

橡胶园土壤酸化、危害与调控研究综述

杨继芬^{1,2}, 耿顺军^{1,2}, 施晓玲^{1,2}, 张强皓^{1,2}, 李明谦^{1,2}, 杨春霞^{1,2*}

(1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室, 云南景洪 666100;

2. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

[摘要]天然橡胶是重要工业原料和战略物资, 然而近年来我国植胶区土壤酸化、土壤养分流失已成为最严重的土壤退化问题之一, 制约了天然橡胶产业的发展。文章综述了我国橡胶园土壤酸化现状及造成橡胶园土壤酸化的影响因素、土壤酸化的主要危害与调控措施, 并对未来的研究方向进行了展望, 以为橡胶园酸化土壤改良和土壤可持续利用提供参考。

[关键词]橡胶园; 土壤酸化; 危害; 成因; 改良措施

中图分类号: S794.1; S156.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2026)02-0109-08

Research Progress on Soil Acidification in Rubber Plantations and Its Control

YANG Jifen^{1,2}, GENG Shunjun^{1,2}, SHI Xiaoling^{1,2}, ZHANG Qianghao^{1,2}, LI Mingqian^{1,2}, YANG Chunxia^{1,2*}

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: Natural rubber is an important industrial raw material and strategic resource in national production. However, in recent years, the soil in rubber plantations in China has been severely acidified, resulting in significant loss of soil nutrients, which has become one of the most serious soil degradation problems in the agricultural system and has hindered the development of the rubber industry. This paper mainly reviews the factors affecting soil acidification in rubber plantations, the main hazards of soil acidification, the measures for preventing and controlling soil acidification, and the future research directions of soil acidification. The aim is to provide theoretical support for the improvement of acidified soil in rubber plantations and the sustainable utilization of acidic soil.

Key words: rubber plantations; soil acidification; damage; cause; improvement measures

土壤健康对作物生产和人类福祉至关重要, 然而全球有 33% 的土壤处于高度退化的状态^[1], 其中土壤酸化是土壤退化的一种具体表现形式^[2]。自然因素和人为因素使土壤缓冲能力下降从而导致土壤酸化, 通常伴随着氢离子与土壤胶体表面吸附的阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 等) 发生交换反应, 交换性氢离子的比例增加, 致使盐基离子不饱和, 土壤 pH 值降低。酸化会致土壤中有毒离子释放 (Al^{3+} 、 Mn^{2+} 等), 其中铝毒被认为是酸性土壤限制植物生长的最主要因子, 土壤中铝离子的浓度达到 $0.04 \sim 0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 就会对植物根

系产生严重毒害^[3]。

橡胶林是热区农林经济的重要来源, 具有重要的战略地位和经济价值。橡胶树是典型的热带雨林树种, 我国橡胶树种植主要分布在海南、云南、广东等省份, 这些热区高温高湿, 降雨量大, 加速了土壤中盐基离子流失, 降低土壤酸碱缓冲性能, 加剧土壤酸化^[4], 进而影响了橡胶树的生长、产量和品质。目前橡胶园土壤方面的研究主要集中在施肥和种植模式对胶园土壤肥力的提升上^[5-6], 对土壤酸化改良方面的研究鲜有报道。胶园土壤酸化后, 活性铝、锰的毒害会严

收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 省所热带作物科技创新专项资金 (RF2025); 雨林英才支持计划

作者简介: 杨继芬 (1996—), 女, 研究实习员, 硕士, 研究方向为橡胶园土壤酸化改良。E-mail: 2023894007@qq.com

*通信作者: 杨春霞 (1979—), 女, 研究员, 硕士, 主要从事热区土壤与植物营养研究。E-mail: chunxiayang.student@sina.com

重抑制橡胶树根系生长与功能,降低营养元素有效性,从而制约橡胶园的长期生产力^[7]。为此,本文对我国橡胶园土壤酸化现状和热区土壤酸化因素、酸化主要危害、土壤酸化防治措施等研究进展进行综述,以期改善橡胶园土壤酸化提供参考。

1 橡胶园土壤酸化现状

全球橡胶林种植面积为1 300万hm²,其中东南亚占全球橡胶林面积的84%^[8],热带森林转变为单一橡胶林对环境产生一定的负面影响,其中包括土壤酸化^[9]。大量田间调查与研究证实,相较于原始林地或次生林,植胶后土壤pH值普遍显著降低,酸化态势严峻^[10-11],同时伴随土壤盐基饱和度急剧下降、交换性铝和锰含量显著升高至毒害水平^[12]。

橡胶树是耐酸植物,但其最适宜pH值为4.5~6.5。近年来,我国现有部分橡胶园土壤pH值已低于4.5^[13],橡胶树生长受到影响。何鹏等^[14]基于在海南省不同方位采集的202个胶园土样及现有的天然林土壤数据,发现植胶后胶园土壤pH普遍降低。杨磊等^[10]在海南省阳江农场采集了537个胶园土壤样本,研究发现这些土壤样本pH值为3.86~5.54。对云南省德宏橡胶林地土壤统计分析结果显示,盈江农场、遮放农场、瑞丽农场、畹町农场采样区域的样点土壤pH分布为4.4~5.0^[15]。临沧市3个橡胶园主产区土壤大部分呈强酸性,pH 4.50~5.49的占54.3%^[13]。许心诺等^[11]在海南儋州、乐东、万宁和云南景洪、勐腊及勐仑植胶区共采集了36个橡胶树根际土壤样本,发现雨季、旱季时所采土样pH分别为 4.16 ± 0.31 和 4.47 ± 0.63 。有研究显示:西双版纳景洪农场5种龄级橡胶林样地的土壤pH在2.59~4.47^[16];海南琼中北部大丰农场,研究区域内不同林龄橡胶林样地的土壤pH为4.09~4.63,随着树龄的增加,橡胶园土壤pH显著降低^[17]。李彭怡等^[18]在广东茂名6个胶园采集了384个土样,土壤样本pH范围为3.39~5.49,pH 4.0~5.0的占97.98%。综上资料可见,我国植胶区部分橡胶园土壤酸化较严重。

从全球主要植胶区来看,对天然橡胶的高需求导致橡胶树种植面积不断扩张,种植的持续扩张和树龄增加加速了土壤酸化^[9]。而热带雨林被砍伐种植橡胶树,热带森林转化为橡胶林显著降低了土壤表层pH,交换性钙、镁,有效锌、锰和铁含量^[19]。

2 土壤酸化的主要危害

2.1 对橡胶树生长的影响

土壤酸化后,土壤中的Al³⁺、Fe²⁺、Mn²⁺等金属离子活性增强,这些金属离子产生的毒性是抑制橡胶树生长的主要因素。金属毒性使根在吸收养分和水分方面的效率低下,限制细根的生长,而细根的生长状况与橡胶树的生长和胶乳产量有密切关系^[20]。研究表明,铝的浓度较高会使橡胶树幼苗的细胞膜遭到破坏,细胞膜的流动性和通透性在铝毒的作用下发生改变,加上细胞严重失水,叶片中的可溶性糖不能顺利输送到幼苗根部,造成幼苗根系可溶性糖含量下降^[21],使幼苗生长受阻。盆栽砂培试验发现,高浓度的铝毒处理会造成橡胶树幼苗根尖发黑、变软甚至坏死^[7]。铝元素不仅会在橡胶树幼苗根部大量积累,也会向地上部运输,造成幼苗叶片干枯、黄化和脱落。此外,铝毒会破坏叶绿体细胞的结构和功能,使细胞中的光合色素含量下降。安峰等^[21]研究发现,铝胁迫显著降低了橡胶树幼苗叶片中的叶绿素a含量和叶绿体荧光特性。

2.2 酸化对土壤养分有效性的影响

大中微量元素是橡胶树生长的必需营养元素,对橡胶树的生理代谢、产胶、胶乳的稳定性起着重要作用^[22]。橡胶林土壤酸化一方面使得土壤中的养分形态发生变化,导致某些重要养分的有效性降低,限制了橡胶树对养分的吸收和利用;另一方面可能导致表层土壤交换性钙、镁、钾和钠的流失,从而使土壤中的含量降低^[23]。Liu等^[19]在西双版纳调查与研究表明,研究区域内橡胶园土壤交换性钙、镁,有效锌、锰、铁含量与pH呈正相关,而交换性铝含量与pH呈负相关。针对水稻的研究表明,土壤酸化可使水稻对氮和磷的吸收分别减少21.6%和19.2%,这种营养吸收的

减少归因于过量的 H^+ 流入根细胞的细胞质,降低了细胞内pH值及酶活性,并导致生物自由基的积累^[24]。同时,铝的含量会上升,磷阴离子通过吸附或沉淀被Al固定,导致磷有效性降低^[25]。

2.3 对土壤微生物的影响

土壤微生物作为橡胶园生态系统的主要分解者,在土壤形成、凋落物分解、土壤养分循环等方面发挥着至关重要的作用,是土壤养分供应能力的关键调节者^[26]。真菌和细菌占土壤微生物总量的90%以上^[27],土壤微生物对pH的变化十分敏感,土壤酸化后,细菌相对丰度、多样性降低。相反,在低pH的环境下,真菌表现出较高的多样性和丰度,微生物群落由细菌主导转变为真菌主导^[28]。酸化导致嗜酸性根际有害微生物大量繁殖,易滋生腐霉菌、尖镰孢菌、丝核菌等致病真菌,使得分解有机质及蛋白质的主要微生物类群芽孢杆菌、放线菌等有益微生物数量降低,加重土传病害的发生^[29]。

橡胶园的土传病害主要由真菌主导。例如橡胶园中常见的根部病害是由多种不同的真菌侵害橡胶树根系而引起的一类传染性病害,有红根病、褐根病、黑根病、白根病、臭根病等,病原菌主要为担子菌门和子囊菌门真菌,严重影响橡胶树根系对土壤中养分和水分的吸收,破坏其正常生命活动,降低胶乳产量^[30]。致病真菌持续感染橡胶树,橡胶树叶片也会受到严重影响,如发黄掉落,严重缩短橡胶林的生产寿命。此外,土壤酸化降低了土壤中氨化细菌和固氮细菌的数量,使土壤微生物的氨化作用和硝化作用能力下降,从而影响土壤有机质的分解和土壤碳、氮、磷、硫等养分循环^[19],导致橡胶树根区养分含量偏低,不利于橡胶树根系生长^[31]。

3 土壤酸化的影响因素

3.1 自然因素

自然驱动的土壤酸化是一个非常缓慢的过程,主要受降雨量、矿物风化的影响^[3]。以西双版纳为例,该地属典型的热带季风气候,其土壤是以沉积岩、火成岩和变质岩为主经过长期风化、淋溶、微生物分解等过程后形成的红壤、棕

壤、黄壤等主要土壤类型,由于当地夏季高温多雨,降雨频繁且雨量大,致土壤矿物风化严重,强烈淋溶,土壤中钾、钙、镁等盐基离子大量流失,土壤盐基饱和度和缓冲性能下降,增加了土壤中 H^+ 的饱和度,产生大量交换性酸^[32],导致土壤酸化。

酸雨也会导致土壤酸化,主要是大气中二氧化硫和氮氧化物通过干沉降与湿沉降至地表,与水蒸气反应生成硫酸和硝酸,当酸雨沉降在地表会直接将硫酸根和硝酸根等离子带入土壤,进一步增强土壤酸性。

植被凋落物是导致土壤酸化的另一个自然因素,土壤中的枯枝落叶不能完全降解,在微生物的作用下会产生酸性很强的富里酸和其他有机酸^[33],使土壤pH值降低,从而导致土壤酸化。除此之外,植物根系分泌物中含有 H^+ 和大量低分子量有机酸,如苹果酸、草酸等酸性物质,它们也会增加土壤中 H^+ 浓度,使根际土壤pH值降低,导致土壤酸化。

3.2 人为因素

化肥的过度使用会导致一系列负面的生态环境问题,如土壤板结、养分失衡、土壤酸化、温室气体排放等^[34]。氮肥是作物生长最重要的养分,保障氮肥供应是保证高产的关键,而氮肥的过量施用则被认为是导致全球土壤酸化的重要因素^[35],全球氮素利用率约为50%,意味着50%未消耗的氮肥是土壤酸性的重要来源^[36]。氮素在土壤转化过程中,铵态氮在土壤中发生硝化作用,产生 H^+ ,此外植物吸收铵态氮,将其转化为氨基酸,提升了土壤中 H^+ 的浓度,从而诱导土壤酸化^[37]。

3.3 橡胶园土壤酸化的影响因素

对橡胶园而言,首先所处地区位于热带亚热带,高温多雨的气候背景导致土壤本身存在的盐基离子大量流失,加速土壤酸化。此外,割胶生产的一些措施是导致土壤酸化的一个重要原因。如施用化肥或硫磺粉控制橡胶树白粉病时,氮、硫或其化合物(如二氧化硫和氮氧化物)是土壤酸化的主要驱动因素;刺激割胶会改变橡胶树的生理生化代谢途径,如改变了根系对矿质元素

吸收的量和比例,从而导致土壤酸化^[38]。

橡胶树种植的持续扩张也导致并加速了土壤酸化^[19]。研究显示,热带雨林开垦转变为橡胶园后,土壤主要理化性质退化,包括pH、电导率,土壤有机碳、有效氮、有效磷、总氮和总磷含量降低^[39]。而且,橡胶树生长周期长,长期单一种植,生产管理措施不当会导致土壤养分失衡与酸性积累。橡胶树在生长过程中会消耗大量的钙、镁、钾等盐基养分^[40],割胶也会导致盐基养分随着胶乳流失,从而导致土壤与作物间离子输入一输出失衡,引起土壤酸化^[38]。

根系活动也是影响橡胶园土壤酸化的一个因素。橡胶树根系在吸收养分时,会分泌H⁺以交换吸附在土壤颗粒上的阳离子(如NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺)。这种离子交换过程是导致根际土壤微区酸化的主要原因。另外,土壤微生物和真菌在分解橡胶树枯枝落叶的过程中会分泌有机酸等物质,从而导致土壤酸化^[33]。

4 橡胶园土壤酸化防治措施

4.1 合理施肥

在橡胶园的施肥管理中,人们普遍施用化学氮肥,不注重有机肥的施用。化肥虽然养分含量高,肥效快,但养分单一、肥效短,易污染环境,不能满足橡胶树生长期的养分供应。相反,有机肥养分全面、肥效长、污染小,在土壤培肥及提高作物产量和品质方面发挥着重要作用。施用有机肥还可以增加土壤微生物的数量,特别是固氮菌、氨化菌、硝化菌等有益微生物的数量^[41],微生物活动的增强可提高土壤有机质含量,改善土壤的理化性质,从而提高土壤的吸收性能、缓冲性能和抗逆性能,还能吸附和固定土壤中的酸性阳离子,提高土壤pH,减缓耕地土壤酸化进程。但单施有机肥存在养分含量低、肥效慢等问题,与无机肥配合施用是比较科学的施肥方法,可取长补短,充分发挥其效益。与单施化肥或单施有机肥相比,化肥配施有机肥可维持有机碳库,增强土壤氮、磷、钾的供应能力^[42]。Xu等^[43]在海南琼中乌石农场的施肥研究发现,与单施化肥相比,化肥与有机肥配施显著提高了橡胶园土壤pH,及

全氮、全磷、速效磷、速效钾、铵态氮和硝态氮的含量。可见,合理施肥如有机肥与化肥配施,对提高土壤肥力、缓解土壤酸化具有明显效果。

4.2 改良土壤

4.2.1 施用石灰

施用石灰是改良酸性土壤最传统的方法,石灰含有大量碳酸钙或氢氧化钙,可有效中和过量的氢离子来提高土壤pH,从而减少土壤中铝、铁离子的溶解,降低其对植物根系的毒害效应^[23]。红壤由于其中的盐基离子大量淋失,土壤的物理性状变差,而施用石灰后可促进土壤中团粒结构的形成,增加团聚体的数量,从而改善土壤的物理性状。石灰对土壤微生物的影响也至关重要,可通过改变土壤环境来调节微生物群落结构^[44]。长期施用生石灰会导致土壤板结、养分失衡、返酸等问题,为此,施用生石灰时可与其他改良剂配合施用,以缓解单一施用石灰带来的问题。王真辉等^[45]研究表明,在橡胶园里撒施石灰石粉能改良酸性土壤并且促进橡胶树细根的生长。

4.2.2 施用生物炭

作为一种重要的土壤改良剂,生物炭由多种碳基原料(包括木质生物质、作物秸秆、动物粪便和其他有机废料^[46])通过热解合成,在保持土壤生物健康方面起着重要作用。健康的土壤能保持微生物的生物多样性,有效抑制植物病原体和害虫,循环利用植物生长所需的养分,促进与植物根系的良性共生关系,改善土壤结构以供应水分和养分,最终提高土壤生产力和植物生长。生物炭通过不同途径来保持土壤健康^[47]。首先,生物炭能促进团聚体的形成和稳定,为微生物提供良好的生长环境。其次,生物炭可以通过改变土壤的物理和化学性质来优化土壤生物的生存条件,从而降低污染物的生物有效性。此外,它可以促进养分的缓慢释放和微生物活动^[48]。王海洋等^[49]在江西吉安某烟田的研究表明,单施生物炭或配施其他改良剂均能提高土壤pH。龙杰琦等^[46]发现施用生物炭能提高土壤有机质含量,改善土壤理化性质,改良酸性土壤。林清火等^[50]

通过室内培养,发现基于橡胶园土壤并添加生物炭能显著提高土壤pH和阳离子交换量。此外,吴敏等^[51]通过室内培养也发现添加生物炭后提高了花盆内橡胶园土壤pH,降低土壤交换性酸和交换性铝含量,从而改善土壤酸度条件。

4.2.3 覆盖绿肥

热带地区水热条件丰富,杂草种群扩增与橡胶树争夺养分资源,会抑制橡胶树的生长发育。而使用除草剂不当不仅会造成橡胶树药害,还会使土壤环境遭到破坏,加剧土壤酸化^[52]。绿肥可以有效改善酸性土壤的理化性质并增强土壤肥力和缓冲能力,有效阻控土壤酸化^[53]。绿肥根系能够打破土壤板结层,增加土壤孔隙度,改善土壤通气性和透水性,使得酸性离子更容易被淋洗、中和。绿肥被翻压入土壤后,有机物质会被微生物迅速分解,形成腐殖质和其他有机质成分,增强土壤的抗酸能力^[54]。贺军军等^[55]研究表明,幼龄橡胶园覆盖葛藤提高了土壤pH、有机质和氮含量。原慧芳等^[56]研究发现,山地胶园覆盖绿肥能改善土壤结构,提高土壤pH,缓解土壤酸化。可见,在橡胶园覆盖绿肥能有效缓解土壤酸化。

4.2.4 施用微生物菌剂

微生物菌剂中含有大量活性微生物,可以增加土壤中有益微生物的数量和多样性,促进土壤物质转化和养分吸收,提高酸性土壤的pH。吴林土等^[57]研究表明,微生物菌剂中的芽孢杆菌和木霉菌优化了酸化土壤中微生物群落结构,提高了土壤pH及有机质、速效磷、全氮等含量。Wu等^[58]研究同样表明施用适当的微生物肥显著提高了土壤的有机碳、有效氮、有效磷和有效钾含量,同时增加了土壤的pH和电导率。此外,微生物对土壤团聚体的形成和稳定起着重要作用^[59]。目前微生物菌剂在橡胶园土壤改良上的研究鲜有报道,今后可在此方面进行深入研究。

4.2.5 复合改良

单一改良难以保证改良效果的稳定性和持续性,两种或多种改良剂配施不仅可以弥补单一改良剂的缺点,同时解决酸性土壤肥力低和养分缺

乏等问题,有机-无机改良剂,有机-生物改良剂配合施用是目前最具前景的酸性土壤改良方法^[23]。如秸秆与石灰联合使用,对土壤改良和作物产量提升具有明显效果^[60]。生物质灰、骨粉、碱渣配合施用使土壤pH显著提高0.63~1.37,且土壤交换性钾、钙、镁及有效磷含量显著提高^[61]。有机-生物改良剂联合施用效果显著,表现出良好的互补性,一方面微生物加速了有机物分解以及养分的释放,另一方面,有机物为微生物提供了丰富的碳源进而提高菌种的存活率^[62]。谢军等^[63]通过盆栽试验发现有机肥与生物炭联合使用显著提高了柠檬根际土壤pH、全氮含量、氮磷比。木丽远等^[64]通过盆栽试验发现生物炭配施有机肥显著提高了月季根际土壤pH、有机质含量和土壤碳氮比。在海南琼中乌石农场有机肥替代化肥的试验表明,50%化学氮肥+50%有机肥能显著提高橡胶园土壤pH及养分含量^[65]。此外,在中国热带农业科学院试验场的土壤改良试验表明:15%生物炭+橡胶树专用肥显著提高胶园土壤pH^[66];水溶性有机肥+铁锰氧化菌剂+硅硼肥能显著提升橡胶园土壤pH^[67]。

预防土壤酸化的技术在不断发展。研发新型肥料是重要方向之一。如控释肥料可根据植物生长需求缓慢释放养分,减少肥料淋溶和流失,降低因过量施肥导致的土壤酸化风险。同时,优化施肥策略,采用精准施肥技术,根据土壤养分状况和植物生长阶段来精确确定施肥量和施肥种类,提高肥料利用率,能避免盲目施肥导致的土壤酸化风险。此外,利用一些环保材料预防土壤酸化,如钙基聚合物,不仅能改善土壤酸度,还能抑制土壤酸化的进一步发展^[68]。而加强对植胶土壤的前期评估和规划,在种植前对土壤性质进行详细分析,选择合适的种植区域和种植模式,也有助于预防土壤酸化的发生。

5 展望

橡胶园土壤酸化制约了橡胶产业的发展,目前对橡胶园土壤酸化方面的研究较少,鲜有报道。为加强橡胶园土壤酸化调控,有效阻控胶园土壤酸化,实现橡胶生产的可持续发展,今后需

要从以下几个方面进行深入研究。

(1) 进行不同改良剂对橡胶园土壤酸化改良的研究, 筛选出有效改良酸性土壤的改良剂, 并深入探究其机理机制, 综合考虑多因素以系统评价改良剂效果, 为土壤改良剂的广泛应用提供科学依据。

(2) 开展长期定位试验, 研究施用改良剂对胶园酸性土壤的长期改良效果和可能存在的负面影响。改良剂在短期内可以有效提高土壤 pH, 达到较好的改良效果, 但长期改良效果未知。且长期施用改良剂也可能会给土壤带来负面影响, 并且成本较大, 不是长久之计。未来的研究或应集中在提高氮肥利用率和减少氮肥施用量上, 这样才能从根本上解决土壤酸化的问题。

(3) 目前对胶园土壤酸化调控措施的相关研究主要集中在单一调控技术上, 缺少对复合技术调控酸化土壤的研究, 今后应结合起来建立综合调控技术, 以实现酸化土壤的长效调控。

(4) 深入探究土壤微生物群落与土壤酸化的相互作用机制, 利用高通量测序等技术全面解析胶园土壤微生物群落结构和功能, 挖掘与土壤酸化调控相关的关键微生物类群和基因, 为生物调控土壤酸化提供更精准的理论依据。

(5) 开发智能化、精准化的土壤酸化监测和调控技术也是重要方向。如利用物联网、大数据等技术实现对橡胶园土壤实时、动态监测, 精准实施调控措施, 提高土壤酸化治理效率。

(6) 加大对新型改良剂的研发。目前市面上的改良剂种类多, 有的在酸性土壤改良上有着较好的改良效果, 但这些材料施用量大、成本高, 尚未在农业生产中大面积推广应用, 长期施用也可能给环境带来负面影响。未来应加强对新型改良剂的产品性状、造粒技术、环境检测等方面研究, 解决现在改良剂存在的现实问题, 生产出施用简便、经济长效、生态环保的新型酸性土壤改良剂。

参考文献:

[1] XU DH, ROS GH, ZHU QC, et al. Major drivers of soil acidification over 30 years differ in paddy and upland soils

in China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 916:170189.

[2] GUO JH, LIU XJ, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327: 1008.

[3] 沈仁芳, 赵学强. 酸性土壤可持续利用 [J]. 农学学报, 2019, 9(3):16-20.

[4] 孙海东. 不同生物质物料对热区酸性砖红壤的改良效果研究 [D]. 海口:海南大学, 2015.

[5] 黄坚雄, 魏元灼, 董天站, 等. 不同类型橡胶园间作对竹芋生产力、经济效益和净温室气体排放的影响 [J]. 西南农业学报, 2024, 37(6):1239-1246.

[6] 杨丽萍, 许木果, 耿顺军, 等. 化肥减施下橡胶树有机肥替代用量研究 [J]. 热带农业科技, 2023, 46(4):50-53, 60.

[7] 马小伟. 橡胶树根系分泌有机酸耐铝的生理和分子机制研究 [D]. 海口:海南大学, 2021.

[8] AHRENDTS A, HOLLINGSWORTH PM, ZIEGLER AD, et al. Current trends of rubber plantation expansion may threaten biodiversity and livelihoods [J]. Global Environmental Change, 2015, 34:48-58.

[9] ZHAI DL, CANNON CH, SLIK JWF, et al. Rubber and pulp plantations represent a double threat to Hainan's natural tropical forests [J]. Journal of Environmental Management. 2012, 96:64-73.

[10] 杨磊, 林清火, 华元刚, 等. 阳江农场胶园土壤 pH 值与养分含量相关性分析 [J]. 热带农业科学, 2013, 33(5): 30-32, 37.

[11] 许心诺, 全飞, 魏亚情, 等. 海南和西双版纳植胶区橡胶树根际真菌群落多样性分析 [J]. 南方农业学报, 2022, 53(9):2392-2402.

[12] 庞家平, 陈明勇, 唐建维, 等. 橡胶-大叶千斤拔复合生态系统中的植物生长与土壤水分养分动态 [J]. 山地学报, 2009, 27(4):433-441.

[13] 罗开忠, 杨志坤, 杨蜀云, 等. 临沧市橡胶园土壤养分状况分析 [J]. 云南农业科技, 2015(4):6-8.

[14] 何鹏, 吴敏, 韦家少, 等. 海南省胶园土壤肥力质量指标的时空变异特性研究 [J]. 中国农学通报, 2008(10): 310-316.

[15] 陈玉芹, 胡永亮, 张丽萍, 等. 基于主成分和聚类分析的德宏橡胶林土壤肥力评价 [J]. 热带作物学报, 2019, 40(8):1461-1467.

[16] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 不同龄级橡胶林土壤有机碳组分及其影响因素 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1595-1603.

[17] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 海南琼中不同林龄橡胶林土

- 壤有机碳组分及其影响因素[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2023,38(5):886-893.
- [18] 李彭怡,黄庆锋,谢黎黎,等. 茂名垦区橡胶园土壤养分分析[J]. 中国热带农业,2018(2):65-68.
- [19] LIU CA, LIANG MY, NIE Y, et al. The conversion of tropical forests to rubber plantations accelerates soil acidification and changes the distribution of soil metal ions in topsoil layers[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 60(5):1248-1263.
- [20] 刘季. 橡胶树细根生长与周转对土壤酸化及其改良的响应[D]. 海口:海南大学,2013.
- [21] 安锋,李昌珍,张婷婷,等. 铝胁迫对橡胶苗生理和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(12):4191-4198.
- [22] 许木果,丁华平,刘忠妹,等. 橡胶园酸性、中性土壤交换性钙、镁测定方法研究[J]. 中国农学通报,2020,36(18):73-79.
- [23] 李金业,程昊,梁晓敏,等. 酸化土壤改良与固碳研究进展[J]. 生态学报,2024,44(17):7871-7884.
- [24] 高国震,董治浩,胡承孝,等. 土壤酸化对樱桃番茄养分积累和分配的影响[J]. 华中农业大学学报,2021,40(1):179-186.
- [25] SHERMAN J, FERNANDEZ IJ, NORTON SA, et al. Soil iron ,aluminum, and phosphorus dynamics in response to long-term experimental nitrogen and sulfur additions at the bear brook watershed in Maine[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,2006,121:421-429.
- [26] PAN C, YUWEN RN, SUN CC, et al. Saprotrophic fungi buffer the adverse effects of soil acidification on the soil nutrient supply ability of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2023,114:103462.
- [27] CLEMMENSEN KE, BAHR A, OVASKAINEN O, et al. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest [J]. *Science*, 2013, 339(6127):1615-1618.
- [28] DUAN YL, ZHANG JB, PETROPOULOS E, et al. Soil acidification destabilizes terrestrial ecosystems via decoupling soil microbiome [J]. *Global Change Biology*, 2025,31(4):e70174.
- [29] 徐影,于镇华,李彦生,等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. 土壤通报,2024,55(2):562-572.
- [30] 王洪星. 橡胶园根部病害的菌物生态[J]. 北京农业,2015(27):108-110.
- [31] 王树明,周敏,陈鸿洁,等. 河口垦区橡胶树根病区土壤养分调查[J]. 热带农业科技,2008,31(4):12-13.
- [32] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤,2015,47(2):238-244.
- [33] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题[J]. 土壤通报,1988,19(2):3-5.
- [34] SUN Y, MA Y, CAO K, et al. Temporal changes of ecosystem carbon stocks in rubber plantations in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Pedosphere*, 2017(27):737-746.
- [35] TIAN DS, NIU SL. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2):024019.
- [36] ZAMANIAN K, TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, TAO JJ, et al. Acidification of European croplands by nitrogen fertilization: consequences for carbonate losses, and soil health [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 924:171631.
- [37] 赵学强,潘贤章,马海艺,等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报,2023,60(5):1248-1263.
- [38] 孙海东,刘备,吴炳孙,等. 橡胶树人工林地土壤酸度特征及酸化原因分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):49-54.
- [39] SINGH AK, LIU WJ, ZHU XA, et al. The detrimental effect of rainforest conversion to rubber plantations on soil dissolved organic carbon and C: N stoichiometry, mediated by altered soil biogeochemistry [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370:122965.
- [40] 陈七双,王坚,李雪枫,等. 根系分泌物和栽培基质对橡胶树幼苗生长与生理特性的影响[J]. 热带作物学报,2025,46(6):1363-1375.
- [41] 蒋雨洲,王甲,张宏媛,等. 化肥配施有机物料对玉米田土壤细菌和真菌群落结构的影响[J]. 作物学报,2025,51(5):1378-1388.
- [42] SARMA B, FAROOQ M, GOGOI N, et al. Soil organic carbon dynamics in wheat-green gram crop rotation amended with vermicompost and biochar in combination with inorganic fertilizers: a comparative study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201:471-480.
- [43] XU WX, LIU WJ, TANG SR, et al. Long-term partial substitution of chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizers increased SOC stability by mediating soil C mineralization and enzyme activities in a rubber plantation of Hainan Island, China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 182:104691.
- [44] LI SN, JI XH, CHAO C, et al. Effects of increasing lime application rates on microbial diversity and community

- structure in paddy soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 161: 103837.
- [45] 王真辉, 刘季, 胡义钰, 等. 撒施石灰石粉对橡胶树细根空间分布及季节动态的影响 [J]. *热带作物学报*, 2015, 36(1): 1-8.
- [46] 龙杰琦, 苗淑杰, 李娜, 等. 施用生物炭对黑土各组分有机质结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(5): 775-785.
- [47] SUMAN J, RAKSHIT A, OGIREDDY SD, et al. Microbiome as a key player in sustainable agriculture and human health [J]. *Frontiers in Soil Science*, 2022, 2: 821589.
- [48] BOLAN S, SHARMA S, MUKHERJEE S, et al. Biochar modulating soil biological health: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 914: 169585.
- [49] 王海洋, 夏昊, 李红霞, 等. 生物炭配施土壤改良剂对酸性土壤特性及烤烟品质的影响 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2024, 39(3): 79-89.
- [50] 林清火, 刘海林, 王莉, 等. 炭基土壤调理剂对橡胶园土壤 pH 和阳离子交换量的影响 [J]. *热带农业科学*, 2018, 38(12): 1-4, 9.
- [51] 吴敏, 韦家少, 孙海东, 等. 生物质炭对橡胶园土壤酸度及交换性能的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(3): 98-107.
- [52] 沈玥. 喷施除草剂对橘园土壤生态及果实品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [53] SONG C, CHUN MX, JIN XY, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: an 11-year field study of rice-based cropping systems in south-east China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 223: 261-269.
- [54] 杨春霞, 赵志平, 杨丽萍, 等. 不同覆盖绿肥养分特性及其对橡胶园土壤理化性质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 467-474.
- [55] 贺建军, 张华林, 罗微, 等. 幼林胶园覆盖葛藤改善土壤细菌群落结构 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 69-76.
- [56] 原慧芳, 黄菁, 田耀华. 不同管理方式下山地胶园土壤物理和水分特性 [J]. *热带作物学报*, 2020, 41(5): 1057-1063.
- [57] 吴林土, 徐火忠, 李贵松, 等. 微生物菌剂对松阳茶园土壤酸化改良及肥力提升的效果分析 [J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(6): 1245-1249.
- [58] WU QC, CHEN Y, DOU XH, et al. Microbial fertilizers improve soil quality and crop yield in coastal saline soils by regulating soil bacterial and fungal community structure [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 175127.
- [59] BIRGITTE N, LEIF P. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of vertisol [J]. *Plant and Soil*, 2000, 218: 173183.
- [60] 刘芳禧, 方畅宇, 庾振宇, 等. 绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(6): 1616-1627.
- [61] SHI RY, LI JY, XU RK, et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 162: 41-45.
- [62] 倪秀雅, 冯永霞, 李如华, 等. 重庆酸雨区不同林型对土壤酸化和真菌群落的影响 [J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 7203-7215.
- [63] 谢军, 王子芳, 王莹燕, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 [J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4565-4574.
- [64] 木丽远, 周洪印, 王军磊, 等. 改性生物炭与有机肥配施对月季生长和土壤养分的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(11): 156-162.
- [65] 徐文娟. 绿肥还田及有机肥替代化学氮肥对橡胶园土壤养分的影响研究 [D]. 海口: 海南大学, 2022.
- [66] 贝美容, 黄艳艳, 井玉丹, 等. 施用不同配比生物炭对橡胶树根系生长的短期响应 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40(6): 1041-1045.
- [67] 屈继祯, 林清火, 金东奇, 等. 不同施肥措施对橡胶树胶乳产量和品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(4): 759-773.
- [68] KANG F, MENG YS, GE YN, et al. Calcium-based polymers for suppression of soil acidification by improving acid-buffering capacity and inhibiting nitrification [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 139: 138-149.