

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.007

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.007

唐旭芳, 付智勇, 黄钰涵, 等. 白云岩坡地土壤与表层岩溶带强风化层耦合结构特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 56-65.

TANG Xufang, FU Zhiyong, HUANG Yuhan, et al. Spatial coupling pattern of soil layer and upper epikarst zone on a dolomite hillslope[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 56-65.

白云岩坡地土壤与表层岩溶带强风化层耦合结构特征

唐旭芳^{1,2}, 付智勇^{2,3}, 黄钰涵¹, 王升^{2,3,4}, 赵杰^{2,3}, 陈洪松^{2,3}

(1. 广西大学林学院广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,

长沙 410125; 3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100;

4. 南宁师范大学地理与海洋研究院北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001)

摘 要: [目的] 喀斯特区白云岩坡地植被恢复困难, 石漠化治理难度大, 其浅薄土层下伏的表层岩溶带深度参与生态系统过程, 然而土壤与表层岩溶带二者的耦合发育关系尚不明确。[方法] 选择典型白云岩山坡, 在全坡面尺度上开展深入表层岩溶带强风化层底部的岩土探槽开挖试验, 结合 Kriging 插值、地理加权回归分析等方法对土壤和表层岩溶带强风化层空间特征进行分析, 初步探明白云岩坡地土壤与表层岩溶带强风化层间的空间耦合发育特征。[结果] 1) 白云岩坡地土壤和表层岩溶带强风化层厚度沿坡向下逐渐增加, 坡地尺度上表层岩溶带强风化层平均厚度为 50 cm, 平均体积为 $0.47 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 占土壤全剖面总体积的 43.9%, 说明喀斯特区表层岩溶带的生态功能极其重要; 2) 白云岩坡地岩土结构呈极强的空间异质性, 下伏表层岩溶带强风化层空间异质性 ($C+C_0=18.88$) 显著高于上覆土壤层 ($C+C_0=15.84$); 3) 土壤总厚度, 尤其是土壤 B 层厚度, 与表层岩溶带风化程度呈显著正相关, 说明土壤厚度的增加促进下伏表层岩溶带的风化, 土壤和表层岩溶带强风化层间呈明显的耦合协同发育关系。[结论] 喀斯特地区土壤和表层岩溶带强风化层协同演化, 土壤层下伏的表层岩溶带可能是支撑喀斯特生态系统的重要介质, 喀斯特水土资源的评估需要考虑除土壤以外的基岩风化层。土壤厚度及土壤发生层 B 层厚度可能成为预测喀斯特坡地表层岩溶带厚度的关键参数。

关键词: 喀斯特关键带; 土壤-表层岩溶带系统; 喀斯特生态系统; 岩溶过程; 土壤发育

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0056-10

Spatial Coupling Pattern of Soil Layer and Upper Epikarst Zone on a Dolomite Hillslope

TANG Xufang^{1,2}, FU Zhiyong^{2,3}, HUANG Yuhan¹,

WANG Sheng^{2,3,4}, ZHAO Jie^{2,3}, CHEN Hongsong^{2,3}

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry,

Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in

Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125,

China; 3. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences,

Huanjiang, Guangxi 547100, China; 4. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf of

Ministry of Education, College of Geography and Oceanography, Nanning Normal University, Nanning 530001, China)

Abstract: [Objective] Restoring vegetation and combating rocky desertification on dolomite slopes in karst regions face significant challenges. The upper epikarst zone, which underlies the shallow soil layer, plays a crucial role in ecosystem processes. Nevertheless, the coupling relationships between the soil and the upper epikarst zone remain poorly understood. [Methods] A representative dolomite hillslope was chosen for detailed soil-epikarst

收稿日期: 2024-08-13

修回日期: 2024-09-21

录用日期: 2024-10-12

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-27

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U21A20189); 广西重点研发项目 (桂科 AB22035058); 国家自然科学基金面上项目 (42077077); 广西科技基地和人才专项青年创新人才科研专项 (桂科 AD22035032)

第一作者: 唐旭芳 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事自然保护地管理与生态修复研究。E-mail: tangxufang0705@foxmail.com

通信作者: 黄钰涵 (1992—), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀和土壤水文研究。E-mail: huangyuhang0710@foxmail.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

system structure investigation through trench excavation method. By integrating Kriging interpolation with geographically weighted regression analysis, the spatial distribution characteristics of different medium layers in the soil-epikarst system were analyzed. The study preliminarily proved the co-evolving feature of the soil and the underlying upper epikarst zone on dolomite hillslopes. [Results] 1) The thickness of soil and upper epikarst zone on the dolomite hillslope gradually increased down the slope. The average thickness of the upper epikarst zone on a hillslope scale was 50 cm, with an average volume of $0.47 \text{ m}^3/\text{m}^2$, accounting for 43.9% of the total volume of the soil profile, indicating that the ecological function of epikarst in karst regions is extremely important. 2) The soil-epikarst system's structure of the dolomite hillslope exhibited strong spatial heterogeneity. The spatial heterogeneity of the underlying upper epikarst zone ($C+C_0=18.88$) was significantly higher than that of the overlying soil layer ($C+C_0=15.84$); 3) The overall soil thickness, especially the B horizon's thickness, was significantly positively correlated with the upper epikarst zone's weathering degree, indicating that the increase of soil thickness promoted the weathering of the underlying upper epikarst zone, and there was a clear coupling and collaborative development relationship between soil and upper epikarst zone. [Conclusion] The soil and upper epikarst zone in karst regions have evolved in a mutually reinforcing manner. The upper epikarst zone acts as an essential substrate for supporting the karst ecosystem. The soil thickness, especially the B horizon's thickness, may be critical parameters for predicting epikarst depth on karst hillslopes. In karst areas, the underlying carbonate rocks can not be ignored when carrying out soil and water resources evaluation.

Keywords: karst critical zone; soil-epikarst system; karst ecosystems; karstification process; soil development

Received: 2024-08-13

Revised: 2024-09-21

Accepted: 2024-10-12

Online(www.cnki.net): 2024-12-27

白云岩是我国西南喀斯特区广泛分布的一种碳酸盐岩类型(约占该区总面积的 25%),其酸不溶物质量分数低,土壤浅薄且砾石质量分数高,持水性差,溶沟等积土生境不足,植被以草本为主,土壤侵蚀问题严重^[1-2]。白云岩区因土层薄弱和基岩严重漏水漏肥,成为喀斯特地区植被恢复的难点,是石漠化治理后续工程的集中攻坚区^[3]。表层岩溶带是指喀斯特地区岩石表层一定深度内风化强烈的部分,具有存储、分配降水补给的作用,是岩溶水系统的重要组成部分^[4-5]。岩溶化学溶蚀作用促使该区土壤与下伏表层岩溶带(碳酸盐岩强风化层)共同演化,形成一个由植物根系、土壤填充物、岩溶裂隙管道和碳酸盐岩基质共同耦合交织的复杂网络,共同参与水文和生物地球化学循环,与非喀斯特地区的生态系统循环过程形成鲜明对比^[5]。因此,在白云岩区开展水土过程研究时,须同时考虑土壤层和下伏表层岩溶带,以确保研究结果的全面性和准确性^[6]。

植物的正常生长有赖于根区水分养分的持续有效供给。刘鸿雁等^[7]结合区域地质图和遥感分析发现,草本多分布于白云岩区,而深根系植物多分布于石灰岩区,其将此现象归因于土壤-表层岩溶带耦合结构的不同,说明喀斯特区应从完整土壤-表层岩溶带系统视角,才能准确评估其植被承载力。基于岩溶动力学理

论和水文地质调查数据,研究者^[8]发现,白云岩晶间孔隙均匀,有利于整体均匀风化,岩溶多重介质分异不明显,岩溶管道裂隙网络不发育。岩土剖面通常呈现从浅薄土层-砂层-结构解体碎块-结构半解体岩块-完整岩体的逐渐过渡的特征,土壤相对均匀地分布于地表^[6,9]。彭韬等^[10]通过野外调查和盆栽试验指出,白云岩山坡土壤量少,且均匀分布于表层岩溶带(白云岩强风化层)之上,植被根系深入表层岩溶带中,土壤-表层岩溶带系统的水分、养分储量是影响植被恢复的关键因素。物探和钻探试验显示^[11],土壤和表层岩溶带沿坡向下厚度递增,且二者协同演化。表层岩溶带深度通常达 2 m 以上,野外全面开挖困难^[12]。尽管以往采用地质图、遥感、土坑开挖和物探等方法,但尚未能直接获取地下岩土结构的空间格局数据,无法定量描述土壤-表层岩溶带系统的结构。

由于土壤-表层岩溶带共同交织发育,二者共同支撑生态系统过程和功能的实现,仅关注上覆的浅薄土壤层,无法准确评估白云岩区浅层地表生源物质赋存状态及其植被支撑能力。有关白云岩山坡土壤-表层岩溶带结构空间异质性及其耦合发育规律的认识,还有待野外实测数据的支撑^[13]。本研究选择典型白云岩山坡,在全坡面尺度上开展深入到基岩底部的岩土探槽开挖试验,揭露支撑白云岩山坡植被生长的完

整土壤-表层岩溶带系统,通过岩土剖面密集调查与取样测试,实现土壤-表层岩溶带系统物质组成及理化性质的直接调查分析。从完整土壤-表层岩溶带系统的角度开展整体分析,分别评估土壤层与下伏表层岩溶带(白云岩强风化层)对白云岩山坡表层松散风化物质的相对贡献,探明土壤与表层岩溶带强风化层的协同发育关系,为深入认识白云岩坡地植被生长的障碍形成机制提供基础数据及理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择位于广西河池市环江毛南族自治县的中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站($24^{\circ}43'59''\sim 24^{\circ}44'49''\text{N}$, $108^{\circ}18'57''\sim 108^{\circ}19'58''\text{E}$)木连白云岩峰丛洼地小流域作为研究对象(图 1)。木连小流域地处云贵高原向广西丘陵过渡的九万大山坡麓地带,属于桂西北峰丛洼地连片分布区的腹地,是典型的喀斯特峰丛-洼地地貌,总面积约 146 hm^2 。高程为 $276\sim 305\text{ m}$,西、南、东部均为峰丛地貌,峰顶标高为 $450\sim 560\text{ m}$,坡度 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$,海拔为 $272\sim 467\text{ m}$,地形起伏大,四周高地与中间低洼相互交错,地形复杂,坡度陡峭,超过 25° 的坡面占总面积的 60% ,基岩裸露面积约占 30% ,其地质背景及地形地貌特征符合该区广泛分布的峰丛洼地流域所具备的普遍特征。

研究区属中亚热带季风气候,雨季高温多雨,旱季低温少雨,年平均气温 19.9°C ,年平均降水量为 $1\,389\text{ mm}$,降水季节不均匀,其中,5—9 月的降水量占全年的 75% 以上,尤其以 6 月中旬至 7 月中旬最为集中。在 1984 年之前,该地区经历大规模的砍伐、樵采、垦殖、放牧和火烧等破坏活动。从 1985 年开始,该坡地得到有效保护,并实施退耕还林措施。通过长期的自然恢复和植树造林,形成各种不同类型的草丛、草灌丛和次生林群落。

1.2 样地设置

于 2020 年 7 月在流域内选取 1 块典型灌草坡面(图 2)作为研究区进行详细的土壤剖面采集,坡度为 25° ,面积为 $30\text{ m}\times 120\text{ m}$,植被覆盖度 $>90\%$,地表枯落物厚度约 2 cm ,覆盖度 $>70\%$ 。野外具体操作流程为:1)探槽开挖前,采用照相法,对探槽所在范围的岩石出露面积进行测量,估算每条探槽的裸岩率;2)获取小区土壤-表层岩溶带系统不同介质层厚度空间分布数据。先将地表植被清除,而后人工采用铁镐沿坡脚至坡顶方向开挖 14 条探槽,每条探槽横向间隔 5 m 、投影长 20 m 、宽 1 m 。以探槽顶部为起始调查点,沿坡向下每隔 20 cm ,用皮尺量测探槽两侧不同介质层的深度,考虑的介质层类型包括土壤 Ao

层、土壤 Ar 层、土壤 B 层、C 层(表层岩溶带强风化层)。采用人工铁镐开挖探槽的过程中发现,由于人工开挖力度的限制,铁镐开挖至白云岩结构半解体岩块上界面即无法再深入挖掘。因此,本研究将包括“糖砂层-结构全解体碎块”的岩石高度风化层,进一步定义为表层岩溶带强风化层,作为本研究的主要研究对象,以确保获取全面的土壤剖面及表层岩溶带强风化层信息(图 3);3)对不同介质层采集样品,测定土壤-表层岩溶带系统基本理化性质及表层岩溶带力学性质。在探槽内,沿坡向下每隔 2 m 采集 1 组土壤(包括土壤 Ao 层、土壤 Ar 层、土壤 B 层)及表层岩溶带强风化层样品,每个土壤发生层样品采集重量约 2 kg ,表层岩溶带样品约 4 kg 。每条探槽共采集土壤-表层岩溶带剖面分层样品约 10 组。土壤和表层岩溶带强风化层样品在室内分析基本理化性质,包括机械组成、砾石质量分数、速效氮磷钾质量分数。以上基本理化性质的测定方法均为常规方法^[14]。为定量评估表层岩溶带的风化程度,采用岩石压入硬度测试法,对表层岩溶带强风化层原状样品进行岩石硬度测试。沿坡向下每隔 1 m 连续拍摄探槽两侧的土壤-表层岩溶带强风化层剖面照片,通过图像处理软件(Photoshop 2022)估计单位剖面面积内直径 $>1\text{ cm}$ 的根系数量。

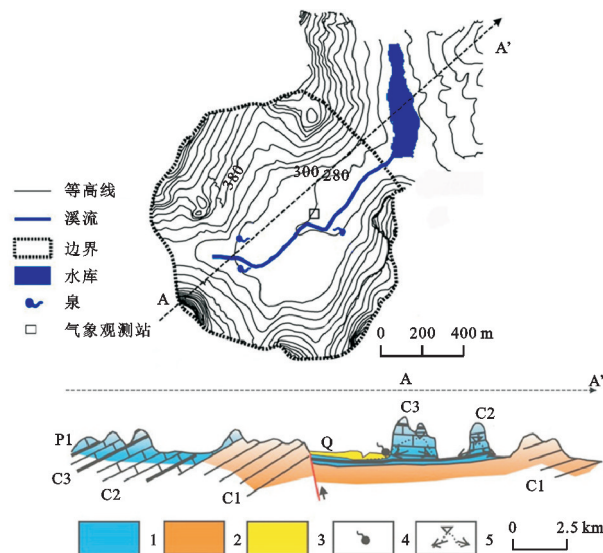


图 1 木连小流域水文地质及地形

Fig.1 Overall hydrogeological and topographic map of the Mulian catchment

1.3 风化程度鉴定

表层岩溶带风化程度根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[15]从纹理、颜色、破碎的程度、敲击声音等野外特征进行定性划分(表 1)。

1.4 土壤-表层岩溶带强风化层剖面结构定量刻画与介质体积估算

开挖过程中,分别对每条探槽的左右两侧槽壁沿

坡向下以 0.2 m 为间隔布置测量点,每条探槽单侧设置 110 个样点,共获取 2 930 个样点。按照发生层次分层测定每个样点所对应的介质厚度,并使用全站仪

确定测量点的三维坐标,以便获取探槽土壤-表层岩溶带强风化层-基岩剖面结构图。裸岩率以沿坡向下每个 1 m 范围内岩石出露的面积百分比估算。

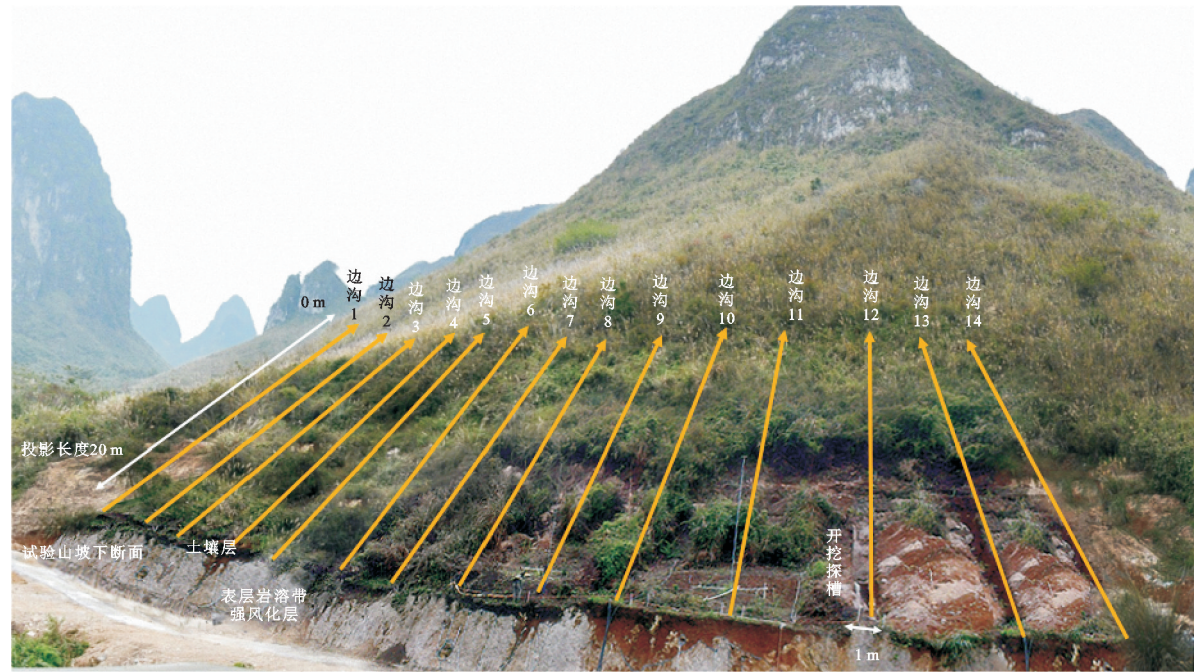


图 2 白云岩试验坡地全景图与探槽开挖调查场景

Fig.2 Panoramic view of the experimental dolomite hillslope and field investigation scene of trench excavation

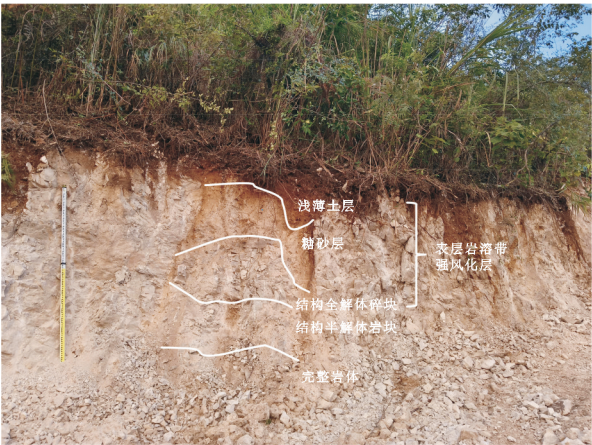


图 3 白云岩坡地典型土壤-表层岩溶带剖面

Fig.3 Feature of a typical soil-epikarst profile on the experimental dolomite hillslope

根据实测数据绘制的剖面图上,运用 CAD 软件对探槽剖面沿坡向下每 0.2 m 范围内各介质层的面积进行统计。根据统计获得的面积值和探槽的宽度,计算出每 0.2 m 范围内各介质层的体积,进而计算出单位面积上的介质体积,计算公式为:

$$V_1 = S_a \times H \tag{1}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{S} \tag{2}$$

式中: V_1 为探槽沿坡向下 0.2 m 土层介质体积, m^3 ; V_2 为单位面积的介质体积, m^3/m^2 ; S_a 为探槽沿坡向下每 0.2 m 内左右两边壁的介质面积平均值, m^2 ; S 为沿坡向下每 0.2 m 长对应的探槽坡面的面积, m^2 ; H 为探槽宽度,1 m。

表 1 风化程度分级标准

Table 1 Weathering degree classification standard

风化级别	纹理	颜色	强度	敲击声音
Ⅵ级(原生土)	无原纹理	全褪色,无原岩石颜色	松散,手指能捻碎	
Ⅴ级(完全风化)	原纹理	全褪色,无原岩石颜色	手指能捻碎,水可冲碎	
Ⅳ级(强风化)	原纹理	全褪色,无原岩石颜色	手能压碎成小块,水中不碎	锤击有钝声
Ⅲ级(中等风化)	原纹理	彻底溶蚀	手不能压碎,锤击易碎	锤击有钝声或轻微清脆声
Ⅱ级(轻微风化)	原纹理	原岩石颜色,裂隙处有溶蚀	锤击不易碎	锤击声清脆
Ⅰ级(新鲜岩石)	原纹理	原岩石颜色,肉眼不易察觉风化现象	锤击不易碎	锤击声清脆

1.5 数据处理

通过 SPSS 26.0 软件对数据进行异常值分析、描

述性统计分析和相关性分析,使用 Origin 2021 软件绘图。利用平均值加减 3 倍标准差识别异常值,超出此

范围的值被识别为异常值,并用最大值和最小值替换,处理后的数据被用于后续的分析。采用偏度峰度联合检验法对处理后的数据进行正态性验证,对不符合正态分布的数据进行对数转换。采用 Spearman 相关系数分析土壤和表层岩溶带强风化层厚度与相对高程和裸岩率的相关性,并进一步探讨土壤和表层岩溶带强风化层厚度间的相互关系,利用 GS+9.0 软件对土壤和表层岩溶带强风化层厚度进行半方差分析,并基于此分析结果,通过 ArcGIS 10.2 软件进行空间插值和地理加权回归(GWR)分析。

2 结果与分析

2.1 白云岩坡地土壤-表层岩溶带强风化层整体形态及其介质组分厚度特征

由图 4 可知,14 条探槽岩土分布格局表现出极强

的空间异质性,土壤和表层岩溶带强风化层厚度均呈沿坡向下逐渐增厚趋势,且土壤发生层(B 层)是白云岩山坡土壤的主要发生层。对白云岩坡地各层次厚度的统计分析结果(表 2)表明,Ao、Ar、B、Ao+Ar+B(土壤层)、C 层(表层岩溶带强风化层)厚度变异系数均高于 100%,属于强变异,其中,Ar 层厚度的空间变异性最强(343.40%),受外界干扰变化较显著,其次为 C 层(157.71%)也显示出较强的空间变异性。同时,C 层与土壤发生层 Ao、Ar 和 B 层的厚度均呈显著差异($p<0.05$),随着土层深度的增加,土壤各层次厚度呈显著增加。根据偏度系数和峰度系数可知,除土壤 B 层和 Ao+Ar+B 服从正态分布以外,其余均不服从正态分布,将 Ao、Ar 和 C 层厚度进行对数转化后服从正态分布,可进行地统计分析。

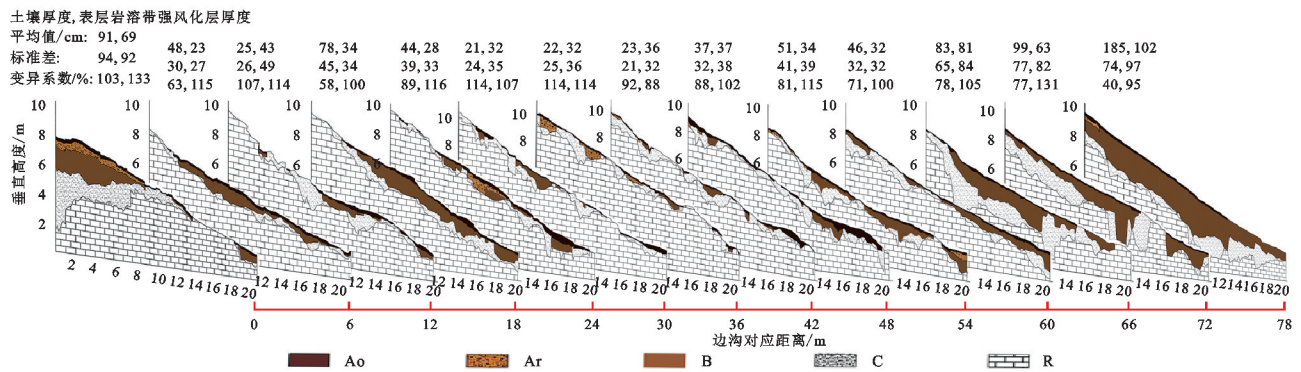


图 4 白云岩试验坡地土壤-表层岩溶带强风化层-基岩剖面结构

Fig.4 Quantitative profiles of the soil-upper epikarst zone-bedrock architecture of the experimental dolomite hillslope

表 2 土壤发生层及表层岩溶带强风化层厚度描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of the thicknesses of soil genetic horizons and upper epikarst zone

土壤层次	最小值/cm	最大值/cm	中值/cm	平均值/cm	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
Ao	0	81.00	11.00	12.78d	13.13	102.71	3.07	13.32
Ar	0	111.00	0	6.30e	21.64	343.40	4.11	16.54
B	0	379.00	19.00	44.80c	62.57	139.66	1.92	4.00
Ao+Ar+B	0	386.00	42.00	63.03a	72.12	114.41	2.09	5.57
C	0	476.00	26.00	49.68b	78.34	157.71	3.65	16.38

注: Ao、Ar、B、C 分别为富含有机质的 A 层、富含岩屑的 A 层、高黏土质量的 B 层、风化的基岩(表层岩溶带强风化层)。同列不同字母表示不同土壤层次厚度差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 白云岩坡地土壤储量及表层岩溶带强风化层体积特征

由表 3 可知,土壤储量与表层岩溶带强风化层体积变异系数分别为 107.82%、106.08%,均属于强变异。土壤储量 0~3.24 m³/m²,平均值为 0.60 m³/m²;表层岩溶带强风化层体积 0~3.87 m³/m²,平均值为 0.47 m³/m²,白云岩坡地土壤储量总体大于表层岩溶带强风化层体积量($p<0.05$)。

2.3 白云岩山坡土壤-表层岩溶带强风化层不同介质厚度的空间变异特征分析

利用 GS+9.0 工具对土壤厚度及表层岩溶带强

风化层厚度进行空间结构变异分析,拟合介质厚度的最优半方差函数模型及参数(表 4)。根据空间自相关程度分类标准^[16],在最优模型中,土壤 Ao、Ar、B、Ao+Ar+B 层变异函数理论模型符合指数模型,C 层变异函数理论模型符合球状模型,且各模型决定系数都较高,表明模型能较好地反映其空间分布特征。基台值($C+C_0$)表示总空间异质性程度,C 层(表层岩溶带强风化层)基台值最大,总体范围变异程度相较于其他介质层空间异质性最高。各介质层的块金系数为 0.003~0.138,土壤 Ao、Ar、B、Ao+Ar+B、C 层的块金系数均 <0.25 ,具有强烈空间自相关性,空

间变异主要受成土母质、地形和地貌等结构性因素影响。变程反映空间变量的有效空间自相关距离,不同介质层间的变程相差较大,为 0.770~3.080 m,表明在此范围内土壤各介质层存在空间自相关性。

表 3 土壤储量及表层岩溶带强风化层体积描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of the volumes of the soil and the upper epikarst zone

土壤 层次	最小值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	最大值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	中值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	平均值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	标准差	变异 系数/%	t	p
土壤(Ao+Ar+B)	0	3.24	0.39	0.60	0.64	107.82	6.22	0
表层岩溶带强风化层(C)	0	3.87	0.33	0.47	0.49	106.08		

表 4 不同介质厚度半变异函数理论模型及参数

Table 4 Semi-variation function model and parameters of different medium layers' thicknesses

土壤层次	模型	C_0	$C+C_0$	$C_0/(C+C_0)$	变程/m	R^2	RSS
Ao	指数模型	0.377	2.832	0.133	1.670	0.955	0.260
Ar	指数模型	0.010	3.804	0.003	0.770	0.840	1.760
B	指数模型	0.820	14.880	0.055	2.930	0.986	2.520
Ao+Ar+B	指数模型	0.510	15.840	0.032	3.080	0.985	3.100
C	球状模型	2.600	18.880	0.138	2.330	0.946	13.700

注: C_0 、 $C+C_0$ 、 $C_0/(C+C_0)$ 分别为块金值、基台值、块金系数; R^2 为决定系数;RSS为残差。

利用普通克里金法插值得出的空间分布图可直接反映白云岩坡地土壤和表层岩溶带强风化层厚度的空间分布格局(图 5),表现为不规则的斑块或条带状分布。白云岩坡地土壤 Ao 层厚度(图 5a)空间上呈斑块分布,表现为下高上低的特点,高值区分布在下部偏中部处;Ar 层土壤厚度(图 5b)呈条带状,高值区域出现在中部由上至下的带状区域内,极高值点状分布在左上部;B 层土壤厚度(图 5c)空间上呈斑块分布,由上向下、由中部向左右两侧呈递增趋势,存在一些极高值点状分布;土壤层(图 5d)总体上呈自上向下逐渐增厚趋势,左右两侧呈高低值相间交错镶嵌状分布;C 层(表层岩溶带强风化层)厚度(图 5e)的空间分布异质性较强,分布规律性较差,高低值错落分布,且高值区大致与土壤 B 层相同。

2.4 白云岩坡地不同介质厚度的影响因素分析

相关性分析(图 6)结果表明,Ao、B、Ao+Ar+B 层与相对高程呈极显著负相关($p<0.01$),而 Ar 层和 C 层与相对高程呈极显著正相关($p<0.01$),但本研究区 C 层与相对高程的相关性微弱,相关系数仅 0.09,表明表层岩溶带强风化层的分布可能主要受地质、气候和水文等其他因素影响。裸岩率与 Ao、B、Ao+Ar+B、C 层厚度呈极显著负相关($p<0.01$),表明随着裸岩率的增加,土壤层和表层岩溶带强风化层厚度减少。C 层与土壤 B 层、Ao+Ar+B 层呈极显著正相关($p<0.01$),进一步通过土壤与表层岩溶带风化程度线性关系(图 7)分析发现,土壤与表层岩溶带风化程度间呈显著正相关($p<0.01$),土壤厚度增加时,表层岩溶带强风化层风化程度也增强。

为探究土壤与表层岩溶带强风化层在空间上的相关性,构建地理加权回归模型并建立局部 R^2 空间分布图

(图 8)。表明土壤厚度对表层岩溶带强风化层厚度的影响呈正向效应,且表现出较为明显的空间异质性,其正效应强度分布呈一定的变化趋势。GWR 模型局部 R^2 总体呈自左向右逐渐增大趋势。土壤发生层 B 层和土壤层与表层岩溶带强风化层局部 R^2 高值区域主要集中在坡地右侧,与土壤发生层 B 层的空间分布(图 5c)相似,说明坡地右侧表层岩溶带强风化层厚度更易受到土壤厚度的影响。整体来看,土壤厚度与表层岩溶带强风化层厚度空间关联性极强。

3 讨论

3.1 试验山坡在峰丛洼地区的代表性

近期在木连小流域开展的水文地质调查及钻探结果表明,木连流域岩性属于石炭系中统白云岩,酸不溶物质量分数 $<0.16\%$,属于极纯白云岩^[17],说明其地质和岩性背景属于该区典型碳酸盐岩发育的峰丛洼地流域。李豪等^[18]先前对该流域开展喀斯特坡地土壤侵蚀机理研究表明,该流域坡地为石炭系下统大塘阶(C_{1d})白云岩组成的石山,为典型的峰丛洼地地貌。研究区坡地的地形和地质概况见图 9。

坡地上部为裸岩极陡坡,坡度多 $>50^\circ$,岩石碎裂后易发生崩落,裂隙内分布有黑色石灰土,仅少量稀疏乔灌生长于岩石的缝隙内;丘坡中下部为薄层撒落堆积物组成的倒石堆型坡地,撒落堆积土层厚度厘米至数米不等,表层散落堆积土层自上而下逐渐由含黑色石灰土的松散角砾过渡为含细角砾的黑色石灰土,植被自上而下逐渐由稀疏的芦苇过渡为茂密的木本灌丛;丘坡坡麓基岩出露,黄壤分布于石芽间的溶槽内。由此可知,白云岩山坡主要根据坡位划分为 2 种土壤类型,中坡为土石混合特征的高砾石黑色石灰土,下坡为较深厚黄壤。

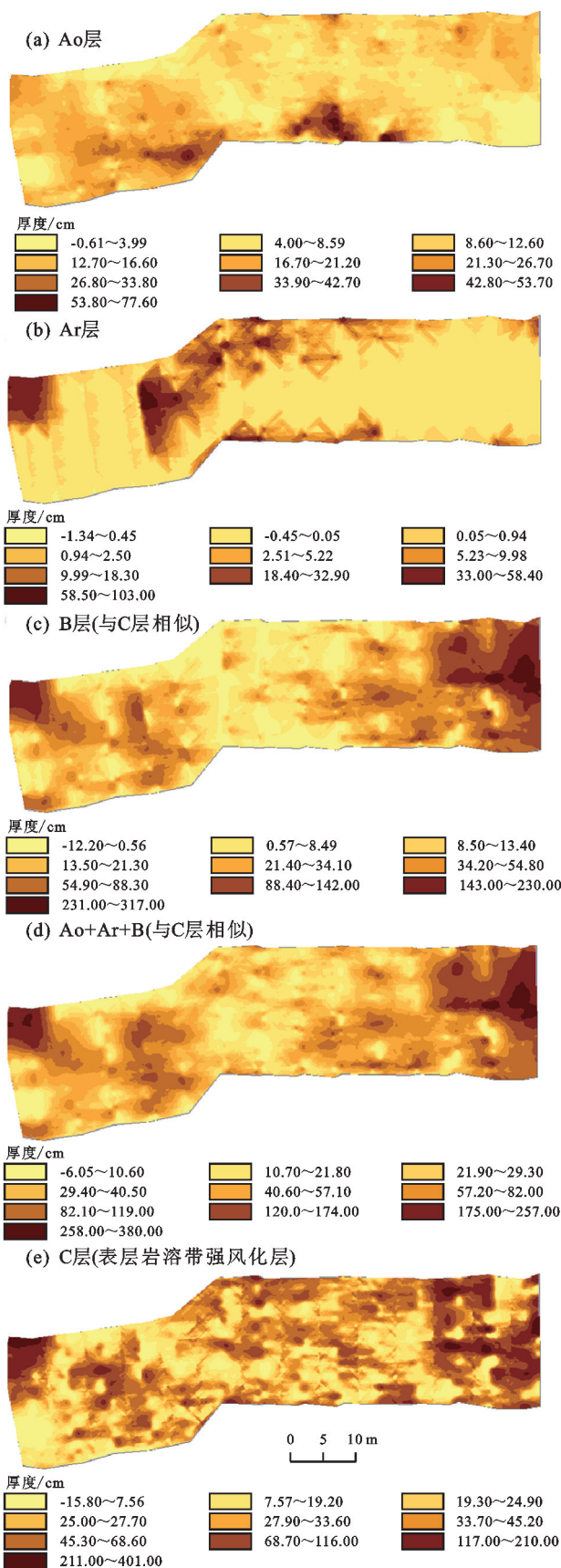


图 5 白云岩坡地土壤-表层岩溶带系统不同介质层厚度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the medium layers' thickness of the soil-epikarst system on the experimental dolomite hillslope

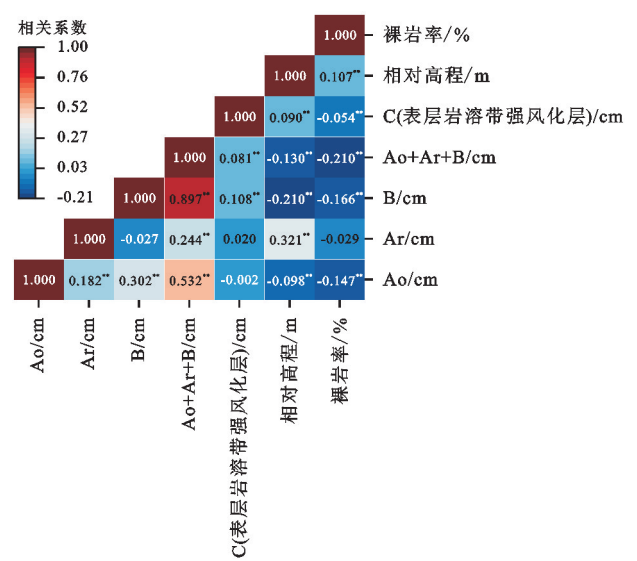


图 6 土壤-表层岩溶带系统不同介质厚度与环境因子的相关性

Fig.6 Correlations between medium layers' thickness and environmental factors in the soil-epikarst system

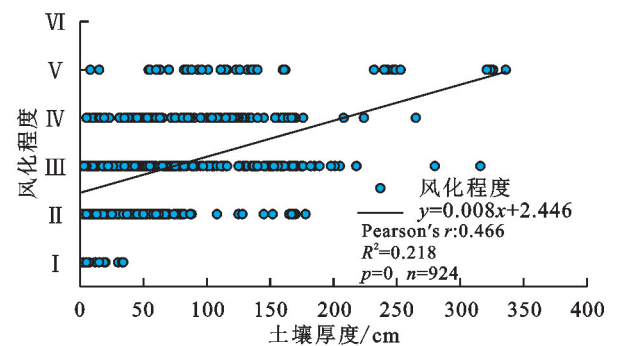


图 7 土壤厚度与表层岩溶带强风化层风化程度的线性相关

Fig.7 Linear correlation between soil thickness and upper epikarst zone's weathering degree

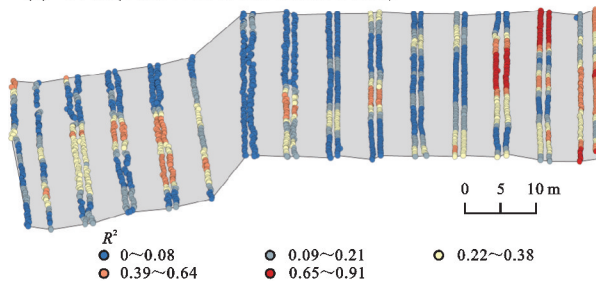
本研究中,探槽开挖范围虽然处于整改试验山坡的中下坡位,未能包含整个山坡,然而本研究选择的白云岩山坡基本包含整个峰丛坡地上有连续土壤分布的所有面积范围(沿坡向上长度约 30 m,宽度约 120 m),说明小区覆盖范围包括白云岩坡地主要的中坡位的高砾石黑色石灰土及下坡位的细质地黄壤 2 种土壤类型。因此,本研究获得的土壤与表层岩溶带强风化层间相互关系的研究结果,具有较好的代表性,能够较好地呈现出完整白云岩山坡土壤-表层岩溶带系统的整体空间分布规律。根据物探结果^[11]发现,木连小流域在流域尺度上,土壤厚度与表层岩溶带厚度呈显著正相关,也证实本研究所选山坡在整个流域尺度具有代表性。

3.2 白云岩山坡土壤-表层岩溶带强风化层耦合发育机理

喀斯特区成土速率缓慢,土层浅薄,岩溶裂隙管道发育,岩土结构空间异质性极强^[19]。虽然已有研究

者^[9]从岩溶理论和宏观调查的角度提出白云岩区典型岩土组构特征,然而,尚未提供足够的野外实测数据支撑,不同地貌部位岩土结构空间分异及其控制因子尚不明确。本研究基于野外大规模岩土剖面探槽开挖试验,从揭露的白云岩坡地土壤-表层岩溶带强风化层-基

(a) GWR(表层岩溶带强风化层和B层)



(b) GWR(表层岩溶带强风化层和Ao+Ar+B层)

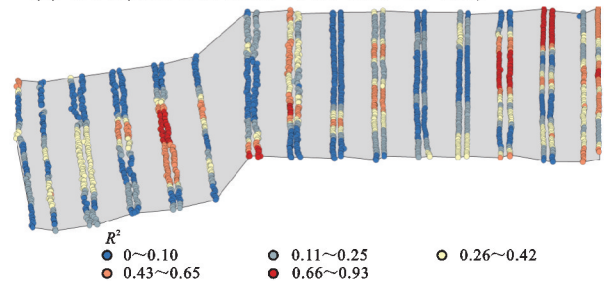


图 8 基于 GWR 模型的土壤厚度对表层岩溶带强风化层影响的局部 R^2 空间分布

Fig.8 Local R^2 values show soil thickness exerting differential degree of influence on upper epikarst zone thickness based on the GWR model

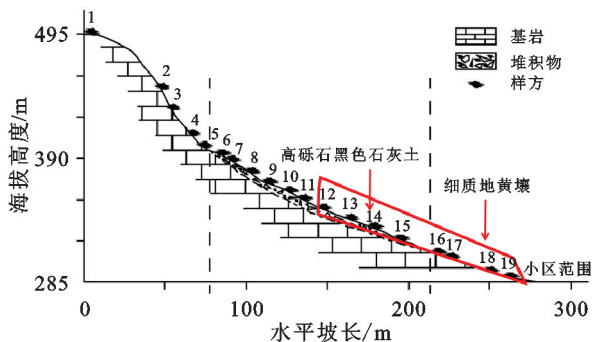


图 9 白云岩试验坡地地形和土壤类型空间分布^[18]

Fig.9 Schematic diagram of the topography and typical soil catena of the experimental dolomite hillslope

整体而言,白云岩坡地土壤厚度和表层岩溶带强风化层厚度沿坡位向下呈逐渐增加趋势,但土壤的空间分布极不均匀。说明在山坡尺度上,白云岩区土壤厚度空间格局与一般意义上的碎屑岩区(非喀斯特区)较为一致,均呈土壤物质沿坡向下逐渐堆积,土壤厚度逐渐增厚的规律性变化趋势。已有研究^[11]也表明,喀斯特区土壤覆盖厚度越大,通常表层岩溶带厚度也较大。张君等^[20]基于水文地质和地球物理勘探技术量化坡地和流域尺度的土壤-表层岩溶带空间分布特征发现,土壤厚度和表层岩溶带强风化层厚度在空间上高度耦合,二者呈强烈的空间自相关性;基于喀斯特标准径流小区降雨产流监测及水化学分析方法,WANG 等^[11]研究发现,相比浅薄土壤,深厚土壤的淀积层发育,且具有较高的储水能力和 CO_2 浓度,促进表层岩溶带的发育;蒙清梅等^[17]在白云岩山坡开展不同坡位土壤分布格局的野外调查发现,白云岩坡地土壤类型及发育程度受到地形和水文过程的综合影响,沿坡向下逐渐堆积较厚的土壤层。

碎屑岩区基岩风化以物理风化为主,基岩风化程度或厚度与地表土壤厚度的关系可能不明显,然而喀

岩剖面结构,证实喀斯特岩土结构有极强空间异质现象,且表层岩溶带强风化层空间异质性高于土壤层。进而对白云岩坡地土壤-表层岩溶带结构初步开展定量刻画发现,上覆土壤和下伏表层岩溶带强风化层间并非独立发育,而是呈耦合发育关系。

喀斯特碳酸盐岩风化以化学溶蚀为主^[21],溶蚀过程所需的反应底物均来自于上覆土壤层(水与 CO_2),因此,土壤厚度与下伏表层岩溶带强风化层厚度表现出显著正相关。本研究基于空间相关性分析(图 6)发现,白云岩坡地土壤厚度与表层岩溶带强风化层厚度呈显著正相关。其中,表层岩溶带强风化层厚度与土壤发生层 B 层厚度呈极显著正相关,即在土壤 B 层较厚的地区,表层岩溶带强风化层往往也呈较大的厚度。土壤 B 层是土壤发育程度及水文条件的重要指示层^[22],因此,从另一个侧面证实喀斯特区土壤层水热及溶蚀潜力与下伏表层岩溶带强风化层发育的密切联系。同时,从地理加权回归结果来看,土壤发生层 B 层对表层岩溶带强风化层厚度影响显著且呈正相关。土壤 B 层越厚的区域表层岩溶带强风化层也越厚,二者具有协同关系。此现象在研究坡地实地获得的土壤-表层岩溶带强风化层剖面结构中也得到反映(图 10),揭示土壤发育与岩溶作用间的密切联系。

白云岩坡地土壤-表层岩溶带系统表现出的耦合发育特征,可以从 2 个方面合理解释。首先,从表层岩溶带促进土壤发育的角度分析:1)相比浅薄且发育程度较低的表层岩溶带,深厚且发育程度较高的表层岩溶带经历更强的岩溶风化过程,地表形成更多的成土物质,从而形成较厚的土壤层;2)水文过程发挥关键作用,表层岩溶带较发育的部位能够汇聚更多径流,促进成土物质在表层堆积,有助于土壤的形成和增厚;3)高度风化且深厚的表层岩溶带空隙结构发育,较高的养分及水分储量能支撑更高的植被生物量,可能加速成土过程,有助于土壤的增厚。其次,从土壤层促进表层岩溶带溶蚀过程的角度分析,相比浅薄土壤,深厚土壤覆盖层可能表现出更高的蓄水能力及二氧化碳分压,从而提高下伏碳酸盐岩的岩溶风化

强度,因此,发育出更高风化程度的表层岩溶带^[23]。总之,土壤的存在对于表层岩溶带的形成和演化起着至关重要的作用,土壤层整体厚度和土壤发生层 B 层厚度与表层岩溶带强风化层厚度均表现出较强的正相关,可能成为预测喀斯特坡地表层岩溶带厚度的关键参数。本研究进一步通过土壤与表层岩溶带强风化层风化程度的线性关系(图 7)分析发现,土壤与表层岩溶带强风化层厚度的相关系数仅为 0.466,表明表层岩溶带强风化层的发育不仅受到土壤厚度的影响,而且受到水文过程、地形地貌及植被等其他因素的影响。

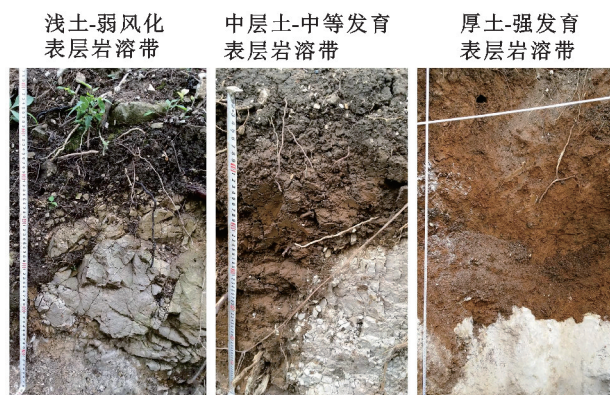


图 10 白云岩坡地典型土壤-表层岩溶带系统类型的剖面结构特征

Fig.10 Profile structure characteristics of typical soil-epikarst system types on the experimental dolomite hillslope

近期模拟降雨及染色示踪试验表明,岩土界面是喀斯特山坡的关键产流通道,岩土界面低洼处是汇聚雨水径流,形成优先流路径的关键位置,说明淋溶出土体的物质能够在岩土界面处集聚并促进表层岩溶带溶蚀风化^[24]。由于碳酸盐岩溶蚀过程受到水动力特征及 CO₂ 通量的共同影响,而地表土壤分布主要受地形地貌因素控制,导致地下表层岩溶带厚度空间异质性明显强于地表土壤厚度空间异质性^[22,25]。研究从岩溶过程及水文水化学的角度,为合理解释白云岩山坡土壤厚度与表层岩溶带强风化层厚度及风化程度间的显著正相关提供可能的理论依据。石灰岩和白云岩是西南喀斯特区主要的碳酸盐岩类型,本研究聚焦典型白云岩发育的峰丛坡地小流域。相比石灰岩高度差异化溶蚀、土嵌发育、岩溶裂隙管道网络发育的高异质性结构特点,白云岩成土过程表现出均匀、整体风化特征,岩溶裂隙管道网络不发育^[25]。本研究揭示的白云岩土壤-表层岩溶带强风化层共同耦合发育的模式,是否在石灰岩分布区同样适用,还需要对不同岩性峰丛洼地小流域进行对比研究。

4 结论

1)喀斯特地区土壤和表层岩溶带强风化层协同

演化。区域尺度下,喀斯特存在地表越往下,介质空间变异越大的现象,表层岩溶带强风化层空间异质性强于土壤。同样,对土壤储量和表层岩溶带强风化层体积的探究揭示表层岩溶带强风化层容量在整体结构中占据相当大的比例,因此,喀斯特水土资源的评估需要考虑除土壤以外的基岩风化层,维持喀斯特生态系统功能的水土赋存条件,有赖于土壤-表层岩溶带系统的整体研究。

2)剖面尺度下土壤和表层岩溶带强风化层厚度空间分布的特征,为直接定量土壤和下伏强风化碳酸盐岩的绝对体质量提供重要数据参考,对于岩溶地区生态系统恢复及环境管理具有重要意义。未来还需要深入研究表层岩溶带强风化层理化性质和养分质量分数的分布情况,进一步揭示表层岩溶带强风化层在生源物质容量方面对喀斯特生态系统的贡献。

3)白云岩区表层岩溶带强风化层表现出与土壤层同等重要的特点,说明喀斯特区土壤下伏岩石强风化层(表层岩溶带)可能深刻参与生态水文及生物地球化学过程,在后续研究及水土资源禀赋评估过程中应该重视表层岩溶带的生态功能。

参考文献:

- [1] 彭韬,周长生,宁茂岐,等.基于探地雷达解译的喀斯特坡地表层岩溶带空间分布特征研究[J].第四纪研究,2017,37(6):1262-1270.
PENG T, ZHOU C S, NING M Q, et al. Study on spatial distribution of epikarst zone on Plateau karst slope based on ground-penetrating radar [J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(6): 1262-1270.
- [2] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [3] 王世杰,李阳兵.喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J].地球科学进展,2007,22(6):573-582.
WANG S J, LI Y B. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(6): 573-582.
- [4] FORD D C, PW W. Karst geomorphology and hydrology [M]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [5] 陈喜,张志才.喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述[J].中国岩溶,2022,41(3):356-364.
CHEN X, ZHANG Z C. An overview on the development of science and ecological hydrology of the earth critical zones in karst area[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 356-364.
- [6] 孙承兴,王世杰,周德全,等.碳酸盐岩差异性风化成土特征及其对石漠化形成的影响[J].矿物学报,2002,22(4):308-314.
SUN C X, WANG S J, ZHOU D Q, et al. Differential

- weathering and pedogenetic characteristics of carbonate rocks and their effect on the development of rock desertification in karst regions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(4): 308-314.
- [7] 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 等. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖[J]. *中国科学(地球科学)*, 2019, 49(12): 1974-1981.
- LIU H Y, JIANG Z H, DAI J Y, et al. Rock fractures determine the coverage of woody and herbaceous plants on the surface of key karst zones[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2019, 49(12): 1974-1981.
- [8] 张之淦. 岩溶发生学: 理论探索[M]. 广西 桂林: 广西师范大学出版社, 2006.
- ZHANG Z G. Origin of karst-theoretical works on karst [M]. Guilin, Guangxi: Guangxi Normal University Press, 2006.
- [9] BUCHER K. Metamorphism of Dolomites and limestones [M] // *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Cham: Springer, 2023: 249-282.
- [10] 彭韬, 邢学刚, 蔡先立, 等. 保水剂与活性炭改良白云岩石漠化坡地土壤促进植物生长的盆栽试验研究[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 525-532.
- PENG T, XING X G, CAI X L, et al. Pot experiment research on the effects of water retaining agent and activated carbon as soil amendments for plant growing on dolomitic rocky desertification slopes [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 525-532.
- [11] WANG S, YAN Y, ZHAO Y J, et al. Co-evolution among soil thickness, epikarst weathering degree, and runoff characteristics on a subtropical karst hillslope[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628: e130499.
- [12] FU Z Y, CHEN H S, XU Q X, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: Implications of field rainfall simulation experiments[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(5): 795-811.
- [13] 张君, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 西南喀斯特关键带结构及其水文过程研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 985-996.
- ZHANG J, CHEN H S, NIE Y P, et al. Research progress on structure and hydrological processes in the karst critical zone of southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(4): 985-996.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- The Ministry of Construction, P.R.C. Code for investigation of geotechnical engineering [GB 50021—2001]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [16] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [17] 蒙清梅, 付智勇, 邓羽松, 等. 白云岩坡地土壤流失空间分布特征及关键影响因子[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 377-386.
- MENG Q M, FU Z Y, DENG Y S, et al. Spatial variations and the key driving factors of soil losses on dolomite slopes [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 377-386.
- [18] 李豪, 张信宝, 王克林, 等. 桂西北倒石堆型岩溶坡地土壤的¹³⁷Cs分布特点[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 42-47.
- LI H, ZHANG X B, WANG K L, et al. ¹³⁷Cs distribution characteristics at a talus-type karst slope in northwestern Guangxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 42-47.
- [19] BERTHELIN R, HARTMANN A. The shallow subsurface of karst systems: review and directions[M] // Bertrand C, Denimal S, Steinmann M, et al, Eds. *Advances in Karst Science*. Cham: Springer International Publishing, 2019: 61-68.
- [20] 张君, 陈洪松, 付智勇, 等. 西南喀斯特小流域关键带含水介质分布特征[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 969-982.
- ZHANG J, CHEN H S, FU Z Y, et al. Investigation on the aquifer structure of small watershed critical zone on karst dolomite in southwest China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 969-982.
- [21] COVINGTON M D, MARTIN J B, TORAN L E, et al. Carbonates in the critical zone[J]. *Earth's Future*, 2023, 11(1): e167214495.
- [22] 李小雁. 水文土壤学面临的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 557-562.
- LI X Y. Opportunity and challenges for hydrogeology [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5): 557-562.
- [23] DONG X L, COHEN M J, MARTIN J B, et al. Eco-hydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst landscape [J]. *Chemical Geology*, 2019, 527: e118774.
- [24] ZHAO Z M, SHEN Y X, JIANG R H, et al. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a karst soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2020, 19(1): e20002.
- [25] KLIMCHOUK A B. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution[J]. *Epikarst*. Special Publication, 2004, 9: 23-35.