

橡胶园土壤退化及改良研究综述

施晓玲^{1,2}, 杨继芬^{1,2}, 耿顺军^{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] 随着土壤养分逐年消耗与土壤结构的破坏, 橡胶园特别是二代胶园土壤退化严重。文章综述了橡胶园土壤物理、化学、生物性质退化表现, 影响因素, 以及采用合理施肥、改土培肥、林下种植和林下养殖等措施提升土壤质量的研究进展, 同时展望未来橡胶园土壤改良的研究方向, 以期橡胶园土壤质量提升提供参考。

[关键词] 橡胶园; 土壤退化; 影响因素; 改良措施

中图分类号: S794.1; S156 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2026)01-0114-07

Progress in Soil Degradation Status and Improvement in Rubber Plantations

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

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

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

Abstract: With the consumption of soil nutrients and the destruction of soil structure year by year, the soil of rubber plantations, especially second-generation rubber plantations, has been seriously degraded. This article reviews the degradation of soil physical, chemical and biological properties in rubber plantations, its influencing factors, and research progress on improving soil quality through measures such as reasonable fertilization, soil improvement, understory planting and understory breeding. At the same time, we look forward to the future research direction of soil improvement in rubber plantations, in order to provide reference for improving soil quality in rubber plantations and promote the improvement of quality and efficiency of the natural rubber industry.

Key words: rubber plantation; soil degradation; influencing factors; improvement measures

我国自20世纪50年代开始发展种植天然橡胶, 至今已愈70 a的历史^[1]。截至2024年, 全国天然橡胶种植面积约113万hm², 干胶产量85万t^[2]。我国垦殖的天然橡胶林取代了原有的竹木混交林、竹林、灌丛和草地等次生植被^[3], 随着种植年限的不断增加, 胶园土壤呈现不同程度退化。如西双版纳州勐腊县研究区域内10、20、30 a橡胶林地的土壤退化指数分别为-16%、-4%和-22%^[4]。近年来, 我国橡胶园存在土壤孔隙度降低、肥力下降和生物多样性降低等问题, 主要受单一化种植, 割胶、施肥和化学除草等生产管理

措施的影响; 此外, 热带地区高降雨量也导致橡胶园土壤养分流失严重^[5]。胶园土壤退化严重制约了天然橡胶产业高质量发展, 改善胶园土壤质量迫在眉睫。本文综述了橡胶园土壤退化表现、影响因素及相应的改良研究进展, 以期提升橡胶园土壤质量提供参考。

1 橡胶园土壤退化表现

1.1 物理性质退化

良好的土壤结构是橡胶树根系健康生长的前提条件, 也是橡胶园土壤保持有效养分的基础。

收稿日期: 2025-06-16

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: 施晓玲(1997-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: 2264073710@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

橡胶园土壤的物理性质退化主要表现为土壤孔隙度降低、容重增大和团聚体性状变差。邹鑫等^[6]研究表明,相较于热带雨林,西双版纳热带植物园内种植约26 a的单层橡胶林0—5 cm土壤容重增加,土壤孔隙度、水稳性大团聚体含量,团聚体平均重量直径和平均几何直径显著降低,土壤物理性质变差。陈春峰等^[7]研究表明,热带雨林转化成单层橡胶林后,西双版纳热带植物园内定植24 a的单层橡胶林土壤中水稳定性团聚体(> 5 mm、> 0.25 mm)的含量和平均重量直径显著降低,团聚体的破坏率显著增加。董豪等^[8]研究发现,海南省儋州市那大镇研究区域内橡胶林随着种植代次的增加,土壤逐渐退化,与第一代橡胶林相比,第三代橡胶林土壤容重显著增加,土壤孔隙度、平均质量直径和大团聚体含量显著降低。

1.2 化学性质恶化

橡胶园土壤的化学性质退化主要表现为土壤养分下降。Liu等^[9]收集了36篇出版物的1 379个测量数据点,通过Meta分析总结得出,天然林垦植为橡胶林后,土壤有机碳、总氮和总镁含量分别显著降低了24%、13%和94%。杨春霞等^[10]采集了云南省西双版纳、普洱、红河、临沧植胶区的16个橡胶种植农场共计3 514个土壤样品,研究发现植胶区土壤有效磷、有机质和速效钾的缺乏比率分别为82.13%、46.10%和27.35%。邓万刚等^[11]研究表明,海南昌屯天然次生林开垦种植橡胶林后,0—100 cm土层有机碳含量有所减少,其中10—20 cm土层有机碳含量显著减少。土壤有机碳的匮乏间接影响了土壤氮的有效性。与热带雨林相比,西双版纳勐仑镇约12 a橡胶林土壤中铵态氮和硝态氮含量较低,且西双版纳地区降雨频繁,硝态氮的淋溶更为严重^[12]。孙燕瓷等^[13]研究表明,在西双版纳景洪农场植胶34 a后,采样点区域土壤碳含量与储量分别减少3.33 g/kg和21.23 t/hm²,土壤氮含量与储量分别减少0.20 g/kg和1.30 t/hm²。

1.3 生物性质变差

橡胶园土壤的生物性质变差主要表现为土壤微生物群落结构发生改变,有益微生物数量减少,多样性降低,土壤酶活性受到抑制,土壤中养分的转化和循环受到影响。研究显示,西双版纳热

带植物园中热带季节雨林转变为橡胶林后,凋落物的分解和土壤有机质的积累特征受到影响,土壤微生物生物量碳含量降低,表层土壤微生物生物量碳含量只有热带季节雨林土壤的60%~70%^[14]。孙树晴等^[15]采集海南儋州、琼中、乐东、万宁及海口等地农场旱季和雨季不同时期的总计130个样本,发现相较于热带雨林,研究区域内橡胶林土壤中细菌和真菌等微生物数量降低,林地中植物种类多样性减少。闫小娟等^[16]在海南省阳江农场、乌石农场、红田农场,云南省东风农场以及广东省建设农场采集75个橡胶林土壤样品,发现植胶区微生物生物量碳质量分数属于低水平,主要分布在100~350 mg/kg区间内。全飞等^[17]研究发现,西双版纳勐仑镇种植15 a的橡胶林土壤微生物生物量碳含量显著低于次生林和季雨林。方丽娜等^[18]也发现该地种植30 a的橡胶林土壤微生物生物量碳显著低于次生林。Zhou等^[19]分别采集海南省琼中县幼龄橡胶园(3 a)、成熟橡胶园(18 a)和老橡胶园(27 a)的土壤样品,发现随着树龄的增加,研究区域内土壤微生物群落的微生物生物量、碳利用能力和功能多样性均呈下降趋势。

2 影响橡胶园土壤退化的因素

2.1 自然因素

气候、地形是影响土壤退化的重要自然因素。我国橡胶树多种植于热带亚热带地区,这些地区土壤脱硅与富铝化过程强烈,使得土壤中的盐基离子大量流失,土壤肥力降低^[20]。同时,热带亚热带地区高温多雨,在缺少地表覆盖物的情况下,降雨量较大会加速胶园土壤养分的流失,如广东垦区新植橡胶园的年水土流失量达到25.7 t/hm²^[21]。坡度较大的橡胶园受雨水冲刷严重^[22],如西双版纳热带植物园内纯橡胶林内小斜坡上的溅蚀率是台地的1.3~1.9倍^[23]。

橡胶树自身生长特性也是影响土壤退化的重要因素。橡胶树冠层高大,易汇聚雨水形成体积更大、动能更强的雨滴。在西双版纳热带植物园的研究表明,橡胶林冠层滴落雨滴的动能可达林外大气降水的1.84~2.32倍^[24]。同样降雨强度

下,研究发现中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站单层橡胶林地土壤侵蚀率是林外空地的1.55倍^[25]。此外,橡胶林冠层的遮荫效应也会间接影响土壤退化。如西双版纳热带植物园研究区域内橡胶林由于林冠层高大,地面覆盖物相对匮乏,甚至地表裸露,使得土壤侵蚀程度显著高于热带雨林,达到2倍以上^[23]。

2.2 人为因素

2.2.1 生产管理措施

肥料施用量较少甚至不施,导致林地长期施肥不足,同时割胶带走了大量养分,降低了胶园土壤的养分含量。云南橡胶园山高坡陡,绝大部分橡胶园处于坡度 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的丘陵和山地,有机肥运输困难^[26];海南橡胶有机肥替代比例仅有4.97%(基于1 170个样本估算)^[27],有机肥用量较少。仅靠橡胶树凋落物补充,易导致土壤中的有机质含量不足,加上胶园土壤微生物生物量低,分解速率较慢,从而降低了土壤碳、氮含量和有效性^[14]。此外,生产作业中的踩踏等人为因素影响易使橡胶园土壤容重增加、孔隙度降低^[28],加上缺少土地翻耕,使得土壤严重板结,物理性质变差,橡胶园地表裸露程度增加。相关研究表明,施肥期的翻耕和割胶季节的踩踏影响了橡胶林地上植物资源输入对土壤微生物生物量碳的作用^[18]。

2.2.2 长期单一种植

森林植被多样性对水土保持、维持地力具有重要作用。但由于橡胶林常为单一种植且成林后郁闭度高,林下植被丰富度不足,微生物量碳含量降低,不利于土壤养分循环^[29]。据不完全统计,我国大多数橡胶林为单一种植模式,间作面积约占胶园面积4%^[30],胶园生物多样性较低。如西双版纳地区橡胶林下植被的多样性指数仅为1.224~3.517,主要以低矮草本及少量小灌木为主,植被层次结构单一,难以涵养水分、固土保肥和促进养分循环,使得橡胶林保水供肥能力下降^[31]。土壤理化性质方面,西双版纳热带植物园研究区域内,和“近自然模式”橡胶林相比,橡胶林单一种植导致林地土壤含水量、持水量、总孔隙度、pH值和土壤养分水平降低,土壤容重提

高,土壤退化严重^[32];和林下种植中药材相比,单一种植橡胶的林地因无丰富的冠层结构缓冲强降雨,地下无复杂的根系网络改善土壤团粒结构,其土壤持水能力和水分入渗性能较差^[33]。此外,在中国热带农业科学院试验场(海南儋州)研究发现,单一种植橡胶林年限的增加,土壤全磷含量降低,土壤磷组分和微生物群落结构也发生较大变化^[34]。

3 橡胶园土壤改良研究

3.1 施肥

合理施肥能提高土壤肥力,有利于解决胶园养分不足等问题。橡胶树营养诊断技术在指导橡胶园合理施肥方面发挥着关键作用。杨丽萍等^[35]研究指出,针对西双版纳州景洪市普文镇氮(镁)缺乏型和氮钾(镁)缺乏型橡胶树,对症施用高氮(镁)型和高氮钾(镁)型专用肥料,可有效解决橡胶树产量低下及经济效益不佳的问题。李春雨等^[36]研究指出,云垦江城橡胶股份有限公司示范区内,对症施用配方肥能够补充橡胶树所缺营养元素,提高产量和品质,如针对缺镁型橡胶树施用专用配方肥,较常规施肥处理土壤有机质含量明显提高8.45 g/kg。

增加有机肥、生物肥的施用,如绿肥、堆肥、厩肥等,提高土壤质量。化肥减量配施有机肥能改良胶园土壤状况、提高胶园土壤综合肥力水平和改善土壤质量。徐文娴等^[37]在海南农垦集团乌石农场橡胶园开展化学氮肥减量配施有机氮肥长期定位试验,为期12 a的试验结果表明,以不施肥为对照,50%化学氮肥+50%经堆肥的有机氮肥、50%化学氮肥+50%未经堆肥的有机氮肥两个处理均提高了土壤质量指数(分别提高75.19%~110.76%和16.34%~36.20%)。杨丽萍等^[38]在云南省景洪市东风农场对22 a橡胶树开展为期2 a有机肥替代试验,发现一定比例有机肥替代化肥有利于提高橡胶土壤pH、碱解氮含量,同时增加土壤大团聚体数量,改善土壤物理性质。李佳乐等^[39]在海南儋州开展了橡胶树幼苗施肥试验,发现化肥减量配施有机肥增加了土壤有机碳含量,提高了 β -1,4-葡萄糖苷酶、乙酰氨基葡萄糖苷酶和L-亮氨酸氨基态酶的活力,从

而改善了胶园土壤的碳氮环境。陆问等^[40]以海南白沙县龙江农场8 a 橡胶树为研究对象,研究表明75%的有机肥替代比例提高了土壤全氮含量,增强了土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性,促进了土壤养分循环和转化。耿顺军等^[41]以云南省景洪市东风农场开割15 a的橡胶树为对象,研究发现化肥减量配施有机肥提高了固氮作用和硝酸盐还原作用等氮循环功能菌群的相对丰度,提高了土壤细菌群落的多样性,改善了土壤微生物群落结构和功能。综上所述,橡胶园土壤施用有机肥增加了土壤养分含量和酶活性,丰富了土壤微生物群落多样性。

3.2 改土培肥

在未形成有效的地面覆盖和采取水土保持措施的情况下,雨水的淋溶冲刷易造成山地橡胶园水土流失、肥力降低,严重时会影响橡胶树生长和产胶^[21]。为了防止水土流失,山地胶园需要落实保水、保土、保肥和护根等“三保一护”措施^[42]。此外,在日常管理中应加强深翻改土、深沟培肥等措施(幼龄胶园深翻改土,成龄胶园深沟培肥),橡胶开割林需要在植胶带面浅耕松土。通过翻耕松土改善土壤的物理性质,增强胶园土壤保水保肥能力。

橡胶林的土壤培肥主要包括保肥、施肥与林地自肥。研究表明:橡胶树自身的枯枝落叶能够调节土壤水分、促进有机质积累与自然施肥过程,从而保护与肥育林地土壤^[43];为缓解橡胶林土壤肥力下降趋势,压青等栽培措施可在一定程度上补充橡胶树所需矿质养分,并改善土壤理化性质^[44];深沟盖草培肥能够改善土壤团粒结构,增加土壤结构稳定性,使施肥沟沟壁土壤物理性状达到较好状态^[45]。

将生物炭作为土壤改良剂,其对土壤的改良效果主要体现在调节土壤酸碱度,增加碳、氮、磷等养分含量和利用率上。潘丽冰等^[46]研究发现,对橡胶树幼苗施用生物炭可显著增加土壤全碳和全磷含量,改善土壤透气性,增加土壤含水量,提高土壤肥力。吴敏等^[47]在海南省儋州市中国热带农业科学院试验场二代橡胶园开展土壤改

良试验,发现生物炭可以提高橡胶土壤的pH、阳离子交换量和土壤盐基饱和度,降低土壤交换性酸和交换性铝含量,缓解橡胶园土壤酸化,提升土壤质量。林清火等^[48]利用中国热带农业科学院橡胶研究所林地的砖红壤进行改良实验,研究得出添加炭基调理剂能够显著增加橡胶林土壤阳离子交换量,提高土壤pH。

3.3 林下种植

3.3.1 间作经济作物

在橡胶园内间作不同经济作物能够改善土壤物理、化学、生物性质,提升土壤肥力。目前在橡胶林间作的经济作物有马铃薯、竹荪、砂仁、甘蔗、香蕉、茶叶、可可和咖啡等。傅泳维等^[49]研究表明,海南省五指山市毛阳镇毛阳农场39 a橡胶林间种马铃薯提高了土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮和有效磷含量及土壤 β -葡萄糖苷酶、N-乙酰- β -D-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性。刘敏等^[50]研究指出,在海南省万宁市北大镇定植14 a橡胶林间种竹荪增加了土壤自生固氮菌、氨化细菌、硝化细菌与纤维素分解菌等有益微生物数量,提高土壤微生物群落功能的多样性。陈红梅等^[51]研究发现,在云南省江城橡胶林间种砂仁有利于土壤中细菌体数量的增加,相较于未种植过砂仁的土壤,种植砂仁4 a后的橡胶园土壤细菌丰度提高了近7倍。韦家少等^[52]基于海南省2种割龄共17个橡胶园的土壤调查数据发现,间作多种经济作物均使土壤有机质、全氮、水解氮含量和土壤酶活性高于纯作胶园。吴志祥等^[53]研究发现,在中国热带农业科学院试验农场幼龄橡胶园间作香蕉明显提高了土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量,增加了土壤纤维素酶和蔗糖酶活性,提高了土壤肥力水平。Chen等^[54]研究表明,与橡胶树单作相比,在西双版纳热带植物园内橡胶林间种可可能增加土壤中土壤碳、氮、磷、钙和镁的养分含量(分别增加38.8%、38.5%、48.2%、47.9%和31.4%),土壤总孔隙度和土壤平均重量直径平均分别增加了13.3%和31.5%。研究显示:在西双版纳勐腊县,研究区域内橡胶-可可复合林提高了土壤持水能力,橡胶-茶树复合林提高了土壤入渗性能^[55];西

双版纳热带植物园内橡胶林间作咖啡有效增加了橡胶种植区0—10 cm土壤的碳氮储量^[56];相较于橡胶纯林,云南省热带作物科学研究所江南试验队5 a橡胶林间作咖啡林地的土壤全磷、全氮、全钾以及有机质含量显著增加^[57]。

3.3.2 间作绿肥

在橡胶林中间作绿肥可固氮,增加土壤养分含量,改善土壤结构,提高土壤质量。研究表明:在海南儋州市海胶集团西联农场内幼龄橡胶间种葛藤提高了0—10 cm土壤过氧化氢酶、脲酶活性和pH,改善了胶园土壤肥力^[58];在海南省琼中县乌石农场内间种葛藤均能使幼龄橡胶林和成龄橡胶林土壤pH、有机碳、硝态氮和速效磷含量以及土壤酶活性显著增加,使成熟期橡胶林土壤全氮和铵态氮含量显著增加^[59];在广东省南华农场内幼龄橡胶林间种柱花草显著提高了土壤有机质含量,同时提高了土壤全氮含量、转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性,增强了土壤养分转化与利用效率^[60]。在海南省儋州市中国热带农业科学院试验场,张婧旻等^[61]研究表明幼龄橡胶园间作柱花草、葛藤和山毛豆3种豆科绿肥均能提高土壤的氮素含量,其中柱花草的提升表现最为突出;薛欣欣等^[62]研究发现幼龄胶园间作爪哇葛藤和山毛豆改善了土壤团聚体稳定性,使土壤有机碳含量和大团聚体比例明显提高。杨春霞等^[63]在云南省热带作物科学研究所橡胶试验基地开割橡胶园内间作10种豆科绿肥,发现均不同程度提高胶园土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾含量,且土壤容重变小,孔隙度和水稳性团粒结构增多,土壤结构得到改善。

3.4 林下养殖

橡胶林下养殖通过引入禽类、蚯蚓等生物能够改善土壤理化性质与微生物群落结构,提升土壤肥力。橡胶林下养殖包括林-禽、林-蚯蚓和林-蜂等模式^[64],其中林-禽模式最为常见。林-蜂模式对胶园土壤无直接影响,禽畜、蚯蚓等的排泄物可提高土壤有机质含量和团聚体的稳定性,一方面增加了林地土壤的养分,改善土壤理化性质,另一方面有利于提高土壤微生物生物活性。林-禽模式主要在橡胶林下养鸡,鸡粪作为有机

肥,可提高土壤肥力。尹红星等^[65]在云南省德宏热带农业科学研究所橡胶基地内开展林下养鸡试验,发现林下养鸡提升了林地土壤中全氮、碱解氮、有效磷和有机质含量,且含量和饲养密度正相关。于向春等^[66]研究发现,在海南大学农学院试验基地内橡胶林下饲养文昌鸡有利于提高土壤中pH值,增加土壤有机质、有效氮、有效磷和有效磷含量。

蚯蚓在土壤中穿行可使土壤更加疏松透气,其排泄物蚯蚓粪是酸碱中性、水气调和且孔隙适中的团粒结构,富含植物所需的常量元素、微量元素、腐殖酸等,能提高土壤肥力,改善土壤水气环境^[67]。曾郁珉等^[68]研究发现,在云南省林业科学院普文热带林业研究所茶树与橡胶树的混交林地内,施用有机肥+蚯蚓的活动明显提升了橡胶林地0—20 cm土层土壤有机质、全钾、全磷含量,改善了孔隙度等土壤物理性质。李艺坚等^[69-70]研究发现,在中国热带农业科学院试验场林龄4 a的橡胶林下养殖蚯蚓显著提高了土壤中硝态氮、速效磷、速效钾、土壤含水量;增加了土壤微生物量碳和过氧化氢酶活性,改善了土壤理化性状。

4 展望

土壤质量是影响橡胶树生长及产胶至关重要的因素之一,预防与解决好橡胶园土壤退化问题有助于实现天然橡胶产业的可持续发展。综上所述,我国橡胶园土壤在物理、化学、生物性质方面均有不同程度的退化,表现在土壤碳氮储量、pH、水稳性大团聚体等显著降低,肥力下降和生物多样性降低。目前关于胶园土壤物理、化学和生物质量退化的深层机制尚不清楚,要制定出有针对性的土壤改良措施需进一步明确土壤物理、化学和生物退化的相互作用及影响因子,未来应加强对橡胶园土壤退化机制的研究,为精准制定土壤改良措施提供理论依据。且单一的改良措施只能解决胶园土壤退化的某一方面问题,难以持续,而针对综合改良措施协同效应的研究尚缺乏。今后应将多种改良措施相结合,以实现橡胶园土壤改良的长效机制。

此外,我国植胶区位于热带北缘和南亚热带,

受气候、海拔等因素影响,不同地区胶园土壤退化原因与状况存在显著差异,橡胶园土壤改良应当结合实际研究制定符合不同区域条件的措施,以实现区域化、个性化的土壤改良技术推广,促进胶园土壤质量的持续提升。

参考文献:

- [1] 王心怡. 全球及中国天然橡胶生产时空变化研究及其影响因素分析[J]. 中国热带农业, 2024(3):70-75.
- [2] 姚媛. 扶持橡胶产业 保障国家安全[N]. 农民日报, 2024-04-15(4).
- [3] 黄泽润, 李一鲲, 曾延庆. 垦殖橡胶与生态平衡[J]. 中国农垦, 1980(3):24-25.
- [4] 宋艳红, 史正涛, 王连晓, 等. 热带地区橡胶林土壤退化特征及演变[J]. 林业资源管理, 2018(2):91-97.
- [5] 何向东, 吴小平. 海南垦区胶园肥力演变探研[J]. 热带农业科学, 2002(1):16-22.
- [6] 邹鑫, 陈春峰, 刘文杰. 西双版纳橡胶种植对土壤团聚体及理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2020, 306(3):99-107.
- [7] 陈春峰, 刘文杰, 吴骏恩, 等. 西双版纳橡胶农林复合系统土壤团聚体稳定性研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(1):49-56.
- [8] 董豪, 茶正早, 张翔, 等. 连续多代次种植橡胶树对土壤团聚体及土壤有机碳的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(12):3664-3670.
- [9] LIU Y, SHEN JP, ZHANG CH, et al. Impact of rubber-based land use changes on soil properties and carbon pools: a meta-analysis[J]. Catena, 2023, 227:107121
- [10] 杨春霞, 许木果, 刘忠妹, 等. 云南山地胶园土壤肥力空间变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2):17-24.
- [11] 邓万刚, 吴蔚东, 罗微, 等. 垦殖橡胶对海南热带土壤有机碳的影响[J]. 中国农学通报, 2007(8):482-484.
- [12] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究[J]. 植物生态学报, 2001(1):99-104.
- [13] 孙燕瓷, 马友鑫, 曹坤芳, 等. 西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):412-419.
- [14] 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.
- [15] 孙树晴, 康立, 兰国玉, 等. 海南橡胶林与热带雨林土壤微生物区系分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(10):2331-2338.
- [16] 闫小娟, 张鑫红, 罗微, 等. 中国主要橡胶种植区土壤微生物生物量研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(7):64-69.
- [17] 全飞, 李君, 兰国玉, 等. 西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳与生物功能研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6):133-140, 155.
- [18] 方丽娜, 杨效东, 杜杰. 土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4):837-844.
- [19] ZHOU YJ, WANG CY, L JH, et al. Functional diversity of soil microbial communities in different-age rubber plantations: a case study of Hainan province, China[J]. Journal of Rubber Research, 2017, 20(3):168-181.
- [20] 林清火, 罗微, 林钊沐, 等. 砖红壤地区旱地土壤肥料养分淋失研究进展[J]. 热带农业科学, 2003(1):61-66.
- [21] 高素华, 周果人, 黄增明. 广东垦区橡胶园生态功能研究[J]. 热带作物科技, 1985(3):36-48.
- [22] 杨春霞, 李国华, 李春丽. 经济绿肥覆盖对西双版纳胶园土壤性状的综合影响[J]. 中国农学通报, 2005(2):280-283.
- [23] LIU W, LUO Q, LI J, et al. The effects of conversion of tropical rainforest to rubber plantation on splash erosion in Xishuangbanna, SW China[J]. Hydrology Research, 2015, 46(1):168-174.
- [24] LIU JQ, LIU WJ, ZHU K. Throughfall kinetic energy and its spatial characteristics under rubber-based agroforestry systems[J]. Cetena, 2018, 161:113-121.
- [25] 罗亲普, 刘文杰. 不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀率及穿透水侵蚀力比较[J]. 土壤通报, 2012, 43(6):1348-1354.
- [26] 杨春霞, 刘忠妹, 邓乐晔, 等. 处理温度对橡胶园覆盖绿肥种子萌发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3):131-135.
- [27] 朱谔, 李婷玉, 洪秀杨, 等. 海南岛主要作物磷肥需求及减量潜力分析[J]. 热带生物学报, 2024, 15(5):639-649.
- [28] LI HM, MA YX, LIU WJ, et al. Soil changes induced by rubber and tea plantation establishment: comparison with tropical rain forest soil in Xishuangbanna, SW China[J]. Environmental management, 2012, 50(5):837-48.
- [29] 靳莉雅, 张志明, 刘文杰, 等. 西双版纳典型森林转变对土壤酶活性及微生物养分限制的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(7):2259-2267.
- [30] 王纪坤, 兰国玉, 吴志祥, 等. 海南岛橡胶林林下植物资源调查与分析[J]. 热带农业科学, 2012, 32(6):31-36.
- [31] 周会平, 岩香甩, 张海东, 等. 西双版纳橡胶林下植被多样性调查研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(8):1444-1449.
- [32] ZENG HH, WU JN, ZHU XA, et al. Jungle rubber facilitates the restoration of degraded soil of an existing rubber plantation[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281:111959-111959.
- [33] JIANG JX, LIU W, WU J, et al. Land degradation controlled and mitigated by rubber-based agroforestry systems through optimizing soil physical conditions and water supply mechanisms: a case study in Xishuangbanna, China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(7):2277-2289.
- [34] 任常琦, 王进闯, 程汉亭, 等. 不同林龄橡胶林土壤微生物群落和磷组分的变化[J]. 生态学报, 2017, 37(23):

- 7983-7993.
- [35] 杨丽萍,杨春霞,黎小清,等. 云南山地胶园橡胶树专用肥肥效研究[J]. 热带农业科学,2015,35(7):5-9.
- [36] 李春丽,陈永川,杨春霞. 云南山地胶园配方施肥示范推广[J]. 热带农业科学,2016,36(3):1-5.
- [37] 徐文娴,郭鑫炜,吴志祥. 不同施肥方式对海南橡胶园土壤质量的影响[J]. 农业工程学报,2025,41(9):103-112.
- [38] 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.
- [39] 李佳乐,梁泳怡,刘文杰,等. 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长和土壤环境的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(2):431-438.
- [40] 陆问,徐文娴,苏天燕,等. 不同比例有机肥替代化学氮肥对海南橡胶林土壤养分和酶活性的影响[J/OL]. 热带生物学报,2024-03-28. <https://link.cnki.net/urlid/46.1078.S.20240328.1354.005>.
- [41] 耿顺军,许木果,刘忠妹,等. 化肥减量配施有机肥对橡胶园土壤细菌群落及其功能的影响[J]. 热带农业科技,2024,47(4):54-60.
- [42] 何康,黄宗道. 热带北缘橡胶树栽培[M]. 广州:广东科技出版社,1987:1-42,142-184.
- [43] 周玉杰. 橡胶人工林生态系统土壤质量特征变化及其影响因素研究[D]. 海口:海南大学,2017.
- [44] CHA ZZ, LIN ZM, LUO W. Sustainable Land Management Practices for Rubber Plantations in Mountainous Area of Hainan [J]. *Pedosphere*,2005(3):404-408.
- [45] 赵庆辉,祝飞,林钊沐,等. 海南橡胶林土壤物理性质的空间变异性[J]. 山地学报,2012,30(3):308-313
- [46] 潘丽冰,徐凡珍,沙丽清. 生物炭对土壤理化性质及橡胶幼苗生物量的影响[J]. 山地学报,2015,33(4):449-456.
- [47] 吴敏,韦家少,孙海东,等. 生物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.
- [48] 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.
- [49] 傅泳维,张振华,涂敏,等. 胶园间作不同马铃薯品种对土壤性质及微生物多样性的影响[J]. 热带作物学报,2024,45(9):1857-1867.
- [50] 刘敏,张广宇,张永北,等. 竹荪间作对橡胶园土壤微生物区系与群落功能多样性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):295-298.
- [51] 陈红梅,余东,罗虎,等. 橡胶-砂仁间作土壤中细菌数量及其对病原菌拮抗性和作物促生性影响[J]. 热带农业科学,2022,42(12):1-7.
- [52] 韦家少,何鹏,吴敏,等. 间作橡胶林地土壤肥力和土壤酶活性特征研究[J]. 热带作物学报,2014,35(5):823-831.
- [53] 吴志祥,谢贵水,杨川,等. 幼龄胶园间种土壤肥力及土壤酶活性特征研究[J]. 南方农业学报,2011,42(1):58-64.
- [54] CHEN C, LIU W, WU J, et al. Can intercropping with the cash crop help improve the soil physico-chemical properties of rubber plantations? [J]. *Geoderma*,2019,335:149-160.
- [55] 马关媛,蒋小金,刘佳庆,等. 不同林型橡胶林土壤水分入渗特征及影响因子[J]. 水土保持研究,2025,32(1):57-65,72.
- [56] 李新爱. 不同橡胶农林模式对土壤碳氮储量及微生物群落结构的影响[D]. 昆明:云南大学,2021.
- [57] 许彦彦,谢江,罗敏,等. 生态胶园构建初期5种植模式土壤质量综合评价[J]. 中国水土保持科学(中英文),2025,23(6):167-174.
- [58] 徐文娴,李金秋,孟磊,等. 葛藤覆盖对幼龄橡胶园表层土壤理化性状和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(9):1740-1748
- [59] XU WX, YANG Q, JING YM, et al. Improving soil pH, nutrient concentrations, and enzyme activities by green manure returning in young and mature rubber plantation on Hainan Island, China [J]. *Plant and Soil*,2023,495(1/2):341-358.
- [60] 贺建军,姚艳丽,张华林,等. 胶园覆盖对土壤肥力及橡胶树根系活力的影响[J]. 西南农业学报,2018,31(7):1444-1450.
- [61] 张婧旻,李彩兰,薛欣欣,等. 豆科绿肥对幼龄胶园土壤养分及叶片氮含量的影响及作用路径分析[J]. 热带作物学报,2025,46(6):1354-1362.
- [62] 薛欣欣,王文斌,茶正早,等. 不同绿肥覆盖对幼龄橡胶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 环境科学,2025,46(11):7013-7021.
- [63] 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.
- [64] 申丹艳,高静,邱苏晗,等. 海南省天然橡胶林下经济发展现状及建议[J]. 热带农业科技,2024,47(1):41-45.
- [65] 尹红星,罗琴,许智萍,等. 橡胶林下养鸡对土壤养分的影响[J]. 热带农业科技,2018,41(3):16-18.
- [66] 于向春,郁树乾,柳贤德,等. 橡胶林养殖文昌鸡的生态效益研究[J]. 畜牧与饲料科学,2012,33(增刊1):118-119.
- [67] 单颖,赵凤亮,林艳,等. 蚯蚓粪对土壤环境质量和作物生长影响的研究现状与展望[J]. 热带农业科学,2017,37(6):11-17.
- [68] 曾郁珉,周跃华,李翠萍,等. 有机肥施用量及蚯蚓投放量对茶树+橡胶林地土壤的改良效果[J]. 西部林业科学,2010,39(2):50-53.
- [69] 李艺坚,谢学方,孔令泽,等. 蚯蚓养殖对幼龄胶园土壤养分及橡胶树根系生长的影响[J]. 热带作物学报,2018,39(12):2331-2335.
- [70] 李艺坚,谢学方,孔令泽,等. 林下蚯蚓养殖对胶园土壤速效养分、酶活性和橡胶树细根根密度的影响[J]. 热带农业科学,2019,39(2):61-65.