

# 广西木论喀斯特森林土壤养分水平 与植被及地形的关系

何加林<sup>1,2</sup>, 曹洪麟<sup>1\*</sup>, 张燕婷<sup>1,2</sup>, 叶万辉<sup>1</sup>, 李武军<sup>3</sup>, 吴林芳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 重庆市垫江中学, 重庆 408300)

**摘要:**研究了广西木论喀斯特森林原生植被和次生植被的土壤养分特征, 测定了陡坡、缓坡、洼地 3 种主要地形内林地 0~5 cm 表层土壤中的有机质(SOM)、氮、磷、钾含量, 以及它们在石土面、土面两类主要小生境间的差异。结果表明: 林分成熟度高、优势种不明显的原生林积累了高水平的 SOM, 缓坡石土面最高, 达 345 g kg<sup>-1</sup>, 洼地的含量较低, 但仍在 80 g kg<sup>-1</sup> 以上; 土壤全氮(TN)、碱解氮(AN)含量也较高。以红背山麻秆(*Alchornea trewioides*)、广西野桐(*Mallotus conspurcatus*)、伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)等为优势种的次生林, 物种多样性较原生林低, SOM、TN、AN 含量也低, 缓坡石土面和土面小生境的 SOM 分别为 110 g kg<sup>-1</sup> 和 77 g kg<sup>-1</sup>, 是原生林的 32% 和 35%, 下降幅度最大, 其次为陡坡, 而洼地的差异不明显。全磷(TP)、有效磷(AP)、全钾(TK)、有效钾(AK)含量在两林型间差异无明显规律。原生林和次生林土壤养分含量(除 TK 外)以缓坡 > 陡坡 > 洼地; 但次生林中三者间无显著差异。同类型样地内小生境土壤养分含量(除 TK 外)均为石土面含量高于土面。

**关键词:** 土壤养分; 喀斯特山区; 植被; 地形; 小生境

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2009)05-0502-08

## Relationship between Vegetation, Landform and Soil Nutrients in Karst Forest of Mulun, Guangxi, China

HE Jia-lin<sup>1,2</sup>, CAO Hong-lin<sup>1\*</sup>, ZHANG Yan-ting<sup>1,2</sup>, YE Wan-hui<sup>1</sup>, LI Wu-jun<sup>3</sup>, WU Lin-fang<sup>1</sup>

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dianjiang High School, Chongqing 408300, China)

**Abstract:** The characteristics of soil nutrients in primary and secondary forests of Mulun Karst forest of Guangxi, China were studied, and the contents of SOM, N, P and K at 0~5 cm depth soil from the three main landforms, such as steep slope, gentle slope and depression, were detected, each including rock-soil (shallow and scattered soil) and soil surface microhabitat (relatively thick and continuous soil). The results showed that the contents of SOM, TN and AN were high in primary forest with high species diversity, with 345 g kg<sup>-1</sup> of SOM in rock-soil surface microhabitat of gentle slope, while above 80 g kg<sup>-1</sup> in soil surface microhabitat of depression. However, those decreased in secondary forest dominated by *Alchornea trewioides*, *Mallotus conspurcatus*, *Eurycorymbus cavaleriei* with lower species diversity. The SOM contents in rock-soil (110 g kg<sup>-1</sup>) and soil surface microhabitat (77 g kg<sup>-1</sup>) in gentle slope decreased significantly, which were only 32% and 35% of that in primary forest, respectively; but there were not significant differences in SOM, TN and AN contents in depression between the two vegetations. There were not obvious regularities in TP, AP, TK and AK contents between the two vegetations. The soil nutrient contents (except for TK) ranged in order: gentle slope > steep slope > depression, but there were not significant differences among the three landforms in secondary forest. The soil nutrient contents (besides TK) in rock-soil surface microhabitat were higher than that in soil surface microhabitat.

收稿日期: 2008-12-26

接受日期: 2009-03-24

基金项目: 中国科学院西部行动计划课题(KZCX2-XB2-08)资助

\* 通讯作者 Corresponding author

**Key words:** Soil nutrient; Karst mountain; Vegetation; Landform; Microhabitat

我国西南地区是世界上喀斯特分布面积最广、地貌类型最丰富的地区之一,主要分布于云南、贵州、广西及广东北部等地。喀斯特地貌是以碳酸盐为主要物质的岩溶构造,多表现为峰林、峰丛、洼地、峡谷等地貌,地表崎岖破碎,坡度陡峭<sup>[1]</sup>。其成土速度缓慢,土层浅薄,土被不连续,土壤蓄水能力差,植物生长缓慢,生态系统的抗逆能力、稳定性和自我恢复能力较低<sup>[2-3]</sup>。随着人类干扰的不断扩展,原来物种多样性和群落结构多样性较高的南方喀斯特森林生态系统遭到严重破坏,出现大面积的石漠化景观,如广西境内,喀斯特石漠化面积已达  $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,并且以  $2\,500 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$  的速度不断扩展<sup>[4]</sup>。这些严重退化的喀斯特生态系统,通常难于进行植被恢复,水土流失严重,从而使环境进一步退化<sup>[5]</sup>。石漠化的本质是土壤质量和土壤生态承载力的退化<sup>[6]</sup>,如何对这一退化生态系统进行植被和功能恢复,长期以来一直是我国的重大科学与社会民生问题。对喀斯特地区环境退化及其驱动机理进行了大量研究报道,主要集中在土地利用变化对喀斯特地区土壤质量的影响<sup>[7]</sup>、石漠化过程中喀斯特生态系统的生物地球化学特征的变化<sup>[8]</sup>、退化喀斯特生态系统恢复重建<sup>[9]</sup>等方面,但很少讨论地形和小生境对喀斯特生态系统演化的影响。地形是重要的土壤成土因子之一<sup>[10]</sup>,喀斯特地区由于特殊的地质条件导致其地形多样且破碎、小生境分布广泛<sup>[11]</sup>,从而使其土壤存在多样性。地形和小生境在喀斯特地区土壤和植被发育方面已有少量研究,主要集中在采样尺度<sup>[11]</sup>、养分和水分的空间变异上<sup>[12-14]</sup>。因此,本文根据喀斯特地区不同森林植被下的土壤特征,比较不同地形、不同小生境之间土壤质量,了解不同植被演替阶段下地形和小生境对土壤状况的影响,为喀斯特地区生态系统发育和退化生态系统重建提供科学参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县西北部的木论喀斯特林区,地处北回归线北侧,  $25^{\circ}09'N$ 、 $108^{\circ}03'E$ ,面积约  $158 \text{ km}^2$ 。林区东濒古滨河上游,西近打狗河,北与贵州茂兰自然保护区相连,南接木论-川山喀斯特地区。属中亚热带季

风气候区,年均温  $16.9^{\circ}\text{C}$ ,1月均温  $6.1^{\circ}\text{C}$ ,7月均温  $24.9^{\circ}\text{C}$ ;年降雨量为  $1\,530 \sim 1\,820 \text{ mm}$ ,雨季(4~8月)占全年降雨量的 73.7%,旱季(9~次年3月)占 26.3%。林区内常绿、落叶阔叶混交林受人为影响较小,森林植被保存完整,原生性较强,森林覆盖率达 94.8%,是我国中亚热带石灰岩森林植被保存较完好的地区之一。地形以峰丛-洼地为主,海拔  $400 \sim 1\,000 \text{ m}$ ,石山、岩石裸露面积达 80%~90%,土地覆盖不足 20%<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 样地设计和采样方案

本研究采用析因设计探讨植被与地形 2 个因素与土壤养分间的关系。在典型植被类型的原生林和次生林内(2 个相邻峰丛洼地底部及侧面山坡),选取陡坡( $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ )、缓坡( $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ )和洼地 3 种主要地形,组成 6 种组合,每个组合建立 4 个不相邻的  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  样方进行植被调查和土壤取样。所有 24 块样地均位于木论保护区内,海拔  $480 \sim 560 \text{ m}$  之间。原生林样地在建保护区前曾有少量人为干扰,次生林样地则在保护区建立后于 1994 年停止耕作,恢复至今。样地内小生境分布广泛、类型多样,主要有石面、石沟、石土面、土面等。其中,石土面是裸岩率 30% 以上,土壤分布较破碎,土层厚度较薄的形状不规则的侵蚀洼地;土面是裸岩率低于 30%,土壤分布相对连续,土层相对较厚的小型台地<sup>[11]</sup>。

土壤采样采取小生境取样方法,根据王世杰等的方法<sup>[11]</sup>略作修改:选取土壤覆盖面积之和超过样地土壤总面积 90% 的石土面、土面两类小生境(表 1),进行小生境单独采样。用直径为  $5 \text{ cm}$  的土钻取表层  $0 \sim 5 \text{ cm}$  的土壤,土层厚度不足  $5 \text{ cm}$  的取全部厚度的土壤,随机选取 6~10 点混合成一个土样,每块样地采 3~5 个混合样。

### 1.3 植被调查和分析

植物调查采用样方调查法<sup>[17]</sup>,每个样地内记录胸径大于  $1 \text{ cm}$  的植物名、胸径、高度、冠幅等,计算乔木树种重要值(IV)和乔木层物种多样性指数:物种丰富度指数( $R$ )、Simpson 多样性指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ )<sup>[18]</sup>:

$$IV = (\text{相对密度} + \text{相对优势度} + \text{相对频度})/3$$

表 1 广西木论喀斯特森林样地基本特征

Table 1 Basic geographic characters of the plots in Karst forest of Mulun, Guangxi

林型 Vegetation	地形 Landform	坡向 Aspect	坡度 Grade	小生境 Microhabitat rate* (%)		
				裸岩 Rock	石土面 Rock-soil surface	土面 Soil surface
原生林 Primary forest	陡坡 Steep slope 缓坡 Gentle slope	南坡 Southern slope	30°~45° 15°~30°	49 55	32 28	14 12
次生林 Secondary forest	洼地 Depression 陡坡 Steep slope 缓坡 Gentle slope 洼地 Depression	- 北坡、西坡 N and W 西坡 Western slope -	- 30°~45° 15°~30° -	55 36 38 36	12 39 35 15	28 20 22 44

\* are the mean of 4 plots.

$$R = (S - 1) / \ln N$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

$$J_{sw} = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

其中,相对密度、相对优势度、相对频度参考张金屯等<sup>[15]</sup>的方法; $P_i$ 表示第*i*个物种的个体数占群落中植株总数的比例, $N$ 为所有物种的个体数之和, $N_i$ 为第*i*个种的个体数; $S$ 为物种数目。

### 1.4 土壤样品的分析

所有 86 份土样于 2007 年 11 月采集,密封带回实验室风干、研磨、过 2 mm 筛,取少量筛过在土样磨细,过 0.25 mm 筛,常温保存备用。采用电位法测定 pH、重铬酸钾外加热法测有机质(SOM)含量、半微量凯氏法测全氮(TN)含量、酸溶-钼锑抗比色法测全磷(TP)含量、酸溶-石墨炉原子吸收方法测全钾(TK)含量、碱解扩散法测碱解氮(AN)含量、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测有效磷(AP)含量、碳酸氢钠浸提-石墨炉原子吸收法测有效钾(AK)含量<sup>[19]</sup>。

### 1.5 数据处理

试验数据均采用 Excel 2003 和 Spss16.0 进行处理分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 植物群落特征

从乔木树种重要值(IV)分析,原生林树种丰富,由冬女贞(*Ligustrum amamianum*)、朴树(*Celtis sinensis*)、广西密花树(*Rapanea kwangsiensis*)、铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum*)、小叶山柿(*Diospyros siderophyllus*)、青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)、榔榆(*Ulmus parvifolia*)、掌叶木(*Handeliendron bodinieri*)、通脱木(*Tetrapanax*

*papyrifera*)、粗糠柴(*Mallotus philippensis*)、苦木(*Picrasma quassioides*)、菜豆树(*Radermachera sinica*)、广西野桐(*Mallotus conspuyrcatus*)、香椿(*Toona sinensis*)等中生性植物种类组成,优势种不明显。次生林树种数量比原生林少,以红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、广西野桐、伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)为优势种,组成常绿落叶阔叶混交林,常见种还有粗糠柴、盐肤木(*Rhus chinensis*)、菜豆树、伊桐(*Itoa orientalis*)、鲫鱼胆(*Maesa perlaris*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等先锋树种。

原生林乔木层胸高断面面积显著高于次生林(表 2),其最大个体胸径可达喀斯特山区少见的 50.7 cm,表明原生林林分成熟度高。地形间的比较显示,原生林陡坡胸高断面面积和个体数量显著高于洼地;相比原生林,次生林缓坡和洼地的乔木胸高断面面积显著高于陡坡,但个体数量的差异不显著。

物种多样性取决于群落中存在的种数和个体总数,以及它们的均匀度<sup>[20-22]</sup>。从表 2 可知,原生林乔木层树种丰富度、Simpson 多样性、Pielou 均匀度均高出次生林,说明原生林处于更加稳定的状态。原生林 3 种地形之间树种丰富度指数没有显著差异( $P > 0.05$ ),坡地的 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数,均比洼地高,其中陡坡显著高于洼地( $P < 0.05$ ),表明坡地植物群落的多样性较洼地高。次生林样地中,缓坡树种丰富度、Simpson 多样性、Pielou 均匀度指数分别达到 4.36、0.89、0.86,为 3 种地形中最高,洼地次之,这表明次生林缓坡的植物群落多样性最大,稳定性最高。

表 2 广西木论喀斯特森林乔木层植物特征

Table 2 Characteristics of tree layer of Karst forests in Mulun, Guangxi

林型 Vegetation	地形 Landform	树种数 Species number	个体数 Individual number	胸高断面积 Basal area (m <sup>2</sup> hm <sup>-2</sup> )	最大胸径 DBH <sub>Max</sub> (cm)	R	D	J <sub>sw</sub>
原生林 Primary forest	陡坡 Steep slope	33.75 ± 7.05a	135 ± 10.42a	18.58 ± 2.46a	32.2 ± 6.21a	6.64 ± 1.35a	0.92 ± 0.01a	0.93 ± 0.05a
	缓坡 Gentle slope	28 ± 4.88ab	89.75 ± 16.18b	17.79 ± 2.1a	29.1 ± 2.85a	5.97 ± 0.9a	0.91 ± 0.01a	0.86 ± 0.01ab
	洼地 Depression	20 ± 1.15b	65.25 ± 8.49b	10.11 ± 1.18b	28.93 ± 2.99a	4.57 ± 0.16a	0.85 ± 0.01b	0.8 ± 0.03b
次生林 Secondary forest	陡坡 Steep slope	1.75 ± 1.03B	70.75 ± 14.87A	3.28 ± 0.49B	12.08 ± 1.12A	2.6 ± 0.35B	0.78 ± 0.05B	0.75 ± 0.06A
	缓坡 Gentle slope	20.5 ± 2.96A	86.5 ± 14.12A	7.56 ± 0.46A	19.63 ± 0.89A	4.36 ± 0.56A	0.89 ± 0.02A	0.86 ± 0.02A
	洼地 Depression	13.25 ± 0.25B	81 ± 5.61A	7.79 ± 1.11A	21.33 ± 4.79A	2.79 ± 0.16B	0.79 ± 0.02B	0.75 ± 0.01A

R: 丰富度指数 Abundance index; D: Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; J<sub>sw</sub>: Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index; 同林型数据后相同字母表示差异不显著(P>0.05)。Values in the same vegetation followed the same letter are not significantly different at 0.05 level by One-way ANOVA.

### 2.2 原生林土壤养分变化特征

如表 3 所示,原生林土壤 pH 值在 6.25~7.28 之间,大体呈中性。原生林土壤有着极高的 SOM 积累,其中,缓坡石土面最高,达 345 g kg<sup>-1</sup>,而洼地相对较低,但仍在 80 g kg<sup>-1</sup>以上。土壤 TN、AN、TP、AP 均是缓坡含量最高,整体趋势是缓坡>陡坡>洼地。其中,石土面小生境中,缓坡土壤 TN、AN、TP、AP 含量分别比洼地高 318%、618%、29% 和 165%;土面小生境中,缓坡土壤 TN、AN 含量分别高出洼地 224%、121%,而缓坡陡坡间的 TP 差异最大,缓坡超出陡坡 376%。TK 在两类小生境中均呈现出与其它养分相反的规律,即洼地含量最高;而 AK 在地形间差异不显著。

原生林同类型样地内,两种不同小生境间,除 TK 外的各养分含量(SOM、TN、AN、TP、AP、AK)均是石土面土壤较高。其中,陡坡样地内 SOM、TN、TP、AK 含量石土面土壤分别高出土面土壤 193%、

187%、276%、164%,洼地石土面土壤的 SOM、AN 含量分别高出土面土壤 70%、44%,达到显著水平(P<0.05)。TK 在小生境中分布有别于其他养分指标,在缓坡和洼地样地内,土面小生境均高于石土面,但均未达到显著水平。

### 2.3 次生林土壤养分变化特征

如表 4 所示,次生林土壤呈弱酸性,pH 在 6.06~6.73 之间。与原生林相比,次生林 SOM 含量明显下降,为 73.54~110.13 g kg<sup>-1</sup>。土壤 SOM、TN、AN、TP、AP、AK 等养分指标在地形间的差异整体上同原生林相似,即缓坡>陡坡>洼地,但差异均未达到显著水平。陡坡尤其是石土面的 TK 含量显著高出缓坡 63%。同类型样地内两小生境间,除 TK 外,石土面的 SOM、TN、AK、TP、AP、AK 含量均高于土面,且洼地的 SOM、AK 和缓坡 TN 的差异达到显著水平。小生境间 TK 含量差异不大。

表 3 广西木论喀斯特森林原生林样地土壤养分状况

Table 3 Soil nutrients status of primary vegetation plots of Karst forsts in Mulun, Guangxi

地形 Landform	小生境 Micro habitat	pH	有机质 SOM (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 AN (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 AP (mg kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK (g kg <sup>-1</sup> )	有效钾 AK (g kg <sup>-1</sup> )
陡坡 Steep slope	R-SS	7.24 ± 0.09a*	275.86 ± 57.71a*	15.01 ± 3.04a*	1.12 ± 0.20a	1.73 ± 0.43b*	14.34 ± 4.12ab	2.52 ± 0.35b	0.29 ± 0.05a*
	SS	6.25 ± 0.15B*	94.10 ± 7.55B*	5.23 ± 0.45B*	0.48 ± 0.01B	0.46 ± 0.03C*	5.63 ± 0.56A	1.75 ± 0.23C	0.11 ± 0.01B*
缓坡 Gentle slope	R-SS	7.28 ± 0.05a	44.90 ± 40.45a	18.26 ± 2.14a	4.45 ± 0.17a	2.46 ± 0.10a	22.45 ± 5.69a	3.09 ± 0.18b	0.36 ± 0.03a*
	SS	7.23 ± 0.02A	221.61 ± 35.82A	12.22 ± 1.99A	0.95 ± 0.13A	2.19 ± 0.21A	9.94 ± 1.97A	3.76 ± 0.30B	0.25 ± 0.01A*
洼地 Depression	R-SS	6.88 ± 0.05b*	136.13 ± 12.41b*	4.37 ± 0.30b	0.62 ± 0.05b*	1.90 ± 0.05b	8.46 ± 1.34b	7.17 ± 0.26a	0.28 ± 0.04a
	SS	6.27 ± 0.03B*	79.98 ± 6.95B*	3.77 ± 0.34B	0.43 ± 0.04B*	1.52 ± 0.13B	5.34 ± 1.27A	7.30 ± 0.18A	0.19 ± 0.03A

R-SS: 石土面 Rock-soil surface; SS: 土面 Soil surface; 同列数据后相同字母表示差异不显著(P>0.05); \* 代表小生境间差异显著(P<0.05)。下表同。Values within column followed the same letter are not significantly different, and \* present significant difference between two microhabitats at 0.05 level by One-way ANOVA. The same as following Tables.

表 4 广西木论喀斯特森林次生林样地土壤养分状况

Table 4 Soil nutrients status of second vegetation plots of Karst forests in Mulun, Guangxi

地形 Landform	小生境 Micro habitat	pH	有机质 SOM (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 AN (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 AP (mg kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK (g kg <sup>-1</sup> )	有效钾 AK (g kg <sup>-1</sup> )
陡坡	R-SS	6.65 ± 0.22a	94.87 ± 13.54a	4.38 ± 0.48a	0.48 ± 0.05a	1.24 ± 0.17a	5.23 ± 1.38a	5.36 ± 0.53a	0.33 ± 0.08a
Steep slope	SS	6.13 ± 0.21A	73.81 ± 8.72A	3.09 ± 0.21A	0.41 ± 0.03A	0.90 ± 0.16A	5.18 ± 0.90A	5.22 ± 0.48A	0.19 ± 0.04A
缓坡	R-SS	6.46 ± 0.14a	110.13 ± 10.20a	5.72 ± 0.78a*	0.59 ± 0.06a	1.08 ± 0.11a	7.62 ± 0.84a	3.28 ± 0.34b	0.17 ± 0.03a
Gentle slope	SS	6.06 ± 0.19A	77.06 ± 9.46A	2.97 ± 0.69A*	0.45 ± 0.03A	0.90 ± 0.14A	6.33 ± 0.56A	3.57 ± 0.36B	0.12 ± 0.02A
洼地	R-SS	6.73 ± 0.04a*	84.25 ± 2.98a*	4.01 ± 0.39a	0.47 ± 0.02a	1.30 ± 0.13a	8.18 ± 1.84a	4.22 ± 0.09ab	0.18 ± 0.01a*
Depression	SS	6.40 ± 0.04A*	73.54 ± 2.42A*	3.33 ± 0.23A	0.45 ± 0.07A	1.21 ± 0.09A	7.62 ± 1.99A	3.94 ± 0.10B	0.14 ± 0.01A*

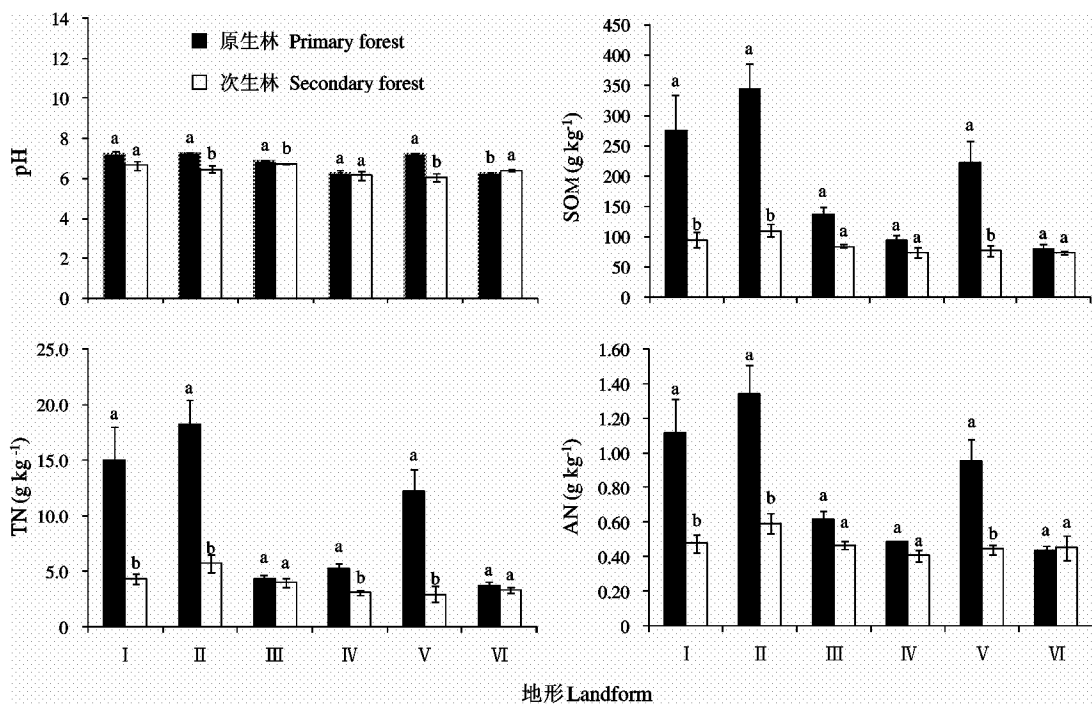


图 1 广西木论喀斯特森林两种林型土壤 pH 值和生物源养分含量(SOM、TN、AN)的比较

Fig. 1 Comparison of soil pH and bio-original nutrient contents (SOM, TN, AN) between two vegetation types in Mulun, Guangxi

I, IV: 陡坡 Steep slope; II, V: 缓坡 Gentle slope 石土面; III, VI: 洼地 Depression; I~III: 石土面 Rock-soil surface (R-SS); IV~VI: 土面 Soil surface (SS)。不同字母表示两林型间单因素方差分析差异显著( $P < 0.05$ ), 图 2 同。Different letters above bar present significant difference between two forest types at 0.05 level by One-way ANOVA. The same as Fig. 2.

## 2.4 土壤性状比较

原生林土壤 pH 值高于次生林,但次生林洼地土面(6.40)稍高于原生林(6.27)。原生林的 SOM、TN、AN 等生物源养分不同程度地高于次生林,其中,原生林缓坡石土面的 SOM、TN、AN 含量分别高出次生林的 213%、219%、654%,缓坡土面分别高出 188%、311%、111%,陡坡石土面中分别高出 191%、243%、133%,差异达显著水平(图 1)。

土壤 TP、AP、TK、AK 等母质源养分指标在林型间的差异规律不及生物源指标明显(图 2),原生林的含量并不都高于次生林,尤其是 TK 在陡坡两

类小生境中均表现为次生林高于原生林,石土面和土面分别高出 113% 和 198%。

## 2.5 林型、地形两因素对土壤养分的影响

从表 5 看出,地形因素和林型因素对生物源养分指标(SOM、TN、AN)影响明显,各指标  $P$  值均小于 0.01;二者交互作用同样明显,仅石土面的 SOM、AN 指标效应未达差异显著水平( $P = 0.052$ 、0.050)。对母质源养分指标(TP、AP、TK、AK)的效应不甚明显,规律性不强。可见,林型和地形因素对于土壤养分的影响主要集中在生物源指标。

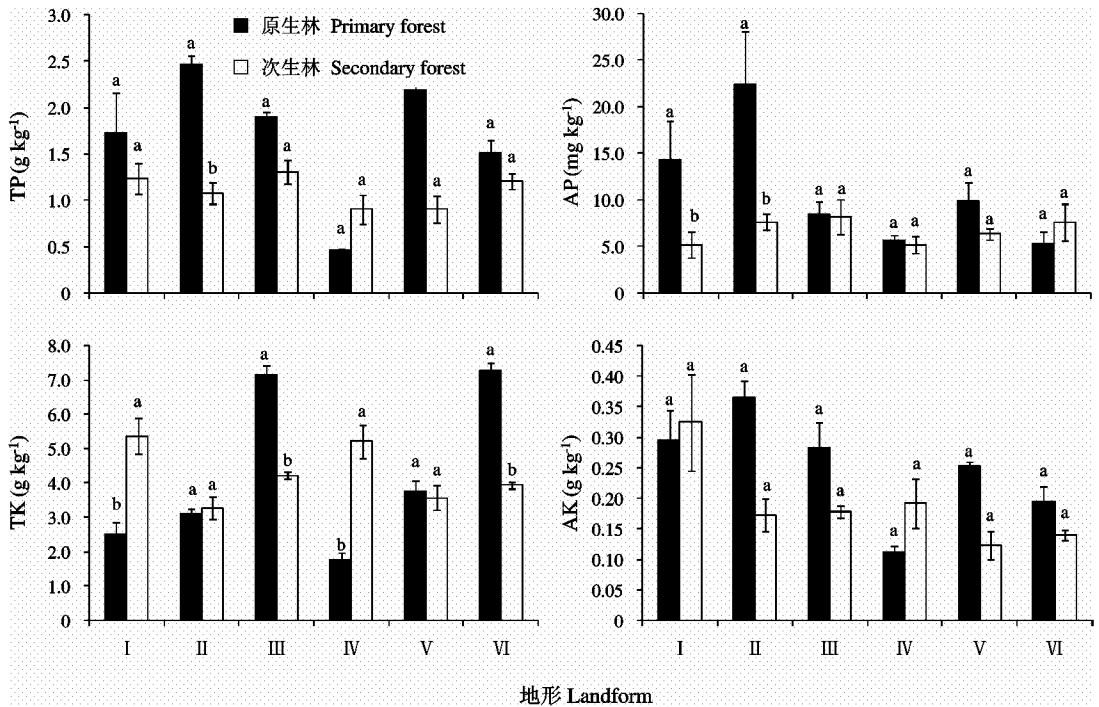


图 2 广西木论喀斯特森林土壤母质源养分含量(TP、AP、TK、AK)的比较

Fig. 2 Comparison of soil rock-original nutrient contents (TP, AP, TK, AK) in Karst forest, Mulun, Guangxi

表 5 广西木论喀斯特森林样地土壤养分的多因素方差分析(P 值)

Table 5 Multivariate ANOVA (P value) of soil nutrients of Karst forests in Mulun, Guangxi

	小生境 Microhabitat	地形 Landform	林型 Vegetation	地形 × 林型 Interaction
pH	R-SS	0.000	0.522	0.038
	SS	0.002	0.009	0.000
有机质 SOM	R-SS	0.001	0.000	0.052
	SS	0.001	0.000	0.001
全氮 TN	R-SS	0.000	0.000	0.001
	SS	0.004	0.000	0.000
碱解氮 AN	R-SS	0.002	0.000	0.050
	SS	0.001	0.002	0.003
全磷 TP	R-SS	0.499	0.001	0.157
	SS	0.000	0.110	0.000
有效磷 AP	R-SS	0.144	0.005	0.150
	SS	0.161	0.735	0.179
全钾 TK	R-SS	0.000	0.213	0.000
	SS	0.000	0.053	0.000
有效钾 AK	R-SS	0.390	0.016	0.120
	SS	0.375	0.092	0.001

P < 0.05 代表因素效应显著。Value < 0.05 means that the effect of the factor is significant.

### 3 讨论

随着植物群落由次生林向原生林正向演替,林分的成熟度和多样性逐渐提高,原生林土壤的SOM、TN、AN、TP、AP、AK等含量也呈上升趋势,说明植被状况是影响喀斯特山区土壤质量的重要

因素。戴礼洪等<sup>[23]</sup>的研究表明,随着喀斯特地区植被的退化,土壤pH值、SOM、N、P等养分含量出现不同程度的下降,这和本文的结果一致。王韵等的研究<sup>[24]</sup>也支持这一点,认为喀斯特地区土壤质量随植被正向演替而逐渐提高。次生林样地在1994年

之前有过耕作史,这可能是其土壤养分状况不及原生林的原因之一。据蒋勇军等报道<sup>[25]</sup>,喀斯特地区土地利用变化对土壤性质的影响强度明显大于其它地区,因此,喀斯特地区土壤经过干扰后,要恢复到干扰前土壤养分水平的时间也 longer。

原生林除 TK 之外的各类指标均是缓坡最高,洼地最低,且生物源指标(SOM、N)的变化幅度要大于母质源指标(P),这可能与喀斯特地区特殊的地貌和水文特征有关。坡地虽然是土壤发生侵蚀的地段,但是由于该地植被状况较好(表 2),大面积突起的裸岩(表 1)上往往匍匐生长着许多粗壮树根,截留了部分易于流失的土壤,使得坡面石块间低凹处有较好的土壤发育。尽管土体不连续,土层厚薄不一,但由于其相对较低的地势以及周围岩石分布,土壤水分的输入相对较高,水分再分布过程中由附近岩体表面带入的植物凋落物也较多<sup>[41]</sup>,大量的凋落物分解进入土壤中,在坡地形成类似泥炭土的表层土壤,使得大部分养分元素含量显著高于洼地,生物源指标的差异则更为明显。而洼地往往伴生破碎、中空的石灰岩母质和丰富的地下暗河<sup>[3]</sup>,土壤溶液易于纵向迁移流失,从而加大了养分元素的地形间差异。次生林中养分状况尽管坡地和洼地也存在差异,但除 TK 之外差异均不显著,可能与次生林内裸岩率有所降低,且匍匐地面生长的树根较原生林有所减少有关,这些改变减弱了植被对土壤的截留功能,使其发生的土壤侵蚀大于原生林。张伟<sup>[13]</sup>探讨了土地利用方式和地形因素对喀斯特峰丛洼地土壤养分的空间分异,认为洼地养分元素含量较坡地低是受洼地耕作的影响。而我们的研究表明,即使没有土地利用方式的差别,坡地、洼地间土壤养分的差异依然存在,这进一步说明了地形是导致养分差异的重要原因。

TK 相比其他养分指标具有不同的分布趋势,原生林洼地 TK 含量高于坡地,且变异幅度较大。王韵等<sup>[27]</sup>的研究表明,喀斯特山区土壤 TK 含量与土壤粘粒含量呈显著相关关系。原生林洼地土壤覆盖度和土层厚度相对较高,土层相对紧致,土壤粘粒含量高,同时,表层土壤中较好的粘土矿物结构,有利于土壤 K 以同晶替代的形式进入粘土矿物内部保存起来,这可能是原生林洼地土壤 TK 含量较高的原因之一。而坡地尽管由于侵蚀作用,表层土壤中也有较多的土壤粘粒<sup>[3]</sup>,但是由于其土层较薄,土体松散不连续,不利于土壤 K 的物理固定;同

时,由于坡地土层较薄,石灰岩基岩更容易出露,使土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  增多<sup>[6]</sup>,较多的  $\text{Ca}^{2+}$  利于矿物固定的 K 被置换出来,从而使土壤中 K 含量降低。

将石土面和土面小生境进行独立分析,是鉴于不同小生境间土壤异质性过大这一特点。我们的实验证明了其合理性:若将同块样地内不同小生境土壤养分数据合并进行统计分析,则会由于同组数据的标准差过大,导致无法检测不同类型样地间的差异。因此,不同小生境进行独立分析,是很有必要的。小生境间,生物源指标(SOM、N)大多呈现出石土面高于土面的趋势,而母质源指标(P、K)多数无显著差异。这是由于石土面裸岩率大于土面,土层不及土面厚,单位体积土壤中接受的凋落物量大于土面,使得石土面高于土面指标多为生物来源。

**致谢** 本实验采样得到东莞植物园叶万和、卓书斌、叶日亮,木论自然保护区覃文更,中国科学院环江喀斯特站宋同清老师,广西植物研究所李先琨老师的大力支持,谨此致谢。

## 参考文献

- [1] Yuan D X (袁道先). World correlation of Karst ecosystem: Objectives and implementation plan [J]. *Adv Earth Sci*(地球科学进展), 2001, 16(4): 461–466. (in Chinese)
- [2] Cao J H(曹建华), Yuan D X(袁道先), Pan G X(潘根兴). Some soil features in Karst ecosystem [J]. *Adv Earth Sci*(地球科学进展), 2003, 18(1): 37–44. (in Chinese)
- [3] Li Y B(李阳兵), Shao J A(邵景安), Wang S J(王世杰), et al. A conceptual analysis of karst ecosystem fragility [J]. *Prog Geogr*(地理科学进展), 2006, 25(5): 1–9. (in Chinese)
- [4] Wang S J(王世杰). Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification [J]. *Carsol Sin*(中国岩溶), 2002, 21(2): 101–105. (in Chinese)
- [5] Lin F(刘方), Wang S J(王世杰), Liu Y S(刘元生), et al. Changes of soil quality in the process of Karst rocky desertification and evaluation of impact on ecological environment [J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 2005, 25(3): 639–644. (in Chinese)
- [6] Long J(龙健), Jiang X R(江新荣), Deng Q Q(邓启琼). Characteristics of soil rocky desertification in the Karst region of Guizhou Province [J]. *Acta Pedol Sin*(土壤学报), 2005, 42(3): 419–427. (in Chinese)
- [7] Long J(龙健), Huang C Y(黄昌勇), Li J(李娟). Effects of land use on soil quality in Karst hilly area [J]. *Soil Water Conserv*(水土保持学报), 2002, 16(1): 76–79. (in Chinese)
- [8] Wang D L(王德炉), Zhu S Q(朱守谦), Huang B L(黄宝龙). Primary study on soil physical and chemical properties in rocky desertification process [J]. *Mount Agri Biol*(山地农业生物学报), 2003, 22(3): 204–207. (in Chinese)
- [9] Yang S T(杨胜天), Zhu Q J(朱启疆). Rates of environmental

- degradation and natural re-habilitation in typical Karst area of Guizhou [J]. *Acta Geogr Sin(地理学报)*, 2000, 55(4): 459-466.(in Chinese)
- [10] Jenny H. Factors of Soil Formation [M]. New York: McGraw-Hill, 1941: 1-15.
- [11] Wang S J(王世杰), Lu H M(卢红梅), Zhou Y C(周运超), et al. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan Karst virgin forest [J]. *Acta Pedol Sin(土壤学报)*, 2007, 44(3): 475-483.(in Chinese)
- [12] Zhang W(张伟), Chen H S(陈洪松), Wang K L(王克林), et al. Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical Karst peak-cluster depression areas [J]. *Trans Chin Soc Agri Engin(农业工程学报)*, 2008, 24(1): 68-73.(in Chinese)
- [13] Zhang W(张伟), Chen H S(陈洪松), Wang K L(王克林), et al. The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region [J]. *Sci Agri Sin(中国农业科学)*, 2006, 39(9): 1828-1835.(in Chinese)
- [14] Liu F(刘方), Wang S J(王世杰), Luo H B(罗海波). Microhabitats in karst forest ecosystem and variability of soils [J]. *Acta Pedol Sin(土壤学报)*, 2008, 45(6): 1055-1062.(in Chinese)
- [15] Zheng Y W(郑颖吾). Introduction to Mulu Karst Forestry Region [M]. Beijing: Science Press, 1999: 1-4.(in Chinese)
- [16] Department of Forestry, Guangxi Zhuang Autonomous Region(广西壮族自治区林业厅). Nature Reserve of Guangxi [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 138-148.(in Chinese)
- [17] Dong M(董鸣), Wang Y F(王义凤), Kong F Z(孔繁志), et al. Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Bio-communities [M]. Beijing: Standard Press of China, 1996: 1-23.(in Chinese)
- [18] Zhang J T(张金屯). Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2003: 17-28.(in Chinese)
- [19] Liu G S(刘光崧), Jiang N H(蒋能慧), Zhang L D(张连弟), et al. Soil Physical-chemical Analysis and Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standard Press of China, 1996: 121-173.(in Chinese)
- [20] Peng S L(彭少麟). Lower-subtropical Forests Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1996: 84-88, 332-336.(in Chinese)
- [21] Connell J H. Diversity in tropical rain forest and coral reefs [J]. *Science*, 1978, 199: 1302-1309.
- [22] Denslow J S. Tropical rain forest gaps and tree species diversity [J]. *Ann Rev Ecol*, 1978, 18: 431-451.
- [23] Dai L H(戴礼洪), Yan L J(闫立金), Zhou L(周莉). Effects of the vegetation degradation in vulnerable Karst ecological region in Guizhou Province on soil quality and its ecological environmental evaluation [J]. *Anhui Agri Sci(安徽农业科学)*, 2008, 36(9): 3850-3852.(in Chinese)
- [24] Wang Y(王韵), Wang K L(王克林), Zhou D S(邹冬生), et al. Effects of vegetation succession on soil quality in Karst region of Guangxi, China [J]. *Soil Water Conserv(水土保持学报)*, 2007, 21(6): 130-134.(in Chinese)
- [25] Jiang Y J(蒋勇军), Yuan D X(袁道先), Zhang C(章程), et al. Impact of land use change on soil properties in a typical Karst agricultural region: A case study of Xiaojiang watershed, Yunnan [J]. *Acta Geogr Sin(地理学报)*, 2005, 60(5): 751-760.(in Chinese)