

DOI: 10.11766/trxb201911040354

龙健, 吴求生, 李娟, 廖洪凯, 刘灵飞, 黄博聪, 张菊梅. 贵州茂兰喀斯特森林不同小生境类型对岩石溶蚀的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 151–161.

LONG Jian, WU Qiusheng, LI Juan, LIAO Hongkai, LIU Lingfei, HUANG Bocong, ZHANG Jumei. Effects of Different Microhabitat Types on Rock Dissolution in Maolan Karst Forest, Southwest China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 151–161.

贵州茂兰喀斯特森林不同小生境类型对岩石溶蚀的影响*

龙 健¹, 吴求生¹, 李 娟², 廖洪凯¹, 刘灵飞¹, 黄博聪¹, 张菊梅¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘 要: 喀斯特山区土层浅薄、生态环境脆弱, 碳酸盐岩溶蚀是喀斯特山区主要成土方式, 研究碳酸盐岩溶蚀对喀斯特山区土壤环境保护及土壤可持续利用具有重要意义。以贵州茂兰喀斯特森林不同类型小生境(石洞、石缝、石沟、石槽、土面、石面)为研究对象, 通过溶蚀试片法于小生境内进行野外溶蚀试验, 观察溶蚀速率、溶蚀形态在时间、空间上的变化, 分析溶蚀速率与小生境类型、土壤理化指标、微生物的关系, 探讨茂兰喀斯特森林碳酸盐岩溶蚀与成土的关系。结果表明, 溶蚀时间介于 0.5~2 年, 置于生境表面的岩石试片中, 石槽的试片溶蚀速率最大, 其次是土面, 再次是石面, 石沟轻微溶蚀, 石洞、石缝未见明显溶蚀; 总体上, 埋于生境土壤以下的岩石溶蚀速率较置于生境表面高。相关性分析和随机森林分析表明, 小生境类型是影响试片溶蚀速率的首要因子, 土壤含水率、pH 分别显著促进、抑制试片溶蚀。在溶蚀速率明显变化的生境中, 溶蚀形态随着溶蚀时间增加而愈发明显。研究结果证实了小生境类型对碳酸盐岩溶蚀速率存在显著影响。

关键词: 茂兰喀斯特; 碳酸盐岩; 溶蚀速率; 溶蚀形态; 成土

中图分类号: S151⁺.1; S151⁺.22; S151⁺.25; **文献标志码:** A

Effects of Different Microhabitat Types on Rock Dissolution in Maolan Karst Forest, Southwest China

LONG Jian¹, WU Qiusheng¹, LI Juan², LIAO Hongkai¹, LIU Lingfei¹, HUANG Bocong¹, ZHANG Jumei¹

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] Karst mountain areas are generally thin in surface soil layer and fragile in ecological environment. Dissolution of carbonate rocks is the main way of soil formation in karst mountain areas. It is of great significance to study dissolution of carbonate rocks for protection of the soil environment and sustainable utilization of the soil resources in the areas. [Method] Different types of microhabitats, such as stone cavern, stone crevice, stone gully, stone groove, earthy surface, and

* 国家自然科学基金项目(41661045)、贵州省百层次创新人才项目(黔科合平台人才[2020]6010)、贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]1Z036)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41661045), Guizhou Province 100-level Talent Project (No. [2020]6010), and Key Program of Science and Technology of Guizhou Province (No. [2020]1Z036)

作者简介: 龙 健(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤化学、喀斯特石漠化治理、喀斯特土壤环境研究。E-mail: longjian22@163.com

收稿日期: 2019-11-04; 收到修改稿日期: 2020-05-26; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-09-10

stone surface, were selected as research objects for the study in the Maolan Karst forest, Guizhou. The method of sheet dissolution test was used to determine carbonate rock dissolution rates in these microhabitats. Spatio-temporal variation of the dissolution rate and shape of the rocks therein was observed, and relationships of dissolution rate with type of the microhabitat, soil physicochemical properties and microorganisms therein were analyzed. In the end, relationship of carbonate rock and soil formation was discussed. 【Result】Results show that with the dissolution lasting from 0.5 to 2 years, the highest sheet dissolution rate of the rock appeared in stone grooves, followed by earthy surface and stone surface. And slight dissolution was observed in stone gullies, but no significant sign in stone caverns and stone crevices. In general, the rocks buried in the soil were higher than the outcropped ones in the habitat in dissolution rate. Correlation and random forest analyses show that type of a habitat was the primary factor affecting rock dissolution, and the soil moisture content and pH were factors promoting and inhibiting rock dissolution, respectively. As the dissolution process going on and on, the morphology of dissolution became more and more apparent in the microhabitats with dissolution rate changing significantly. 【Conclusion】All the findings demonstrate that type of a microhabitat has a significant impact on rock dissolution in karst mountain areas.

Key words: Maolan karst; Carbonate rock; Dissolution rate; Dissolution morphology; Soil process

碳酸盐岩溶蚀成土是我国南方岩溶地区土壤资源的一种重要成土机制, 岩溶地区土壤侵蚀的严重程度在很大程度上取决于特定地质环境背景下的成土速率^[1-3], 受到碳酸盐岩酸性不溶物含量低的影响, 喀斯特地区土壤存有成土速率慢、土层浅薄、土壤环境脆弱等环境问题。因此, 探明碳酸盐岩溶蚀与成土作用对喀斯特山区土壤保护和可持续利用具有重要意义。针对碳酸盐岩溶蚀成土的机制, 目前从碳酸盐岩溶蚀及其与残余物的关系、生态环境因子对溶蚀和成土的影响等方面进行研究, 研究基本认为, 碳酸盐岩溶蚀残余物是成土的基本物质, 受到环境条件的影响, 成土过程和成土质量存在显著差异^[4-13]。

碳酸盐岩溶蚀(风化)成土过程受到微观和宏观的物理、化学、生物等因素的影响。在碳酸盐岩溶蚀的研究中, 目前主要是基于标准溶蚀试片法、结合野外实验和室内溶蚀模拟作对比, 分析影响溶蚀速率的因素, 得出碳酸盐岩结构、水物质、气温、动物、植物以及微生物等条件是溶蚀的主要影响因素^[14-16], 甚至土壤理化性质也会影响碳酸盐岩的溶蚀速率^[17-18]。碳酸盐岩溶蚀使得喀斯特地表形成多样式小生境, 前人主要根据岩石面积裸露情况将生境分为石洞、石缝、石沟、石槽、石面以及一般土面等小生境^[19]。喀斯特地区大多数土壤留存于地表发育的石缝、石洞、石沟等小生境中, 生境多样性影响生境成土过程和土壤有机质含量^[19-22]。然而, 已有的研究未能充分说明生境生态因子在岩石溶蚀过程中的贡献大小, 特别是对喀斯特小生境类型下

岩石溶蚀与成土关系还未见相关报道。

茂兰喀斯特原始森林位于贵州省荔波县境内, 是目前世界上同纬度地区喀斯特原生性森林分布面积最大的地区, 该地区分布着复杂的小生境类型, 对整个西南喀斯特地区具有较好的代表性。本研究选取茂兰喀斯特森林不同小生境类型为研究对象, 进行碳酸盐岩溶蚀实验, 探讨不同小生境类型下岩石溶蚀及其与成土的关系, 以期丰富喀斯特地区成土机制, 为喀斯特森林土壤生态保护及可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

贵州荔波茂兰国家级喀斯特自然保护区(25°09'~25°20'N, 107°52'~108°05'E), 年均温度18.3℃, ≥10℃积温5768℃, 全年降水量1321mm, 集中分布于4—10月; 年均相对湿度80%; 年均霜日7.3d; 全年日照时数1273h; 属中亚热带季风湿润气候。出露地层主要为下石炭系的厚层石灰岩和白云岩组成, 溶蚀作用导致石芽、溶沟、溶蚀裂隙发育完全, 出露的岩石起伏多变, 且有大块岩石崩塌和堆积, 复杂的岩石形态组合的微地形组成了石面、石沟、石洞、石槽、土面等小生境^[19]。区内土壤以黑色石灰土为主, 土层浅薄不连续, 富含有机质及其他营养物质(氮、磷、钾、钙等)。

1.2 试验设计

在茂兰喀斯特森林中采集灰岩样品, 带回实验

室并加工成直径约 1 cm、厚度约 2 mm 的岩石薄片，用 1000 号砂纸打磨试片表面，将打磨后的试片洗净，烘至恒重，称量并记录，然后置于自制的尼龙网袋中（孔径 5 mm），平整存放于野外小生境中，小生境类型具体为：石洞、石缝、石沟、石槽、土面及石面，试片放于小生境表面和小生境土壤内部，具体见表 1、图 1a 和图 1b（注：石面几乎无土壤，因此试片仅放于石面表面），每层放 5 块，共放置 165 块岩石薄片；取回时间设定为 0.5 年、1 年、1.5 年、2 年，根据溶蚀速率和溶蚀形态决定每一批次所取回样片数量。计算每批岩样溶蚀速率。预先用无需镀碳的飞纳电镜观察溶蚀后的试片表面情况，挑选出具有溶蚀代表的试片进行镀碳，进一步用扫描电镜能谱仪（Scanning Electron Microscope-

Energy Dispersive Spectrometer, SEM-EDS）观察代表试片的表面形态和微区元素组成。

表 1 小生境土层深度及试片放置深度

Table 1 Thickness of the soil layer and depth of the placement of the rock sheet

| 小生境类型 | 土层深度 | 试片埋藏深度 |
|----------------------|--------------------------------|---|
| Type of microhabitat | Thickness of the soil layer/cm | Depth of the placement of rock sheet/cm |
| 石沟 Stone gully | 3~6 | 3~6 |
| 石洞 Stone cavern | 10~30 | 10 |
| 石槽 Stone groove | 2~4 | 2~4 |
| 石缝 Stone crevice | 1 | 1 |
| 土面 Earthy surface | 20 | 10 |

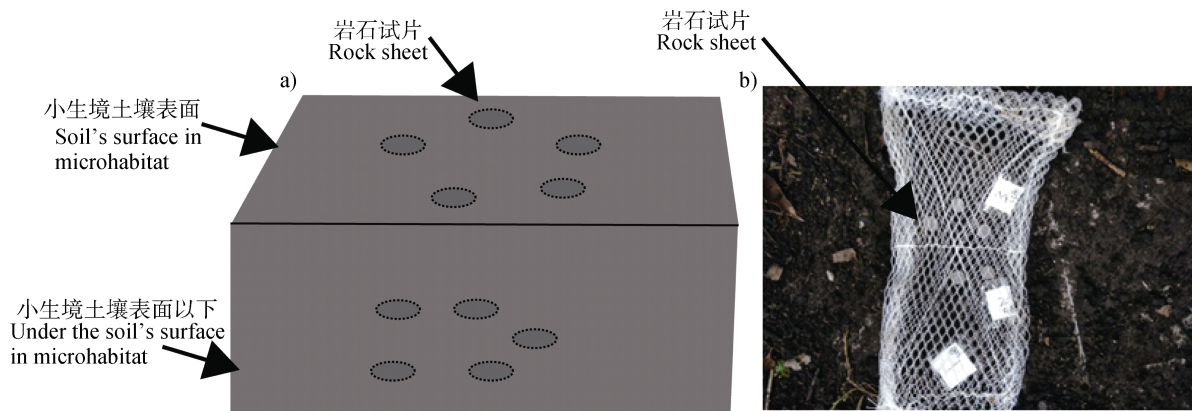


图 1 碳酸盐岩试片放置图

Fig. 1 Placement diagram of carbonate rock sheet

试片于 2016 年 12 月放置野外小生境中，第一次取回样品时间为 2017 年 6 月底，每个生境（土壤表面、土壤以下）各取一片，共 33 片。洗净、烘干、称重，扫描电镜观察溶蚀形态，发现试片表面有明显溶蚀痕迹。第二次取样时间为 2017 年 12 月，每类生境中的每个位置取 2 片，共 66 片；第三次取样为 2018 年 6 月，每类生境中的每个位置取一片，共 33 片，计算溶蚀速率及观察溶蚀形态发现，溶蚀进行 1.5 年后溶蚀速率与形态变化缓慢，因此，在第四次取样时（2018 年 12 月），仅取 6 片，主要为溶蚀明显的生境：石槽、石沟、土面、石面，其中前三类生境分为土壤表面和土壤以下各取 1 片。4 次共取回 138 片碳酸盐岩试片，剩余 27 片取回时间和数量视后期分析结果而定。

1.3 数据处理

为便于分析，将溶蚀速率约定为响应变量，土壤理化指标、微生物（细菌、真菌、放线菌）、生境类型约定为解释变量。以 R 语言 *psych* 包 *corr.test* 函数分析响应变量与解释变量的相关性，*randomForest* 包 *randomForest* 和 *varImpPlot* 函数计算解释变量在影响响应变量过程中的排序情况。

以万分之一天平对溶蚀前后的试片进行称量，计算溶蚀速率：

$$(w_0 - w_1) / a\pi r^2$$

式中， w_0 代表试片初始质量，mg； w_1 代表试片溶蚀后质量，mg； a 代表溶蚀时间，a； r 代表试片半径，cm；以上分析在 R 语言 3.6 版本中进行。

以 Origin2017 版本对能谱仪扫描所得谱图数据进行绘图。

2 结果

2.1 喀斯特森林小生境土壤理化指标与微生物分布

石槽土壤全碳、全氮、全硫以及碳氮比、有机质显著高于其他生境 ($P<0.05$) (表 2) [23]; 石洞、石缝土壤 pH 高于其他生境, 但未达到显著水平 ($P>0.05$); 石槽土壤含水率显著高于石洞、石缝、石沟及土面下层。5 类小生境中, 土壤粒径从小到大占比逐渐增加, 5 mm 以下占比约为 30%, 5 mm 以上

占比高达 70% (石槽中约为 30%) (图 2a)。石槽土壤真菌、放线菌、细菌含量高于其他生境 (图 2b) [23]。

2.2 喀斯特不同小生境岩石溶蚀速率及其对土壤指标的响应

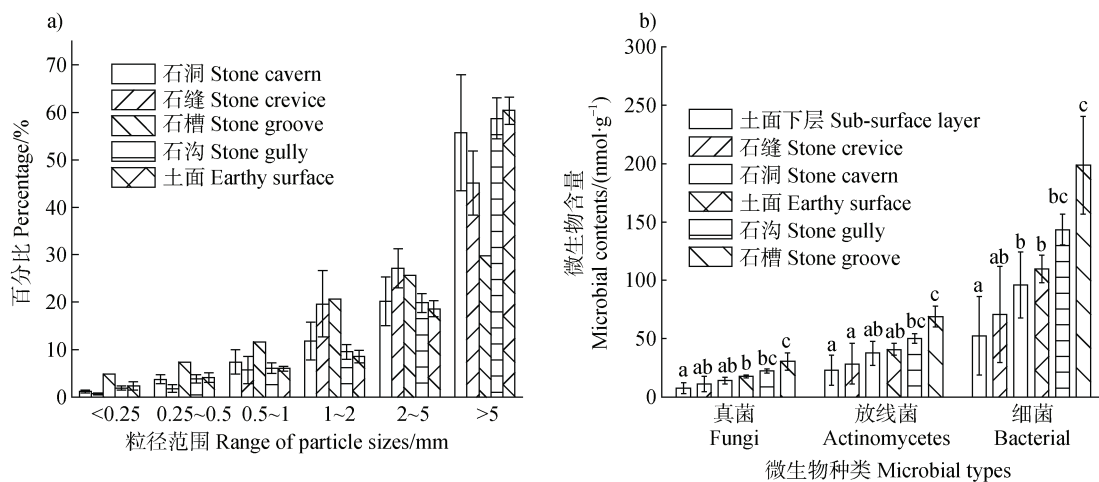
由图 3a、图 3b 可知, 溶蚀时间从 0.5~2 年, 放置于土壤表面的试片在石洞、石缝、石沟中表现为未见明显溶蚀和低溶蚀, 在石槽、石面以及土面中表现为显著溶蚀; 此外, 相同生境类型中, 试片溶蚀速率未见随溶蚀时间增加而一直增大。放置于土壤以下的试片在石洞、石缝、石沟中溶蚀过低, 石槽、土面的试片表现出高溶蚀, 但石槽组内差异较大。总体上, 置于土壤表面的试片溶蚀速率较土

表 2 小生境土壤理化指标

Table 2 Soil Physical and chemical properties of microhabitat

| 小生境类型 Type of microhabitat | 全氮 Total nitrogen/% | 全碳 Total carbon/% | 全硫 Total sulfur/% | 碳氮比 C/ N ratio/ % | 有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹) | pH | 含水率 Moisture/% |
|----------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--|------------|-------------------|
| 石洞 ^① | 0.83±0.15b | 6.48±1.10b | 0.06±0.01bc | 7.78±0.18b | 100.69±13.55b | 7.40±0.12a | 0.24±0.07cd |
| 石缝 ^② | 0.83±0.39b | 6.9±3.26b | 0.08±0.02bc | 8.33±0.52b | 100.1±46.21b | 7.56±0.27a | 0.18±0.01d |
| 石沟 ^③ | 1.24±0.12b | 10.86±1.41b | 0.11±0.03b | 8.78±1.33b | 166.2±24.11b | 6.86±0.41a | 0.34±0.05bc |
| 石槽 ^④ | 2.31±0.53a | 30.06±8.02a | 0.19±0.03a | 12.91±0.60a | 546.51±207.58a | 6.99±0.09a | 0.52±0.04a |
| 土面 ^⑤ | 0.9±0.11b | 7.99±0.77b | 0.09±0.02bc | 8.92±0.29b | 120.45±15.57b | 6.9±0.18a | 0.38±0.05ab |
| 土面下层 ^⑥ | 0.49±0.15b | 3.85±1.21b | 0.04±0.01c | 7.88±0.24b | 60.32±22.16b | 6.82±0.49a | 0.34±0.04bc |

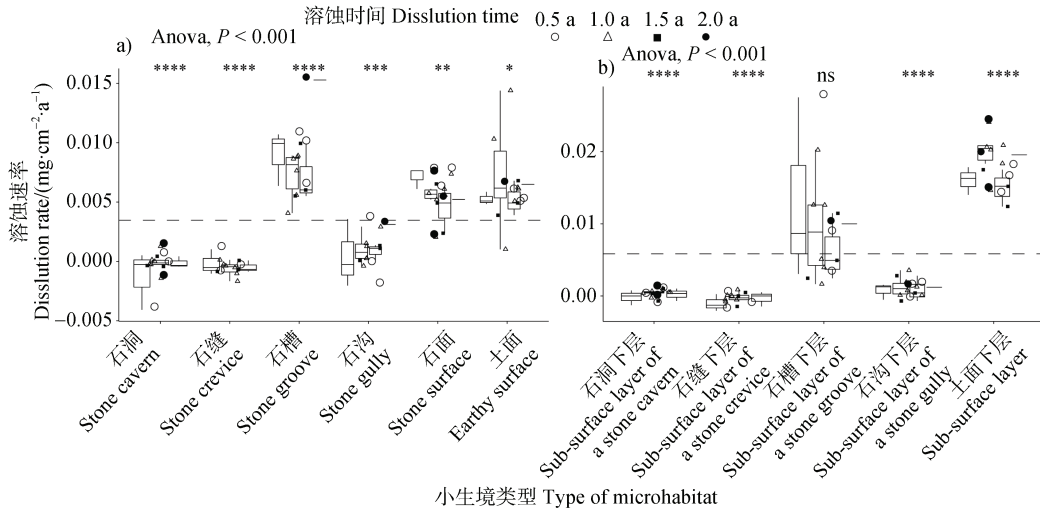
注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. 下同 The same below. ①Stone cavern; ②Stone crevice; ③Stone gully; ④Stone groove; ⑤Earthy surface; ⑥Sub-surface layer.



注: 图 2b 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different letters mean significant difference at 0.05 level.

图 2 粒径范围和微生物分布

Fig. 2 Range of particle sizes (a), and microbe distribution (b)



注: $P < 0.05$ 用 “*” 表示, $P < 0.01$ 用 “**” 表示, $P < 0.001$ 用 “***” 表示。Note: $P < 0.05$ was represented by “*”, $P < 0.01$ was “**”, and $P < 0.001$ was “***” .

图 3 不同小生境下岩石溶蚀速率

Fig. 3 Dissolution rate of carbonate rocks relative to type of microhabitat

壤以下的试片溶蚀速率小, 如置于土面表层的试片在溶蚀时间为 1 年时, 溶蚀速率最高为 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}$, 置于土面下层的试片在溶蚀时间为 1 年时, 溶蚀速率最高为 $0.024 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}$ 。

土面下层土壤有机质、碳、氮含量低于其他生境 (表 2), 埋在土面下层的岩石试片溶蚀速率大于土面表层。因此, 在分析试片溶蚀速率对土壤理化指标、微生物响应情况时, 有必要将土面表层与土面下层区分开进行分析。结果表明, 未剔除土面下层时, 仅土壤 pH 和含水率与溶蚀速率呈显著相关, 剔除土面下层后, 各因子均与溶蚀速率呈显著相关, 并且均表明土壤 pH、含水率在二种情况下分别抑制、促进试片的溶蚀 (表 3)。随机森林分析表明 (图 4a、图 4b), 无论剔除土面下层与否, 生境类型、土壤含水率是影响试片溶蚀的主要因子, 微生物对试片溶蚀影响较其他因子小。

2.3 喀斯特不同小生境岩石溶蚀形态

由 2.2 节已知, 土面、石槽、石沟以及石面这四类小生境中的试片质量在 0.5 年时就已减少, 而石缝和石洞生境中的试片直至 2 年时质量仍未见明显减轻, 因此, 分析溶蚀形态时, 主要关注试片质量在 2 年内明显减轻的生境中的试片 (注: 在以扫描电镜观察溶蚀形态实验中, 实验者从不同溶蚀阶段试片中主要选取溶蚀速率存在变化的试片进行观察, 每片试样随机至少抽取 4 个点进行观察)。直接

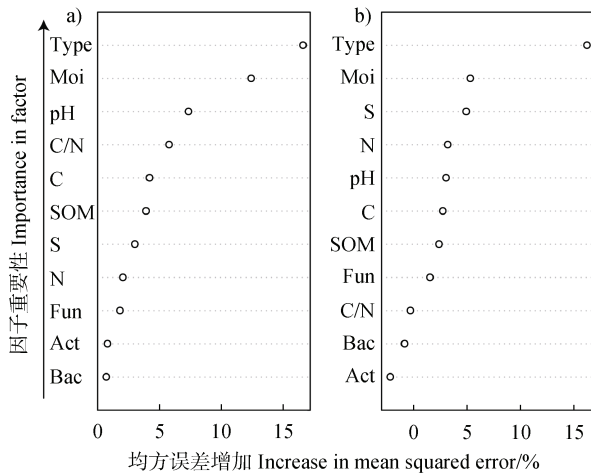
观察从野外采回的对照组发现 (图 5a), 溶蚀主要分为溶锥和溶孔两种形态, 未经溶蚀的试片表面较

表 3 小生境土壤性质与试片溶蚀速率相关性

Table 3 Correlation coefficients between soil properties and dissolution rate of carbonate rocks relative to type of microhabitat

| 因子 Factors | 溶蚀速率 Dissolution rate | |
|-------------------------|-----------------------|---|
| | 总小生境 | 总小生境 (剔除土面下层) |
| | Total microhabitats | Total microhabitats (excluding sub-surface layer) |
| 细菌 Bacteria | 0.06 | 0.63* |
| 放线菌 Actinomycetes | 0.10 | 0.63* |
| 真菌 Fungi | 0.08 | 0.66** |
| 氮 N | -0.06 | 0.52* |
| 碳 C | -0.01 | 0.67** |
| 硫 S | -0.07 | 0.59* |
| 碳氮比 C/N | 0.26 | 0.71** |
| 有机质 Soil organic matter | -0.03 | 0.64* |
| pH | -0.60** | -0.66** |
| 含水率 Moisture | 0.69** | 0.88*** |

注: $P < 0.05$ 用 “*” 表示, $P < 0.01$ 用 “**” 表示, $P < 0.001$ 用 “***” 表示。Note: $P < 0.05$ was represented by “*”, $P < 0.01$ was “**”, and $P < 0.001$ was “***” .



注: Type: 小生境类型 Type of microhabitat; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; Fun: 真菌 Fungi; Act: 放线菌 Actinomycete; Bac: 细菌 Bacteria; Moi: 含水率 Moisture。

图 4 环境因子对试片溶蚀速率的影响

Fig. 4 Effects of environmental factors on dissolution rate of carbonate rocks

溶蚀相对平整(图 5b),说明试片在溶蚀过程中受到岩性及节理的影响,表现出选择性溶蚀。对比置于土面(图 5c、图 5d、图 5e、图 5f)和石槽(图 5i、图 5j、图 5k、图 5l)中的试片的溶蚀形态发现,土面中试片溶锥和溶孔随着溶蚀时间的增加而明显,石槽中试片溶蚀痕迹较同时期的土面表层试片溶蚀形态更加明显,特别是在 0.5 年时就已经呈明显溶蚀。埋于土壤以下的试片(图 5g、图 5h、图 5m)的溶蚀形态较同时期的土体表面中试片的形态更加明显,溶蚀区域更为宽广。

通过 SEM 观察到试片表面存在不均匀溶蚀现象,通过 EDS 分析溶蚀表面的溶锥和溶孔元素组成(图 6a、图 6b、图 6c、图 6d、图 6e、图 6f),可知两种溶蚀形态微区域元素组成总体上为 Ca、Mg、Si、Al、C 以及 O,推测主要的组成可能为 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$ 、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 、 SiO_2 等化合物,这些化合物为碳酸盐岩风化溶蚀后的产物。

3 讨论

3.1 环境因子对岩石溶蚀速率的影响

目前,对于喀斯特碳酸盐岩成土速率与成土关系的研究,基本上认为形成 1 m 厚的土层需要 63~788 万年^[15, 24]。碳酸盐岩溶蚀受到组成结构和外界条件的综合影响,组成结构包括岩石元素组成差异、

孔隙度大小、节理等特征,外在条件主要包括降雨量及持续时间、光照(温度、辐射)、植物根系的机械作用及其分泌物、微生物等因素。事实上,在野外溶蚀过程中,自然条件极为复杂,土地利用方式、植被类型均会对溶蚀产生影响^[25-26],研究发现溶蚀速率与土壤 pH 呈负相关,与含水率、土壤有机碳呈正相关^[17-18],与本研究剔除土面下层后的结果一致(表 3)。在未剔除土面下层的相关性分析中发现(表 2),土壤有机质、碳、氮、硫、微生物与溶蚀速率相关性较小,土壤含水率是影响岩石溶蚀速率的主要因子(图 4b),前已述及,土壤下层中有机质、碳、氮、硫、微生物含量以及含水率均低于土壤表面,(表 2、图 2b)。既有研究表明土壤有机碳含量与其产生二氧化碳、有机酸的能力呈正比关系,二氧化碳溶于水形成碳酸极大提升了水的溶蚀能力^[27-28],土壤含水率对岩石溶蚀的影响被包含在生境类型作用中,其亦是影响岩石溶蚀主要因子(图 4a、图 4b),说明了水及其他物质从土壤表面渗流至土壤下层,使得岩石溶蚀速率在土壤以下高于土壤表面。

3.2 小生境对试片溶蚀形态的影响

为理解岩石溶蚀过程及发生机制,许多科研工作者设计室内模拟实验,主要以淋溶实验为主(以定浓度的盐酸或碳酸溶液为淋液),结果表明碳酸盐岩溶蚀促使淋溶液体 pH 升高、溶蚀初始有酸不溶物产生、溶蚀增大碳酸盐岩孔隙度^[16, 29-32]。溶蚀模拟结合扫描电子显微镜观察溶蚀形态发现,受到岩性的影响,溶蚀形态主要表现为选择性溶蚀、不均匀溶蚀^[33],微生物(细菌、真菌及放线菌)对溶蚀形态的影响有显著促进作用^[34-35]。本研究中,与野外自然溶蚀(图 5a)、未经溶蚀(图 5b)的试片的表面形态相比,溶蚀时间为 0.5 年时,置于土面的试片未见明显溶蚀(图 5c),置于石槽的试片溶蚀形态明显被观察到(图 5i)。基于相同溶蚀时间内,比较同一生境类型下的土壤表面、土壤以下岩石溶蚀形态发现,埋于土壤以下的岩石溶蚀较置于土壤表面明显(图 5e、图 5f、图 5g、图 5h、图 5i、图 5m),前已述及,水及其他物质从土壤表面渗流至土壤以下,可进一步与土壤中的物质综合作用于岩石,可见,土壤含水率在岩石溶蚀速率、形态的变化中发挥重要作用。对溶锥和溶孔进行能谱分析表明,二种微区的元素组成未见显著差异,这可能是野外作用时间不够长、溶蚀正在发生,今后可依托切片技术进一步分析。

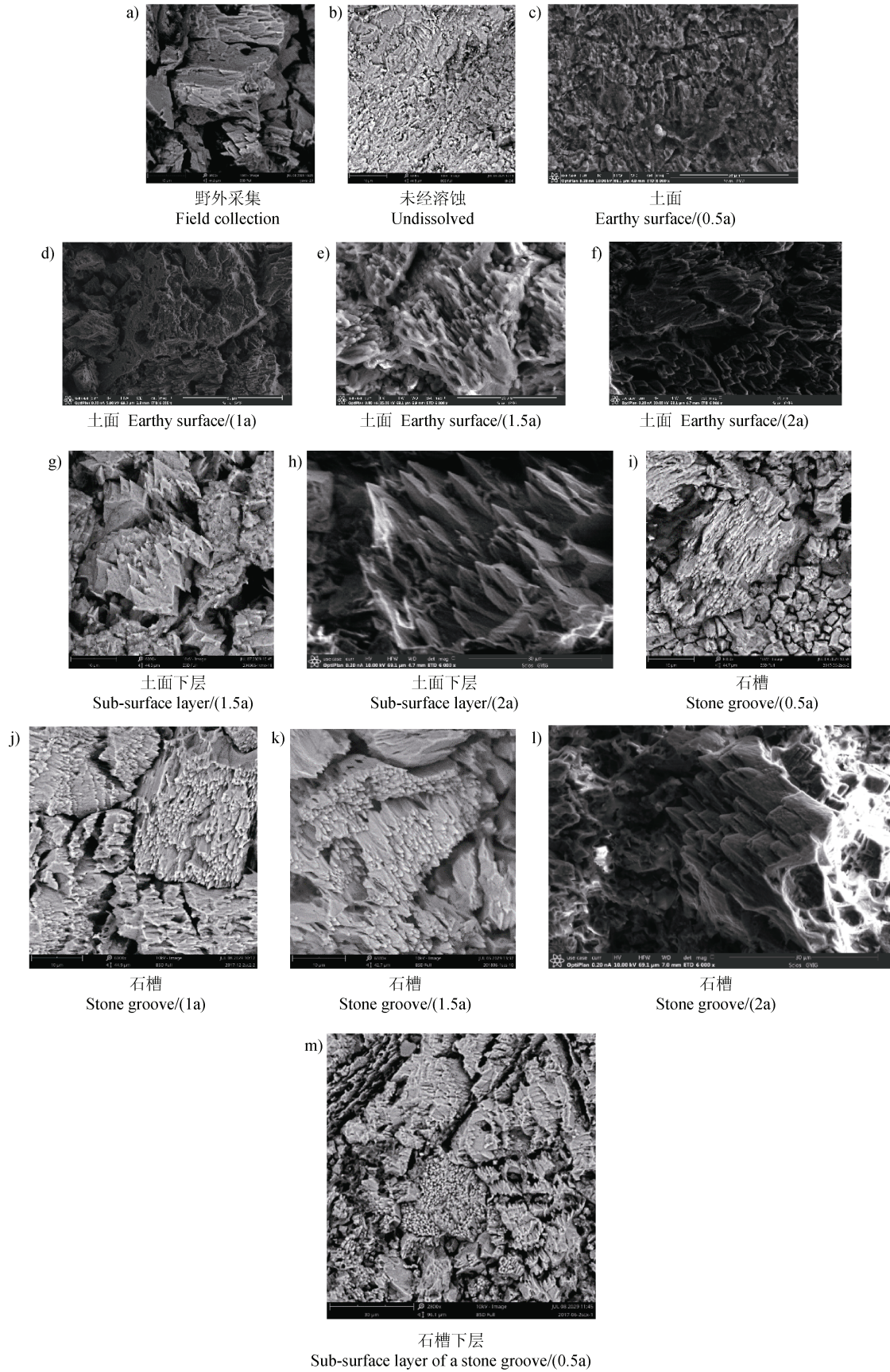
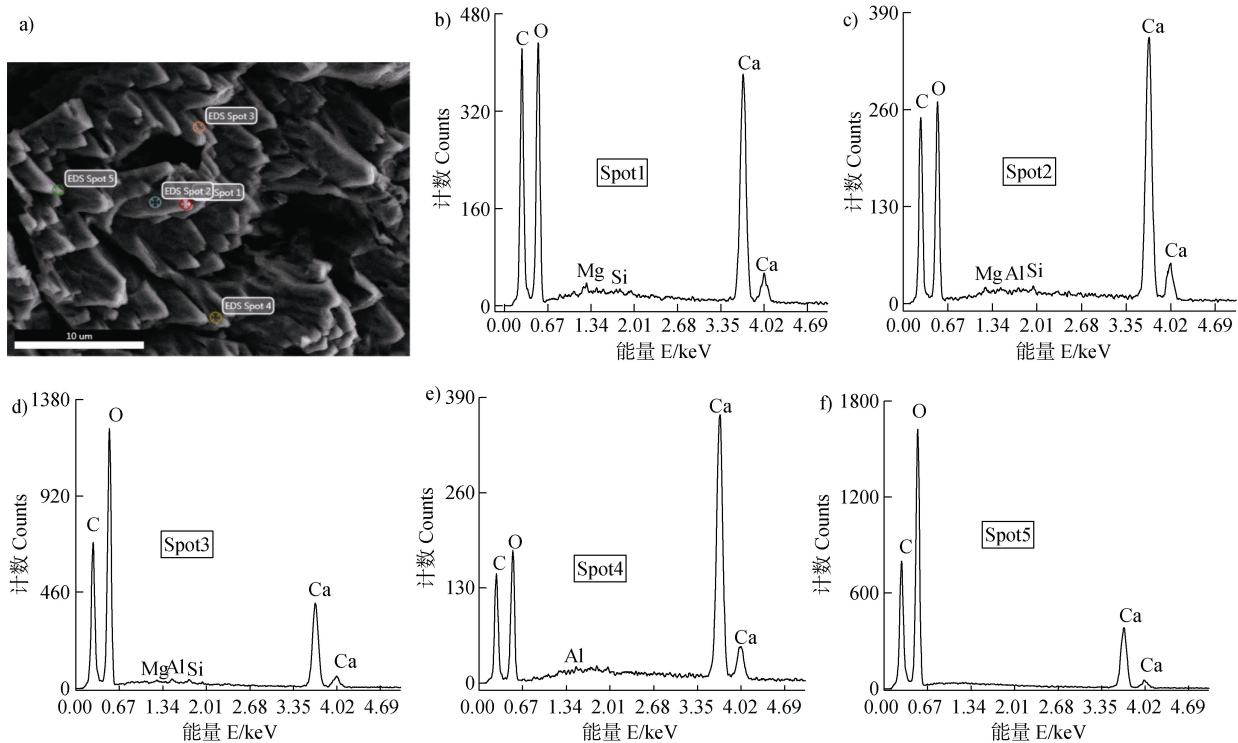


图 5 土面、土面下层、石槽以及石槽下层中碳酸盐岩的溶蚀形态

Fig. 5 The type of carbonate rocks in earthy surface, sub-surface layer, stone groove and sub-surface layer of a stone groove



注：6a) 为放于土面溶蚀 2 年试片 EDS 扫描图，图 6b) 至图 6f) 对应图 6a) 中 EDS Spot1 至 EDS Spot5 EDS 谱图。Note: Fig. 6a) is an EDS scan of a rock sheet placed on earthy surface for 2 years. Fig. 6b) ~6f) correspond to EDS Spot1 to EDS Spot5 in Fig. 6a).

图 6 土面中碳酸盐岩的 EDS 谱图

Fig. 6 EDS micrographs of carbonate rocks in soil surface

3.3 岩石溶蚀在成土中的作用

喀斯特地区成土速率缓慢，与喀斯特成土方式存在重要联系^[36]，在过去的研究中，对于岩石溶蚀与成土的关系，主要从物理、化学方面考虑，很少综合考虑生境类型、土壤理化指标以及微生物与岩石溶蚀在成土过程中的作用，如刘方等^[19]认为小生境成土过程主要以岩石风化、腐殖化为主。岩石溶蚀直至变成土壤是一个复杂的过程，环境因子的综合作用极其重要。本研究表明，不同类型小生境土壤理化指标、碳酸盐岩溶蚀速率存在显著差异（表 2，图 3a、图 3b），研究发现，小生境土壤 PLFAs (Phospholipid Fatty Acids) 总量存在显著差异，如石槽中土壤总 PLFA 含量最高，石洞、石缝中较低^[23]，土壤细菌 Alpha 多样性未见显著差异，但 Beta 多样性差异显著^[37]。从小生境类型对土壤理化性质、碳酸盐岩溶蚀速率和形态以及微生物分布的影响可反映出喀斯特山区生态演替过程的环境变化规律，具体表现为：从石缝、石洞，到石沟、石槽，最后到土面，该方向为正向演替，从土面、石槽，最后到石洞、石缝，该方向为反向演替。无论是正向演替或反向演替，岩石溶蚀一直发生，正向演替岩石溶

蚀速率逐渐增大，土壤微生物群落与功能向稳定方向发展，土壤由贫瘠到肥沃；反向演替可视为喀斯特山区土壤质量下降的根本规律。

综上，茂兰喀斯特森林生境类型对岩石溶蚀速率、形态存在显著影响，这种影响进一步使得不同生境类型在成土方式、质量上表现出差异。在贵州喀斯特地区，碳酸盐岩出露面积约为 12.96 万 km²，岩石裸露率高达 73.6%，这种自然环境与本研究中石面类似，成土方式与本研究中石洞、石缝生境类似，成土速率慢、质量低，导致土壤环境极为脆弱。为解决喀斯特地区土壤贫瘠、质量低等问题，可加大植被恢复面积和管理力度，并且在可能的情况下，地区间的土壤可实施转移“借”用，加速构建植被、土壤微生物以及土壤动物之间的生态功能网络，促进喀斯特山区成土速率以确保土地资源的可持续利用。

4 结论

研究喀斯特山区岩石溶蚀对土壤生态保护和可持续利用具有积极意义，经野外溶蚀实验和室内分

析表明: (1) 埋于石槽生境中土壤以下的试片在溶蚀时间为 0.5 a 时, 溶蚀速率达 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 置于生境表面的试片在溶蚀至 2a 时, 溶蚀速率最高约 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 总体表现出埋于生境土面以下的岩石试片溶蚀速率较置于生境表面高。(2) 在溶蚀时间从 0.5~2 a 中, 随着溶蚀时间增加, 试片溶蚀区域扩大, 并且溶锥体积逐渐增大、溶孔加深。能谱分析发现试片溶蚀区域元素组成未见显著差异。(3) 岩石溶蚀主要受到生境类型的影响, 影响过程可通过土壤含水率、有机质以及微生物等因子体现。(4) 碳酸盐岩溶蚀与环境因子的综合作用过程是茂兰喀斯特森林主要成土方式。

参考文献 (References)

- [1] Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, et al. Preliminary study on weathering of carbonate rock[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1999, 29 (5): 441—449. [王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1999, 29 (5): 441—449.]
- [2] Xu Z M, Huang R Q, Tang Z G, et al. A review of advances and outstanding issues in research on the forming mechanism of laterite in South China[J]. Earth and Environment, 2005, 33 (4): 29—36. [徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展[J]. 地球与环境, 2005, 33 (4): 29—36.]
- [3] Li Y B, Wang S J, Wei C F, et al. The spatial distribution of soil loss tolerance in carbonate area in Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2006, 34 (4): 36—40. [李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布[J]. 地球与环境, 2006, 34 (4): 36—40.]
- [4] Norrish K, Rogers L E R. The mineralogy of some Terra rossas and rendzinas of south Australia[J]. Journal of Soil Science, 1956, 7 (2): 294—301.
- [5] Khan D H. Clay mineral distribution in some rendzinas, red-brown soils, and Terra rossas on limestones of different geological ages[J]. Soil Science, 1960, 90 (5): 312—319.
- [6] Wilke B M, Mishra V K, Rehfuess K E. Clay mineralogy of a soil sequence in slope deposits derived from hauptdolomit (dolomite) in the Bavarian Alps[J]. Geoderma, 1984, 32 (2): 103—116.
- [7] Egli M, Merkli C, Sartori G, et al. Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene soil toposequence developed on carbonate-rich materials[J]. Geomorphology, 2008, 97(3/4): 675—696.
- [8] Bronger A, Ensling J, Kalk E. Mineralverwitterung, tonmineralbildung und rufifizierung in Terrae calcis der slowakei Ein beitrag zum paläoklimatischen aussagewert von kalkstein-Rotlehmen in Mitteleuropa[J]. Catena, 1984, 11 (2/3): 115—132.
- [9] Sun C X, Wang S J, Liu X M, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of rock-soil interface in limestone weathering crust at Huaxi, Guizhou Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22 (2): 126—132. [孙承兴, 王世杰, 刘秀明, 等. 碳酸盐岩风化壳岩-土界面地球化学特征及其形成过程——以贵州花溪灰岩风化壳剖面为例[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 126—132.]
- [10] Wang S J, Sun C X, Feng Z G, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the limestone weathering profile in Jishou, western Hunan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22 (1): 19—29. [王世杰, 孙承兴, 冯志刚, 等. 发育完整的灰岩风化壳及其矿物学与地球化学特征[J]. 矿物学报, 2002, 22 (1): 19—29.]
- [11] Li J Y, Wang C F, Fan T Z, et al. The characteristics of structure and texture of residual laterite and their Genesis[J]. Carsologica Sinica, 1995, 14 (1): 31—39. [李景阳, 王朝富, 樊廷章, 等. 碳酸盐岩残积红土的结构、构造特征及其成因研究[J]. 中国岩溶, 1995, 14 (1): 31—39.]
- [12] Li J Y, Zhu L J, Liang F, et al. Characteristics of structure and mineralogy of interface laterite in weathering crust of carbonate rocks[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19 (4): 11—17. [李景阳, 朱立军, 梁凤. 碳酸盐岩风化壳界面土层的结构和矿物学特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(4): 11—17.]
- [13] Fu B C, Huang Y, Fang L P. Analysis of geohazard origin in the laterite area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9 (4): 13—18. [符必昌, 黄英, 方丽萍. 红土地区地质灾害成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9 (4): 13—18.]
- [14] Li F C, Li S, Yang Y Z, et al. Advances in the study of weathering products of primary silicate minerals, exemplified by Mica and feldspar[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25 (5): 440—448. [李福春, 李莎, 杨用钊, 等. 原生硅酸盐矿物风化产物的研究进展——以云母和长石为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25 (5): 440—448.]
- [15] Li Y, Jiang T M, Wei C F. Progress on calculation models of soil weathering rates[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (5): 1252—1256. [李渝, 蒋太明, 魏朝富. 风化成土速率计算模型的研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41 (5): 1252—1256.]
- [16] Feng Z G, Ma Q, Li S P, et al. Weathering mechanism of rock-soil interface in weathering profile derived from carbonate rocks: Preliminary study of leaching simulation in rock powder layer[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (1): 119—132. [冯志刚, 马强, 李石朋, 等. 碳酸盐岩风化壳岩-土界面风化作用机制——对岩粉层淋溶

- 模拟的初步研究[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 119—132.]
- [17] Li E X, Jiang Z C, Cao J H, et al. The comparison of properties of Karst soil and Karst erosion ratio under different successional stages of Karst vegetation in Nongla, Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1131—1139. [李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 等. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1131—1139.]
- [18] Yang P H, Zhang C, Sun Y C, et al. Effects of soil environmental factors on the dissolution rate of Karst in soils—A case study of the State Jinfo Mountain Nature Reserve, Chongqing[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 920—926. [杨平恒, 章程, 孙玉川, 等. 土壤环境因子对土下岩溶溶蚀速率的影响——以重庆金佛山国家自然保护区为例[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 920—926.]
- [19] Liu F, Wang S J, Luo H B, et al. Micro-habitats in Karst forest ecosystem and variability of soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1055—1062. [刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055—1062.]
- [20] Liao H K, Long J, Li J, et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different vegetation types in micro-habitats of Karst dry-hot valley region of South Western China[J]. *Soils*, 2012, 44(3): 421—428. [廖洪凯, 龙健, 李娟, 等. 西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征[J]. 土壤, 2012, 44(3): 421—428.]
- [21] Liao H K, Li J, Long J, et al. Soil characteristics of different microhabitats of Chinese prickly ash in Karst mountain areas of Guizhou Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2429—2435. [廖洪凯, 李娟, 龙健, 等. 贵州喀斯特山区花椒林小生境类型与土壤环境因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2429—2435.]
- [22] Liao H K, Li J, Long J. Effect of vegetation type and micro-habitat on soil active organic carbon and basal respiration in Karst dry and hot valley region of Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 580—586. [廖洪凯, 李娟, 龙健. 喀斯特干热河谷植被类型和小生境对土壤活性有机碳和基础呼吸的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 580—586.]
- [23] Wu Q S, Long J, Li J, et al. Effects of different microhabitat types on soil microbial community composition in the Maolan Karst Forest in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 1009—1018. [吴求生, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特森林小生境类型对土壤微生物群落组成的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 1009—1018.]
- [24] He T B. Status of soil and water loss and counter measures of ecological agriculture construction in Guizhou Karst mountainous region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(S1): 28—34. [何腾兵. 贵州喀斯特山区水土流失状况及生态农业建设途径探讨[J]. 水土保持学报, 2000, 14(S1): 28—34.]
- [25] Liu B C, Xiao S D, Zheng Y, et al. Analysis of basic characteristics of carbonate Karst in Guilin City[J]. *Subgrade Engineering*, 2016(3): 31—35. [刘宝臣, 肖适德, 郑元, 等. 桂林市碳酸盐岩溶蚀基本特征分析[J]. 路基工程, 2016(3): 31—35.]
- [26] Wu K Y, Jiang Z C, Ye Y. Influence of different plant communities on erosion rates of limestone rock blocks[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(5): 967—971. [吴孔运, 蒋忠诚, 叶晔. 不同植物群落对灰岩试块溶蚀速率的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 967—971.]
- [27] Lan J C, Fu W L, Peng J T, et al. Dissolution rate under soil in Karst areas and the influencing factors of different land use patterns[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3205—3212. [蓝家程, 傅瓦利, 彭景涛, 等. 不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3205—3212.]
- [28] Wang D Y, Zhang C, Xie S Y, et al. Response of karstification to land-use types in mountain area—A case study of the Karst areas in Bitan and Shuifang springs in Jinfo Mountain, Chongqing, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 222—230. [王冬银, 章程, 谢世友, 等. 山区岩溶作用对土地利用方式的响应——以金佛山碧潭泉和水房泉两区岩溶系统为例[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 222—230.]
- [29] She M, Shou J F, Shen A J, et al. Experimental simulation of dissolution for carbonate rocks in organic acid under the conditions from epigenesis to deep burial environments[J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 276—286. [余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 从表生到深埋藏环境下有机酸对碳酸盐岩溶蚀的实验模拟[J]. 地球化学, 2014, 43(3): 276—286.]
- [30] She M, Zhu Y, Shen A J, et al. Simulation experiment for the dissolution of carbonate rocks of the Yingshan formation on the northern slope of Tazhong uplift[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 234—239. [余敏, 朱吟, 沈安江, 等. 塔中北斜坡鹰山组碳酸盐岩溶蚀的模拟实验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 234—239.]
- [31] Zhang A, Fang Y, Xu M, et al. Simulation experiment for weathering of culture relic on carbonate rock Palisades in Longmen grottoes[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 227—233. [张傲, 方云, 徐敏, 等. 龙门石窟碳酸盐岩体文物风化作用模拟试验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 227—233.]
- [32] Zhang A, Fang Y, Chen J P, et al. Dissolution experiment and numerical simulation analysis for condensation water on carbonate rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3648—3656.

- [张傲, 方云, 陈建平, 等. 凝结水对碳酸盐岩溶蚀实验及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (S2): 3648—3656.]
- [33] He Y B, Jin Y Z, Li K, et al. Study on mechanism of carbonate dissolution[J]. *Carsologica Sinica*, 1984, 3(2): 17-21, 281-183. [何宇彬, 金玉璋, 李康, 等. 碳酸盐岩溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶, 1984, 3 (2): 17-21, 281-183.]
- [34] Zhang J, Li S F, Zhou Y Y. On bacterial and fungal effects on Karst process and its application[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16 (4): 362—369. [张捷, 李升峰, 周游游. 细菌、真菌对喀斯特作用的影响研究及其意义[J]. 中国岩溶, 1997, 16 (4): 362—369.]
- [35] Jia L P, Li W, Zhu M, et al. Dynamic corrosion effect of different microbes on limestone[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13 (1): 126—130. [贾丽萍, 李为, 朱敏, 等. 典型细菌、真菌、放线菌对石灰岩动态溶蚀效果比较[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13 (1): 126—130.]
- [36] Long J, Jiang X R, Deng Q Q, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the Karst region of Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (3): 419—427. [龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42 (3): 419—427.]
- [37] Wu Q S, Long J, Liao H K, et al. Soil bacterial community characteristics under different microhabitat types on Maolan Karst forest, Guizhou, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (1): 108—116. [吴求生, 龙健, 廖洪凯, 等. 贵州茂兰喀斯特森林不同小生境下土壤细菌群落特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (1): 108—116.]

(责任编辑: 檀满枝)