

# 海拔梯度和原生林转换对北热带山地土壤有机碳密度的影响

王平<sup>1</sup>, 俞筱桢<sup>2</sup>, 丁智强<sup>1,3\*</sup>, 谭小爱<sup>1</sup>, 华红莲<sup>1</sup>, 李玉辉<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学地理学部, 云南 昆明 650500; 2. 黔南民族师范学院旅游与资源环境学院, 贵州 都匀 558000;  
3. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 【目的】探究北热带土壤有机碳密度 (SOCD) 对海拔梯度和原生林转换的响应特征及内在机制。【方法】以中国红河蝴蝶谷地区海拔 105~3012 m 的山地和原生热带雨林转换而来的香蕉和橡胶种植园为研究对象, 研究 0~40 cm 土壤有机碳 (SOC) 在海拔梯度和原生林转换后的变化情况, 并用最小角回归 (Least Angle Regression, LARS)、偏相关和皮尔森相关分析探究气候和土壤理化因子的耦合驱动作用。【结果】① 海拔与 SOC 呈显著正相关, 从低海拔的砖红壤带到高海拔的棕壤带, SOC 储量增加了 452.1% (0~40 cm 土层), 该变化主要受土壤容重 (BD)、酸碱度 (pH)、全磷 (TP)、速效氮 (AN) 和年平均气温 (MAT) 的驱动, 偏相关分析表明 MAT 对 SOCD 的作用不随土壤理化因子而改变, 但土壤理化因子对 SOCD 的作用却受 MAT 的控制。② 低地原生林转换为橡胶和香蕉种植园后 SOC 储量分别损失了 49.7% 和 43.5%, SOCD 损失与土壤 BD 增加和 C/N 减小有关, 二者反映了原生林转换后凋落物归还减少和侵蚀加强两个重要的生态过程。【结论】北热带山地土壤碳密度极易受到年均气温的影响, 而低海拔土壤碳密度主要受人类活动干扰的调控, 未来对土壤碳密度的评估除考虑垂直梯度分异外, 还应考虑原生林转换为种植园导致的土壤有机碳损失。

**关键词:** 土壤有机碳密度; 海拔梯度; 热带雨林; 原生林转换; 热带种植园

中图分类号: S153.6 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2024)02-0391-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022112801

王平, 俞筱桢, 丁智强, 谭小爱, 华红莲, 李玉辉. 海拔梯度和原生林转换对北热带山地土壤有机碳密度的影响 [J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 391-400

WANG Ping, YU Xiao-ya, DING Zhi-qiang, TAN Xiao-ai, HUA Hong-lian, LI Yu-hui. Effects of Altitudinal Gradient and Primary Forest Conversion on Soil Organic Carbon Density in the Northern Tropical Mountains [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 391-400

**【研究意义】** 土壤碳库平衡与气候变暖之间存在正反馈效应, 所以最近提出的“千分之四”倡议表明增加土壤碳储量依然是目前缓解气候变化的最大希望, 然而实现这一目标的前提是对土壤碳库的可靠估计<sup>[1]</sup>。热带森林存储了全球 2/3 的植物生物量碳和 1/4 的土壤碳, 已有证据表明地形和人类活动是导致土壤有机碳密度 (Soil Organic Carbon Density, SOCD) 空间分异的主要原因<sup>[2-3]</sup>。大量从全球到样地尺度的研究促进了人们对土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 响应海拔梯度变化和原生林转换的了解<sup>[4-6]</sup>, 但对分布广泛且高度异质性的热带山地生态系统的认识依然不足。

**【前人研究进展】** 热带山地森林 SOCD 由于受地形结构、垂直气候梯度以及生态系统差异的影响, 其预测具有很大的不确定性<sup>[3]</sup>。首先, 目前对热带碳储量的研究主要集中在低地森林和地上部分<sup>[7-8]</sup>, 对海拔梯度的研究较少; 其次, 关于热带山地森林 SOC 海拔梯度效应的研究结果不一致, 甚至相互矛盾, 比如安第斯山脉的 SOCD 不受海拔梯度的影响<sup>[9]</sup>, 而武夷山<sup>[10]</sup>、中非班布托山<sup>[11]</sup> 的 SOC 随海拔高度先增加后下降, 邱思慧<sup>[12]</sup>、Castillo-Figueroa<sup>[6]</sup> 等研究则显示了 SOC 随海拔升高而增加的规律; 最后, 有关 SOC 海拔梯度效应的调控机制尚存争议, 跨纬度尺度和高寒草地的研究结果表明: 气候与地

收稿日期: 2022-11-28; 修订日期: 2023-05-25

基金项目: 中央财政林业改革发展资金项目 (53060020000000025798) 和国家自然科学基金项目 (41861030) 资助

作者简介: 王平 (1965-), 男, 云南昭通人, 硕士, 副教授, 硕士生导师。主要从事土壤地理研究。E-mail: ynuwangping@163.com

\*通讯作者: E-mail: dingfjnu@163.com

球化学因素的相互作用调控着海拔梯度上 SOC 储量和周转时间<sup>[13-14]</sup>, 然而这在土壤高度风化、土壤类型变异大、碳周转迅速的热带山地森林土壤的表现尚不可知。此外, 土壤带是土壤发生学和诊断学特性基本一致的特定空间范围, 山地土壤带反应了相似土壤理化性质、温度、水分条件以及植物群落特征, 然而, 基于热带山地不同土壤垂直带 SOC 变化的研究较少。

森林的破坏、恢复或者林型转化等土地利用变化在全球、大陆以及区域尺度显著影响土壤碳动态<sup>[15-16]</sup>, 其中原生林转换引起的土壤碳储量变化占主导地位, 特别是在热带地区, 21 世纪的前 20 年全球热带森林总碳损失翻了一番, 驱动力分析表明原生林转换造成的土壤碳损失高于其他类型的土地利用变化<sup>[16]</sup>。由于市场的巨大需求, 作为世界经济贸易中排名第五、世界十大主食之一的香蕉 (*Musa spp.*) 种植面积超过  $500 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 而橡胶在 2010 年之前种植面积达  $950 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 2010 — 2017 年之间又扩张了  $200 \times 10^4 \text{ hm}^2$ <sup>[17-18]</sup>。热带低地雨林砍伐是香蕉和橡胶种植园迅速增加的根本原因, 已有研究表明原生林转换后凋落物归还减少<sup>[19]</sup>, 土壤侵蚀加强, 在新开垦的香蕉和橡胶种植园中土壤侵蚀速率可达  $4.7 \sim 9.9 \text{ cm a}^{-1}$  不等, 即使是成熟的种植园每年依然有  $0.35 \sim 1.56 \text{ cm}$  的土壤被侵蚀<sup>[20]</sup>, 这些改变严重威胁着土壤碳库平衡。但目前对热带土地利用变化的研究主要集中在原生林向次生林、人工木材林、草地、农田等转换方面<sup>[16,21]</sup>, 少数涉及橡胶林、香蕉种植园的研究也主要集中在空间变化<sup>[22-23]</sup>、病虫害<sup>[24]</sup>、生物多样性<sup>[25]</sup> 等方面, 有关原生林转换为橡胶、香蕉种植园后 SOC 变化方向、幅度以及关键过程的研究依然很少。

**【本研究切入点】** 无论是热带山地海拔梯度还是低地原生林转换为种植园, 对土壤有机碳库的影响往往会随特定地理空间特征、地形和气候条件而变化, 这阻碍了人们对土壤碳动态和空间分布的一般性认识。云南省南部地形复杂, 山地土壤垂直带谱多样, 虽然已有几项 SOC 与海拔梯度关系的研究<sup>[26-27]</sup>, 但由于采样点处于不同水平气候带和地质环境背景而增加了结果的不确定性, 此外相关学者研究了香蕉和橡胶种植园 SOC 动态, 但没有考虑原生林转换过程的影响<sup>[28]</sup>。**【拟解决的问题】** 本研究在中国红河蝴蝶谷地区山地海拔梯度 (105 ~ 3012 m) 和低地热带雨林、香蕉、橡胶种植园进行采样, 以

展示同一地区海拔梯度和原生林转换对土壤碳动态的影响。本研究主要讨论以下问题: ① SOCD 在海拔梯度上 (105 ~ 3012 m) 的垂直分布特性和调控因子; ② 热带雨林向种植园转换后 SOCD 变化及关键驱动过程。

## 1 研究区概况

研究区位于云南省东南部红河州金平县马鞍底乡和勐桥乡境内, 地理坐标:  $22^{\circ}35'40'' \sim 22^{\circ}52'5'' \text{ N}$ ,  $103^{\circ}24'51'' \sim 103^{\circ}38'48'' \text{ E}$  (图 1)。出露的岩石以片岩、片麻岩、混合岩和花岗岩为主。地势由西南向东北倾斜, 最高峰五台山海拔 3012 m, 最低点为龙脖河汇口, 海拔 105 m。河流均属红河水系, 自北向南依次为红河一级支流新桥河、小者兰河、龙脖河。气候类型为低纬北热带山原型季风气候。

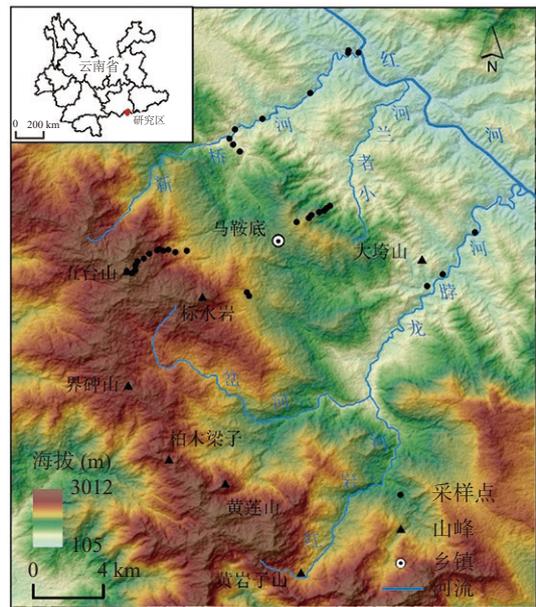


图 1 研究区位置及采样点空间位置

Fig.1 Location of study area and spatial location of sampling points

将马鞍底 (1310 m)、勐桥 (462 m) 两个自动气象站 2013 — 2015 年气温观测数据、分水岭气象站 (2340 m) 1970 — 1985 年气温观测数据以及五台山 (3012 m) 气温订正值进行拟合, 得到该山地区气温垂直递减率为  $0.558^{\circ}\text{C} (100\text{m})^{-1}$  ( $r = 0.9965$ ,  $P = 0.001$ ), 进而推算得到区内年平均气温 (Mean annual temperature, MAT) 从最低海拔的  $23.5^{\circ}\text{C}$  降低到最高海拔的  $7.8^{\circ}\text{C}$ 。

采用附近勐坪雨量站 (950 m) 1960 — 1990 年

降水量、分水岭气象站 (2340 m) 1970 — 1985 年降水量、勐桥自动气象站 (462 m) 2013 — 2015 年降水量、区内卡房雨量站 (120 m) 1960 — 1990 年降水量和马鞍底自动气象站 (1310 m) 2013 — 2015 年降水量, 通过线性回归拟合得到区内年平均降水量 (Mean annual precipitation, MAP) 从最低点的 1598 mm 递增到最高点的 3850 mm。5 ~ 10 月降水量占全年的 70% ~ 85%, 11 月至次年 4 月降水量占全年的 15% ~ 30%。

## 2 材料与方 法

### 2.1 山地土壤带划分及采样

研究区基带为砖红壤带 (105 ~ 600 m), 在砖红壤之上到五台山山顶依次发育有赤红壤带 (600 ~ 1200 m)、红壤带 (1200 ~ 1500 m)、黄壤带 (1500 ~ 1900 m)、黄棕壤带 (1900 ~ 2500 m)、棕壤带 (2500 ~ 3012 m), 对应的植被类型分别为湿润雨林、山地雨林、季风常绿阔叶林、中山湿性常绿阔叶林、山地苔藓常绿阔叶林、山地苔藓矮林。各山地土壤带坡度在 17.2° ~ 35.5° 之间, 郁闭度在 78% ~ 92% 之间, 乔木层平均树高在 11.2 ~ 18.9 m 之间, 平均胸径在 15.3 ~ 27.8 cm 之间<sup>[29]</sup>。

基于山地土壤带划分结果, 于 2015 年 7 ~ 8 月和 2016 年 9 月, 在每个土壤带内以高差 100 m 的间距, 按“S”型采样法随机选取 5 个点, 按表层 (0 ~ 20 cm)、亚表层 (20 ~ 40 cm) 分层采样, 再将 5 个点的同层土样均匀混合, 采用四分法按对角线取 500 g 装入土袋, 采集混合样 58 袋 (表层、亚表层各 29 袋), 从砖红壤带到棕壤带, 每层土壤对应的样品数量分别为 5、6、3、4、6、5 个, 以满足统计要求。在采样过程中尽可能保证采样点坡度和坡向一致。

在采集 105 ~ 200 m、200 ~ 300 m 和 300 ~ 400 m 海拔段原生热带雨林砖红壤土样时, 选取附近由原生林转换而来的 3 片橡胶林和香蕉园, 在每片园地内设置 30 m × 30 m 的样方 1 个, 样方内按“S”型选取 5 个点, 按表层、亚表层将 5 个点的同层土样均匀混合, 采用四分法按对角线取 500 g 土壤装袋, 共采集水平样带混合土样 12 袋 (表层、亚表层各 6 袋), 用于分析原生林向香蕉和橡胶种植园转换后的 SOC 储量变化情况。3 片香蕉园香蕉种植密度为 4500 ~ 5000 株 hm<sup>-2</sup>, 施肥以钾肥为主, 其次是复合肥, 每年还会施用鸡粪等有机肥。3 片橡胶林种植

约 30 a, 株距为 2.5 ~ 3 m, 行距为 6 ~ 7 m, 橡胶园的管理包括修整梯地、施肥、防治害虫、清除林下植被和割胶等<sup>[29]</sup>。

### 2.2 土壤有机碳及影响因素测定

土壤有机碳 (SOC, g kg<sup>-1</sup>) 采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 氧化法测定。土壤有机碳密度 (SOC<sub>D</sub>, kg m<sup>-2</sup>) 是一定深度一定面积范围内的土壤有机碳储量, 以下列公式计算:

$$SOC_D = \sum_{i=1}^n 0.01 \times SOC_i \times BD_i \times (1 - ST_i) \times \Delta d_i$$

式中, SOC<sub>i</sub> 是第 *i* 层的土壤有机碳含量 (g kg<sup>-1</sup>), BD<sub>i</sub> 是第 *i* 层土壤的容重 (g cm<sup>-3</sup>), ST<sub>i</sub> 是第 *i* 层土壤中粒径 > 2 mm 的砂砾比例 (%) (按相关研究结果一般可忽略不计), Δ*d*<sub>*i*</sub> 是第 *i* 层土壤的厚度 (cm), 参数 0.01 是单位转换系数, *i* 为土壤层次序号, *n* 为土壤层次数。

土壤自然含水量 (Soil Moisture, SM) 采用烘干法测定; 土壤酸碱度 (pH) 采用水浸提电极电位法测定 (水土比为 2.5 : 1); 土壤吸湿水含量采用烘干法测定; 土壤容重 (Bulk Density, BD) 采用环刀法测定; 土壤颗粒组成采用比重计法测定; 全磷 (Total P, TP) 采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定; 全钾 (Total K, TK) 采用 NaOH 熔融—火焰光度法测定; 全氮 (Total N, TN) 采用半微量开氏法测定; 速效氮 (Available N, AN) 采用碱解扩散法测定; 速效磷 (Available P, AP) 采用盐酸-氟化铵浸提法测定; 速效钾 (Available K, AK) 采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提—火焰光度法测定。

### 2.3 统计分析

在 Origin 2021b 中使用单因素方差分析 (ANOVA) 确定不同土壤带及土地利用类型下 SOC、SOC<sub>D</sub> 的差异显著性 (0.05 水平) 并绘图, 在 R (R 4.0.5) 中使用 Corrplot 计算皮尔森相关系数、绘制相关性热图, 使用 Car 包计算 16 个指标的方差膨胀因子 (VIF), 去除年均降水量、土壤吸湿水含量、全氮、粉砂粒含量等 4 个 VIF 大于 10 的因子, 使用 Ppcor 包计算 MAT 与土壤理化因子交互的偏相关系数, 用于确定土壤、气候之间的相互关系。

为了确定变量对 SOC 和 SOC<sub>D</sub> 的预测能力, 在 R 中使用 Lars 包计算 12 个预测变量的相对贡献。LARS (Least Angle Regression, LARS) 是一种针对线性回归问题, 快速进行特征选择和计算回归系数的迭代算法, 其被广泛用于求解最小绝对收缩和选

择算子路径, 它使误差平方和最小化, 并对系数的绝对值之和 ( $\ell_1$  范数) 进行惩罚。由于样本量相对较小, 为了避免过度解释数据, 不允许任何交互项进入预测模型, 并且所有模型都经过交叉验证, 最终选择 CP 值 (Mallows's CP) 最小的模型进行分析, 模型性能由交叉验证的均方根误差 (RMSE) 评估, 所选模型中确定的变量对预测响应变量的相对重要性计算为标准化回归系数, 系数越高, 其对 SOC 响应变量预测的相对重要性就越高。

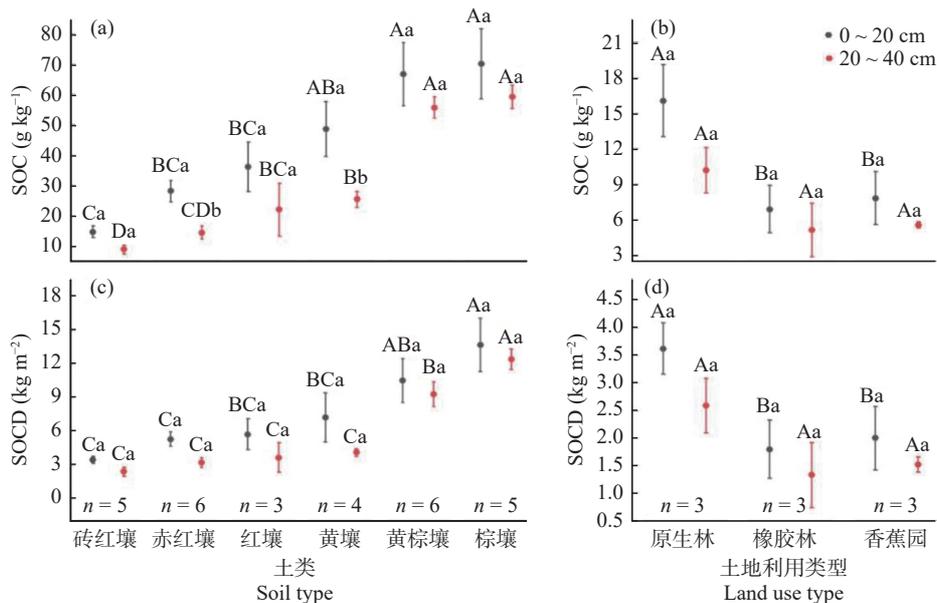
### 3 结果分析

#### 3.1 SOC/SOCD 对海拔梯度和原生林转换的响应

研究区表层 SOC 从砖红壤的  $14.71 \pm 1.91 \text{ g kg}^{-1}$  增加到棕壤的  $69.99 \pm 11.49 \text{ g kg}^{-1}$  ( $P < 0.05$ ), 亚表层 SOC 亦从  $8.94 \pm 1.51 \text{ g kg}^{-1}$  增加到  $59.09 \pm 3.78 \text{ g kg}^{-1}$ , 表层与亚表层 SOC 的差异仅在赤红壤带和黄

壤带较显著 (图 2a)。表层 SOCD 从砖红壤的  $3.40 \pm 0.29 \text{ kg m}^{-2}$  增加到棕壤的  $13.63 \pm 2.36 \text{ kg m}^{-2}$  ( $P < 0.05$ ), 亚表层则从  $2.35 \pm 0.3929 \text{ kg m}^{-2}$  增加到  $13.34 \pm 0.9235 \text{ kg m}^{-2}$  ( $P < 0.05$ ), 表层和亚表层 SOCD 仅在赤红壤带具有显著差异。总体来看, 表层和亚表层 SOC/SOCD 均随海拔而逐渐增大 (图 2b)。

原生林转换为橡胶林和香蕉园导致表层 SOC 显著下降了 56.92% 和 51.23% ( $P < 0.05$ ), 亚表层分别降低了 53.79%、50.15% ( $P > 0.05$ )。在 3 种土地利用类型中, SOC 随土层深度而降低 ( $P > 0.05$ )。原生林转换为橡胶林和香蕉园后表层 SOCD 降低了 50.51%、44.88% ( $P < 0.05$ ), 亚表层分别降低了 44.40%、36.55%, 平均降低了 49.76% 和 43.46% (0~40 cm)。从表层和亚表层来看, 原生林转换后表层的差异较亚表层显著, 说明原生林转换首先造成表层碳的流失 (图 2b、图 2d)。



注: SOC—土壤有机碳含量, SOCD—土壤有机碳密度。不同小写字母表示不同土层深度的 SOC/SOCD 差异显著, 不同大写字母表示相同土层深度的 SOC/SOCD 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据用平均值  $\pm$  标准误显示。

图 2 海拔梯度和原生林转换造成的 SOC/SOCD 变化

Fig.2 SOC/SOCD changes caused by elevation gradient and forest conversion

#### 3.2 SOC/SOCD 变化的影响因素

Lars 回归得到的 4 个模型解释了 SOC 74%~87% 的方差, 说明模型具有较好的预测能力 (表 1)。在对表层 SOCD 的预测中, 共有 MAT、BD、SM、pH、AN、TP、C/N 7 个因子入选模型, 其中贡献值最大的为 BD (16.19); 而对亚表层 SOCD 的预测中, 共有 MAT、BD、SM、AN、TP 5 个因子入选模型, 其中贡献值最大的是 BD (7.04)。在各个预

测因子中, MAT 和 pH 对研究区 SOC 变化具有负效应, 而 BD、SM、AN、TP、Clay 和 C/N 具有正效应。总体来说, BD 对 SOCD 的预测贡献最大, 其次是 pH 和 TP, MAT、SM、AN、C/N 以及 Clay 的影响较小。

#### 3.3 气温和土壤理化性质对 SOC/SOCD 的交互影响

不同深度 SOCD 与 MAT 的零阶偏相关系数均呈显著负相关 (表 2), 且相关性为亚表层 > 表层,

表 1 气候和土壤理化性质因子在预测 SOC 中的相对贡献(Lars 回归分析)

Table 1 Relative contribution of climate & soil physical and chemical property factors in predicting SOC by LARS

土壤层 Soil layer	截距 Intercept	MAT	BD	SM	pH	AN	TP	Clay	C/N	R <sup>2</sup>	RMSE	CP	P
0 ~ 20 cm													
SOC	3.84	-0.53	44.42	0.30	-7.98	0.25*	0.98	NS	0.07	0.76	0.343	0.60	0.00
SOCD	1.19	-0.19	16.19***	0.04	-2.43	0.04	0.27	-0.07	0.01	0.74	0.556	0.59	0.00
20 ~ 40 cm													
SOC	57.20	-2.91***	NS	0.18	NS	0.05	2.73	NS	NS	0.87	0.465	0.69	0.00
SOCD	5.42	-0.67***	7.04***	0.03	NS	0.01	0.54	NS	NS	0.83	0.434	1.10	0.00

注: SOC—土壤有机碳含量 (g kg<sup>-1</sup>); SOCD—土壤有机碳密度 (kg m<sup>-2</sup>); MAT—年平均气温; BD—土壤容重; SM—土壤含水量; pH—土壤酸碱度; AN—土壤速效氮; TP—全磷; AP—速效磷; TK—全钾; AK—速效钾; Clay—黏粒含量; Sand—砂粒含量; C/N—土壤碳氮比; R<sup>2</sup>和 RMSE 通过交叉验证计算; CP 为衡量因子多重共线性的参数, 选择 CP 值最小的模型; P 为模型显著性; NS: 没有选入模型; \*P < 0.05, \*\*P < 0.01, \*\*\*P < 0.001

SOC > SOCD。当去除土壤理化因子后, SOCD 与 MAT 的偏相关系数发生了显著变化, 具体为当去除 AN 后, SOCD 与 MAT 的相关系数由-0.66 减小到-0.26, 亚表层 SOCD 与 MAT 的相关系数由极显著

负相关的-0.83 减小到显著相关的-0.44。而去除 BD 后表层 SOCD 与 MAT 的相关系数由极显著负相关的-0.66 变为显著正相关的 0.42。

表 2 去除土壤理化因子后 SOC/SOCD 与 MAT 的偏相关分析

Table 2 Partial correlation analysis of SOC/SOCD and climate (temperature) under control of soil physicochemical properties

土壤层 Soil layer	Z-O (MAT)	BD	SM	pH	AN	TP	AP	TK	AK	Clay	Sand	C/N
0 ~ 20 cm												
SOC	-0.73**	-0.70**	-0.59**	-0.58**	-0.14	-0.71**	-0.76**	-0.74**	-0.66**	-0.66**	-0.73**	-0.73**
SOCD	-0.66**	0.42*	-0.51**	-0.55**	-0.26	-0.63**	-0.67**	-0.66**	-0.57**	-0.58**	-0.65**	-0.65**
20 ~ 40 cm												
SOC	-0.89**	-0.87**	-0.87**	-0.87**	-0.62**	-0.86**	-0.89**	-0.90**	-0.88**	-0.85**	-0.89**	-0.89**
SOCD	-0.83**	-0.89**	-0.79**	-0.81**	-0.44*	-0.77**	-0.83**	-0.83**	-0.83**	-0.78**	-0.82**	-0.83**

注: Z-O (MAT) 列表示 SOC/SOCD 与 MAT 的零阶偏相关系数, 其余列表示去除对应土壤理化因子后 SOC/SOCD 与 MAT 的偏相关系数; \*P < 0.05; \*\*P < 0.01, n = 29

各土壤层 SOCD 与土壤理化因子的零阶偏相关系数具有差异性 (表 3), 在去除 MAT 的影响后, SOCD 与 AP、TK、C/N 的偏相关系数没有显著变化, 但表层 SOCD 与 BD 的相关系数从 0.02 增加到显著相关的 0.44, 亚表层 SOCD 与 BD 的偏相关系数从-

0.19 增加到极显著相关的 0.58。而表层 SOCD 与 SM、pH、AN、TP、AK、Clay 则由显著负相关降低为无显著相关, 亚表层 SOCD 与 SM、AN、TP、Clay 的相关性亦发生了显著变化。

表 3 去除 MAT 后土壤理化因子与 SOC/SOCD 的偏相关分析

Table 3 Correlation of soil physicochemical properties and SOC/SOCD with removal of climatic (temperature) effects

土壤层 Soil layer		BD	SM	pH	AN	TP	AP	TK	AK	Clay	Sand	C/N
0 ~ 20 cm												
SOC	Z-O	-0.27	0.71**	-0.59**	0.80**	0.37*	-0.17	-0.06	-0.42*	-0.41*	0.1	-0.13
	MAT	0.05	0.56**	-0.26	0.49**	0.27	-0.35	-0.16	-0.05	0.02	-0.13	0.04
SOCD	Z-O	0.02	0.57**	-0.44*	0.65**	0.41*	-0.04	-0.04	-0.41*	-0.38*	0.16	-0.15
	MAT	0.44*	0.35	-0.06	0.22	0.33	-0.13	-0.11	-0.09	0.01	-0.01	-0.02
20 ~ 40 cm												
SOC	Z-O	-0.45*	0.57**	-0.44*	0.86**	0.63**	0.13	0.05	-0.28	-0.52**	0.25	-0.11
	MAT	0.12	0.43*	-0.10	0.42*	0.50**	0.04	-0.30	0.11	-0.01	-0.01	0.01
SOCD	Z-O	-0.19	0.52**	-0.32	0.83**	0.62**	0.16	0.10	-0.19	-0.46*	0.21	-0.15
	MAT	0.58**	0.30	0.12	0.44*	0.45*	0.11	-0.13	0.21	0.07	-0.05	-0.08

注: Z-O 一行表示 SOC/SOCD 与土壤理化因子之间零阶偏相关系数, MAT 一行表示去除 MAT 影响后 SOC/SOCD 与土壤理化因子之间的偏相关系数; \*P < 0.05; \*\*P < 0.01, n = 29

偏相关分析首先反应了 AP、TK、C/N 无论是独立还是与 MAT 的相互作用，对 SOCD 的影响均较小，这与 Lars 回归的结果（表 1）一致，其次表明海拔梯度上 MAT 对 SOCD 的影响不随土壤类型或土壤理化性质而改变，但土壤理化性质对 SOCD 的影响却受 MAT 的控制。

### 3.4 不同土地利用类型 SOC/SOCD 与土壤理化因子的相关性

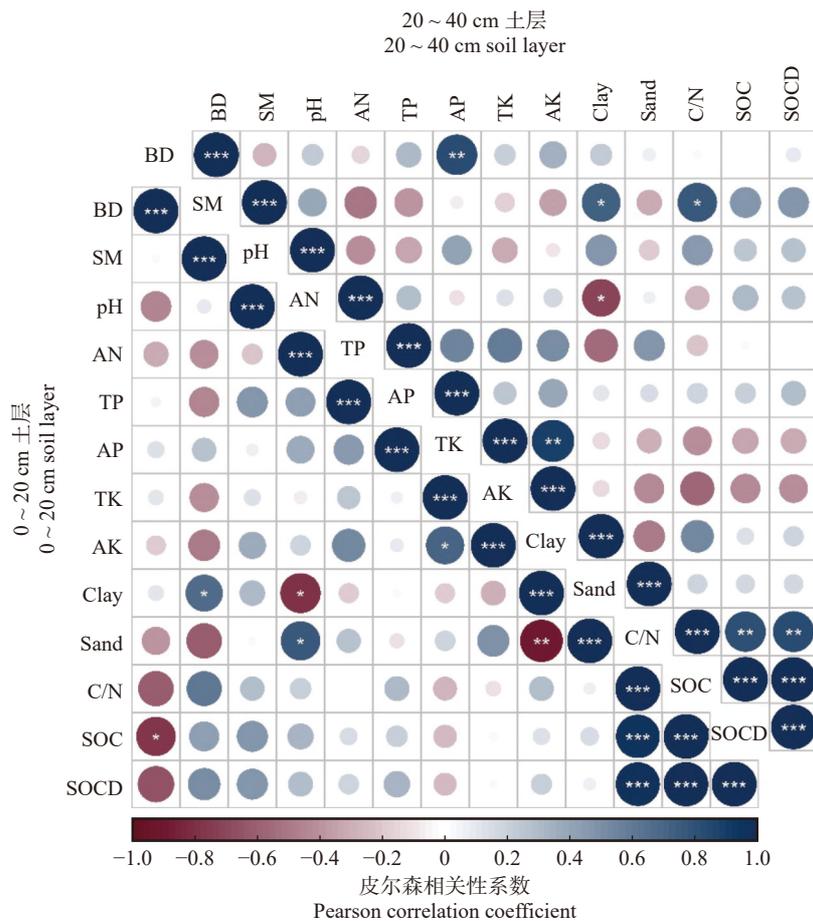
原生林转换导致的 SOC 流失虽然受土壤理化性质的影响，但本研究的 SOC 主要与 BD ( $r = -0.77$ )、C/N ( $r = 0.95$ ) 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与其他土壤理化因子的相关性较小（图 3）。在表层的各个土壤理化因子之间，速效钾与全钾含量 ( $r = 0.72$ ) 呈显著正相关；土壤黏粒含量与土壤含水量 ( $r = 0.68$ ) 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与速效氮 ( $r = -0.8$ ) 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；土壤砂粒含

量与速效氮 ( $r = 0.77$ ) 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与黏粒含量 ( $r = -0.90$ ) 呈中度显著负相关 ( $P < 0.01$ )。在亚表层中，SOC 仅与土壤碳氮比 ( $r = 0.82$ ) 呈中度显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与土壤容重的相关性降低，SOCD 与土壤碳氮比呈中度显著相关 ( $r = 0.83$ ,  $P < 0.01$ )，与 SOC 呈极显著正相关 ( $r = 0.99$ ,  $P < 0.001$ )。亚表层土壤速效磷与容重 ( $r = 0.82$ ,  $P < 0.01$ ) 以及土壤碳氮比与土壤水分 ( $r = 0.77$ ,  $P < 0.05$ ) 的相关性比表层增加，土壤黏粒含量与土壤含水量 ( $r = 0.74$ ,  $P < 0.05$ ) 和速效磷 ( $r = -0.71$ ,  $P < 0.05$ ) 的相关性与表层一致（图 3）。

## 4 讨论

### 4.1 山地 SOC/SOCD 变化特征

研究区 SOCD ( $13.40 \pm 2.21 \text{ kg m}^{-2}$ ) 与老挝<sup>[30]</sup>接近，高于中亚热带地区<sup>[9]</sup>。SOCD 随剖面深度增加



注: SOC—土壤有机碳含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )；SOCD—土壤有机碳密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ )；BD—土壤容重；SM—土壤含水量；pH—土壤酸碱度；AN—土壤速效氮；TP—全磷；AP—速效磷；TK—全钾；AK—速效钾；Clay—黏粒含量；Sand—砂粒含量；C/N—土壤碳氮比；\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ 。

图 3 原生林转换后土壤理化因子的相关性

Fig.3 Correlation of soil physicochemical factors after primary forest conversion

而减小的规律与刘波<sup>[11]</sup>、邱思慧<sup>[12]</sup>、熊小玲<sup>[10]</sup>等的结果一致, 土壤碳储量主要分布在表土层中 (56.72%), 说明外部干扰造成的微小变化都会使 SOCD 发生较大的损失。各土壤带 SOCD 处于中国地带性土壤的范围内<sup>[31]</sup>, 但砖红壤、赤红壤 SOCD 高于 Zhang 和 Liu 等<sup>[27]</sup> 在云南省西双版纳、普洱的分析结果。另外据 Chen 等<sup>[32]</sup> 的估计, 云南省 1986 年 SOCD 平均为 5.82 kg m<sup>-2</sup>, 2010 年为 5.45 kg m<sup>-2</sup>, 远低于本研究成果, 造成这种差异的原因可能是研究区正处于云南省有机碳高密度区, 原生林保存较完好, 特别是中高海拔区域, 原生林中发育的土壤深厚且砾石含量较少, SOCD 远高于其他土地利用类型。

研究区 SOC 与海拔呈显著正相关支持了 Chen 等<sup>[32]</sup>、Zhang 等<sup>[27]</sup> 以及 Duan 等<sup>[26]</sup> 在云南的研究结果, 但区别于哥伦比亚安第斯山脉<sup>[33]</sup>、秘鲁安第斯山脉热带森林<sup>[34]</sup>, 这些区域 SOC 随海拔梯度没有显著变化, 而在玻利维亚热带山地雨林中 SOC 随海拔高度先增加后下降<sup>[35]</sup>。研究区 SOC 主要存储在高海拔区域, 研究表明土壤中不稳定碳含量会随海拔升高而增加<sup>[36]</sup>, 加之气候变暖随海拔升高而被放大, 所以热带高海拔地区 SOC 将面临更大的损失风险。

#### 4.2 山地 SOC/SOCD 变化的驱动因素

本研究中 SOC/SOCD 与 MAT 的显著负相关关系说明低温造成的低生物活性和低分解速率是高海拔区域 SOC 积累的重要过程<sup>[36]</sup>。然而除气候因子外, 土壤理化性质对 SOC 的贡献同样重要 (表 1)。土壤 pH 与 SOC 的极显著负相关关系表明低海拔区域的 pH 有利于微生物对 SOC 的分解, 而寒冷潮湿的中高海拔偏酸土壤与低温一同抑制了微生物分解速率, 从而促进 SOC 的积累<sup>[37]</sup>。SOC 与黏粒含量呈显著负相关, 但相关性随土壤层深度而增加, 这与武夷山<sup>[10]</sup> 的研究结果一致, 表明稳定 SOC 的数量受到细颗粒黏土和细粉粒含量的限制, 热带低地高度风化的土壤中低活性黏土占比大, 为 SOC 提供物理保护和使其长期稳定的矿物的比表面积较小, 而高海拔区域壤质土壤更大的比表面积能够有效吸附和保持 SOC 稳定。氮磷钾与 SOC 累积和周转过程存在复杂的相互作用, 其中土壤氮主要受控于凋落物积累和分解, 随着有机碳含量水平升高, 速效氮含量也在增加, 所以 AN 与 SOC 呈显著正相关。P 元素多来源于岩石风化, 其丰富程度多受地层岩石等地质背景控制, 因此在土壤中的分布具有迁移缓慢、空间

分布较稳定等特点, 所以虽然 SOC 随海拔高度而增加, 但 TP 与 SOC 的相关性低于 AN, 这种相关性表明热带低地森林中 N、P 限制的普遍规律<sup>[38-40]</sup>。而表层 SOC 与 AK 呈显著负相关反应了 AK 具有较强的水溶性, 受降水随海拔梯度逐渐增强的影响, 中高海拔段土壤带中速效钾流失严重, 所以其对 SOC 的限制随海拔升高而加强。

土壤碳库往往是生物量输入和分解之间的平衡, 气候和土壤理化因子只是限制了 SOC 分解和稳定。最近的研究揭示了地上活生物量、凋落物数量、细根生物量、细根碳停留时间、细根生物量与茎生物量比率、细根碳库随海拔升高而显著增加<sup>[34, 41]</sup>, 说明地上、地下凋落物输入对高海拔 SOC 积累的潜在影响, Duan 等的研究显示在 4000 m 以下 SOC 随海拔升高而增加, 但是超过 4000 m 后随海拔升高而降低<sup>[26]</sup>, 这是由于超过 4000 m 后恶劣的气候条件限制了植被生长以及凋落物归还, 甚至存在多年冻土和积雪覆盖, 相似的结果同样出现在东喜马拉雅地区<sup>[41]</sup>, 这一结果间接表明了沿海拔梯度变化的 SOC 来源与分解的差异可能是造成全球 SOC 海拔分布模式不同的原因<sup>[33-36, 42]</sup>, 未来的研究应该更多关注地上、地下生物量和净初级生产力对 SOC 海拔梯度效应的影响。

#### 4.3 原生林转换对 SOC/SOCD 的影响

Dieleman 等<sup>[37]</sup> 的研究显示了森林和草地 SOC 储存的差异随海拔升高而增加, 这意味着高海拔地区原生林转变可能导致比低地更大的土壤碳损失。然而在本研究区, 由于高海拔地区建立了国家级自然保护区, 对现存原始森林有着严格的管理制度, 所以土地利用的剧烈转换主要发生在中低海拔区域。从本研究的结果来看, 原生林转换为种植园后已经造成土壤碳的剧烈流失, 其损失量与 Straaten 等<sup>[43]</sup> 的结果一致, 橡胶林 SOC 损失量 (49.8%) 低于苏门答腊岛占碑省低地 Ah 层的 62%<sup>[44]</sup>, 但高于西双版纳橡胶园的 27%<sup>[45]</sup>。Singh 等<sup>[17]</sup> 对 9 项原生林转为橡胶园的研究进行总结, 发现转换后 SOCD 的平均变化量为 -32.9%。原生林转换为香蕉园后有机碳含量和储量分别损失 48.9% 和 43.5% (0 ~ 40 cm), 远高于哥斯达黎加东北部原生林转换为香蕉园后的损失量 (37% 和 16.5%)<sup>[46]</sup>。

造成原生林转换为种植园后 SOC 剧烈下降是多因素综合作用的结果。从图 3 可以看出 SOC 的变化主要受 BD 和 C/N 的影响, 而与其他土壤理化因子

之间的相关性较小,说明原生林转换为种植园后改变了土壤容重和 C/N,从而造成 SOC 的损失。土壤 C/N 的变化主要受到凋落物输入的影响,相关研究指出原生林向种植园转换往往造成地上、地下生物量减少以及地上、地下凋落物归还数量、质量以及多样性的下降,同时转换后林内温度、光照强度以及土壤水分蒸发的增加进一步限制了凋落物的分解速率,所以 C/N 的变化直接反应了有机碳输入减少和分解率降低导致的 SOC 损失。与种植园相比,原生林较高的 SOC 含量以及微弱的人为扰动使得 BD 较低,森林砍伐后种植稀疏的香蕉和橡胶使得地表径流和侵蚀强度增加,表层土壤流失严重,下层土壤暴露使得 BD 增大<sup>[47-48]</sup>,所以 BD 的增加反应了侵蚀和踩踏过程对 SOC 损失的影响。而导致不同区域原始林转变为种植园后 SOCD 损失幅度差异的原因一方面可能受原生林初始碳储量的影响,另一方面可能与转换年限以及转换后的管理方式差异有关<sup>[29]</sup>。

## 5 结论

(1) 研究区 0~40 cm 的 SOCD 随海拔升高而增加, MAT 与土壤理化因子对 SOCD 的影响具有复杂的交互作用, MAT 对 SOCD 的影响不随土壤理化因子的变化而变化,但土壤理化因子对 SOCD 的影响受到 MAT 的控制。

(2) 原生林转换为香蕉和橡胶种植园后在 0~40 cm 土层有接近一半的 SOCD 损失, SOCD 损失与 C/N 的减小和 BD 的增加有关,反应了研究区 SOCD 损失受凋落物归还减少以及侵蚀两个过程的驱动。

### 参考文献:

- [1] Soussana J F, Lutfalla S, Ehrhardt F, et al. Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 188(6): 3 - 15.
- [2] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988 - 992.
- [3] Mountain Research Initiative EDW Working Group. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 424 - 430.
- [4] Sothe C, Gonsamo A, Arabian J, et al. Large Soil Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems of Canada[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(2): 7213 - 7231.
- [5] Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. *National Science Review*, 2022, 9(2): 120 - 121.
- [6] Castillo-Figueroa D. Carbon cycle in tropical upland ecosystems: a global review[J]. *Web Ecology*, 2021, 21(2): 109 - 136.
- [7] Nottingham A T, Meir P, Velasquez E, et al. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest[J]. *Nature*, 2020, 584(7820): 234 - 237.
- [8] Nottingham A T, Gloor E, Bååth E, et al. Soil carbon and microbes in the warming tropics[J]. *Functional Ecology*, 2022, 36(6): 1338 - 1354.
- [9] Lydia C, Guillermo B, Victoria C, et al. Trade-Offs Among Aboveground, Belowground, and Soil Organic Carbon Stocks Along Altitudinal Gradients in Andean Tropical Montane Forests[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11(3): 3389 - 3402.
- [10] 熊小玲, 任寅榜, 吕茂奎, 等. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 83 - 88.
- [11] Désiré T, Jean P N, Paul T, et al. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa[J]. *Catena*, 2019, 175(4): 251 - 262.
- [12] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(3): 142 - 150.
- [13] Doetterl S, Stevens A, Six J, et al. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 780 - 783.
- [14] Zhao Y F, Wang X, Jiang S L, et al. Climate and geochemistry interactions at different altitudes influence soil organic carbon turnover times in alpine grasslands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 320(8): 107591 - 107608.
- [15] Beillouin D, Cardinael R, Berre D, et al. A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1690 - 1702.
- [16] Feng Y, Zeng Z, Searchinger T D, et al. Doubling of annual forest carbon loss over the tropics during the early twenty-first century[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(5): 444 - 451.
- [17] Singh A K, Liu W, Zakari S, et al. A global review of rubber plantations: Impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796(8): 148948 - 66.
- [18] da Silva R B, Rosa J S, Packer A P, et al. A soil quality physical-chemical approach 30 years after land-use change from forest to banana plantation[J]. *Environ Monit Assess*, 2022, 194(7): 482 - 498.
- [19] Zhu X, Jiang X, Kumar Singh A, et al. Reduced litterfall and decomposition alters nutrient cycling following conversion of tropical natural forests to rubber plantations[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138(7): 108819 - 108831.
- [20] Gharibreza M, Raj J K, Yusoff I, et al. Land use changes and soil redistribution estimation using <sup>137</sup>Cs in the tropical Bera Lake catchment, Malaysia[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 131(5): 1 - 10.

- [ 21 ] Han M, Zhu B. Changes in soil greenhouse gas fluxes by land use change from primary forest[J]. *Glob Chang Biol*, 2020, 30(9): 14993 – 14014.
- [ 22 ] 易 琦, 高宇亭, 彭启洋, 等. 全球变暖背景下云南省橡胶林潜在适生区的预测及变化[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(10): 1 – 12.
- [ 23 ] 翟佳豪, 刘 影, 肖池伟. 1987—2018年西双版纳橡胶林时空变化及其线状特征[J]. *热带地理*, 2022, 42(8): 1376 – 1385.
- [ 24 ] 付步礼, 夏西亚, 邱海燕, 等. 香蕉园黄胸蓟马成虫种群的活动节律、消长规律与空间分布[J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4996 – 5004.
- [ 25 ] 李明美, 兰国玉, 杨 川, 等. 缅甸橡胶林下植物物种的多样性分析[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(1): 64 – 72.
- [ 26 ] Duan X, Rong L, Hu J, et al. Soil organic carbon stocks in the Yunnan Plateau, southwest China: spatial variations and environmental controls[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(10): 1643 – 1658.
- [ 27 ] Zhang Y, Ai J, Sun Q, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous regions in the Yunnan Province, south-western China[J]. *Catena*, 2021, 196(8): 104872 – 80.
- [ 28 ] Zhu X, Chen C, Wu J, et al. Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191(5): 327 – 339.
- [ 29 ] 王 平, 华红莲, 丁智强, 等. 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.
- [ 30 ] Chaplot V, Bouahom B, Valentin C. Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1380 – 1393.
- [ 31 ] Dai W, Huang Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China[J]. *Catena*, 2006, 65(1): 87 – 94.
- [ 32 ] Chen D, Xue M, Duan X, et al. Changes in topsoil organic carbon from 1986 to 2010 in a mountainous plateau region in Southwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 734 – 747.
- [ 33 ] Phillips J, Ramirez S, Wayson C, et al. Differences in carbon stocks along an elevational gradient in tropical mountain forests of Colombia[J]. *Biotropica*, 2019, 51(4): 490 – 499.
- [ 34 ] Girardin C A J, Malhi Y, Aragão L E O C, et al. Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(12): 3176 – 3192.
- [ 35 ] Schawe M, Glatzel S, Gerold G. Soil development along an altitudinal transect in a Bolivian tropical montane rainforest: Podzolization vs. hydromorphy[J]. *Catena*, 2007, 69(2): 83 – 90.
- [ 36 ] Leifeld J, Zimmermann M, Fuhrer J, et al. Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 668 – 679.
- [ 37 ] Dieleman W I J, Venter M, Ramachandra A, et al. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage[J]. *Geoderma*, 2013, 204-205(5): 59 – 67.
- [ 38 ] Camenzind T, Hättenschwiler S, Treseder K K, et al. Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests[J]. *Ecological Monographs*, 2018, 88(1): 4 – 21.
- [ 39 ] Hui D, Porter W, Phillips J R, et al. Phosphorus rather than nitrogen enhances CO<sub>2</sub> emissions in tropical forest soils: Evidence from a laboratory incubation study[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(3): 495 – 510.
- [ 40 ] Feng J, Tang M, Zhu B. Soil priming effect and its responses to nutrient addition along a tropical forest elevation gradient[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2793 – 2806.
- [ 41 ] Tashi S, Singh B, Keitel C, et al. Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta-analysis of global data[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(6): 2255 – 68.
- [ 42 ] Djukic I, Zehetner F, Tatzber M, et al. Soil organic - matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(1): 30 – 38.
- [ 43 ] van Straaten O, Corre M D, Wolf K, et al. Conversion of lowland tropical forests to tree cash crop plantations loses up to one-half of stored soil organic carbon[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(32): 9956 – 60.
- [ 44 ] Guillaume T, Damris M, Kuzyakov Y. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by delta(13) C[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3548 – 60.
- [ 45 ] de Blecourt M, Brumme R, Xu J, et al. Soil carbon stocks decrease following conversion of secondary forests to rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations[J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): 69357 – 69366.
- [ 46 ] Powers J S. Changes in Soil Carbon and Nitrogen after Contrasting Land-use Transitions in Northeastern Costa Rica[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 134 – 146.
- [ 47 ] Zhang W, Zhu X, Ji S, et al. Soil water movement differences relating to banana (*Musa nana* Lour. ) plantation regime[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 56(12): 4264 – 4279.
- [ 48 ] Liu W, Zhu C, Wu J, et al. Are rubber-based agroforestry systems effective in controlling rain splash erosion?[J]. *Catena*, 2016, 147(9): 16 – 24.

## Effects of Altitudinal Gradient and Primary Forest Conversion on Soil Organic Carbon Density in the Northern Tropical Mountains

WANG Ping<sup>1</sup>, YU Xiao-ya<sup>2</sup>, DING Zhi-qiang<sup>1,3\*</sup>, TAN Xiao-ai<sup>1</sup>, HUA Hong-lian<sup>1</sup>, LI Yu-hui<sup>1</sup>

(1. Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 651500, China; 2. School of tourism and resource environment, Qiannan normal university for nationalities, Duyun 558000, China; 3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** [Objective] The paper aimed to approach the response and mechanism of soil organic carbon density (SOCD) to mountain elevational gradients and lowland native forest conversion. [Method] The effects of altitudinal gradients and forest conversion on SOCD (0 ~ 40 cm) were investigated in the Butterfly Valley tropical rainforest of southwestern China. Meanwhile, the driving role of climatic and soil physicochemical factors were further explored based on LARS regression, Partial and Pearson correlation analyses. [Result] ① Altitudinal gradients had a significant positive correlation with SOC, and SOCD was increased by 452.1% from the laterite zone at a low altitude to the brown earth zone at a high elevation in the 0 to 40 cm soil layers, which the variation was mainly driven by BD, pH, TP, AN and MAT. Partial correlation analysis showed that the effect of MAT on SOC did not vary with soil physicochemical factors, but the effect of soil physicochemical factors on SOCD was controlled by MAT. ② The conversions of lowland native forests to rubber and banana plantations resulted in SOCD losses of 49.7% and 43.5%. The loss of SOC was associated with an increase in soil BD and a decrease in C/N. both of them reflects two important ecological processes, the reduction of litter return and the intensification of erosion, following the conversion of native forests. [Conclusion] The SOCD in the northern tropical alpine elevation zone were highly susceptible to MAT factors, while the SOCD dynamics at the lower elevations probably were subject to a combination of human disturbance. Future assessments of SOCD in tropical soils should take into account the loss of SOC due to conversion of native forests to plantations and the altitudinal gradient differentiation.

**Key words:** Soil organic carbon density; Altitudinal gradient; Tropical rainforest; Primary forest conversion; Tropical plantations

[责任编辑: 韩春兰]