

# 粤北岩溶峰丛自然坡面土壤钙元素的空间分布

李忠云<sup>1,2</sup>, 魏兴琥<sup>2</sup>, 李保生<sup>1</sup>, 关共凑<sup>2</sup>, 徐喜珍<sup>3</sup>, 雷俐<sup>1</sup>

(1. 华南师范大学 地理科学学院, 广东 广州 510631;

2. 佛山科学技术学院, 广东 佛山 528000; 3. 中山市第二中学, 广东 中山 528429)

**摘要:** [目的] 探讨综合要素影响下自然坡面土壤钙元素的分布特征, 认识岩溶区土壤结构与演化。[方法] 测定广东省英德市岩背镇典型峰丛坡面土壤的全钙、交换性钙、水溶性钙和有机质的含量, 并进行相关性分析。[结果] 峰丛坡面土壤的全钙、交换性钙、水溶性钙含量的平均值分别为 4.172, 1.050, 0.026 g/kg, 交换性钙/全钙的平均值为 22.29%, 水溶性钙/全钙的平均值为 0.56%。全钙、交换性钙和有机质的含量都随坡面海拔下降而逐渐减少, 陡峭的坡面上部的全钙、交换性钙和有机质含量要明显高于中下部平缓坡面的含量, 而水溶性钙的含量随坡面下降不显著。相关性分析表明, 全钙和交换性钙与海拔、坡度、岩石裸露率呈显著正相关, 而与土层厚度是显著负相关, 水溶性钙与这些地形因素相关性不显著。[结论] 坡面的地形变化和土壤发育程度是影响土壤全钙和交换性钙含量变化的主要因素, 但对于水溶性钙含量的影响不大。峰丛自然坡面的全钙和交换钙具有坡面迁移特征, 但垂向迁移特征不明显, 水溶性钙的坡面迁移和垂向迁移都不明显, 对局部水文状况响应灵敏。

**关键词:** 坡面; 土壤钙; 地形; 粤北

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0062-07

中图分类号: S153.6

**文献参数:** 李忠云, 魏兴琥, 李保生, 等. 粤北岩溶峰丛自然坡面土壤钙元素的空间分布[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 62-68. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.012

## Spatial Distribution of Soil Calcium on Natural Slope of Karst Peak-cluster in Northern Guangdong Province

LI Zhongyun<sup>1,2</sup>, WEI Xinghu<sup>2</sup>, LI Baosheng<sup>1</sup>, GUAN Gongcou<sup>2</sup>, XU Xizhen<sup>3</sup>, LEI Li<sup>1</sup>

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong

510631, China; 2. Foshan Scientific and Technologic College, Foshan, Guangdong 528000,

China; 3. The Second Middle School of Zhongshan City, Zhongshan, Guangdong 528429, China)

**Abstract:** [Objective] Investigating the distribution of soil calcium on natural slope under the influences of integrated factors in order to better understand the structure and evolution of soil in karst area. [Methods] Typical karst peak-cluster in Yanbei Town, Yingde City, Northern Guangdong Province, was selected as the research area. The contents of total calcium, exchangeable calcium, water calcium and organic matter were measured, and correlation analysis were used. [Results] At the peak cluster, the average content of total calcium, exchangeable calcium and water soluble calcium was 4.172, 1.050 and 0.026 g/kg, respectively. Exchangeable calcium accounted for 22.29% of the total calcium, while water soluble calcium accounted for 0.56% of total calcium. The contents of total calcium, exchangeable calcium and organic matter reduced with the decrease of slope gradient. Contents of soil calcium in steep slope were obviously higher than that in the gentle one. The contents of water soluble calcium showed little changes with the slope variation. The correlation analysis showed that the total calcium and exchangeable calcium was positively related with altitude, slope and coverage of rock, while negatively related with soil thickness. There were no significant correla-

收稿日期: 2015-04-09

修回日期: 2015-06-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“粤北岩溶山区岩石—土壤—植物系统钙迁移循环过程及其生态效应”(31170486), “基于水动力过程的粤北岩溶区土地利用方式对钙迁移、沉积影响机制研究”(41571091); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-ST5-092)

第一作者: 李忠云(1981—), 男(瑶族), 湖南省郴州市人, 硕士研究生, 研究方向为地表过程与演变。E-mail: 349183585@qq.com。

通讯作者: 魏兴琥(1964—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 博士, 研究员, 主要从事土地退化过程、机理及生态恢复研究。E-mail: weixinghu1964@163.com。



112°48′—112°52′E, 24°16′—24°21′N。调查区内, 峰丛坡面土壤的成土母质为石灰岩。坡面具有的顶陡、麓缓的地形特征, 坡面上中部为自然坡面, 下部为梯田(图2)。

样带沿山顶到山坡中下部设3条平行样带, 样带间距离6~10 m, 每个样带自然坡面按间隔距离15 m设置样点, 每个样带设11个样点, 最低样点和梯田接壤。每个样点设3 m×4 m大小的样方, 考虑到峰丛坡面实际土层厚度和土壤特性, 每个样点在样方内按土壤深度0—10, 10—20 cm分层采集土样, 每个样点重复3次采样。在采集土壤样品的同时, 详细记录样方的位置、海拔、坡度、土层厚度、岩石裸露面积、植被类型等基本信息。土层厚度用铁钎法沿样方对角线和十字线每1 m一个测点测定, 根据平均值求得样方土层厚度。岩石裸露率通过测定样方内岩石出露面积再除以样方面积计算。

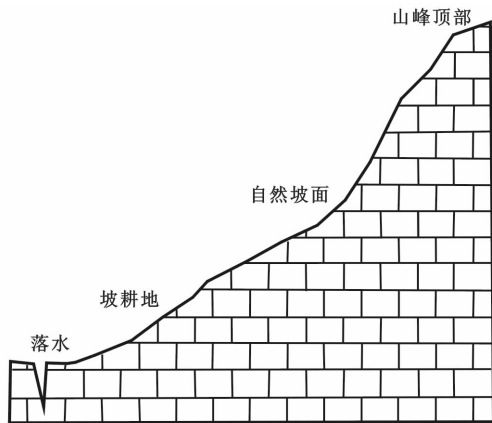


图2 岩背峰丛坡面示意图

### 1.3 土壤样品室内试验分析方法

测定土壤全钙、交换性钙、水溶性钙的含量<sup>[21]</sup>; 分别用浓硝酸—氢氟酸—高氯酸消解、乙酸铵振荡浸提、去离子水振荡浸提进行前处理, 然后再分别用原子吸收分光光度法进行测定3种形态的钙含量。测定有机质含量用重铬酸钾氧化—外加热法。

土壤粒度分析先用筛析法测定粒径粗砂以上(>1 mm)成分, 再用激光粒度仪测定粒径粗砂以下(≤1 mm)成分。

## 2 结果与分析

### 2.1 峰丛坡面地表特征

本文选择海拔和坡度两个指标反映峰丛坡面的地形变化的。再根据喀斯特地区的土壤分布零星、浅薄, 基岩裸露率高的特点<sup>[22]</sup>, 选择岩石裸露率和土层厚度2个指标反映峰丛坡面土壤发育状况。

从表1可以看出, 岩背峰丛自然坡面位于山体的中上部(590~474 m之间), 坡度下降急剧, 在120 m的落差内, 坡度从50°左右降至20°左右。在海拔530 m以上, 坡面的坡度极为陡峻, 平均坡度超过50°, 在530 m以下坡度迅速变缓, 平均坡度为23°左右, 因此剖面6是整个坡面坡度变化的转折点。坡面土壤的岩石裸露率变化也极大, 介于94.4%~2.2%, 其中在剖面6以上, 平均的岩石裸露率是86.2%, 在剖面6以下, 平均岩石裸露率下降为22.4%。坡面的土壤总体上是稀薄的, 平均土层厚度都不超过30 cm, 特别海拔538 m以上的土层厚度不足10 cm。将海拔、坡度、岩石裸露率及平均土层厚度这4者进行比较分析, 可以发现: 随着坡面海拔下降, 坡度逐渐变缓, 岩石裸露率总体上减小, 而平均土层厚度有逐步增加的趋势。

表1 土壤剖面的基本情况

土壤剖面编号	海拔/m	坡度/(°)	岩石裸露率/%	平均土层厚度/cm	土地利用类型
YB-PM-1	590	51	94.4	3.3	林地
YB-PM-2	580	40	92.8	1.8	林地
YB-PM-3	571	59	92	4.4	林地
YB-PM-4	566	58	91.8	5.6	林地
YB-PM-5	538	52	60	13.3	林地
YB-PM-6	525	36	25	17.6	林地
YB-PM-7	515	24	15	18.3	林地
YB-PM-8	505	20	55	9.1	林地
YB-PM-9	491	21	2.2	23.5	林地
YB-PM-10	480	18	33	18.7	林地
YB-PM-11	474	24	4.2	22	林地

岩背岩溶峰丛坡面土壤颗粒组分含量如下: 砾石的含量最少, 最高值仅为5.46%, 平均值为1.14%; 粗砂粒含量在17.64%~53.77%之间, 细砂粒在32.56%~56.48%之间, 平均值分别为33.89%和43.57%, 将粗砂粒与细砂粒两者合并进行计算, 砂粒的比例在58.93%~89.34%之间, 平均值为77.46%; 粉粒和黏粒的含量分别为6.51%~24.28%, 1.24%~16.32%, 平均值分别为14.14%和7.27%。基于上述土壤机械组成分析, 整个坡面土壤的砂粒含量都超过50%, 砂粒在所有颗粒组分占有绝对优势, 岩背峰丛坡面的土壤质地应该归类于砂质土。

### 2.2 峰丛坡面土壤钙和有机质含量的变化

从表2可见, 在岩背岩溶峰丛坡面的11个土壤剖面中, 全钙含量在3.386~6.209 g/kg之间, 平均值为4.172 g/kg, 交换性钙含量在0.527~1.698 g/kg之间, 平均值为1.050 g/kg, 水溶性钙含量主要集中

在 0.018~0.028 g/kg 之间(仅在第 10 剖面有极端值 0.062 g/kg),平均值为 0.026 g/kg,有机质含量在 33.818~75.346 g/kg 之间,平均值为 50.881 g/kg。11 个剖面中,交换性钙占全钙的比例介于 13.67%~27.62 之间(平均值为 22.29%),水溶性钙占全钙的比例在 0.30%~1.61%之间(平均值 0.56%)。通过

计算表 2 中的变异系数 SD/Mean,可得出土壤全钙含量的变异系数的平均值是 20.12%,交换性钙的是 16.84%,水溶性钙的是 35.27%,有机质的是 26.56%。总体来看,变异系数变化不是很大,说明它们在各剖面的含量的波动较小,平均值具有较好的代表性。

表 2 峰丛坡面土壤钙含量和有机质含量

g/kg

土壤剖面编号	全钙含量	交换性钙含量	水溶性钙含量	有机质含量
YB-PM-1	4.462±0.597	1.145±0.094	0.018±0.006	54.897±11.663
YB-PM-2	6.147±1.576	1.698±0.236	0.026±0.010	75.346±21.291
YB-PM-3	6.051±1.114	1.506±0.204	0.025±0.006	74.850±15.827
YB-PM-4	6.209±1.133	1.611±0.184	0.019±0.007	71.984±19.459
YB-PM-5	4.340±0.703	1.077±0.218	0.022±0.006	48.287±16.252
YB-PM-6	4.466±0.300	1.178±0.074	0.024±0.004	33.818±15.040
YB-PM-7	4.482±0.937	0.648±0.053	0.025±0.016	47.497±14.333
YB-PM-8	3.891±0.969	0.876±0.117	0.025±0.004	41.309±8.421
YB-PM-9	4.544±0.676	0.700±0.104	0.028±0.005	34.993±12.620
YB-PM-10	3.853±1.652	0.527±0.183	0.062±0.057	41.537±5.708
YB-PM-11	3.386±0.651	0.587±0.238	0.018±0.003	35.172±8.442

### 2.3 峰丛坡面土壤钙与海拔、坡度、土层厚度、岩石裸露率的关系

对岩背峰丛坡面土壤全钙、交换性钙、水溶性钙、海拔、坡度、土层厚度、岩石裸露率进行 Pearson 相关性分析,结果如表 3 所示。除了水溶性钙与其他各因素呈不显著相关以外,其他各因素相互这间都呈极显

著或显著相关性。其中,全钙与交换性钙、全钙与海拔,交换性钙与海拔、交换性钙与坡度、交换性钙与岩石裸露率都呈极显著的正相关,而土层厚度与全钙,交换性钙分别显著、极显著的负相关。这表明海拔、坡度、土层厚度和岩石裸露率在很大程度上影响着土壤中全钙和交换性钙含量,但对水溶性钙的含量影响不大。

表 3 土壤钙、海拔、坡度、土层厚度、岩石裸露率的相关关系

项目	全钙	交换性钙	水溶性钙	海拔高度	坡度	土层厚度	岩石裸露率
全钙	1	—	—	—	—	—	—
交换性钙	0.890**	1	—	—	—	—	—
水溶性钙	-0.228	-0.402	1	—	—	—	—
海拔	0.767**	0.875**	-0.427	1	—	—	—
坡度	0.693*	0.812**	-0.462	0.853**	1	—	—
土层厚度	-0.693*	-0.833**	0.289	-0.897**	-0.711*	1	—
岩石裸露率	0.707*	0.838**	-0.215	0.899**	0.795**	-0.976**	1

注: \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

## 3 讨论

地形是土壤形成发育的一个空间条件。在不同的地貌条件下,水热条件的再分配是完全不同的,进而影响到喀斯特的发育过程及土壤的发生发展过程<sup>[22]</sup>。在粤北岩溶区的峰丛坡面,海拔越高,其坡度越陡峭,植被越稀疏,土壤更易受到地表水侵蚀,造成岩石裸露率增加,坡度增加了侵蚀颗粒的运移速度。在长期的地表侵蚀作用下,峰丛坡面土壤物质逐渐由

上至下迁移,或堆积于洼地、裂隙、石缝间,或随水迁移并最终进入落水洞,流入地下河。因此,海拔和坡度是影响岩溶峰丛坡面土壤发育的主要因素。

土壤中的化学元素都以不同形态存在,一般多以离子形态与其它元素结合,较少以元素态出现。土壤中钙元素有 4 种存在形态即矿物态钙、有机物中的钙、交换性钙和水溶性钙,其中前两种形态的钙需要长期的风化作用和分解才能释放,是属于难溶成分。交换性钙是被土壤胶体表面吸附的钙离子,是土壤阳

离子交换作用的主要组分,其含量很高,变幅也大,钙离子的饱和度因 pH 值而异。水溶性钙指存在于土壤溶液中的钙,是土壤溶液中含量最高的离子。交换性钙与水溶性钙之和称为有效钙,占土壤全钙含量的 5%~60%,一般为 20%~30%。谢丽萍等<sup>[8]</sup>测得岩溶区土壤全钙平均含量为 18 g/kg。另外,在该调查区相邻的九龙镇岩溶丘陵区测得全钙含量是 29.368 g/kg,交换性钙是 2.556 g/kg,水溶性钙是 0.138 g/kg<sup>[23]</sup>。由表 2 可知,岩背峰丛自然坡面的土壤全钙平均含量是 4.172 g/kg、交换性钙 1.050 g/kg、水溶性钙 0.026 g/kg。通过比较,可以发现岩背岩溶峰丛土壤钙含量总体上是偏低的,其主要原因有:① 岩背峰丛坡面的成土母质是石灰岩,而九龙岩溶丘陵区的成土母质是白云岩,一般而言石灰岩土壤中的钙元素迁移作用相对白云岩地区要强烈些<sup>[3,24]</sup>;② 由于钙元素本身在土壤就是容易强烈淋失的元素,岩背峰丛的坡面连续,坡度较陡,土层稀薄,土壤侵蚀严重,这些都加剧了钙元素的淋失导致土壤钙元素的含量偏低;③ 岩背峰丛坡面的土壤机械组成是以砂粒为主,而砂质土的通气性、透水性强,水流在土壤中的渗透、溶解都很容易进行,土壤的钙元素容易被溶蚀迁移。因此,岩背峰丛坡面区域性的地质地形特征和土壤质

地是导致其土壤全钙含量偏低的主要原因。

按照 0—10,10—20 cm 的土壤深度,将岩背峰丛自然坡面各个剖面的土壤分为表层土和底层土(因海拔 580 m 的剖面 2 的土壤不足 10 cm 深,按 0—5,5—10 cm 进行分层),然后再绘制 11 个土壤剖面表层和底层土壤的全钙、交换性钙、水溶性钙、有机质含量的折线图(图 3)。表层全钙、交换性钙、水溶性钙或低于或高于底层的含量,它们在表层与底层土壤中的变化趋势不一致,而土壤钙在垂向上迁移的规律性不明显,有机质则有表层总要高于底层含量的显著特征,有明显的垂向迁移特征。在海拔较高、坡度较陡的坡面上部,表层土壤与底层土壤的全钙、交换性钙、水溶性钙含量的差别较大,而随着坡度变缓,土层逐渐增厚,表层与底层的土壤钙含量则逐渐变小。位于坡面上部的土壤侵蚀严重,土层稀薄,表层的土壤钙容易被地表水流直接带走,而土壤的母质石灰岩不断的风化成壤,释放钙元素到土壤底层。由于土壤中钙元素的流失与补充不同步,土壤中钙元素是处在一个非稳定的状态。而位于坡面下部,坡度较缓,土层较厚,既有地表水溶蚀,还有土壤内部稳定的淋溶作用,使得土壤中的钙元素处于动态平衡的状态,因而位于坡面下部土壤表层与底层中全钙、交换性钙和水溶性钙的含量都很接近。

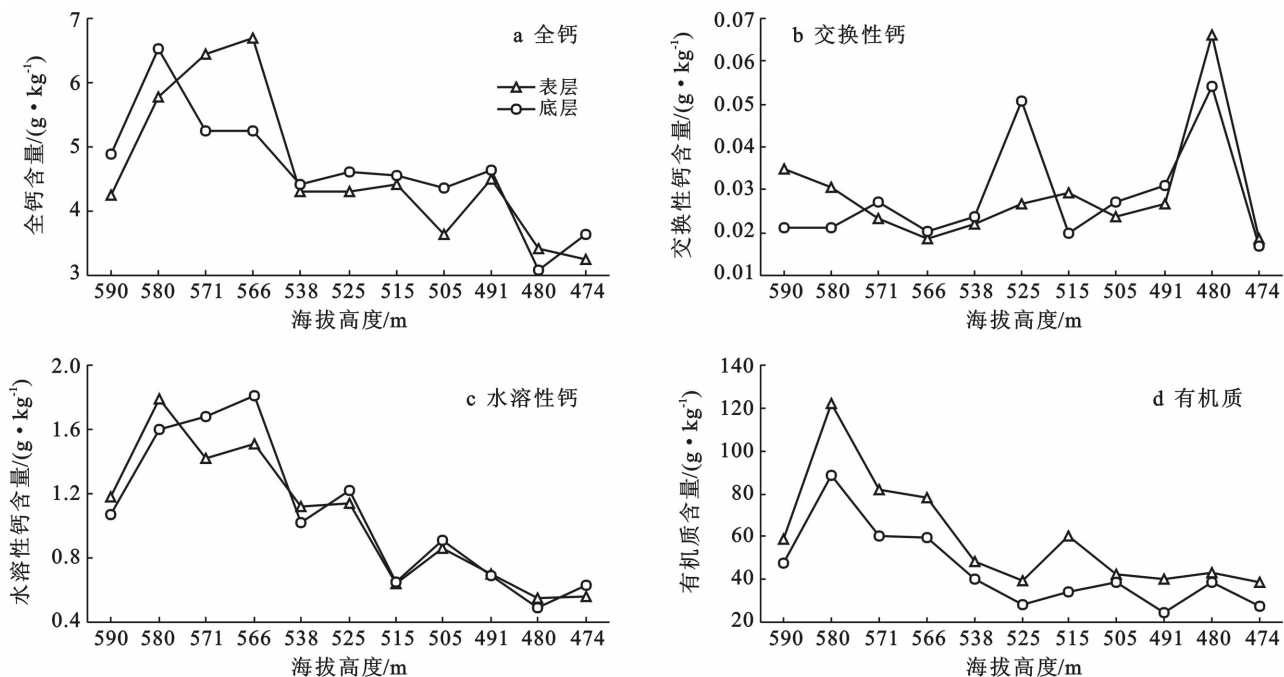


图 3 表层和底层土壤全钙、交换性钙、水溶性钙、有机质的含量

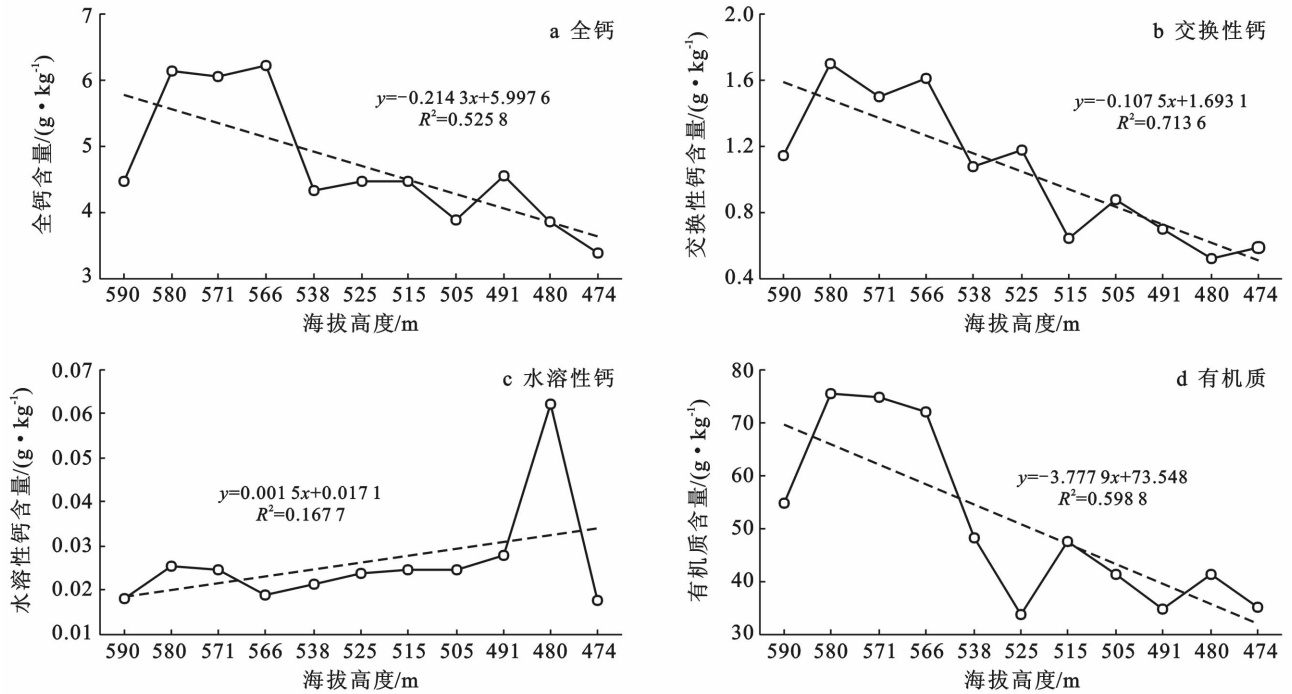
根据岩背峰丛坡面 11 个土壤剖面的全钙、交换性钙、水溶性钙和有机质的平均含量,绘制随坡面下降的折线图(图 4)。可以发现全钙、交换性钙和有机质的含量与海拔是显著的负相关,它们的含量随着海

拔下降而逐渐减少的,位于陡峭坡面土壤的全钙、交换性钙和有机质含量要明显高于平缓坡面的含量。而水溶性钙的含量与海拔不显著的相关性,除了剖面 10(海拔 480 m)的含量是极端高值外,在其他剖面土

壤中的含量呈小幅度的波动。表 4 的相关性分析,也表明全钙和交换性钙与海拔、坡度、土层厚度、岩石裸露率都有极显著相关性,说明地形变化和土壤发育状况是影响峰丛坡面土壤全钙、交换性钙迁移的外在因素,有着明显的坡面迁移特征。岩背峰丛坡面具有坡度变化大的地形特点,地表侵蚀和垂直渗漏侵蚀共存<sup>[25]</sup>。

从坡顶至坡中(590~525 m)坡面陡峻,地表水流速度快,因而地表侵蚀搬运严重,土壤物质不容易保留,使得岩石裸露率高,土层极其稀薄,土壤处于石灰岩风化成壤的初始阶段,石灰岩风化释放的钙元素直

接进入土壤,土壤中的钙元素能够持续得到补充。坡度和缓的中部,是地表水的汇集区和滞留区,土壤中的钙元素更容易被溶解迁移。另外,石灰土的有机质含量对土壤中钙元素的含量也有重要影响,因为它对钙离子有较强吸附和络合作用,可以抑制钙的流失和迁移<sup>[8]</sup>。由图 4 可知,位于陡峻的坡面中上部的土壤中的有机质含量更高,能够吸附更多钙,使得它的全钙和交换性钙的含量相对较高。海拔 525 m 以下的坡度较小,土层逐渐增厚,石灰土发育过程中的淋溶脱钙作用更加明显<sup>[2]</sup>,地表水下渗的淋溶作用使得土壤钙被淋失。



注:线性方程中  $x$  的取值对应土壤剖面的序数

图 4 土壤全钙、交换性钙、水溶性钙、有机质的含量随坡面变化

岩背峰丛自然坡面土壤水溶性钙的含量极少,平均含量仅占全钙的 0.59%,仅相当于石灰土钙元素在中淋失的痕量,总体上随坡面的海拔下降和坡度减小变化不明显。岩背峰丛坡面的坡度大,降雨产生的地表径流速度快,土壤溶液中的钙离子极易随地表水流失。通过岩背峰丛坡面土壤机械组成分析,可以确定其土壤类型是砂质土,而砂质土具有通气性强、透水性强,保水蓄水保肥性能弱的特点,不利于水溶性钙保留的。受地形和土壤质地的限制,即使是在富钙偏碱的岩溶环境里,峰丛坡面的水溶性钙含量也是极低的。不过位于第 10 个剖面(即海拔 480 m 处)水溶性钙的含量有个极端高值 0.062 g/kg,是其他各个部位土壤水溶性钙含量 2~3 倍。在确定了试验测定过程准确无误后,结合实地调查的坡度测量(表 1),

可以发现此剖面正处于坡面中下部微微下凹的位置,形成局部的负地形,坡面流水在此的汇聚产生积水环境,而有利于水溶性钙的累积。岩溶峰丛坡面一般都有坡度大,坡面连续,地表侵蚀严重,土壤发育缓慢,土层比较薄,颗粒以砂粒为主,土壤中的有机质和一些营养元素容易被流失。岩背峰丛自然坡面的土壤钙元素迁移特征可以归纳为:土壤中全钙、交换性钙和水溶性钙的垂向迁移特征不明显,而全钙和交换性钙有很明显的坡面迁移特征,水溶性钙的坡面迁移特征不明显,但对土壤的水文状况响应灵敏。峰丛坡面的地形变化(海拔和坡度)和土壤发育程度(土层厚度、岩石裸露率)是影响土壤全钙和交换性钙含量的变化重要原因,但对水溶性钙含量的影响却不明显。由于岩溶区普通土壤稀薄、生态脆弱,极易产生土壤发

育的逆转,导致石漠化的发生。因而仍需进一步研究峰丛坡面土壤的有机质和土壤重要营养元素之一钙元素含量的变化与石漠化程度的相关性。

## 4 结论

(1) 岩背岩溶峰丛自然坡面较陡,土壤的岩石裸露率变化大,介于 94.4%~2.2%之间,土层薄,平均土层厚度不足 30 cm。在整个坡面表现出随着坡面的海拔下降,坡度逐渐变缓,岩石裸露率减小,而平均土层厚度有增加的趋势。

(2) 岩背岩溶峰丛坡面土壤的全钙、交换性钙和水溶性钙的平均值分别为 4.172, 1.050 和 0.026 g/kg,总体上要低于岩溶丘陵区土壤钙元素的含量。峰丛自然坡面的全钙、交换性钙和有机质的含量都随海拔下降而逐渐减少,陡峭坡面的全钙、交换性钙和有机质含量要明显高于平缓坡面的含量,而水溶性钙的含量在坡面上总体变化不大。

(3) 相关性分析表明,全钙和交换性钙与海拔、坡度、岩裸露率都呈显著的正相关,而与土层厚度是显著的负相关,水溶性钙与这些地形因素都呈不显著相关。这表明岩背峰丛坡面的地形变化和土壤发育程度主要影响的是土壤全钙和交换性钙含量的变化,但对水溶性钙含量的影响不明显,局部水文环境的差异是影响水溶性钙含量的主要原因。

(4) 在岩背峰丛自然坡面,土壤中全钙、交换性钙和水溶性钙的垂向迁移特征不明显,而全钙和交换性钙有很明显的坡面迁移特征,水溶性钙的坡面迁移特征不明显,但对土壤的水文状况响应灵敏。

### [参 考 文 献]

- [1] 李阳兵,王世杰,李瑞玲. 岩溶生态系统的土壤[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 434-438.
- [2] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [3] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 438-444.
- [4] Xu shengyou, He shiyi. The CO<sub>2</sub> regime of soil profile and its drive to dissolution of carbonate rock [J]. *Carso-logica Sinica*, 1996, 15(1/2): 50-57.
- [5] 魏兴琥,马婷婷,王杰,等. 不同 pH 值水溶液对石灰岩溶蚀影响的模拟研究[J]. 佛山科学技术学院学报:自然科学版, 2013, 31(2): 17-23.
- [6] 蓝家程,傅瓦利,甄晓君,等. 岩溶山区土壤性质及其对土下溶蚀速率的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 58-62.
- [7] 关共凑,魏兴琥. 自然降雨对粤北岩溶区土壤钙、镁离子流失影响模拟试验[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 73-76.
- [8] 谢丽萍,王世杰,肖德安. 喀斯特小流域植被—土壤系统钙的协变关系研究[J]. 地球与环境, 2007, 35(1): 26-32.
- [9] 滕永忠. 湿润亚热带岩溶土壤环境元素地球化学与岩溶作用的相互关系[D]. 南京:南京农业大学, 1996.
- [10] 罗为群,蒋忠诚,韩清廷,等. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. 中国水土保持, 2008(12): 46-49.
- [11] Plan L. Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian Alps[J]. *Geomorphology*, 2005, 68(3): 201-212.
- [12] 覃星铭,蒋忠诚,罗为群,等. 典型岩溶农业区洼地和坡地的元素迁移特征差异[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 349-352.
- [13] 章程. 典型岩溶泉流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 165-169.
- [14] 陈家瑞,曹建华,梁毅,等. 石灰土发育过程中土壤腐殖质组成及其与土壤钙赋存形态关系[J]. 中国岩溶, 2012, 31(1): 7-11.
- [15] Wei L, Zhou P P, Jia L P, et al. Limestone dissolution induced by fungal mycelia, acidic materials, and carbonic anhydrase from fungi[J]. *Mycopathologia*, 2009, 167(1): 37-46.
- [16] Jorgensen S E, Fath B. *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set; Online version*[M]. Elsevier, 2008.
- [17] 李森,魏兴琥,张素红,等. 典型岩溶山区土地石漠化过程:以粤北岩溶山区为例[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 674-684.
- [18] 王明刚,李森,金昌宁. 粤北石漠化地区坡地入渗产流规律试验研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 57-61.
- [19] 魏兴琥,陆冠尧,周红艳,等. 粤北石漠化灌丛坡地模拟降雨地表径流水中钙离子含量变化[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1343-1347.
- [20] 黄金国,李森,魏兴琥,等. 粤北岩溶山区石漠化过程中土壤养分变化研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 163-167.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [22] 张美良,邓自强. 我国南方喀斯特地区的土壤及其形成[J]. 贵州工学院学报, 1994(1): 67-75.
- [23] 李忠云,魏兴琥,李保生,等. 粤北岩溶丘陵区不同地貌部位土壤钙的分布特征:以英德市九龙镇为例[J]. 热带地理, 2015, 35(1): 89-95.
- [24] 李先琨,苏宗明. 桂西南不同地层土壤的元素地球化学特征[J]. 广西科学, 2001(4): 301-307.
- [25] 雷俐,魏兴琥,徐喜珍,等. 粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2204-2214.