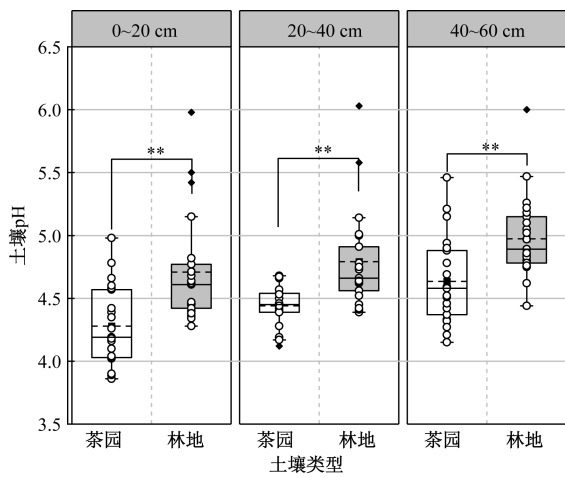
2 结果与分析

2.1 茶园剖面土壤酸化特征

2.1.1 茶园剖面土壤pH变化特征

如图1所示,茶园土壤0~20、20~40、40~

60 cm土层 pH 变化范围分别为 3.86 ~ 4.98 (均值 4.28)、4.12 ~ 4.68 (均值 4.44)、4.15 ~ 5.46 (均值 4.63),pH 随着土层深度增加而升高,0 ~ 20 cm 土层比 40 ~ 60 cm 土层,显著下降 0.35 个单位 ($P < 0.05$)。与林地土壤比较(图 1),茶园 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土层 pH 分别下降 0.43、0.16 和 0.35 个单位,存在显著差异 ($P < 0.05$)。如图 2 所示,以茶树生长下限 pH = 4.5 为界对各土层土壤酸化情况进行统计,结果表明,茶园 pH ≥ 4.5 所占的比例为 28.6% ~ 61.9%,林地占比 52.4% ~ 90.5%;茶园 pH < 4.5 所占的比例为 38.1% ~ 71.4%,林地占比 9.5% ~ 47.6%,表明植茶过后,土壤 pH > 4.5 的比例在逐渐减少,在茶园 0 ~ 20 cm 土层仅占 28.6%;而



方框内实线表示中位数,虚线表示平均值;方框上下限表示 75% 和 25% 的置信区间,盒须上下限表示 90% 和 10% 的置信区间;黑点表示置信区间以外的样本; **表示极显著相关 ($P < 0.01$)

图 1 茶园和林地不同土层土壤剖面 pH

Fig. 1 The box chart of pH in different soil layers in tea plantations and woodlands

pH < 4.5 所占的比例则逐渐增加,在茶园 0 ~ 20 cm 土层中占比高达 71.4%。总体来说,说明茶园土壤酸化趋势明显,随着土层深度的增加,呈现出整体强酸性的变化特征,存在严重的酸化现象。

2.1.2 茶园土壤剖面交换性酸(交换性 Al^{3+} 、交换性 H^+)变化情况

由表 1 可见,茶园土壤中交换性酸(exchangeable acid, EA),含量为 8.28 ~ 10.25 $cmol/kg$,包括交换性 H^+ (exchangeable H^+ , EH^+)和交换性 Al^{3+} (exchangeable Al^{3+} , EAl^{3+}),平均含量分别为 0.48 ~ 0.81、7.80 ~ 9.44 $cmol/kg$,均随着土层深度增加逐渐降低。与林地土壤比较,茶园各土层土壤 EA 和 EAl^{3+} 虽有所增加却无显著性差异,而土壤 EH^+ 存在显著差异,茶园 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层比林地土壤显著减少了 45.7% 和 55.6% ($P < 0.05$)。

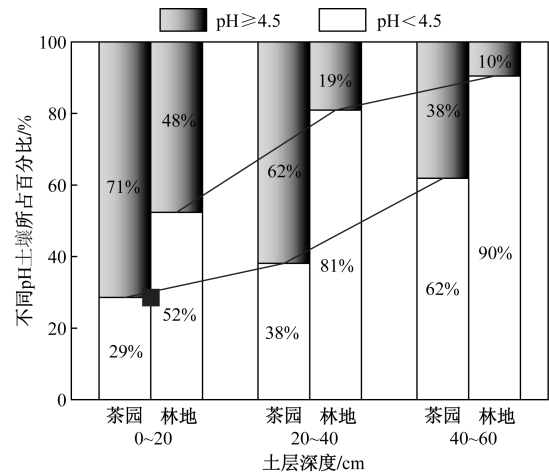


图 2 茶园和林地不同土层土壤 pH ≥ 4.5 或 pH < 4.5 的酸化所占百分比

Fig. 2 Percentage of acidification in different soil layers of tea plantations and woodlands with soil pH ≥ 4.5 or pH < 4.5

表 1 茶园和林地土壤剖面 EA、 EAl^{3+} 、 EH^+ 含量

Table 1 EA、 EAl^{3+} 、 EH^+ content of tea plantation and woodland

土壤类型	土层深度/cm	项目	EA/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)		EH^+		EAl^{3+}	
			含量/($cmol \cdot kg^{-1}$)	氢离子比例/%	含量/($cmol \cdot kg^{-1}$)	铝离子比例/%		
茶园	0 ~ 20	平均值	10.25 ± 3.71 ^a	0.81 ± 0.30 ^{ab}	8.8 ± 3.85 ^a	9.44 ± 3.74 ^a	91.2 ± 3.74 ^a	
		变化范围	5.00 ~ 18.50	0.30 ~ 1.40	2.6 ~ 16.1	4.51 ~ 17.90	83.9 ~ 97.5	
	20 ~ 40	平均值	8.49 ± 3.79 ^a	0.57 ± 0.35 ^b	7.70 ± 4.48 ^a	7.92 ± 3.68 ^a	92.30 ± 4.48 ^a	
		变化范围	2.36 ~ 15.76	0.20 ~ 1.77	2.7 ~ 16.5	1.97 ~ 14.76	83.5 ~ 97.3	
	40 ~ 60	平均值	8.28 ± 4.52 ^a	0.48 ± 0.42 ^b	11.60 ± 4.60 ^a	7.80 ± 4.71 ^a	88.40 ± 4.72 ^{ab}	
		变化范围	0.59 ~ 20.90	0.19 ~ 2.17	1.6 ~ 85.4	0.20 ~ 20.40	14.6 ~ 98.4	
林地	0 ~ 20	平均值	9.95 ± 6.25 ^a	0.75 ± 0.37 ^{ab}	18.70 ± 5.86 ^a	9.20 ± 6.38 ^a	81.30 ± 5.86 ^{abc}	
		变化范围	0.59 ~ 23.50	0.29 ~ 1.53	2.0 ~ 100.0	0.00 ~ 22.80	0.0 ~ 98.0	
	20 ~ 40	平均值	8.34 ± 5.17 ^a	1.05 ± 1.09 ^a	26.90 ± 7.56 ^a	7.28 ± 5.69 ^a	73.10 ± 7.56 ^c	
		变化范围	0.69 ~ 19.10	0.20 ~ 4.10	1.7 ~ 100.0	0.00 ~ 18.60	0.0 ~ 98.3	
	40 ~ 60	平均值	8.36 ± 5.57 ^a	1.08 ± 1.33 ^a	26.80 ± 7.60 ^a	7.28 ± 6.09 ^a	73.40 ± 7.60 ^{bc}	
		变化范围	0.30 ~ 23.70	0.10 ~ 4.70	1.0 ~ 100.0	0.00 ~ 23.20	0.0 ~ 99.0	

注:表中数据为平均值 ± 标准差,不同的小写字母表示同一列中不同土层之间的显著性差异 ($P < 0.05$)。

从 EAl^{3+} 和 EH^+ 占 EA 比例 (EAl^{3+}/EA 、 EH^+/EA) 来看,茶园各土层 EH^+/EA 、 EAl^{3+}/EA 平均范围分别在 7.7% ~ 11.6%、88.4% ~ 92.3%,前者与林地土壤之间无显著差异,而 EAl^{3+}/EA 在 20 ~ 40 cm 土层比林地显著高出 19.2%。

从图 3 可以看出,茶园土壤 EAl^{3+} 的含量随着 EA 含量的增加而增加,呈显著的线性关系 ($y = 0.9902x - 0.5321$, $R^2 = 0.9912$, $n = 63$; 其中 y 代表 EAl^{3+} 含量; x 代表 EA 含量),而 EH^+ 则在一个恒定范围 0.19 ~ 2.17 cmol/kg 变化,茶园土壤 EA 以 EAl^{3+} 占主要优势, EAl^{3+} 的变化影响着 EA 含量。综上所述,植茶会促进 EA 的产生,以 EAl^{3+} 为主体,且显著增加 EAl^{3+}/EA 的占比,茶园土壤酸度与 EAl^{3+} 之间存在紧密联系。

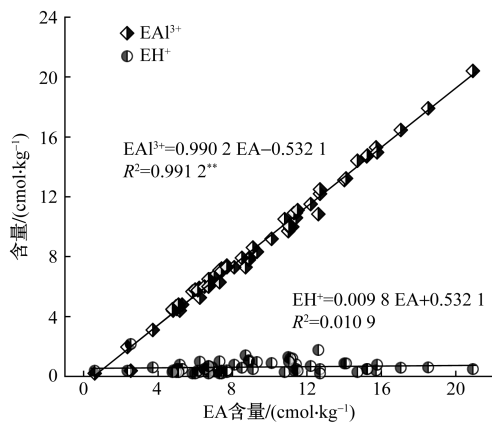


图 3 茶园土壤 EAl^{3+} 、 H^+ 与 EA 的关系

Fig. 3 Relationship between EAl^{3+} , EH^+ and EA in tea plantation soils

2.2 茶园土壤剖面阳离子交换量和盐基离子

由表 2 可知,茶园 3 个土层土壤阳离子交换量 (cation exchange capacity, CEC) 平均含量在 15.67 ~ 21.44 cmol/kg,与林地比较,茶园土壤 CEC 有下降趋势,在 20 ~ 40 cm 土层最大程度减少 10.6%。茶园 3 个土层交换性钾离子平均含量在 0.14 ~ 0.36 cmol/kg,轻微增加,无显著变化,钠离子则没有明显变化规律。茶园 3 个土层土壤交换性钙、镁

平均含量分别为 0.68 ~ 1.25、0.26 ~ 0.48 cmol/kg,相较于林地土壤,茶园土壤交换性钙、镁含量在 0 ~ 20 cm 土层下降最多,分别减少 34.6%、32.4%,但差异不显著。总体来说,植茶后,茶园土壤交换性钾和钠含量会有所增加,而土壤 CEC、交换性钙和镁含量则会减少,且从上层至底层土壤呈现“V”字形“高低高”的变化。

2.3 茶园土壤剖面养分变化情况

2.3.1 植茶后土壤剖面有机质、全氮及有效态大量元素

如图 4 所示,茶园土壤有机质 (soil organic matter, SOM)、全氮 (total nitrogen, TN) 和碱解氮 (soil alkaline hydrolyzable nitrogen, SAN) 平均含量变化范围分别为 9.86 ~ 54.01、1.05 ~ 2.63、40.71 ~ 202.95 mg/kg,与林地土壤比较,茶园土壤酸化后有机质含量比林地低,但无显著性差异。茶园土壤全氮和碱解氮则呈相反变化,其中,在 20 ~ 40 cm 土层中茶园土壤全氮含量显著高于林地 ($P < 0.05$),高出 43.8%,并且茶园 0 ~ 20 cm 土层中全氮、碱解氮含量较 20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土层分别明显增长了 29.7% ~ 60.1%、61.5% ~ 79.9% ($P < 0.05$)。茶园 3 个土层土壤有效磷 (available phosphorus, AP) 和速效钾 (available potassium, AK) 平均含量分别在 2.22 ~ 22.9、65.86 ~ 177.31 mg/kg。相对于林地,茶园土壤各土层有效磷和速效钾含量均高于林地各土层,其中在 0 ~ 20 cm 土层中有效磷显著高出林地 18.53 mg/kg ($P < 0.05$),而速效钾无明显差异。

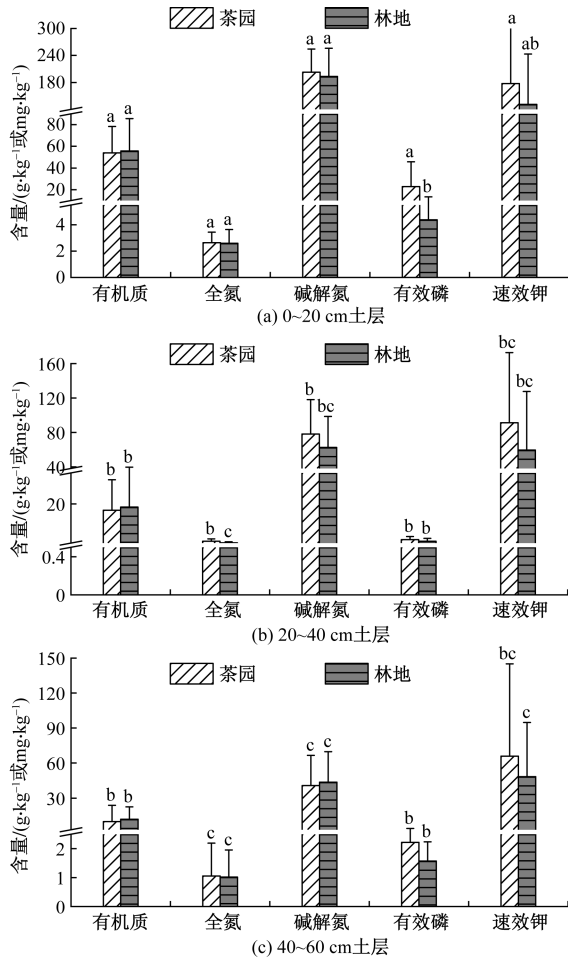
如图 5 所示,当土壤 pH 低于茶树适宜生长的 pH (4.5 ~ 6.0) 时,在 0 ~ 20 cm 土层中,茶园土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾的含量均在 pH < 4.5 后,呈下降趋势,但随着土层深度的加深,除有机质和有效磷 20 ~ 40 cm 土层有所下降外,其余养分均呈现出增加的变化趋势。总体来说,茶园土壤有机质、全氮及有效态大量元素等养分均有表聚特征,然而植茶后,未促进有机质的积累,并且随着土壤的强烈酸化,土壤其他养分在表层流失,并且

表 2 茶园土壤交换性盐基离子含量平均值统计

Table 2 Statistics on the mean content of exchangeable salt-based ions in tea plantations

土壤类型	土层/cm	含量/(cmol·kg ⁻¹)				
		CEC	交换性钾	交换性钠	交换性钙	交换性镁
茶园	0 ~ 20	21.44 ± 7.29 ^a	0.36 ± 0.27 ^a	0.21 ± 0.09 ^a	1.25 ± 1.46 ^{ab}	0.46 ± 0.42 ^{ab}
	20 ~ 40	15.63 ± 6.1 ^b	0.21 ± 0.18 ^{bc}	0.21 ± 0.08 ^a	0.68 ± 0.57 ^b	0.26 ± 0.22 ^b
	40 ~ 60	15.67 ± 6.42 ^b	0.14 ± 0.11 ^c	0.19 ± 0.06 ^a	1.04 ± 0.99 ^{ab}	0.48 ± 0.49 ^{ab}
林地	0 ~ 20	21.63 ± 7.13 ^a	0.28 ± 0.22 ^{ab}	0.22 ± 0.09 ^a	1.91 ± 2.49 ^a	0.68 ± 0.63 ^a
	20 ~ 40	17.48 ± 8.5 ^{ab}	0.14 ± 0.13 ^c	0.19 ± 0.06 ^a	0.89 ± 2.11 ^{ab}	0.43 ± 0.63 ^{ab}
	40 ~ 60	17.22 ± 9.38 ^{ab}	0.12 ± 0.11 ^c	0.17 ± 0.06 ^a	1.23 ± 2.46 ^{ab}	0.69 ± 0.96 ^a

注:表中数据为平均值 ± 标准差,不同的小写字母表示同一列中不同土层之间的显著性差异 ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示同一指标不同土层之间的显著性差异 ($P < 0.05$) ; 有机质、全氮的含量单位为 g/kg, 碱解氮、有效磷和速效钾的单位为 mg/kg

图 4 植茶后土壤剖面有机质及有效态大量养分含量
Fig. 4 Contents of soil organic matter and available nutrients between layers after tea planting

在次表土层和底土层土壤中累积。

2.3.2 植茶后土壤剖面有效态微量元素

如图 6 所示, 茶园 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤有效铁 (available iron, A-Fe) 含量平均值分别为 122.67、18.35、9.15 mg/kg, 土壤有效锰 (available manganese, A-Mn) 平均含量分别为 20.12、18.87、6.77 mg/kg; 与林地比较, 茶园土壤有效铁含量在 0~20 cm 土层中比林地增加了 30.8%, 在 20~40 cm 土层下降了 7.7%, 而锰变化则与之相反, 均无显著差异。茶园各土层土壤有效铜 (available copper, A-Cu)、有效锌 (available zinc, A-Zn) 平均含量分别在 0.22~0.68、0.21~1.07 mg/kg。相较于林地土壤, 茶园有效铜含量在 0~20、20~40 cm 土层分别下降了 0.15 mg/kg 和 0.55 mg/kg, 在 40~60 cm 土层增加了 0.17 mg/kg, 有效锌在 0~20 cm 土层比林地下降了 0.12 mg/kg,

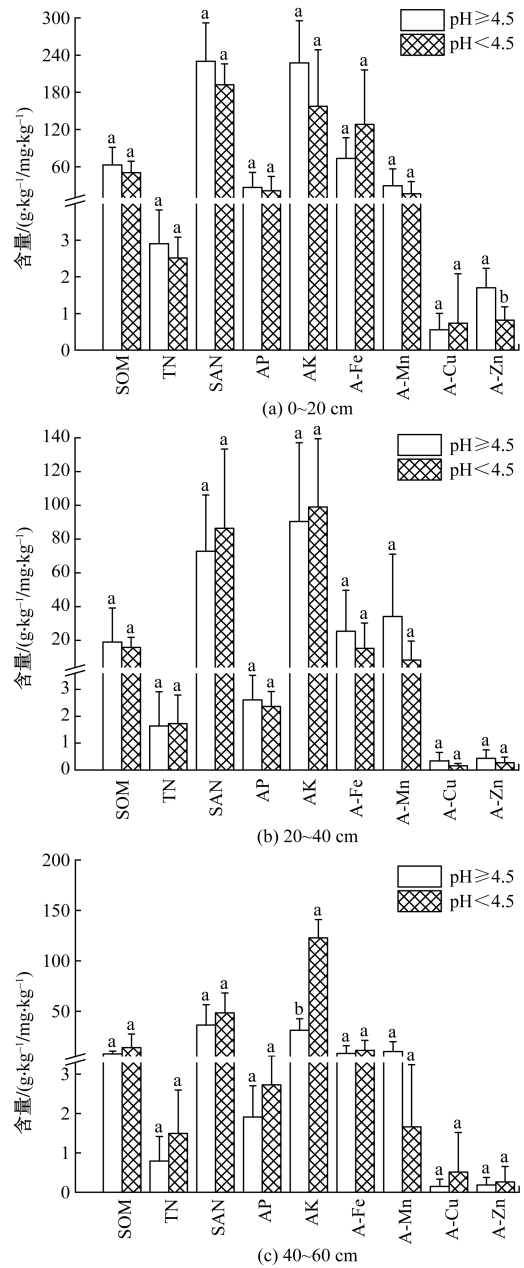


图 5 植茶后 pH ≥ 4.5 和 pH < 4.5 的剖面土壤养分含量

Fig. 5 Contents of soil nutrients between profiles with pH ≥ 4.5 and pH < 4.5 after tea planting

但在 20~40 cm 和 40~60 cm 中相比林地轻微增加。当茶园土壤 pH < 4.5 后 (图 5), 土壤有效铁和有效铜含量随土层深度增加先升后降, 而有效锰和有效锌则是先降后升。整体而言, 尽管茶园剖面土壤各有效态微量元素无显著性变化, 但植茶后茶园土壤酸化, 促进了有效铁产生。

2.4 茶园土壤酸化的影响因素

2.4.1 茶园土壤 pH 与交换性酸 (Al^{3+} 、 H^{+})、交换性盐基离子的关系

根据土壤酸度理论, 土壤 pH 代表着活性酸的

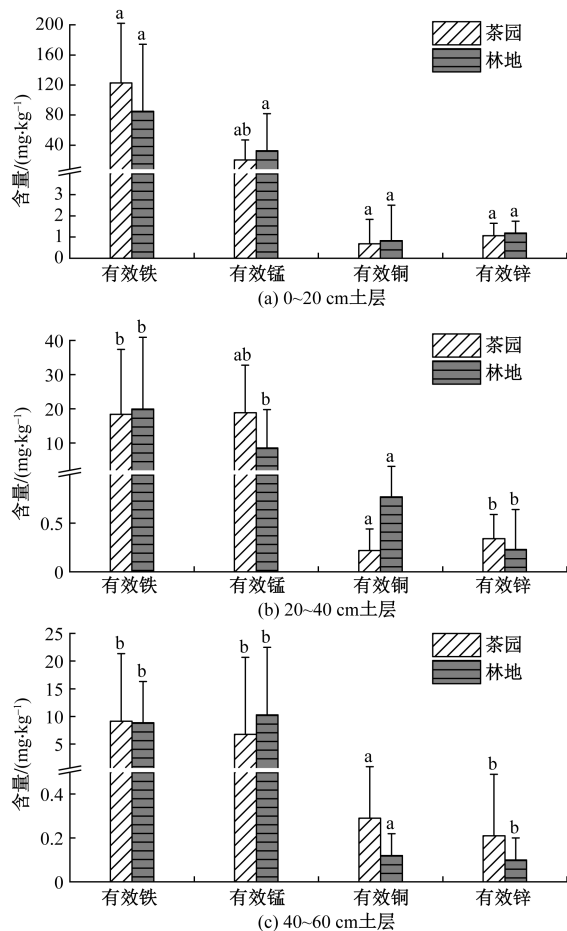
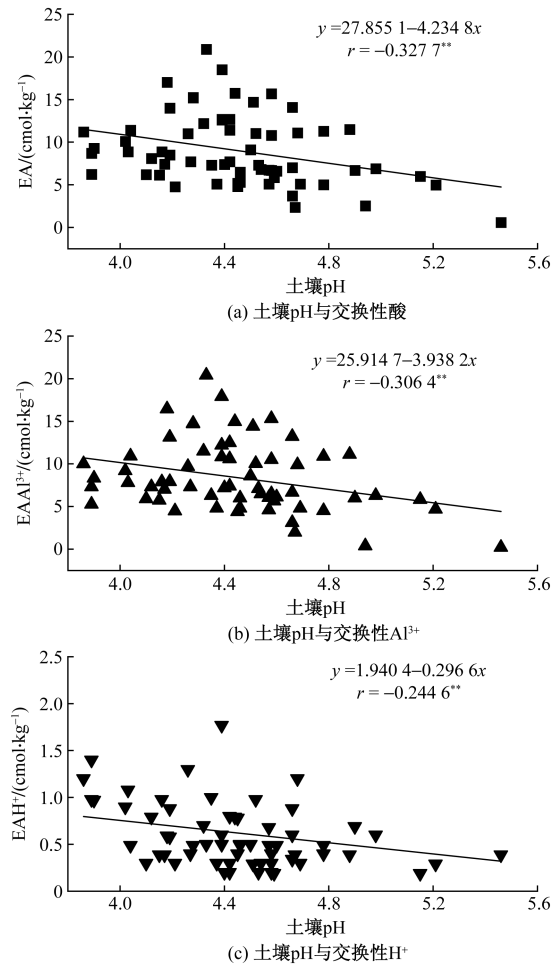


图6 植茶后土壤剖面有效态微量元素含量

Fig. 6 Contents of difference in effective state trace elements in the soil profile after tea planting

强度,其取决于土壤溶液中 H^+ 的数量;土壤潜性酸分为交换性酸和非交换性酸,交换性酸是指吸附在土壤胶体表面的交换性致酸离子 (Al^{3+} 、 H^+) 的数量。如图 7 所示,对茶园土壤 pH 与交换性酸 (Al^{3+} 、 H^+) 之间关系进行相关性分析,结果表明茶园土壤 pH 与交换性酸、交换性 Al^{3+} 呈极显著负相关 ($r_{EA} = -0.3277^{**}$, $r_{Al} = -0.3064^{**}$, $n = 63$),但与交换性 H^+ 之间无显著相关性,说明茶园土壤 pH 主要受到交换性酸的制约,而交换性 Al^{3+} 在交换性酸中占据主导优势,表明茶园土壤酸化与交换性铝有着密切关系。

对茶园土壤 pH 与盐基饱和度 (base saturation, BS)、交换性酸占阳离子交换量比例 (EA/CEC) 的关系进行方程拟合 (图 8),土壤 pH 与 BS ($r = 0.6448^{**}$)、EA/CEC ($r = 0.5010^{**}$) 之间符合二阶多项式非线性回归相关关系。当 $pH > 5.2$, BS 对土壤 pH 起主要作用,而低于 5.2 后,土壤 pH 变化主要受到交换性酸的制约,且当 $pH < 4.5$ 时, EA/CEC 呈上升趋势,在高于 4.5 后近似呈直线下

图7 茶园土壤 pH 与交换性酸 (EA^{3+} 、 EH^+) 的关系Fig. 7 Relationship between soil pH and exchangeable acids (EA^{3+} , EH^+) in tea plantations

降,在 pH 接近 5.5 时交换性酸含量趋近于零。进一步对茶园土壤 pH 与盐基离子进行相关性分析,结果表明土壤 pH 与交换性钾、钠不存在显著相关性,而与交换性钙、镁之间存在极显著正相关关系 ($r_{Ca} = 0.4833^{**}$, $r_{Mg} = 0.4614^{**}$, $n = 63$)。总体而言,茶园土壤酸度受到 BS、EA/CEC 的重要影响,在 $pH < 5.2$ 时,尤其是低于适宜茶树生长的 pH (4.5) 后,主要受到交换性酸的影响;而 $pH > 5.2$ 后,主要受到 BS 的影响,且主要取决于钙镁离子含量高低。

2.4.2 茶园土壤 pH 与土壤养分的相关性

如图 9 所示,对茶园土壤 pH 与土壤养分进行相关性分析,结果表明土壤 pH 受不同土壤养分含量的影响各异。茶园土壤 pH 与全氮、碱解氮、有效磷、有效铁与土壤 pH 呈现显著或者极显著的负相关性,它们随着 pH 的升高或降低而下降或上升,而有机质、速效钾、有效锰、有效铜、有效锌以及阳离子交换量等养分与 pH 并无直接的关系。

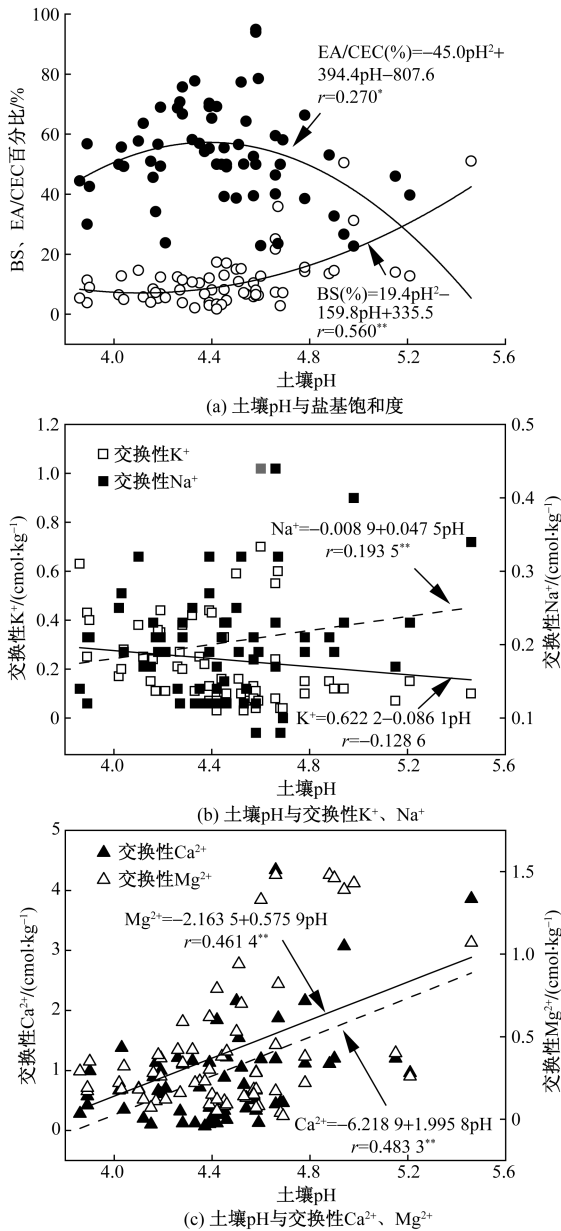


图8 茶园土壤 pH 与盐基饱和度、交换性盐基离子的关系
Fig. 8 Relationship between soil pH and exchangeable salt-based ions and base saturation in tea plantations

基于茶园土壤 pH 相关性达显著或极显著水平的全氮、碱解氮、有效磷、有效铁、交换性钙、交换性镁、交换性酸、交换性铝等指标作为自变量, 以 pH 为因变量进行逐步回归分析, 定量分析各指标对茶园土壤 pH 变化的综合解释能力。逐步回归分析结果如表 3 可见, 交换性钙对 pH 变化的影响最大, 能够独立解释其变量的 22.3%, 其次是碱解氮、交换性镁、交换性酸和交换性铝对 pH 的累计解释能力达 55.6%。综上, 茶园土壤 pH 变化是多个因子共同作用的结果, 碱解氮、交换性酸和交换性铝是茶园土壤的主要致酸因子, 而交换性钙和交换性镁是茶园土壤酸化的控制因子。

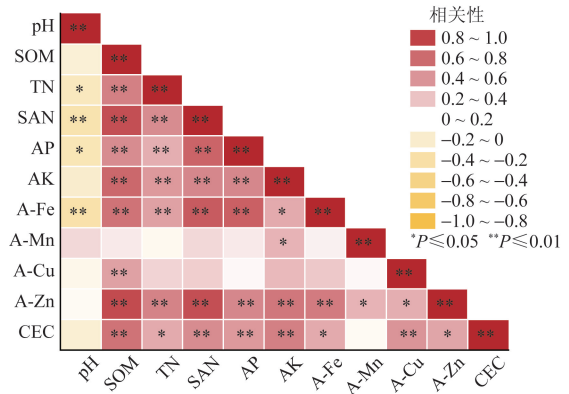


图9 茶园土壤 pH 与土壤养分的相关性分析
Fig. 9 Correlation analysis of soil pH and soil nutrients in tea plantations

表3 各因素与茶园土壤 pH 的逐步回归分析结果
Table 3 Results of stepwise regression analysis of factors and soil pH in tea plantations

回归模型	变量	R ²	调整后 R ²
模型 1	交换性钙	0.223	0.211
模型 2	交换性钙、碱解氮	0.370	0.349
模型 3	交换性钙、碱解氮、交换性镁	0.420	0.390
模型 4	交换性钙、碱解氮、交换性镁、交换性酸	0.476	0.440
模型 5	碱解氮、交换性镁、交换性酸	0.452	0.424
模型 6	碱解氮、交换性镁、交换性酸、交换性铝	0.513	0.479
模型 7	碱解氮、交换性镁、交换性酸、交换性铝、交换性钙	0.551	0.512

3 讨论

3.1 茶园土壤酸化特征

茶树是典型喜酸作物, 宜生长在 pH 为 4.5 ~ 5.5 的土壤, 尽管茶树喜酸, 但并非越酸越好, 当土壤 pH < 4.5 时, 茶园土壤严重酸化, 茶树生长受限, 茶叶产量和品质随之下降^[15-17, 7]。本研究结果表明种植茶树对土壤 pH 有重要影响, 尤其是对茶园 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层有显著作用。既往颜鹏等^[4]研究表明, 与森林土壤相比, 茶园各土层土壤 pH 显著下降; 林诚等^[18]研究显示由林地转变为茶园后, 茶园表层土壤 pH 平均每年下降 0.031 个单位, 且较于林地, 茶园土壤 pH < 4.5 的样本比例增加了 63.8%。本研究中, 茶园剖面土壤 pH 平均值变化范围为 4.28 ~ 4.63, 通过对比茶园和林地各土层 pH 发现, 茶园各土层土壤 pH 均显著降低, 尤其是 0 ~ 20 cm 土层, 植茶后显著下降了 0.43 个单位, 且 pH < 4.5 的土壤样品比例高达 71.4%, 比林地土壤高出 23.8%。根据《中国土壤》将 pH ≤ 4.5 和 4.5 < pH ≤ 5.5 的土壤分别归类为极强酸性和强酸

性土壤^[19],茶园土壤从底层到表层土壤朝着极强酸化发展。以往研究表明,植茶年限的延长和氮肥的施用会加速酸化^[20]。母媛等^[21]研究发现植茶十年的茶园表层土壤 pH 比植茶三年的茶园平均下降了 0.92 个单位;并且当土壤 pH 介于 4.0~6.0 时,土壤 pH 缓冲容量呈近似直线关系,随着植茶年限的增加而呈下降趋势^[22]。而施用氮肥后硝化作用释放的质子是土壤致酸的主要因素,施氮量越高越促进茶园土壤的酸化^[15,23-24],Qiao 等^[9]研究表明氮肥施用显著降低了土壤 pH 平均 0.45 个单位。因此,相较于自然林地,长期的植茶和高投入的氮肥施用可能引起了茶园土壤整体强酸化的趋势。

本研究中,与自然林地比较,植茶后茶园土壤交换性酸和交换性铝离子含量增加,而交换性氢离子在表层土壤有所增加,却在下层土壤显著减少,且土壤交换性铝占交换性酸的分配比例远高于交换性氢。这可能是由于茶园管理中施入的含氮肥发生铵态氮硝化作用而在 0~20 cm 土层不断产生 H^+ ^[25],但是,在自然条件下,氢质土壤并不稳定,因此随着降雨淋失和和时间推移,部分氢离子在迁移至下层土壤中后,吸附在土粒表面的 H^+ 自发地与矿物晶格表面的铝反应,释放出相当的 Al^{3+} ,也因而交换性铝的分配比例更高^[26]。另一方面,研究表明外源氮肥输入引起的 pH 降低会直接改变土壤-植物的铝循环,茶树吸收铝离子导致其根部释放质子,从而增加土壤酸度^[27]。相关性分析表明,茶园土壤 pH 与交换性酸总量、交换性铝含量呈显著负相关关系,这与刘炳君等^[28]和吴志丹等^[29]研究结果一致,pH 低的土壤铝硅酸盐矿物可以转变为易溶化合物,从而导致交换态铝含量增加^[30]。同时对茶园土壤 pH 与盐基饱和度、交换性酸占阳离子交换量比例的关系进行方程拟合,结果表明土壤 pH 随着盐基饱和度的增加而升高,在 pH 高于 5.2 后,对土壤 pH 起主要作用,进一步对茶园土壤 pH 与盐基离子进行相关性分析,土壤 pH 与交换性钙、镁之间存在极显著正相关,表明茶园土壤 pH 受到盐基饱和度的影响,且主要取决于钙镁离子含量的高低,说明酸化减弱了土壤的保肥能力,导致土壤钙、镁元素的缺乏,这一结果与吴志丹等^[29]、姜冠杰等^[31]研究结果一致。综上所述,土壤 pH 的变化受到交换性铝和钙镁离子含量的影响。

3.2 茶园土壤养分特征

茶园土壤养分决定着茶树生长的优劣。与自然林地比较,植茶过后,茶园土壤 CEC、交换性钙和镁含量逐渐下降。当土壤中酸根积累严重,土壤胶

粒中的钙镁离子不仅被 H^+ 置换,并且加之降雨的淋溶作用,因而导致土壤中钙、镁、钾等交换性盐基离子大量淋失^[32]。茶园土壤各土层有机质含量呈下降趋势,而全氮以及碱解氮含量则与之相反。既往研究表明,中国约有 30% 的茶园存在施肥过量,贵州茶园氮肥用量为 413 kg/hm^2 ,以尿素为主,同时存在过度施用磷、钾肥的情况^[33]。研究表明,C/N 较小时,有利于增强土壤微生物的分解能力,从而促进土壤有效 N 增多;而比值较高时,则由于存在 N 素受限,影响土壤微生物分解能力,促进有机碳的累积^[34]。因此,当存在足够多的氮源时,土壤 C/N 比下降,土壤有机质的矿化速度大于腐殖化^[35],故当茶园土壤中存在大量氮素的时候并不利于有机质的累积与保存。土壤有效磷和速效钾平均含量在茶园 0~20 cm 土层中分别为 22.90、177.31 mg/kg,较林地分别增加了 18.53、45.86 mg/kg;这一结果也比张小琴等^[36]和陈玲等^[37]在 2015 年和 2018 年所调查茶区的土壤有效磷和速效钾平均含量分别高出 3.1 倍和 2.0 倍,表明本次所调查的茶园在施肥管理中提高了对磷钾肥的应用。本研究中,茶园土壤酸化后,土壤有效铁、锰、铜、锌在 0~20 cm 土层富集,并随着土层深度的增加和 pH 升高而逐渐降低。与林地比较,茶园土壤有效铁含量在 0~20 cm 土层中增加了 27.75 mg/kg,同时显著高于茶园 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,说明酸化极大地提高了铁元素的有效性,这与邹庆鹏等^[38]研究结果一致,铁的有效态含量与 pH 呈极显著负相关,但过量的铁会使茶叶品质变差^[39],因此在植茶过程中应当注意土壤酸化引发的铁毒害;然而有效锰、锌、铜不表现出明显变化规律。当茶园土壤 pH < 4.5 后,0~20 cm 土层土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均呈下降趋势,而在 20~40、40~60 cm 土层有所增加;从有效态微量元素来看,除土壤有效锰外,有效铁、有效铜和有效锌含量整体呈现升高的变化趋势,表明强酸化作用下有利于微量元素的溶解和活化。通过相关性分析,茶园土壤全氮、碱解氮、有效磷和茶园土壤 pH 存在显著或极显著的负相关关系,这一结果与柳书俊等^[40]得出的分析一致,林诚等^[18]研究也表明当茶园土壤 pH 下降 1 个单位时,土壤中碱解氮、有效磷养分含量可分别积累 63.92、52.45 mg/kg。总体而言,茶园土壤酸化后改变了土壤养分含量,不利于土壤肥力的保持。研究发现^[41-42],施用土壤调理剂配施有机肥及生物基质肥料等能有效降低茶园土壤活性酸含量,提高土壤保肥能力;因此,可适当增加这类物质的使用来解决茶园土壤酸化问题。

4 结论

通过对比茶园与自然林地各土层土壤 pH 和养分情况,主要得到以下结论。

(1) 贵州典型茶园 0~20、20~40、40~60 cm 3 个土层土壤 pH 在 3.86~5.46,整体呈现出强酸化趋势,其中 0~20 cm 土层土壤酸化(pH 平均值为 4.28)最为严重,有高达 71.4% 的土壤处于极强酸化环境中。土壤交换性酸以交换性 Al^{3+} 占主要优势,交换性 H^+ 则在一个恒定范围 0.19~2.17 cmol/kg 变化。

(2) 茶园土壤养分均有表聚特征,植茶后,有机质、阳离子交换量、钙镁离子含量减少,土壤全氮、碱解氮、速效钾、有效磷以及有效铁养分提高。当 pH<4.5 时,茶园土壤养分在表层土壤流失,并在下层土壤中累积。

(3) 茶园土壤 pH 与交换性铝、全氮、碱解氮、有效磷、有效铁呈显著负相关关系,与交换性钙、交换性镁呈显著正相关性。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [2] 孙继海, 吴子铭. 茶园土壤活性酸度动态、土壤酸化及最适酸度的初步研究[J]. 土壤肥料, 1980(3): 16-23.
Sun Jihai, Wu Ziming. A preliminary study on soil active acidity dynamics, soil acidification and optimum acidity in tea plantations [J]. Soils and Fertilizers, 1980(3): 16-23.
- [3] 赵华富, 周国兰, 刘晓霞, 等. 贵州茶区土壤养分状况综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2012(3): 30-34.
Zhao Huafu, Zhou Guolan, Liu Xiaoxia, et al. Comprehensive evaluation on tea garden soil fertility status of tea planting areas in Guizhou [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012(3): 30-34.
- [4] 颜鹏, 韩文炎, 李鑫, 等. 中国茶园土壤酸化现状与分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(4): 795-813.
Yan Peng, Han Wengyan, Li Xin, et al. Present situation and analysis of soil acidification in Chinese tea garden [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(4): 795-813.
- [5] 贾宽宽. 贵州植茶土壤剖面酸化趋势研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
Jia Kuankuan. Study on soil acidification trend of tea planting in Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [6] Huang P, Zhang J B, Xin X L, et al. Proton accumulation accelerated by heavy chemical nitrogen fertilization and its long-term impact on acidifying rate in a typical arable soil in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(1): 148-157.
- [7] 耿赛攀, 马立锋. 施肥对茶园土壤质量及茶叶产量、品质的影响研究进展[J]. 茶叶学报, 2021, 62(1): 22-29.
Geng Saipan, Ma Lifeng. On soil quality and tea yield/quality affected by fertilizer application [J]. Acta Tea Sinica, 2021, 62(1): 22-29.
- [8] Tang S, Liu Y, Zheng N, et al. Temporal variation in nutrient requirements of tea (Camellia sinensis) in China based on QUEFTS analysis [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1745.
- [9] Qiao C L, Xu B, Han Y T, et al. Synthetic nitrogen fertilizers alter the soil chemistry, production and quality of tea: a meta-analysis [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2018, 38(1): 1-10.
- [10] 金桂梅, 李昱航, 郑向群, 等. 不同土壤管理与施肥模式对茶园土壤环境及茶叶产量的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 152-158.
Jin Guimei, Li Yuhang, Zheng Xiangqun, et al. Effects of different soil management and fertilization patterns on soil condition in tea garden and tea yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 152-158.
- [11] Yan P, Shen C, Fan L, et al. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 254: 20-25.
- [12] Guo H, Chen L, Wang Y, et al. Combined application of biochar and magnesium fertilizer effectively improved the soil environment and the tea quality in southern strongly acidic tea garden [J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(7): 2798-2815.
- [13] 麻万诸, 朱康莹, 卓志清. 酸化对茶园土壤矿物转变及供钾能力的影响[J]. 茶叶科学, 2023, 43(1): 17-26.
Ma Wanzhu, Zhu Kangying, Zhuo Zhiqing. Effects of acidification on mineral transformation and potassium supply capacity of tea garden soils [J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(1): 17-26.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [15] Ye J, Wang Y, Wang Y, et al. Improvement of soil acidification and ammonium nitrogen content in tea plantations by long-term use of organic fertilizer [J]. Plant Biology (Stuttgart, Germany), 2023, 25(6): 994-1008.
- [16] Yan P, Wu L Q, Wang D H, et al. Soil acidification in Chinese tea plantations [J]. Science of the Total Environment, 2020, 715: 136963.
- [17] 陈晓婷, 王裕华, 林立文, 等. 土壤酸度对茶叶产量及品质成分含量的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(1): 260-266.
Chen Xiaoting, Wang Yuhua, Lin Liwen, et al. Effects of soil acidity on tea yield and contents of leave quality components [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(1): 260-266.
- [18] 林诚, 陈子聪, 吴一群, 等. 林地转变为茶园的土壤 pH 及养分变化特征[J]. 茶叶科学, 2020, 40(2): 186-193.
Lin Cheng, Chen Zicong, Wu Yiqun, et al. Acidification characteristics and nutrient contents in soils of tea garden and adjacent woodland in subtropical region [J]. Journal of Tea Science, 2020, 40(2): 186-193.
- [19] 中国科学院南京土壤所. 中国土壤[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1987: 433-438.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Chinese soil [M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 1987: 433-438.

- [20] Jahan I, Shopan J, Rahman M M, et al. Long-term traditional fertilization alters tea garden soil properties and tea leaf quality in bangladesh[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9): 2128.
- [21] 母媛, 袁大刚, 兰永生, 等. 植茶年限对土壤 pH 值、有机质与酚酸含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(4): 44-48.
Mu Yuan, Yuan Dagang, Lan Yongsheng, et al. Effects of tea planting age on soil pH value, contents of organic matter and phenolic acids[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(4): 44-48.
- [22] 苏有健, 王焯军, 张永利, 等. 不同植茶年限茶园土壤 pH 缓冲容量[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2914-2918.
Su Youjian, Wang Yejun, Zhang Yongli, et al. Soil pH buffer capacity of tea garden with different planting years [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2914-2918.
- [23] Hao T, Liu X, Zhu Q, et al. Quantifying drivers of soil acidification in three Chinese cropping systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105230.
- [24] Yang X D, Ni K, Shi Y Z, et al. Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 74-82.
- [25] Cai Z J, Wang B R, Xu M, et al. Nitrification and acidification from urea application in red soil(Ferralsic cambisol) after different long-term fertilization treatments [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14: 1526-1536.
- [26] 何淑勤, 吴雯, 郑子成, 等. 植茶年限对土壤酸度及其团聚体交换性酸分布的影响 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32(2): 317-323.
He Shuqin, Wu Wen, Zhen Zicheng, et al. Effect of tea plantation ages on soil acidification and distribution of exchangeable acidity within soil aggregates [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(2): 317-323.
- [27] Yang X D, Ni K, Shi Y, et al. Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 74-82.
- [28] 刘炳君, 杨扬, 李强, 等. 调节茶园土壤 pH 对土壤养分、酶活性及微生物数量的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(32): 19822-19824.
Liu Bingjun, Yang Yang, Li Qiang, et al. Effects of adjusting pH of tea plantation soil on its soil nutrients, enzyme activity and microorganisms [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(32): 19822-19824.
- [29] 吴志丹, 江福英, 尤志明, 等. 亚热带茶园土壤酸度特征研究——以福建省武夷山市为例 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 181-189.
Wu Zhidan, Jiang Fuying, You Zhiming, et al. Acidic characteristics of subtropical tea garden soil: a case study in Wuyishan city, Fujian [J]. *China Environmental Sciences*, 2016, 36(1): 181-189.
- [30] 张艳萍, 宗良纲, 史艳芙. 茶园土壤 pH 变化对土壤中铝特性的影响 [J]. *土壤*, 2019, 51(4): 746-751.
Zhang Yanping, Zong Lianggang, Shi Yanfu. Effects of soil pH on characteristics of soil Al in tea plantations [J]. *Soils*, 2019, 51(4): 746-751.
- [31] 姜冠杰, 何小林, 刘敏, 等. 江西省主要土地利用方式下土壤酸化现状探究 [J]. *江西农业学报*, 2021, 33(5): 46-55.
Jiang Guanjie, He Xiaolin, Liu Min, et al. Research on current situation of soil acidification under main land use modes in Jiangxi Province [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(5): 46-55.
- [32] 李春培, 李雪, 汪璇, 等. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 258-271.
Li Chunpei, Li Xue, Wang Xuan, et al. Effect of the acidification environment on exchangeable cations and acid buffering capacity of weathering products of purple parent rock [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 258-271.
- [33] 倪康, 廖万有, 伊晓云, 等. 我国茶园施肥现状与减施潜力分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(3): 421-432.
Ni Kang, Liao Wanyou, Yi Xiaoyun, et al. Fertilization status and reduction potential in tea gardens of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 421-432.
- [34] 何绍浪, 林小兵, 黄尚书, 等. 江西省茶叶主产地茶园土壤生态化学计量特征 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(23): 9976-9981.
He Shaolang, Lin Xiaobing, Huang Shangshu, et al. Soil ecological stoichiometry characteristics of main tea gardens in Jiangxi Province, China [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(23): 9976-9981.
- [35] Schipper L, Sparling G. Accumulation of soil organic C and change in C:N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 104: 49-58.
- [36] 张小琴, 陈娟, 高秀兵, 等. 贵州重点茶区茶园土壤 pH 值和主要养分分析 [J]. *西南农业学报*, 2015, 28(1): 286-291.
Zhang Xiaoqin, Chen Juan, Gao Xiubing, et al. Analysis on pH and major soil nutrients of tea gardens in key tea producing areas of Guizhou [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(1): 286-291.
- [37] 陈玲, 田景涛, 侯彦双, 等. 贵州铜仁茶区茶园土壤主要养分调查分析 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(11): 271-275.
Chen Ling, Tian Jingtao, Hou Yanshuang, et al. Investigation and analysis on major soil nutrients contents of tea gardens in tea producing areas of Tongren, Guizhou Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(11): 271-275.
- [38] 邹庆鹏, 金开美, 曹成, 等. 信阳茶区土壤有效态微量元素含量状况 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(3): 975-980.
Zou Qingpeng, Jin Kaimei, Cao Cheng, et al. Available trace elements content in soil of Xinyang tea-producing area [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(3): 975-980.
- [39] 刘小文, 高晓余, 何月秋, 等. 几种微量元素对茶树生理及茶叶品质的影响 [J]. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 162-165.
Liu Xiaowen, Gao Xiaoyu, He Yueqiu, et al. Effect of several trace elements on the tea plant physiological and tea quality [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(6): 162-165.
- [40] 柳书俊, 姚新转, 赵德刚, 等. 湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量评价 [J]. *草业学报*, 2020, 29(11): 33-45.
Liu Shujun, Yao Xinzhan, Zhao Degang, et al. An evaluation of soil nutrient status and balance in Meitan tea plantations [J]. *Practical Science*, 2020, 29(11): 33-45.
- [41] 赵丽芳, 黄鹏武, 陈翰, 等. 土壤调理剂与有机肥配施治理红壤茶园土壤酸化与培育地力的效果 [J]. *浙江农业科学*,

2022, 63(11): 2692-2695.

Zhao Lifang, Huang Pengwu, Chen Han, et al. Application effect of soil conditioner combined with organic fertilizer on soil acidification and soil fertility in tea plangarden [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(11): 2692-2695.

[42] 李昌娟, 杨文浩, 周碧青, 等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养

分及茶叶产质量的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 387-397.

Li Changjuan, Yang Wenhao, Zhou Biqing, et al. Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients, tea output and quality in an acidified tea field [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(2): 387-397.