

花岗岩母岩土壤养分与酸化对儋州橡胶园、果园和桉树林的差异化响应

羊有学¹, 李蕊², 陆智², 陈昊苒², 吴敏^{3,4*}

1. 儋州市农林科学院, 海南儋州 571700; 2. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000; 3. 中国热带农业科学院橡胶研究所/海口市土壤健康与养分资源高效利用重点实验室/农业农村部橡胶树生物学与遗传资源利用重点实验, 海南海口 571101; 4. 农业农村部儋州野外综合科学观测研究站, 海南儋州 571737

摘要: 本研究以海南省儋州市花岗岩母质发育的土壤为研究对象, 比较桉树林、果园和橡胶园 3 种不同土地利用方式下土壤理化性质的特征差异。结果表明: 橡胶园土壤有机质和全氮含量显著高于其他利用方式, 但酸化程度最为严重, 交换性铝含量约为桉树林和果园的 3.06 倍和 3.53 倍。果园土壤有效磷含量显著富集, 分别为橡胶园和桉树林的 5.62 倍和 10.46 倍, 但盐基离子淋失强烈, 阳离子交换量 (CEC) 最低。桉树林土壤各项指标总体处于中等水平。在结构组成方面, 橡胶园土壤以>5 mm 团聚体为主, 结合其最强的酸化程度和最高的交换性铝含量, 表明其>5 mm 团聚体在强酸和高铝环境下稳定性较差。尽管橡胶园 CEC 分别约为桉树林和果园的 2.47 倍和 3.02 倍, 但盐基饱和度极低, 表明保肥能力与实际有效肥力之间存在矛盾。研究初步推断, 橡胶园土壤中高有机质的积累可能与橡胶树凋落物大量输入有关, 而强化酸化与高铝毒现象则可能由持续的氮循环过程所驱动。果园磷富集主要源于长期过量施用磷肥。该研究结果可为热带花岗岩母岩区不同土地利用方式的土壤管理和酸化防控提供依据。

关键词: 儋州; 花岗岩; 土地利用方式; 土壤酸化; 铝毒; 养分

中图分类号: S158 文献标志码: A

Differential Responses of Nutrient Status and Acidification in Granite-derived Soils to Rubber Plantations, Orchards and Eucalyptus Plantations in Danzhou

YANG Youxue¹, LI Rui², LU Zhi², CHEN Haoran², WU Min^{3,4*}

1. Danzhou Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Danzhou, Hainan 571700, China; 2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China; 3. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Haikou Key Laboratory of Soil Health and Efficient Nutrient Utilization / Key Laboratory of Biology and Genetic Resources of Rubber Tree, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Danzhou Comprehensive Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: This study investigated the differences in soil physicochemical properties under three different land-use types, eucalyptus forest, orchard and rubber plantation, developed from granite-derived soils in Danzhou city, Hainan province. The results demonstrated that land use significantly influenced soil nutrient and acidity characteristics: rubber plantation soils showed significantly higher organic matter and total nitrogen content compared to other land uses, but also the most severe acidification with exchangeable aluminum content approximately 3.06 and 3.53 times higher than that in eucalyptus forests and orchards; Orchard soils were characterized by abnormal phosphorus enrichment, with available

收稿日期 2025-08-25; 接受日期 2025-10-21

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630022025002); 中国热带农业科学院国家农业科学中心科技创新团体 (No. CATASCXTD202303); 儋州市 (含洋浦) 2022 年农药化肥减量增效项目 - 推广测土配方施肥技术项目。

作者简介 养有学 (1974—), 男, 大专, 农艺师, 研究方向: 农业技术推广。通信作者 (Corresponding author): *吴敏 (WU Min), E-mail: wuminhainan@sina.com。

phosphorus content about 5.62 and 10.46 times higher than that in rubber plantations and eucalyptus forests, respectively, accompanied by strong base cation leaching and the lowest cation exchange capacity (CEC); Soils in Eucalyptus forests exhibited intermediate properties with relatively milder acidification. In terms of soil structure, rubber plantations were dominated by >5 mm aggregates. Combined with its most severe acidification and highest exchangeable aluminum content, this aggregate distribution pattern may indicate poor stability of large aggregates under strong acid and high aluminum toxicity environments. Although rubber plantation soils had CEC values approximately 2.47 and 3.02 times higher than those in Eucalyptus forests and orchards, respectively, the base saturation was extremely low, reflecting a significant contradiction between nutrient retention capacity and actual fertility availability. This study preliminarily suggests that the accumulation of high organic matter in rubber plantation soils may be associated with substantial litter input from rubber trees, while strong acidification and high aluminum toxicity are likely driven by continuous nitrogen cycling processes. The phosphorus enrichment in orchards primarily results from long-term excessive phosphorus fertilization. These findings provide a scientific basis for soil management and acidification control in tropical granite-derived regions under different land-use types.

Keywords: Danzhou; granite; land use type; soil acidification; aluminum toxicity; nutrient

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.022

土地利用方式对植被-土壤系统的物质循环过程和土壤质量产生深远影响。砖红壤是我国西南热带雨林或季雨林地区的地带性土壤。海南省花岗岩母岩发育的砖红壤占土壤总面积的 46.7%^[1], 位于该省西北部的儋州市 (19°11'~19°52'N, 108°56'~109°46'E) 是该类土壤的典型分布区。近 50 a 来, 该地区橡胶园面积从 39 512 hm² 扩张到 101 175 hm²; 果园种植面积也同步大幅增加^[1-2], 逐渐成为该区最主要的土地利用类型。诸多研究表明, 土地利用方式的改变深刻影响土壤理化性质。例如, 热带森林转为橡胶林后, 土壤 pH、有机碳氮含量等均发生显著变化^[3-5], 而果园经营常导致土壤有效磷富集和钾离子等盐基离子淋失^[6-8]。喀斯特地区不同土地利用方式下土壤养分含量也同样存在差异^[9-10]。除土壤酸度和养分含量外, 不同土地利用方式下土壤团聚体组成存在差异^[11], 天然植被 (如森林) 覆盖通常有利于土壤结构的形成与稳定^[12-14]。然而, 高强度的人工耕作或某些人工林 (如桉树多代连栽) 的经营, 则可能加剧花岗岩红壤的结构退化^[12]。土壤理化性质的差异除受土地利用方式影响外, 也与气候、海拔及成土母质等因素密切相关^[15-17]。

然而, 目前针对热带地区土地利用方式对土壤性质影响的研究仍存在一些不足。首先, 多数研究侧重于单一土地利用类型, 缺乏对桉树林、果园与橡胶园这 3 种典型方式的系统比较; 其次, 土壤酸化、铝毒效应与团聚体稳定性之间的耦合关系尚未得到充分探讨; 此外, 现有研究多集中于表层土壤, 对 0~40 cm 剖面土层的系统性研究

较为缺乏。因此, 本研究以海南省儋州市花岗岩母质发育的土壤为研究对象, 采集桉树林、果园和橡胶园 0~40 cm 土层的土壤样品, 分析其养分含量、酸度指标及团聚体组成, 旨在阐明 3 种土地利用方式下土壤关键理化性质的分异规律, 揭示土地利用方式影响土壤质量的内在机制, 为热带花岗岩母质区的土壤资源管理与酸化防控提供科学依据和实践建议。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样设计

在儋州市 (19°11'~19°52'N, 108°56'~109°46'E) 选取桉树林、果园与橡胶园 3 种典型土地利用方式。所有样地均起源于相同的次生林背景, 后经人为改造为现有利用方式。桉树林已经过 5~6 次砍伐, 常规施肥管理; 果园包括菠萝蜜、椰子、柠檬等多种果树, 均采用常规施肥管理, 磷肥施用量较高; 橡胶园为种植超过 40 a 的二代胶园, 管理过程中氮肥投入较多。所选各样地坡度、坡向、海拔基本一致, 以减少地形因子的干扰。每种利用方式选择有代表性的样地 5~10 个, 桉树林、果园和橡胶园样地分别为 5、7、9 个。在每个样地设置 30 m×30 m 的样方, 在样方内按对角线法或梅花法布设取 5 个采样点, 采样前先清除样点表面的枯枝落叶及其他杂物后, 采集 0~40 cm 土层的土样, 均匀混合后采用四分法按对角线取 1500 g 土样装袋。室内自然风干, 制样待测。

1.2 方法

土壤理化性质测定参照鲁如坤^[18]的方法进

行：土壤团聚体组成测定采用干筛法；有机质含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法；全氮含量测定采用凯氏定氮法；硝态氮和铵态氮含量测定采用 1 mol/L KCl 浸提-流动分析仪；全磷含量测定采用酸溶-钼锑抗比色法；全钾含量测定采用碱溶-火焰光度法；有效磷含量测定采用 Bray I 提取-钼锑抗吸光光度法；速效钾含量测定采用乙酸铵提取-火焰光度法；交换性钾/钙/镁含量测定采用 ICP-OES 法；交换性钠含量测定采用火焰光度法；酸度指标含量测定采用 pH 电位法（土：水=1：2.5）；交换性酸总量测定采用氯化钾交换-中和滴定法；交换性铝含量测定采用 1 mol/L KCl 提取-中和滴定法；阳离子交换量（CEC）测定采用乙酸钠法（pH 8.2）；盐基饱和度（BS）=交换性盐基总量/CEC×100%。

1.3 数据处理

采用 Excel 2020 软件和 IBM SPSS Statistics 27 软件进行试验数据处理与统计，采用单因素方差分析结合 LSD 法进行差异显著性检验（ $P<0.05$ 为差异显著）。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成响应特征

干筛法获得的土壤团聚体组成结果见表 1，土地利用方式的改变显著影响了土壤的结构稳定性。橡胶园的土壤结构与其他 2 种方式存在明显差异。具体而言，橡胶园土壤中>5 mm 粒径的团聚体含量显著高于桉树林和果园（ $P<0.05$ ），分

表 1 不同土地利用方式的土壤团聚体含量
Tab. 1 Soil aggregates content under different land-use practices %

团聚体 Aggregate	桉树林 Eucalyptus for- est	果园 Orchard garden	橡胶园 Rubber plantation
>5.000 mm	20.99±11.68 ^a	29.41±20.98 ^a	53.76±18.70 ^b
3.000~5.000 mm	7.18±5.05 ^a	9.68±5.24 ^a	11.74±3.12 ^a
2.000~3.000 mm	3.26±2.59 ^a	4.82±3.28 ^a	4.19±1.39 ^a
1.000~2.000 mm	11.79±3.22 ^a	13.24±4.42 ^a	10.37±6.02 ^a
0.500~1.000 mm	30.47±15.41 ^a	19.82±10.21 ^{ab}	11.27±7.86 ^b
0.250~1.000 mm	12.86±6.38 ^a	11.32±8.20 ^a	4.70±7.87 ^b
0.053~0.250 mm	12.52±10.12 ^a	11.20±8.14 ^a	3.76±3.23 ^b
<0.053 mm	0.92±0.83 ^a	0.50±0.39 ^a	0.19±0.14 ^b

注：同行不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P<0.05$).

别高出 2.56 倍和 1.83 倍。这表明橡胶园土壤在物理稳定性方面形成了最多的大型结构单元。相反，0.500~1.000 mm、0.250~1.000 mm、0.053~0.250 mm 及<0.053 mm 粒径的团聚体含量在橡胶园中最低，其中 0.500~1.000 mm 粒径团聚体含量仅为桉树林的 36.98%和果园的 56.86%。

2.2 土壤养分指标响应特征

由表 2 可知，土壤养分指标在不同土地利用方式下表现出显著差异。橡胶园土壤有机质含量分别比桉树林和果园高出约 42.24%和 6.97%，全氮含量分别高出约 73.17%和 7.58%。果园土壤有效磷含量显著高于其他 2 种方式（ $P<0.05$ ），分别为橡胶园的 5.62 倍和桉树林的 10.46 倍。其余养分指标在不同土地利用方式间均无显著差异。

表 2 不同土地利用方式的土壤养分含量
Tab. 2 Soil nutrients content in response to different land uses

养分指标 Nutrient index	桉树林 Eucalyptus forest	果园 Orchard garden	橡胶园 Rubber plan- tation
有机质/(g·kg ⁻¹)	12.61±3.22 ^a	16.79±5.39 ^{ab}	17.96±3.69 ^b
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.41±0.07 ^a	0.66±0.25 ^b	0.71±0.20 ^b
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.05±0.03 ^a	0.05±0.04 ^a	0.04±0.01 ^a
全钾/(g·kg ⁻¹)	1.01±1.63 ^a	1.17±1.47 ^a	1.63±0.85 ^a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	75.40±96.05 ^a	51.12±17.64 ^a	65.13±18.71 ^a
铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	4.86±4.11 ^a	5.06±2.68 ^a	6.48±1.77 ^a
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	6.09±2.31 ^a	11.59±5.04 ^a	8.27±6.17 ^a
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	4.19±2.53 ^a	43.82±28.81 ^b	7.80±14.27 ^a
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	18.82±11.01 ^a	35.48±23.35 ^a	28.89±15.71 ^a

注：同行不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 土壤酸度指标响应特征

土壤酸度指标在不同土地利用方式下呈显著差异（表 3）。橡胶园土壤 pH 最低，分别比桉树林和果园低约 0.55 和 0.45 个单位。此外，橡胶园土壤交换性氢离子含量分别为桉树林和果园的 1.86 倍和 3.37 倍，交换性铝离子含量分别为桉树林和果园的 3.06 倍和 3.53 倍。桉树林与果园的酸度指标无显著差异。

2.4 土壤交换盐基及组成响应特征

土壤交换性盐基离子及阳离子交换量在不同土地利用方式下表现出特定的分异特征（表 4）。橡胶园的阳离子交换量显著高于其他 2 种方式

($P<0.05$), 分别为桉树林和果园的 2.47 倍和 3.02 倍。桉树林土壤交换性钠含量显著高于果园和橡胶园 ($P<0.05$), 分别为后二者的 5.31 倍和 7.08 倍。其余盐基离子指标及盐基饱和度在不同土地利用方式间无显著差异。

表 3 不同土地利用方式的土壤酸度
Tab. 3 Soil acidity in response to different land uses

酸度指标 Acidity index	桉树林 Eucalyptus forest	果园 Orchard garden	橡胶园 Rubber plantation
pH	4.91±0.46 ^a	4.81±0.40 ^a	4.36±0.54 ^a
交换性氢离子含量/(cmol·kg ⁻¹)	1.32±1.13 ^a	0.73±0.72 ^a	2.46±0.98 ^b
交换性铝离子含量/(cmol·kg ⁻¹)	6.66±4.73 ^a	5.77±3.98 ^a	20.38±2.17 ^b

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P<0.05$).

表 4 不同土地利用方式的土壤交换性盐基含量
Tab. 4 Soil exchangeable base cations content in response to different land uses

交换性盐基 Exchangeable base cation	桉树林 Eucalyptus forest	果园 Orchard garden	橡胶园 Rubber plantation
交换性钾离子含量/(g·kg ⁻¹)	0.58±0.84 ^a	0.94±0.81 ^a	0.43±0.42 ^b
交换性钠离子含量/(g·kg ⁻¹)	0.85±1.56 ^a	0.16±0.13 ^b	0.12±0.12 ^b
交换性钙离子含量/(g·kg ⁻¹)	0.08±0.04 ^a	0.14±0.08 ^a	0.11±0.07 ^a
交换性镁离子含量/(g·kg ⁻¹)	0.05±0.04 ^a	0.02±0.03 ^a	0.00±0.00 ^a
CEC/(g·kg ⁻¹)	9.52±4.80 ^a	7.78±3.90 ^a	23.51±12.30 ^b
BS/%	17.99±30.68 ^a	23.14±22.05 ^a	9.07±17.10 ^a

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P<0.05$).

3 讨论

本研究揭示了儋州市花岗岩母岩区不同土地利用方式下土壤性质的显著差异, 这些差异反映了人为干扰下土壤质量演变的不同路径和机制。通过与现有研究的对比, 可发现本研究区表现出独特的响应特征, 这些特征既受土地利用方式的强烈影响, 也与区域成土母岩和气候条件密切相关。

3.1 土壤团聚体组成对土地利用方式的响应

研究表明, 土地利用方式显著改变了土壤团聚体组成。橡胶园土壤表现出>5 mm 团聚体含

量显著高于其他 2 种利用方式的特征。这一现象可能与橡胶树庞大的根系分布及其凋落物输入特性有关^[19], 其在成土过程中对土壤结构的塑造作用明显不同于桉树林和果园。然而, 在强酸性和高铝离子浓度的环境中, 大团聚体的稳定性可能受到不利影响^[11, 20]。尽管橡胶园土壤表现出较高的团聚体比例, 但其在酸性环境下的长期稳定性仍需进一步评估。这一发现与 DUAN 等^[21]的研究结果存在部分一致性, 即土地利用类型对土壤团聚体稳定性的影响显著。

3.2 土壤养分含量对土地利用方式的响应

不同土地利用方式下土壤养分含量表现出显著差异。橡胶园土壤具有较高的有机质和全氮含量, 这很可能与橡胶树丰富的凋落物归还及其独特的氮循环特征密切相关^[4, 19]。相比之下, 果园土壤表现出明显的有效磷富集现象, 这归因于果园管理中长期过量施用磷肥^[7-8]。橡胶园土壤具有较高的养分储量, 但在强酸性环境下这些养分的有效性和可利用性将会受到限制^[6], 这体现了养分积累与实际有效性之间的复杂关系。

3.3 土壤酸化特征对土地利用方式的响应

土地利用方式对土壤酸化程度产生了显著影响, 其中橡胶园土壤表现出较为严重的酸化现象。这种强烈的酸化状况可能源于多个因素的共同作用: 一方面, 橡胶树生长过程中的氮循环可能产生酸性物质^[4]; 另一方面, 橡胶园管理措施可能加速了盐基离子的淋失过程^[6, 22]。土壤酸化与铝离子活化之间存在密切的关联性^[20, 22], 本研究表明, 随着酸化程度的加剧, 交换性铝离子含量也相应增加, 这种协同效应可能对植物生长和土壤生态系统健康产生重要影响。

3.4 土壤交换性能对土地利用方式的响应

本研究发现, 不同土地利用方式显著影响土壤的阳离子交换性能。橡胶园土壤表现出较高的阳离子交换量, 表明其具有相对较强的养分保持潜力。然而, 其盐基饱和度却处于较低水平, 这一矛盾现象揭示了土壤保肥能力与实际肥力状况之间的不一致性^[6]。造成这种情况的主要原因可能是在强酸性环境下, 大量的交换位点被氢离子和铝离子所占据^[20, 22], 从而限制了土壤中盐基离子的保持。

3.5 土地利用方式对土壤性质影响的综合机制

综合分析表明, 土地利用方式通过改变植被类型、凋落物特性和管理措施等途径, 综合影响

土壤理化性质。本研究发现, 橡胶园土壤表现出最强的酸化特征 (pH 4.36) 和最高的交换性铝含量 (20.38 cmol/kg), 这与橡胶树的特殊生态系统过程密切相关^[4]。果园土壤的有效磷显著富集 (43.82 mg/kg), 反映了长期过量施用磷肥对土壤养分状况的明显影响^[7]。

与喀斯特地区相比^[9-10], 花岗岩母质土壤对土地利用方式变化的响应表现出独特特征。石灰岩母质土壤通常具有较高的盐基饱和度, 而本研究区 3 种土地利用方式下土壤均表现出较强的酸化趋势和较低的盐基饱和度, 体现了成土母质的基础控制作用。

基于研究结果, 建议采取差异化土壤管理措施: 橡胶园重点防控土壤酸化和铝毒, 果园需优化磷肥管理并补充盐基离子, 桉树林则可作为区域生态可持续管理的参考。这些建议为热带花岗岩母质区的土壤可持续利用提供科学依据。

4 结论

土地利用方式显著影响儋州花岗岩母质土壤的理化性质。橡胶园呈现高有机质、高氮与强酸化、高铝毒的特征; 果园以有效磷富集和盐基淋失为特点; 桉树林各项指标总体居中。橡胶园土壤以大团聚体为主, 但在强酸和高铝环境下结构稳定性可能降低, 养分保持能力与实际有效肥力之间存在矛盾。果园磷富集主要与长期过量施磷有关, 而橡胶园强酸化可能与氮循环驱动的盐基离子耗竭相关。本研究基于空间采样数据, 缺乏长期定位观测, 对土壤性质动态演变过程的揭示仍显不足。未来需结合长期田间试验, 从微生物机制和元素循环过程等维度, 深入解析土地利用方式影响土壤质量的内在机理。

参考文献

- [1] 龚子同, 张甘霖, 漆智平. 海南岛土系概论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 3-17.
GONG Z T, ZHANG G L, QI Z P. Overview of the soil series in Hainan island[M]. Beijing: Science Press, 2004: 3-17. (in Chinese)
- [2] 海南省统计局. 海南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
Hainan Provincial Bureau of Statistics. Hainan statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024. (in Chinese)
- [3] LUO J, CHEN Y P, ZHONG L S, SHI L L, ZHANG X. Litter stoichiometric traits drive differences in soil organic carbon stability between rubber plantations and natural secondary forests[J]. Forest Ecology and Management, 2025(596): 1-9.
- [4] 张敏, 邹晓明. 热带季节雨林与人工橡胶林土壤碳氮比较[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1013-1019.
ZHANG M, ZOU X M. Comparison of soil C and N in rubber plantation and seasonal rain forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1013-1019. (in Chinese)
- [5] 薛欣欣, 吴小平, 罗微, 魏云霞, 罗雪华, 王文斌, 王大鹏, 张永发, 赵春梅. 橡胶凋落叶覆盖对胶园土壤部分理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 301-306.
XUE X X, WU X P, LUO W, WEI Y X, LUO X H, WANG W B, WANG D P, ZHANG Y F, ZHAO C M. Effects of leaf litter decomposition on soil partial physicochemical properties in the rubber plantation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 301-306. (in Chinese)
- [6] 文慧颖, 吴华勇, 董岳, 冯文娟, 卢瑛, 胡月明, 张甘霖. 不同土地利用方式下亚热带赤红壤酸化特征[J]. 土壤, 2023, 55(2): 372-378.
WEN H Y, WU H Y, DONG Y, FENG W J, LU Y, HU Y M, ZHANG G L. Acidification characteristics of lateritic red soil under different land use types in typical subtropical region[J]. Soils, 2023, 55(2): 372-378. (in Chinese)
- [7] 何翠翠, 冯焕德, 魏志远, 侯宪文, 陈业渊. 海南岛芒果园施肥现状调查及土壤养分状况分析[J]. 热带作物学报, 2018, 39(12): 2336-2342.
HE C C, FENG H D, WEI Z Y, HOU X W, CHEN Y Y. Investigation of current situation of fertilization and analysis of soil nutrients of mango orchard in Hainan island[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(12): 2336-2342. (in Chinese)
- [8] 方渝. 云霄县耕地及枇杷园土壤主要营养障碍与优化施肥研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
FANG Y. Study on the main nutritional disorders and optimal fertilization of cultivated land and loquat orchard in Yunxiao county[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [9] 曾成城, 苏天明, 苏利荣, 秦芳, 李琴, 何铁光, 俞月凤, 张雨, 徐亮, 冯倩. 广西典型喀斯特地区不同土地利用方式土壤养分特征[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 199-203.
ZENG C C, SU T M, SU L R, QIN F, LI Q, HE T G, YU Y F, ZHANG Y, XU L, FENG Q. Soil nutrient characteristics under different land use patterns in typical karst areas of Guangxi[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 199-203. (in Chinese)
- [10] 邹钰峰, 陆晓辉. 典型喀斯特流域不同土地利用类型表层

- 土壤 CNP 化学计量特征及其影响因素[J]. 农业与技术, 2025, 45(10): 76-83.
- ZOU Y F, LU X H. Stoichiometric characteristics of C, N and P in surface soil under different land use types in a typical karst watershed and their influencing factors[J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(10): 76-83. (in Chinese)
- [11] 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3752-3760.
- HE Y, SHENG M Y, WANG K, WANG L J. Effects of land use change on constitution, stability, and C, N, P stoichiometric characteristics of soil aggregates in southwest China karst[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3752-3760. (in Chinese)
- [12] 鲍文, 赖奕卡. 湘中红壤丘陵区不同土地利用类型对土壤特性的影响[J]. 中国水土保持, 2011(10): 47-50.
- BAO W, LAI Y K. Effects of different land use types on soil organic carbon and microbial biomass carbon in the hilly area, central Hunan province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011(10): 47-50. (in Chinese)
- [13] 赵辉, 陈国玉, 解明曙, 赖奕卡. 湖南武水流域不同土地利用类型土壤结构分形特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 993-997.
- ZHAO H, CHEN G Y, XIE M S, LAI Y K. Study on fractal property of red soil structure derived from granite under different land-use types in Hunan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 993-997 (in Chinese)
- [14] QI F, ZHANG R H, LIU X, NIU Y, ZHANG H D, LI H, LI J Z, WANG B Y, ZHANG G C. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 45-51.
- [15] OSKAR B, CEZARY K. Transformation of physicochemical soil properties along a mountain slope due to land management and climate changes—a case study from the Karkonosze Mountains, SW Poland[J]. Catena, 2016, 140: 43-54.
- [16] 王平, 华红莲, 丁智强, 俞小押, 谭小爱, 李玉辉. 海拔梯度及典型土地利用类型对北热带山地土壤有机质和综合肥力的影响[J]. 热带地理, 2023, 43(1): 144-154.
- WANG P, HUA H L, DING Z Q, YU X Y, TAN X A, LI Y H. The effects of altitude and land use on organic matter and integrated fertility of soils in the northern tropics mountain[J]. Tropical Geography, 2023, 43(1): 144-154. (in Chinese)
- [17] THOMAS G, ANNA M H, MUHAMMAD D, BERNHARD B D, YAKOV K A. Soil degradation in oil palm and rubber plantations under land resource scarcity[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016(232): 110-118.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 官丽莉, 周国逸, 张德强, 刘菊秀, 张倩媚. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林凋落物量 20 年动态研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 449-456.
- GUAN L L, ZHOU G Y, ZHANG D Q, LIU J X, ZHANG Q M. Twenty years of litter fall dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghushan forest ecosystem research station[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 449-456. (in Chinese)
- [20] 赵凯丽, 蔡泽江, 王伯仁, 文石林, 周晓阳, 孙楠. 不同母质和植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4818-4826.
- ZHAO K L, CAI Z J, WANG B R, WEN S L, ZHOU X Y, SUN N. Changes in pH and exchangeable acidity at depths of red soils derived from 4 parent materials under 3 vegetations[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4818-4826. (in Chinese)
- [21] DUAN L G, SHENG H, YUAN H, ZHOU Q, LI Z W. Land use conversion and lithology impacts soil aggregate stability in subtropical China[J]. Geoderma, 2021, 389: 1-12.
- [22] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 111-113.
- ZENG X B. Acidification of red soils and its control[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(3): 111-113. (in Chinese)