

DOI: 10.5846/stxb201703290541

文志, 赵赫, 刘磊, 王丽娟, 欧阳志云, 郑华, 李彦旻. 基于土地利用变化的热带植物群落功能性状与土壤质量关系. 生态学报, 2019, 39(1): - .
Wen Z, Zhao H, Liu L, Wang L J, Ouyang Z Y, Zheng H, Li Y M. Relationships between plant community functional traits and soil quality based on land use changes in tropical region. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

基于土地利用变化的热带植物群落功能性状与土壤质量关系

文志^{1,2}, 赵赫^{1,2}, 刘磊³, 王丽娟^{1,2}, 欧阳志云^{1,2}, 郑华^{1,2,*}, 李彦旻^{2,4,5}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 海南鹦哥岭国家级自然保护区管理站, 白沙 572800

4 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

5 厦门城市代谢重点实验室, 厦门 361021

摘要: 为了明确热带天然林转变为橡胶林和槟榔后土壤质量变化, 揭示土地利用变化下植物群落功能性状对土壤质量影响。在海南中部山区, 以原始林 (PF)、次生林 (SF)、槟榔 (*Areca catechu*) 林 (AP)、纯橡胶 (*Hevea brasiliensis*) 林 (RP) 和橡胶益智 (*Alpinia oxyphylla*) 林 (RAP) 为对象, 探索天然林退化后土壤性质和质量变化, 分析了植物群落功能性状 (凋落物量、郁闭度、根长密度、细根密度和比根长) 对土壤质量影响。结果表明: 1) 与原始林相比, 其他土地利用类型凋落物量、根长密度、细根密度、土壤总孔隙度、最大持水量、土壤有机碳和总氮显著降低, 土壤容重显著增加。人工林土壤碱解氮明显降低, 但总磷、总钾和缓效钾明显升高 ($P < 0.05$)。2) 与原始林相比, 次生林、槟榔林、纯橡胶林和橡胶益智林土壤质量指数分别降低 63.4%、85.8%、81.2% 和 84.1%, 随原始林、次生林和人工林梯度土地利用强度的增加, 土壤质量显著降低 ($P < 0.05$), 但人工林间土壤质量无显著差异。3) 凋落物量、郁闭度、根长密度和细根密度均与土壤质量指数显著正相关 ($P < 0.05$), 细根密度对土壤质量的直接影响效应最大, 凋落物间接影响效应最大。天然林转变为橡胶和槟榔林显著改变土壤性质和质量, 群落性状细根密度和凋落物可较好解释土壤质量变化, 强化人工林林下植被和凋落物管理有利于土壤质量改善。

关键词: 土地利用变化; 群落功能性状; 土壤质量指数; 土壤退化; 海南

Relationships between plant community functional traits and soil quality based on land use changes in tropical region

WEN Zhi^{1,2}, ZHAO He^{1,2}, LIU Lei³, WANG Lijuan^{1,2}, OUYANG Zhiyun^{1,2}, ZHENG Hua^{1,*}, LI Yanmin^{2,4,5}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Hainan Yinggeling National Nature Reserve, Baisha 572800, Hainan, China

4 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

5 Key Laboratory of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China

Abstract: To reveal the effects of plant community functional trait changes, resulted from the land use conversion from primitive forest to secondary forest or plantations, on soil quality in tropical region, an investigation was conducted in five typical land use types in the central mountainous area of Hainan Island. The land use types include primitive forest (PF), secondary forest (SF), areca plantation (AP), pure rubber plantation (RP) and rubber intercropping *Alpinia oxyphylla*

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503401); 国家自然科学基金项目 (41871217)

收稿日期: 2017-03-29; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

plantation (RAP). The changes of soil qualities after the natural forest conversion to secondary forest or plantations and the relationships between plant community functional traits (litter fall, canopy density, root length density, fine root density, and specific root length) and soil quality were analyzed. Compared with those of primitive forest, the litter fall, root length density, fine root density, total soil porosity, maximum water holding capacity, soil organic carbon, and total nitrogen of other land use types decreased significantly ($P < 0.05$), but soil bulk density increased significantly ($P < 0.05$). Soil alkaline hydrolysis of nitrogen in all plantations decreased obviously, whereas soil total phosphorus, soil total potassium, and slowly available potassium increased significantly ($P < 0.05$) during the conversion. With increasing of land use intensity, the soil quality decreased significantly ($P < 0.05$). The soil quality indexes of SF, AP, RP, and RAP decreased by 63.4%, 85.8%, 81.2% and 84.1%, respectively, compared with that of PF. However, there were no differences in soil quality among the plantations. The litter fall, canopy density, root length density, and fine root density had the positive and significantly correlations with the soil quality index ($P < 0.05$). Moreover, fine root density had the largest direct effect on soil quality, and litter had the largest indirect effect. Our results suggested that the transformation of tropical primitive forests to rubber and areca plantations significantly changed soil properties and soil quality, which was mainly explained by the plant community functional traits of fine root density and litter fall. Improving the management of litter fall and understory plant community, which influences fine root density, will help increase soil quality in plantations in tropical region.

Key Words: land use change; community functional traits; soil quality index; soil degradation; Hainan Island

工业原料和农业生产的需要导致全球大量森林退化为其他土地利用类型。在热带地区,已有大量原始林转变为次生林和人工林^[1],这种退化趋势还将继续^[2]。其中,森林采伐和人工林扩种是热带天然林退化的最重要原因^[3-4]。例如,橡胶(*Hevea brasiliensis*)种植面积已达 $9.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$,预测未来还将增加 3 倍^[5]。在海南,橡胶和槟榔(*Areca catechu*)已成为最重要的两大热带经济作物^[6-7],统计年鉴显示 2016 年种植面积分别已达 $5.41 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 和 $9.97 \times 10^3 \text{ hm}^2$,其中很大部分由天然林转变而来^[8]。天然林退化后,不仅改变了植物群落结构,而且增加了土地利用强度,均会影响土壤理化性质^[1,3],容易引起土壤质量退化^[9-10],进而降低生态系统生产力^[11]。研究土地利用变化对土壤质量影响,尤其是天然林退化为橡胶林和槟榔林,对农业生产和土地管理均有现实指导意义^[3,12]。

土地利用变化对土壤质量影响已有较多研究^[9,12-13]。在热带地区,已有研究主要关注热带天然林转变为多种人工林^[14]、农耕地和草地^[10,15]及弃耕地自然恢复^[9,16]对土壤质量影响,极少有研究探讨天然林转变为橡胶林后土壤质量变化^[3,5],关于槟榔林土壤质量研究更少。但橡胶和槟榔的种植显著影响土壤性质^[2,17],例如热带森林转变为橡胶林后减少了土壤有机质^[5],降低了土壤总氮和有效磷^[1],增加了土壤容重^[18],土壤理化性质变化会导致土壤质量严重退化^[2,10]。鉴于目前已有大量天然林转变为橡胶和槟榔林,但对其土壤质量影响尚不清楚。因此,明确天然林退化为橡胶和槟榔后对土壤质量影响,探讨其内在变化机制,对于热带地区橡胶和槟榔林的有效管理尤为必要^[19]。

基于植物群落功能性状的方法可较好解释土地利用变化对生态过程影响^[20],越来越多的研究应用此方法探讨生态过程变化。例如,天然林转变为人工林后功能性状根长密度的降低增加了土壤侵蚀而导致土壤碳流失^[21]。植物群落地上和地下功能性状是多个关键生态系统过程和服务的决定性因子^[22-23],但极少有研究从群落功能性状角度阐释土地利用变化对土壤质量影响^[12,16]。本研究以海南中部山区 5 种土地利用为对象,明确天然林退化为橡胶林和槟榔林对土壤质量影响,从群落功能性状角度分析土壤质量变化原因,以期全面揭示土地利用变化对土壤质量影响的内在机制,及土地利用管理策略的制定提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南省白沙县东南部($19^\circ 04'73''$ — $19^\circ 04'80''\text{N}$, $109^\circ 31'14''$ — $109^\circ 31'55''\text{E}$),见图 1。该地区

地处北热带,属热带季风气候。地形以山地为主,年平均气温 20—24℃,年降水量 1900—2900 mm,降雨季节分配不均,雨季主要在 5—11 月,这一时期降雨量约占全年降雨总量的 80%—94%。区内主要以花岗岩为主要成土母质,土壤类型为砖黄壤。2004 年之前,当地居民以刀耕火种方式破坏森林多年,大量天然林转变为人工林。2004 年后该地区逐步建立保护区进行土地管理,天然林执行保护政策,但人工林仍允许农户按需进行管理。总体上,区内土地类型多样,分布有原始林、次生林、槟榔林、桉树(*Eucalyptus* spp.)林和橡胶林等多种类型,人工林以橡胶林和槟榔林居多。部分居民为增加收入,选择在橡胶林下套种益智(*Alpinia oxyphylla*),丰富了土地利用类型。

1.2 样地基本情况

在对研究区土地利用进行资料查询和踏查基础上,选择区内有代表性的 5 种土地类型为对象,分别为原始林(PF)、次生林(SF)、槟榔林(AP)、纯橡胶林(RP)和橡胶益智复合林(RAP)。其中,次生林为原始林经砍伐火烧后自然恢复而来。槟榔林和两种橡胶林原均为原始林,后经刀耕火种改造成人工林。其中,槟榔林下为杂草(覆盖度约 60%);橡胶林下为裸地,林下植被和杂草被人为彻底清除。将益智套种于橡胶林中,即为橡胶益智林,益智覆盖度为 60%,高度约为 1—2m,密度为 7.2×10^5 丛/hm²,两种橡胶林管理方式完全一致。在原始林中设置 50 m×50 m 标准样地,其他土地利用中设置 3 个 20 m×20 m 标准样地,再将各样方划为 10 m×10 m 的小样方,测定小样方中每株胸径(DBH)≥1 cm 木本的胸径、树高,并鉴定其种名。因益智为草本,在橡胶益智林只调查橡胶特征,记录各土地类型中坡度和林木密度等因子(表 1)。

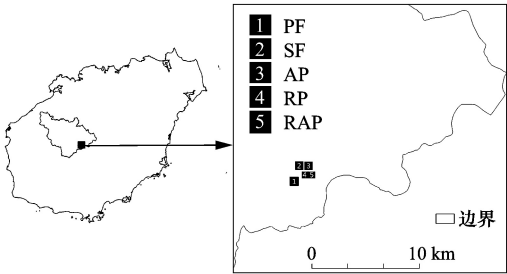


图 1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of the research area

1,2,3,4,5 分别表示原始林、次生林、槟榔林、橡胶林和橡胶益智林位置;PF:原始林,Primitive forest;SF:次生林,Secondary forest;AP:槟榔林,Areca plantation;RP:纯橡胶林,Pure rubber plantation;RAP:橡胶益智林,Rubber intercropping *Alpinia oxyphylla* plantation

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic condition of different land use types

土地类型 Land types	林龄 Stand age/a	坡度 Slope	胸径 DBH Diameter at breast height/ cm	林分密度 SD Stand density/ (株/hm ²)	优势物种 Dominant Species	干扰活动 Disturbance activities
PF	>100	19±6	10.3±2.7	(6.2±1.7)×10 ⁵	黎蒴,鸡屎树,普洱茶, 陆均松,厚皮香,毛茛, 密脉蒲桃	—
SF	10	16±3	4.5±1.6	(13.2±2.9)×10 ⁵	倒吊笔,九节,秀丽锥, 银柴,山柑算盘子,烟 斗柯	砍柴、拾薪
AP	12	18±7	11.6±1.8	(1.83±0.2)×10 ⁵	槟榔	除草、施肥、收果
RP	35	26±8	23.4±5.2	(6±1)×10 ⁴	橡胶树	除草、施肥、割胶、 拾薪
RAP	35	26±8	23.9±7.1	(6±1)×10 ⁴	橡胶树,益智	除草、施肥、割胶、收 果、拾薪

PF:原始林,Primitive forest;SF:次生林,Secondary forest;AP:槟榔林,Areca plantation;RP:纯橡胶林,Pure rubber plantation;RAP:橡胶益智林,Rubber intercropping *Alpinia oxyphylla* plantation

1.3 样品采集和测定

1.3.1 土壤样品采集及测定

已有研究表明热带地区土地利用变化主要影响表层土壤性质,对中深层土壤影响作用不大^[10,24]。据此,2016 年 9 月在各土地利用类型中取 0—10cm 表层土壤(5 点取样法),5 点取样中的每个点均用 3 个土壤环刀

(容积 100cm^3) 采集 3 个样品用于测定土壤物理性质。且在每个点用 10cm 土钻(直径 3.5cm)采取土样 3 个, 置入自封袋混匀后带回实验室测定土壤化学性质。

土壤容重、总孔隙度和最大持水量等土壤物理性质采用常规方法测定和计算^[25]。土壤有机质、土壤总氮、碱解氮、亚硝态氮、土壤总磷、有效磷、总钾、有效钾和缓效钾等土壤化学性质的测定和计算亦采用常规方法^[26]。

1.3.2 群落功能性状测定

土地利用变化显著改变植物群落功能性状^[27]。已有研究表明土壤性质受群落功能性状间接或直接影响。植被郁闭度通过多种途径改变土壤水分和养分^[28],凋落物量、根长密度和细根密度均直接影响土壤理化性质^[21,29],比根长是细根生理功能的一个重要指标,与根系分泌物和根系增殖等密切相关^[30]。因此,选择植被郁闭度、凋落物量、根长密度、细根密度和比根长为群落功能性状指标。

植被郁闭度野外直接测定。凋落物测定具体如下:在每个取土样点附近设定 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 小样方,一次性收集小样方中凋落物,实验室 65°C 烘干后,称量和计算凋落物量。细根性状测定如下:将混合均匀土样自然风干后,过 2mm 土筛,挑选土壤中 $\leq 2\text{mm}$ 细根,洗净后 65°C 烘干至恒重,称重得到细根质量 (RM)。细根样品用 Canon LiDE120 扫描仪扫描,通过 Image-Pro Plus 6.0 软件测定扫描图片中细根总长度 (RL)。群落功能性状根长密度 (RLD)、细根密度 (RD) 和比根长 (SRL) 计算公式分别为:

$$RLD = RL/V, RD = RM/V, SRL = RL/RM$$

式中, V 为取样土壤体积。

1.4 土壤质量评价

土壤质量的评价有多种方法,但多数研究采用土壤质量指数 (soil quality index, SQI) 进行评价^[31-32]。计算土壤质量指数前,需从土壤参数中选取对土壤质量敏感的评价参数最小数据集 (MDS)。土壤参数的确定有 3 种方法:(1) 参考已有文献,(2) 咨询专家意见,(3) 通过主成分分析筛选。本研究在已有文献基础上^[9-10,12,16],先选择土地利用间差异显著的土壤参数进入主成分分析。通过主成分分析,结合专家意见,筛选进入最小数据集 (MDS) 的土壤参数。土壤参数的权重 W_i 用主成分分析确定。理想情况下,土壤质量评价数据集还应包括土壤生物学参数,但理化参数基本上已经代表了土壤质量评价因子^[12],而且,用生化指标作为土壤质量评价因子的最大问题是缺乏相关参考值及这些生化性质之间存在的相互矛盾^[33]。

在评价土壤质量时,土壤肥力指标中的土壤有机质、总氮、碱解氮、亚硝态氮和总磷等被认为越多越好,土壤总孔隙度被认为合适就好^[34],但考虑到研究区土壤总孔隙度与土壤多个肥力指标可能为正相关关系^[35],因此,土壤总孔隙度和土壤肥力指标隶属度值均采用升型分布函数计算^[32],计算公式为:

$$P_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为土壤第 i 个指标的最大值和最小值; X_i 为第 i 个指标的值。

对各土壤因子指标值用乘法进行整合^[36],土壤质量指数 (SQI) 计算公式为:

$$SQI = \sum_i^n P_i W_i$$

式中, P_i 和 W_i 分别表示第 i 种评价指标所对应的隶属度值和权重系数; n 为最小数据集土壤指标的数量。

1.5 数据分析

植物群落功能性状(凋落物量、郁闭度、根长密度、细根密度和比根长)、土壤物理和化学性质及土壤质量指数通过单因素方差分析 (ANOVA) 确定不同土地利用类型的差异,在此基础上通过 LSD 两两比较以确定土地类型间的差异显著性。评价土壤质量时采用主成分分析方法 (PCA) 确定不同土壤参数的权重。Bivariate Correlations 分析群落功能性状与土壤性质和质量指数间相关性,以 Pearson 相关性系数表征与指标间相关性高低,Two-tailed 检验反映与该指标间是否具有显著相关性。以上数据分析均在 SPSS 20.0 (SPSS Inc.,

Chicago, IL, USA) 软件完成, 检验水平均为 0.05。数据结果使用 SigmaPlot for Windows version 12.5 (Systa Software Inc.) 制图。基于群落功能性状与土壤性质和质量指数间相关性, 用结构方程模型进一步探索不同因素的直接和间接影响, 运用 P 值、NNFI、CFI 和 RMSEA 作为检验模型的拟合指数, 结构方程模型的构建和分析使用 SPSS AMOS (IBM SPSS AMOS Inc., 21.0) 软件完成。

2 结果与分析

2.1 植物群落功能性状

土地利用变化显著改变了植物群落功能性状(图 2)。与原始林相比, 其他林型凋落物量、根长密度和细根密度均显著减少($P < 0.05$)。凋落物量达 8.9 t/hm^2 , 次生林、槟榔林、纯橡胶林和橡胶益智林分别降低 37.9%、65.5%、83.1% 和 72.4%。但根长密度和细根密度降低趋势不一致, 其中, 次生林、槟榔林、纯橡胶林和橡胶益智林根长密度分别降低 59.9%、52%、83.9% 和 69.5%, 细根密度分别降低 37.8%、70%、83.8% 和 62.5%。天然林凋落物、郁闭度和细根密度显著高于人工林($P < 0.05$), 但比根长差异不明显, 仅槟榔林中比根长显著低于次生林。人工林之间的根长密度差异显著($P < 0.05$), 但细根密度和比根长无明显差异。

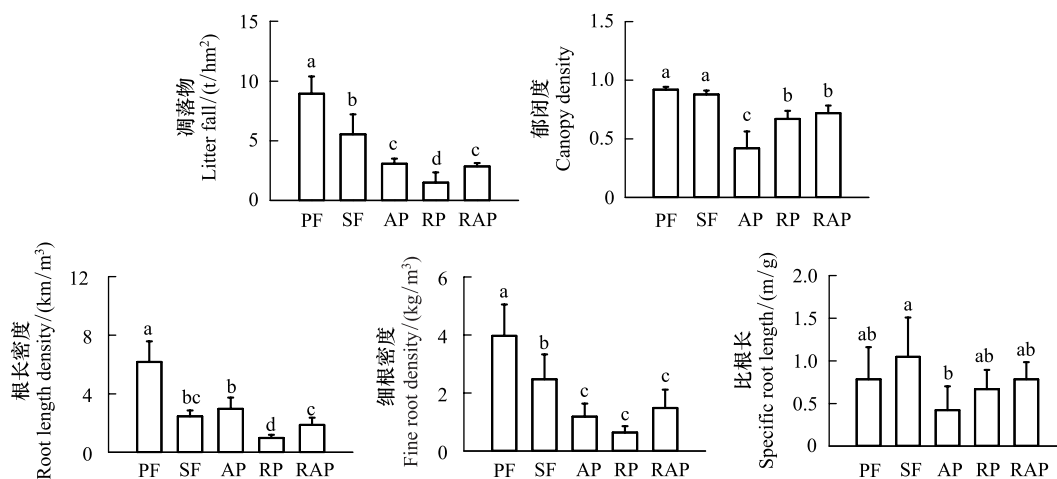


图 2 不同土地利用群落功能性状差异

Fig.2 Differences in community functional traits under different land use types

2.2 土壤质量

2.2.1 土壤理化性质

土地利用变化明显改变了土壤性质(图 3)。原始林中土壤容重、总孔隙度、最大持水量、土壤有机质和总氮分别为 1.07 g/cm^3 、56.8%、54.2%、2.86% 和 0.186%。与原始林相比, 其他林型土壤容重显著增加, 土壤总孔隙度、最大持水量、土壤有机质和总氮均显著降低($P < 0.05$), 其他四种林型间土壤容重、总氮和碱解氮无差异($P > 0.05$), 但槟榔林中土壤总孔隙度低于其他林型($P < 0.05$)。橡胶益智林中土壤有机质含量最低(1.45%), 显著低于次生林($P < 0.05$), 但与其他两种人工林无显著差异($P > 0.05$)。原始林碱解氮含量为 0.233 g/kg , 次生林、槟榔林、纯橡胶林和橡胶益智林分别降低了 13.7%、23.3%、18% 和 23.6%, 槟榔林、纯橡胶林和橡胶益智林降低明显($P < 0.05$), 但次生林降低未达到显著水平($P > 0.05$)。

原始林亚硝态氮含量为 0.23 mg/kg , 显著低于次生林和槟榔林($P < 0.05$), 但与两种橡胶林无显著差异($P > 0.05$)。槟榔林中亚硝态氮含量明显高于其他林型, 两种橡胶林间硝态氮无差异, 但橡胶益智林土壤有效磷明显高于纯橡胶林, 速效钾明显低于纯橡胶林($P < 0.05$)。原始林土壤速效钾含量为 38.6 mg/kg , 显著低于其他林型($P < 0.05$), 纯橡胶林中速效钾最高。

原始林中土壤总磷、全钾和缓效钾分别为 0.012%、0.681% 和 0.194 g/kg , 次生林、槟榔林、纯橡胶林和橡

胶益智林中土壤总磷含量分别是原始林的 1.25、1.49、1.85、1.71 倍,全钾分别是原始林的 1.09、1.35、2.05、2.45 倍,缓效钾分别是原始林 1.24、2.99、7.05、7.4 倍。其中,槟榔林和两种橡胶林总磷、全钾和缓效钾显著高于原始林($P<0.05$),但次生林与原始林间无显著差异($P>0.05$)。槟榔林与两种橡胶林间总磷无明显差异,但全钾和缓效钾显著低于两种橡胶林($P<0.05$)。土地利用强度增加会提高土壤总磷、全钾和缓效钾含量。

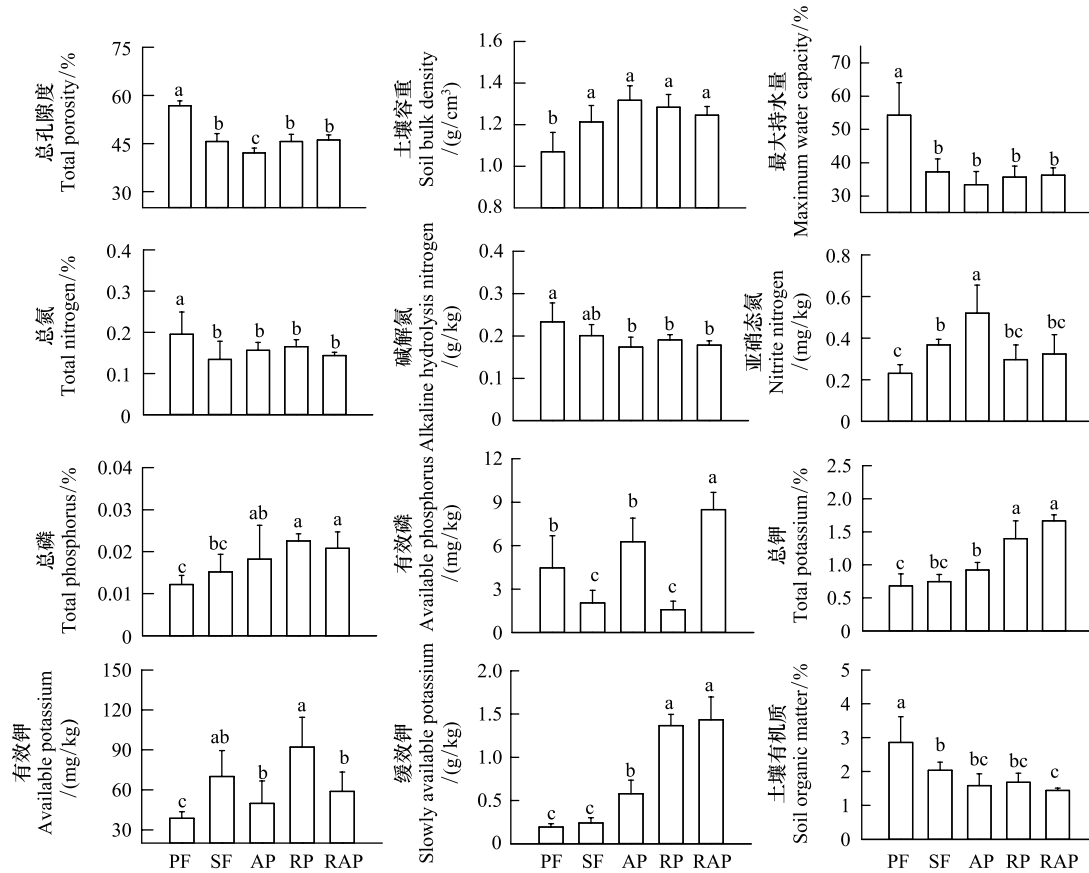


图 3 不同土地利用土壤性质差异

Fig.3 Differences in soil properties under different land use types

2.2.2 土壤质量评价参数

土地利用间差异显著的土壤参数进入主成分分析,表 2 反应不同土地利用类型土壤参数的主成分分析结果。由表可知,特征值 ≥ 1 主成分有 4 个,4 个主成分解释百分比分别为 40.71%、16.46%、15.56%和 9.19%,共可解释土壤参数总变量的 81.91%。其中,PC1 具有 4 个高权重变量,分别为土壤总孔隙度、最大持水量、土壤有机质和碱解氮,PC1 可能与土壤水分保持密切相关。PC2 高权重变量为有效磷和速效钾,反应土壤中可利用磷和钾元素含量状况。PC3 高权重变量亚硝态氮、全钾和缓效钾,PC4 高权重变量为全氮和全磷。相关分析表明各土壤参数均与特征向量显著相关,均应进入最终评价。

2.2.3 土壤质量指数

土地利用变化明显改变了土壤质量(图 4)。与原始林相比,次生林、槟榔林、纯橡胶林和橡胶益智林土壤质量指数明显降低($P<0.05$),降低比例分别为 63.4%、85.8%、81.2%和 84.1%。槟榔林中土壤质量变化最大,但与两种橡胶林间无显著差异($P>0.05$)。次生林土壤质量指数明显高于槟榔林和两种橡胶林($P<0.05$)。橡胶林中套种益智降低了土壤质量指数,降低比例为 13.5%。随着原始林、次生林和人工林梯度土地利用强度的增加,土壤质量表现出显著降低趋势。

表 2 不同土地利用土壤参数的主成分分析结果

主成分 Principal components	PC1	PC2	PC3	PC4
特征值 Eigen value	4.478	1.81	1.712	1.011
百分数 Percent	40.705	16.456	15.559	9.194
累积百分数 Cumulative percent	40.705	57.161	72.72	81.914
特征向量 Eigen vectors				
土壤总孔隙度 Soil total porosity/%	0.389 *	0.168	0.276	-0.111
最大含水量 Maximum water content/%	0.388 *	0.263	0.236	0.087
土壤有机质 Soil organic matter/%	0.428 *	-0.029	0.079	0.171
全氮 Total nitrogen/%	0.101	0.343	0.210	0.562 *
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen/(g/kg)	0.363 *	-0.188	0.238	0.057
亚硝态氮 Nitrite nitrogen/(mg/kg)	-0.143	0.285	-0.443 *	0.138
全磷 Total phosphorus/%	-0.310	0.091	0.168	0.481 *
有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	-0.138	0.577 *	-0.019	-0.201
全钾 Total potassium/	-0.288	0.233	0.502 *	-0.081
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	-0.174	-0.522 *	0.237	0.192
缓效钾 Slowly available potassium/(mg/kg)	-0.352	-0.010	0.477 *	-0.072

* 特征向量表示与土壤参数相关性显著, * $P<0.05$

2.3 土壤质量影响因素

表 3 反应群落功能性状与土壤性状和土壤质量相关性,由表可知,土地利用转变导致的植物群落功能性状变化显著影响土壤性质和土壤质量。其中,除比根长外的其他功能性状与土壤最大持水量、有机质、碱解氮和土壤质量均为显著正相关关系,表明天然林退化后凋落物量、郁闭度、根长密度和细根密度的降低均会使土壤质量退化,植物地上(凋落物和郁闭度)和地下(根长密度和细根密度)功能性状主要通过改变关键土壤性质(土壤最大持水量、有机碳和碱解氮)以影响土壤质量。土地利用转变后植物群落功能性状差异是土壤质量变化重要原因。

结构方程模型适配度指标 P 值为 0.439,NNFI 值为 1.015,CFI 值为 1.000,RMSEA 值为 0.000,表示模型的适配情形良好(图 5)。模型结果表明,细根密度对土壤质量直接影响最大,但凋落物对土壤质量间接影响最大,主要通过间接影响土壤有机质和碱解氮而影响土壤质量。

3 结论与讨论

土地利用变化导致的土地利用强度增加引起土壤质量退化。从已有研究来看,土地利用变化包含两方面重要内容,一是土地利用强度变化^[37],二是土地利用中植被群落结构变化^[5]。本研究发现原始林的转变导致土壤质量显著退化,原始林转变为次生林、槟榔林、橡胶林和橡胶益智林土壤质量分别降低 63.4%、85.8%、81.2%和 84.1%。与次生林相比,橡胶林和槟榔林土壤质量退化程度加重,与橡胶林和槟榔林中高的土地利用强度有关^[3],尤其是橡胶林和槟榔林中频繁性的农业生产活动,例如除草和收果等,压实了土壤而增加土壤容重,改变土壤孔隙度和持水性能^[2-3],影响土壤质量。橡胶林和槟榔林均为高强度土地利用类型,具相似土地利用强度^[38],因此,三种人工林间土壤质量并无显著差异。

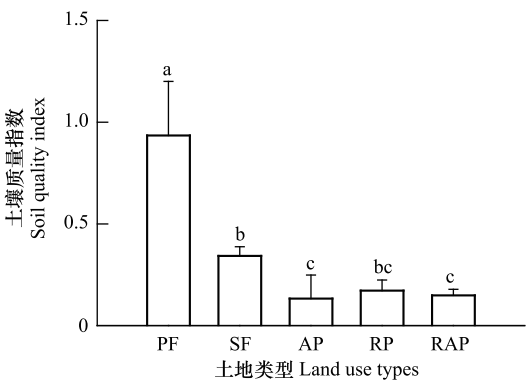


图 4 不同土地利用土壤质量指数差异
Fig. 4 Differences in soil quality index under different land use types

表 3 群落功能性状与土壤性质和土壤质量相关性

项目 Items	凋落物/(t/hm ²) Litter fall	郁闭度/% Canopy density	根长密度/(km/m ³) Root length density	细根密度/(kg/m ³) Fine root density	比根长/(m/g) Specific root length
最大持水量/% Maximum water content	0.650 **	0.531 **	0.687 **	0.472 *	0.082
有机质/% Soil organic matter	0.671 **	0.631 **	0.584 **	0.483 *	0.118
碱解氮/(g/kg) Alkaline hydrolysis nitrogen	0.473 *	0.572 **	0.470 *	0.492 *	0.112
土壤质量指数 Soil quality index	0.778 **	0.664 **	0.785 **	0.655 **	0.178

* : $P<0.05$, ** : $P<0.01$

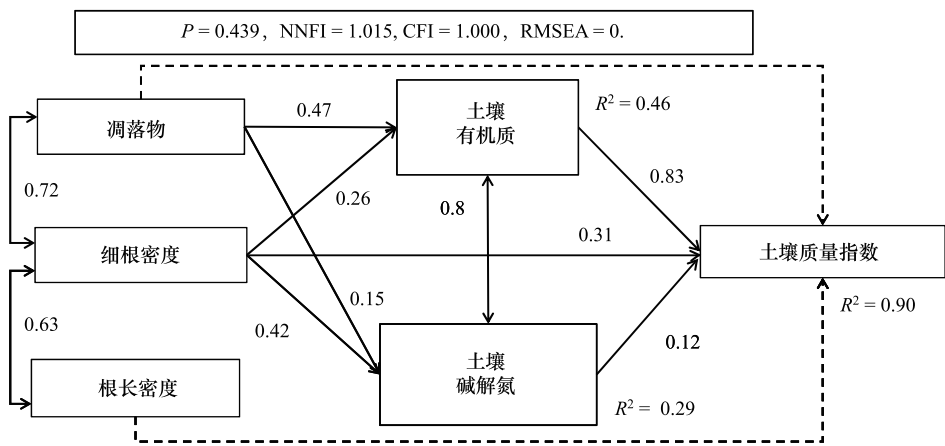


图 5 群落功能性状对土壤质量直接和间接影响

Fig.5 Direct and indirect effects of community functional traits on soil quality

NNFI:非规范拟合指数,Non-normed fit index;CFI:比较拟合指数,Comparative fit index;RMSEA:近似误差均方根,Root mean square error of approximation

土地利用转变导致植物群落功能性状变化而影响土壤质量。植物群落功能性状表征土地利用变化对植物群落结构影响,是土地利用变化的另一重要内容^[27]。本研究发现,土地利用变化下,植物群落功能性状凋落物、郁闭度、根长密度和细根密度改变是土壤质量退化重要原因(表 3)。原始林转变为次生林、橡胶林和槟榔林后,植物群落功能性状凋落物、郁闭度、根长密度和细根密度均发生明显变化,且变化趋势相异(图 2),与其他研究结果类似^[37]。群落功能性状以不同机制调节关键土壤性质而影响土壤质量。其中,天然林退化后凋落物及其分解速率的降低是土壤有机质和碱解氮减少重要原因^[39],郁闭度不仅调控凋落物输入量而间接影响土壤性质,还可控制蒸腾作用直接影响土壤水分^[28]。低的细根密度降低了根系分泌物而使土壤碳氮输入减少^[29]。此外,原始林转变为次生林和人工林降低了土壤微生物数量和种类,继而减少根系分泌物和死根的分解速率^[40],进一步降低土壤有机质和氮素的补充。细根密度通过改善土壤孔隙度和有机质含量而增加土壤最大持水性^[21],进而与其他关键土壤性质共同改善土壤质量。由此可知,植物群落地上(凋落物和郁闭度)和地下(细根密度)功能性状均与土壤质量密切相关,土地利用转变导致群落功能性状变化可能是土壤质量退化的最重要原因^[22-23]。目前极少有研究从植物群落功能性状角度分析土壤质量变化,本研究结果为全面理解土地利用变化对土壤质量影响提供了新视角。

土地管理者可通过调控植物群落功能性状以改善土壤质量。经踏查和调研发现,海南地区农户常从橡胶林拾薪,大量枯枝被人为转移降低了橡胶林中凋落物量。农户还常用喷洒农药方式清除橡胶林和槟榔林中杂草,农药施用直接导致杂草细根凋亡,有些林地甚至寸草不留,降低了群落中细根密度。从本研究结果来看,

农户的拾薪和除草活动均因降低群落功能性状而不利于土壤质量保持。因此,土地管理者可采用禁止拾薪和调整除草方式来调节土壤质量,尤其是改变除草方式,例如将喷施农药转变为人工除草,既清除了地面杂草而不影响生产,又保留了杂草地下细根活性,从而改善土壤质量。此外,有研究认为土地利用变化导致的土壤流失是土壤质量退化重要原因^[3]。本研究未测定土壤侵蚀,但据前人研究结果,热带原始林土壤流失量明显低于次生林和人工林^[2],而凋落物增加不仅可减少土壤侵蚀^[41],还可补充土壤有机质和氮素^[39],因此,对橡胶林和槟榔中凋落物进行有效管理极为必要。综合考虑到土地利用强度增加对土壤质量负面影响,土地管理中应对橡胶林和槟榔林等人工林中凋落物进行有效管理以改善土壤质量,实现土地利用可持续性。

参考文献 (References):

- [1] Guillaume T, Marangut D, Murtalaksono K, Kuzyakov Y. Sensitivity and resistance of soil fertility indicators to land-use changes: new concept and examples from conversion of Indonesian rainforest to plantations. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 49-57.
- [2] Guillaume T, Damris M, Kuzyakov Y. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by $\delta^{13}\text{C}$. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3548-3560.
- [3] Guillaume T, Holtkamp A M, Damris M, Brümmer B, Kuzyakov Y. Soil degradation in oil palm and rubber plantations under land resource scarcity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 110-118.
- [4] Krashevskaya V, Klarner B, Widyastuti R, Maraun M, Scheu S. Changes in structure and functioning of protist (Testate Amoebae) communities due to conversion of lowland rainforest into rubber and oil palm plantations. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0160179.
- [5] Van Straaten O, Corre M D, Wolf K, Tchinkoua M, Cuellar E, Matthews R B, Veldkamp E. Conversion of lowland tropical forests to tree cash crop plantations loses up to one-half of stored soil organic carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(32): 9956-9960.
- [6] 王丹, 庞玉新, 胡璇, 张晓东, 林敏霞, 于福来, 谢小丽. 海南省槟榔种植业发展现状及其动力分析. *广东农业科学*, 2013, 40(15): 207-209.
- [7] 钟勇. 海南橡胶种植业发展前景分析. *热带农业科学*, 2016, 36(8): 69-75.
- [8] 董国涛, 杨胜天, 白娟, 高云飞, 郑东海, 朗杨. 海南岛中部山区热带天然林与人工橡胶林土壤特性对比研究. *热带地理*, 2012, 32(1): 11-15.
- [9] Viana R M, Ferraz J B S, Neves Jr A F, Vieira G, Pereira B F F. Soil quality indicators for different restoration stages on Amazon rainforest. *Soil and Tillage Research*, 2014, 140: 1-7.
- [10] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79(1): 9-16.
- [11] Paz-Kagan T, Shachak M, Zaady E, Karnieli A. Evaluation of ecosystem responses to land-use change using soil quality and primary productivity in a semi-arid area, Israel. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 193: 9-24.
- [12] Ngo-Mbogba M, Yemefack M, Nyeck B. Assessing soil quality under different land cover types within shifting agriculture in South Cameroon. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 124-131.
- [13] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 赵同谦, 彭廷柏. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. *生态学报*, 2004, 24(9): 1994-2002.
- [14] Sohng J, Singhakumara B M P, Ashton M S. Effects on soil chemistry of tropical deforestation for agriculture and subsequent reforestation with special reference to changes in carbon and nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 2017, 389: 331-340.
- [15] Cherubin M R, Karlen D L, Cerri C E P, Franco A L C, Tormena C A, Davies C A, Cerri C C. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0150860.
- [16] Bautista-Cruz A, Del Castillo R F, Etchevers-Barra J D, Del Carmen Gutiérrez-Castorena M, Baez A. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2012, 277: 74-80.
- [17] 卢丽兰, 甘炳春, 许明会. 海南槟榔土壤养分与其养分特征及作用研究进展. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 372-376.
- [18] Nurulita Y, Adetutu E M, Kadali K K, Zul D, Mansur AA, Ball A S. The assessment of the impact of oil palm and rubber plantations on the biotic and abiotic properties of tropical peat swamp soil in Indonesia. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2015, 13(2): 150-166.
- [19] Zhao X, Wu P, Gao X, Persaud N. Soil quality indicators in relation to land use and topography in a small catchment on the loess plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(1): 54-61.
- [20] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014,

29(12): 692-699.

- [21] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, Poesen J. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [22] Van Der Sande M T, Peña-Claros M, Ascarrunz N, Arets E J M M, Licona J C, Toledo M, Poorter L. Abiotic and biotic drivers of biomass change in a Neotropical forest. *Journal of Ecology*, 2017, 105(5): 1223-1234.
- [23] Ali A, Yan E R, Chang S X, Cheng J Y, Liu X Y. Community-weighted mean of leaf traits and divergence of wood traits predict aboveground biomass in secondary subtropical forests. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 654-662.
- [24] Leff J W, Wieder W R, Taylor P G, Townsend A R, Nemergut D R, Grandy A S, Cleveland C C. Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2969-2979.
- [25] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [26] 陈超, 杨丰, 赵丽丽, 姚红艳, 王建立, 刘洪来. 贵州省不同土地利用方式对土壤理化性质及其有效性的影响. *草地学报*, 2014, 22(5): 1007-1013.
- [27] Carreño-Rocabado G, Peña-Claros M, Bongers F, Díaz S, Quétier F, Chuviña J, Poorter L. Land-use intensification effects on functional properties in tropical plant communities. *Ecological Applications*, 2016, 26(1): 174-189.
- [28] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [29] Ola A, Dodd I C, Quinton J N. Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? *Soil Discussions*, 2015, 2(1): 265-289.
- [30] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根根长特性. *生态学报*, 2006, 26(12): 4164-4170.
- [31] Armenise E, Redmile-Gordon M A, Stellacci A M, Ciccacese A, Rubino P. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130(6): 91-98.
- [32] Zhang K, Zheng H, Chen F L, Ouyang Z Y, Wang Y, Wu Y F, Lan J, Fu M, Xiang X W. Changes in soil quality after converting *Pinus* to *Eucalyptus* plantations in southern China. *Solid Earth*, 2015, 6(1): 115-123.
- [33] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 檀满枝. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定. *生态学报*, 2007, 27(7): 2715-2724.
- [34] Masto R E, Chhonkar P K, Purakayastha T J, Patra A K, Singh D. Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India. *Land Degradation & Development*, 2008, 19(5): 516-529.
- [35] 杨怀, 李意德, 任海, 骆土寿, 陈仁利, 刘文杰, 陈德祥, 许涵, 周璋, 林明献, 杨秋, 姚海荣, 周国逸. 海南岛热带原始森林主要分布区土壤有机碳密度及影响因素. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 292-303.
- [36] Zheng H, Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H, Zhao T Q, Peng T B. How different reforestation approaches affect red soil properties in southern China. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(4): 387-396.
- [37] Pakeman R J. Functional diversity indices reveal the impacts of land use intensification on plant community assembly. *Journal of Ecology*, 2011, 99(5): 1143-1151.
- [38] Brown M T, Vivas M B. Landscape development intensity index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 101(1/3): 289-309.
- [39] Paudel E, Dossa G G O, Xu J C, Harrison R D. Litterfall and nutrient return along a disturbance gradient in a tropical montane forest. *Forest Ecology and Management*, 2015, 353: 97-106.
- [40] Krashevskaya V, Klarner B, Widyastuti R, Maraun M, Scheu S. Impact of tropical lowland rainforest conversion into rubber and oil palm plantations on soil microbial communities. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(6): 697-705.
- [41] Liu W J, Luo Q P, Lu H J, Wu J E, Duan W P. The effect of litter layer on controlling surface runoff and erosion in rubber plantations on tropical mountain slopes, SW China. *Catena*, 2017, 149: 167-175.