

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2017.06.10

文章编号 1001-7410(2017)06-1262-09

# 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\*

彭 韬<sup>①②</sup> 周长生<sup>①②③</sup> 宁茂岐<sup>④</sup> 付 磊<sup>④</sup> 戴德求<sup>③</sup> 王世杰<sup>①②</sup>

(①中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; ②中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 普定 562100; ③湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411100; ④贵州省水土保持技术咨询研究中心, 贵阳 550021)

**摘要** 表层岩溶带作为喀斯特关键带区别于其他区域地球关键带的近地表岩土结构标志层, 对于水分和养分下渗、赋存、滞留、植被水分养分利用等方面具有重要作用, 是岩石-土壤-植被系统中生物地球化学过程最为活跃的关键地带。描述和认识表层岩溶带对认知喀斯特关键带结构信息、研究水土物质循环过程、揭示表层与地下水资源利用规律等方面具有十分重要的理论和现实意义。本文利用探地雷达技术, 探测黔中高原黔西县东南部喀斯特坡地, 共计测线 35 条, 测点 799 个, 提取表层岩溶带发育厚度并分析空间分布特征, 得到以下结论: 喀斯特高原峰丛地貌区表层岩溶带发育较好, 发育厚度集中在 2~8m 之间, 最深可达 18.8m。表层岩溶带发育空间分布异质性强, 坡地表层岩溶带厚度发育异质性变化强于坝地。地面物质组成和表层岩溶带发育厚度关系密切, 坡地石质化比例提高, 表层岩溶带发育较深, 地面物质组成可作为高原型喀斯特坡地反映表层岩溶带发育程度的综合代用性指标。本次研究还指示了喀斯特坡地土地石质化是表层岩溶带地质历史时期不断溶蚀发育演化、土壤地质历史持续漏失的结果。表层岩溶带的发育为水土漏失提供了空间基础, 水土漏失也进一步加剧了岩土界面的水岩反应过程, 促进了表层岩溶带的进一步发育以及地表土体下沉、基岩裸露、土地石质化景观的出现。

**关键词** 喀斯特 石漠化 表层岩溶带 关键带 探地雷达

**中图分类号** P641.134, P534.63<sup>+</sup>2 **文献标识码** A

地球关键带科学(Critical Zone Science)起源于地球系统科学研究, 是指从陆地表面植被冠层到地下含水层的地球表层系统<sup>[1]</sup>, 以监测、模拟、适应性管理为主要研究手段, 从多种时间和空间尺度了解表层地球系统结构、过程、功能及其演化趋势, 目前已成为 21 世纪地球表层系统研究的国际新趋势<sup>[2]</sup>。

喀斯特地球关键带(岩溶地球关键带)受地质背景强烈制约, 在青藏高原晚新生代隆升和雨热同季气候的耦合作用下, 溶蚀作用强烈, 形成地表、地下二元水文地质结构<sup>[3]</sup>。表层岩溶带(epikarst zone), 也称为“皮下层”(subcutaneous), 是由大气或土壤中 CO<sub>2</sub> 与可溶性岩石发生溶蚀作用形成的各种犬牙交错的岩溶个体形态和微形态(如溶蚀裂隙)组合构成的不规则带状强岩溶化层<sup>[4]</sup>。其上界

位于岩土(气)界面, 下界为包气带上部溶隙不发育的基岩(图 1)。由于其高度密集发育的溶蚀孔洞、裂隙, 既是重要的赋水空间和水运移的重要传输通道, 也是喀斯特关键带区别于其他地区地下岩土结构, 在岩石-土壤-植被系统中生物地球化学过程最为活跃的关键地带, 对于水分和养分下渗、赋存、滞留、植被水分养分利用等方面具有重要作用。笔者参考国外岩溶地质学者的表层岩溶带概化图<sup>[5]</sup>结合喀斯特高原地貌特点绘制喀斯特地球关键带及表层岩溶带结构发育示意图(图 1)。

表层岩溶带最早由法国地质学家 A. Mangin<sup>[6]</sup> 在 20 世纪 70 年代提出, 目的是区分水动力学分带中包气带上部含水相对较丰富的部分; 80 年代 Williams<sup>[5]</sup> 分析漏斗和洼地成因时, 从岩溶动力学的角度将此概念发展为浅表层(皮下层)概念。在

第一作者简介: 彭 韬 男 33 岁 博士 生态环境地球化学、土壤侵蚀与水土保持学研究 E-mail: pengtao@vip.gyig.ac.cn

\* 国家自然科学基金项目(批准号:41403112 和 41571130074)、科技部重点研发计划项目(批准号:2016YFC0502602)、喀斯特科学研究中心联合资助项目(批准号:U1612441)和贵州省水利厅科技项目(批准号:KT201408)共同资助

2017-07-02 收稿, 2017-09-25 收修稿稿

通讯作者: 王世杰 E-mail: wangshijie@vip.gyig.ac.cn

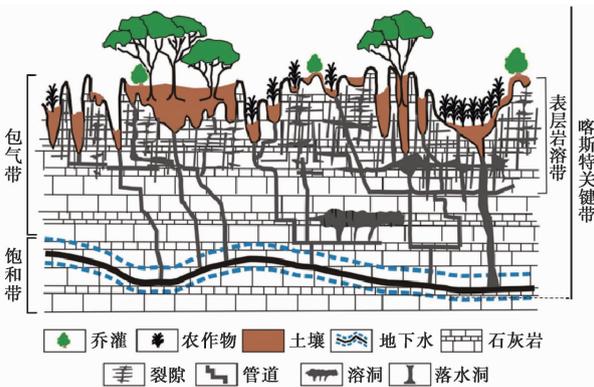


图1 喀斯特地球关键带及表层岩溶带结构发育部位

Fig. 1 Karst critical zone and epikarst zone

我国,袁道先首先使用岩溶表层带这一术语,并针对我国喀斯特地区表层岩溶带开展了水文水化学的相关研究工作取得了丰硕的成果<sup>[7-9]</sup>,并将其作为现代岩溶研究的重要内容<sup>[10]</sup>。

表层岩溶带发育程度(如厚度、裂隙分布、渗透率等)的控制因素受到气候、岩性、构造等综合因素影响,空间差异较大,变异性强。蒋忠诚<sup>[11]</sup>研究表层岩溶带厚度发现在亚热带地区普遍发育厚度约为10m,最深可达30m以上。随着区域降水减少,温度降低,在中亚热带贵州高原面,表层岩溶带发育厚度一般约为2~5m,在降雨量<800mm的温带,表层岩溶带发育已不明显<sup>[11]</sup>。岩性、构造同样对表层岩溶带发育具有重要的控制作用。张信宝等<sup>[12]</sup>在分析喀斯特锥峰和塔峰地貌形成机制时,将控制因素归因于水动力学作用下的表层岩溶带发育,认为在岩层水平、岩性较纯的喀斯特坡地表层岩溶带最为发育;蒋忠诚和袁道先<sup>[13]</sup>则认为生物作用下造成的土壤CO<sub>2</sub>增加也有助于增进表层岩溶带的形成。但目前对表层岩溶带的相关研究多集中在溶蚀速率、水化学过程变化、剖面调查、钻孔调查等方面<sup>[14,15]</sup>,对于其结构的描述刻画、空间发育异质性问题虽也有学者用雷达开展了探索性尝试,分析了表层岩溶带和地形因子的关系<sup>[16]</sup>,但仍缺乏较为详细的定量化的研究。

本文利用探地雷达技术手段,通过对表层岩溶带发育的典型测线进行识别解译,并对喀斯特坡地开展高密度探测,分析表层岩溶带发育特点、空间分布特征,为定量认识喀斯特关键带地下结构提供新的思路,也为关键带生物地球化学过程和圈层界面相互作用等方面相关研究提供结构支撑信息。

## 1 研究区概况

研究地点位于黔中高原黔西县东南部的猴场村喀斯特坡地(26°52'6"N, 106°02'51"E),地貌为峰丛洼地、谷地,区内出露的岩石主要为三叠系厚层纯灰岩,其西侧少量砂岩出露,溶沟、溶槽、石牙等喀斯特地貌广泛发育(图2)。土地利用类型多样,谷地为农田,山体中下部为坡耕地,山体中上部多为裸岩石漠化地,零星分布林地。研究区位于山体坡麓到山体中上部,面积约为0.4km<sup>2</sup>,区内平均海拔1300m,年平均降雨量1050mm,年均气温13.8℃,年平均日照1348.9小时,7月最热,1月最冷,雨季在4~9月,主要集中在6~8月。

## 2 研究方法

利用无人机高分辨率遥感技术对研究区内开展航测,采用ArcGIS中3D Analyst分析工具进行坡度、坡形、坡向及高程等地形特征因子提取。探地雷达采用Mala公司的ProEx主机及50MHz的天线,采样分辨率达到5ps,根据电磁波在介质中的传播速度及表层岩溶带发育厚度确定采样时窗设置为613ns,极值探测深度为30m左右,利用GroundVision软件进行成像。

利用RRFLEXW雷达处理软件进行雷达图像解译,对原始图像进行滤波处理,通过直流漂移、静校正/移动初始时间、增益/能量衰减、二维滤波/滑动平均、1维滤波/带通滤波、抽取平均值等5个步骤,获得表层岩溶带滤波结果图像,然后通过相位自动追踪识别并辅以人工校正,提取出表层岩溶带的厚度结果。前期选取临近研究区青龙山路边剖面(QLP)(27°1'3"N, 106°00'14"E)探测并解译,结果如图3所示,表层岩溶带发育厚度约2m,带内裂隙广泛发育,裂隙率约10%。雷达解译岩层产状及表层岩溶带发育深度与测线实际相符。

根据研究区内地面物质组成(岩石出露率)差异变化,划分为土质测线、土-石质测线和石质测线三类,实测测线35条(图2和表1),同时每条测线每10m用GPS记录探测点的坐标信息,并在各测点5m半径开展地面物质组成调查,共计测点799个。在此基础上,运用空间插值方法分析表层岩溶带厚度发育空间分布特征。研究区地质雷达探测测线空间分布如图2所示。

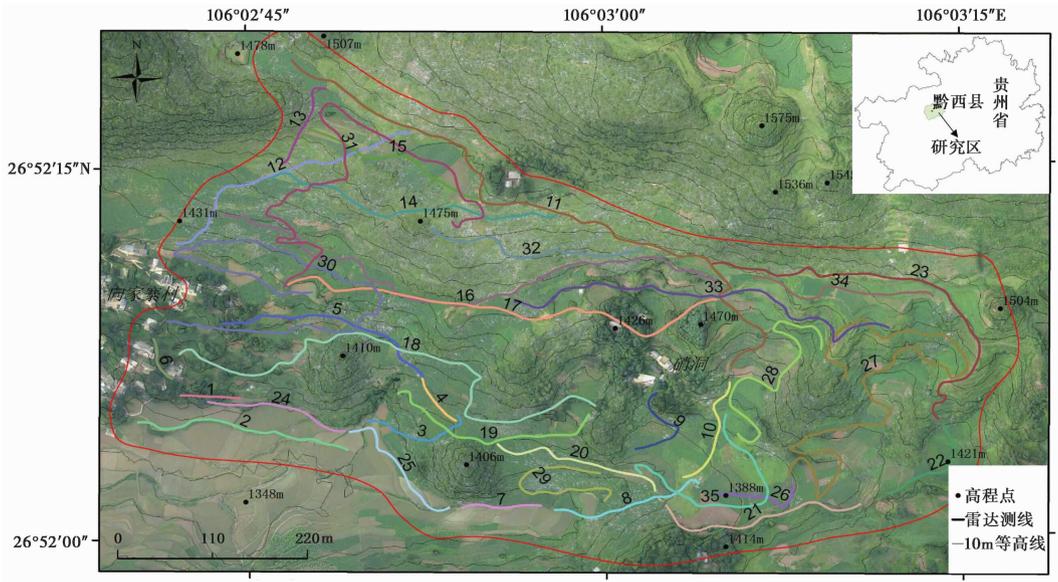


图 2 研究区及雷达探测线空间分布图

Fig. 2 The research area and GPR (Ground Penetrating Radar) profiles

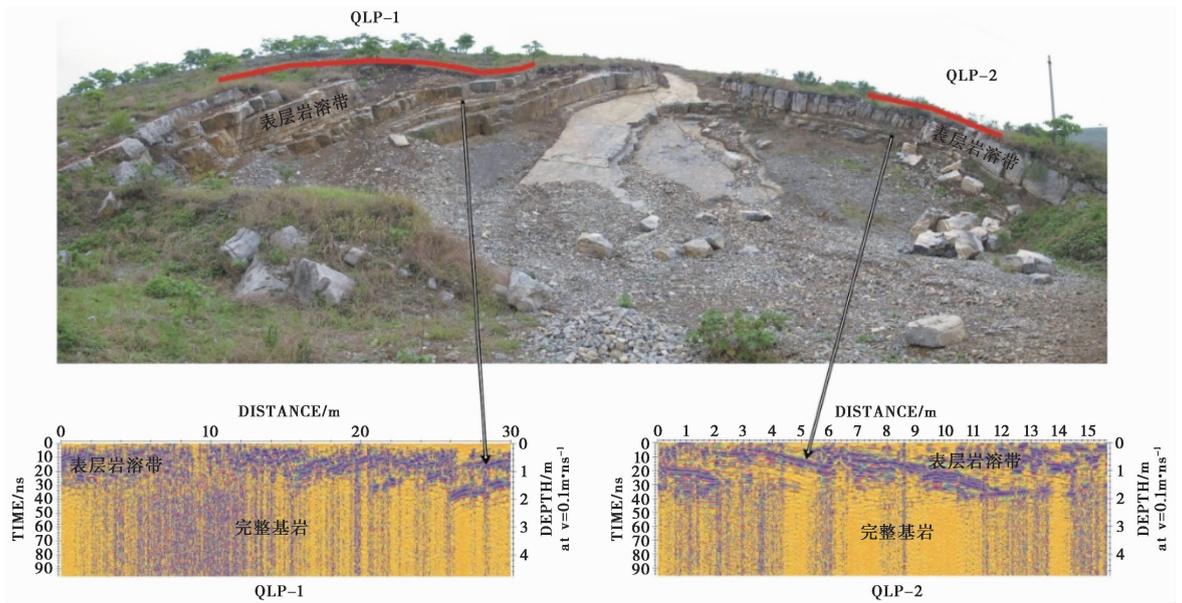


图 3 典型雷达测线解译

Fig. 3 Typical GPR results of epikarst development

### 3 结果与分析

#### 3.1 喀斯特坡地表层岩溶带发育深度空间分布

通过 REFLEXW 软件滤波处理,对研究区野外实测获取的坡地表层岩溶带 35 条测线 799 个测点提取出表层岩溶带发育的厚度统计结果如表 1 所示。研究区域表层岩溶带厚度发育的最大值、最小值和平均值分别为 18.8m、1.3m 和 5.8m,喀斯特坡地表层岩溶带发育体现出高度的异质性,发育厚

度变化差异显著,在溶洞附近、裂隙较为发育的区域表层岩溶带发育可达到 15m 以上,但测区表层岩溶带发育厚度主要集中于 2~8m 之间。利用 ArcGIS 的地统分析选择 Universal Kriging 空间插值,同时先择 K-Bessel 半方差拟合模型,计算得到研究区内表层岩溶带空间插值结果如图 4 所示。

从表层岩溶带发育的山体部位来看,由山体中上部到坡麓地带,表层岩溶带厚度发育并未随高程的变化呈现出明显的规律性变化,表层岩溶带发育较厚区域与岩石裸露较多的石漠化区域重叠度高

表 1 表层岩溶带厚度 (m) 统计表

Table 1 The statistic thickness (m) of epikarst zone

测线编号	最小值	最大值	平均值	样点个数 / 个	地面物质组成分类
1	2.8	5.8	4.2	5	土质测线
2	2.8	10.5	5.0	27	土质测线
3	2.1	11.2	5.1	14	土-石混合测线
4	2.7	10.3	4.8	8	土-石混合测线
5	1.6	12.3	4.6	24	土-石混合测线
6	2.9	6.3	4.5	4	土质测线
7	2.9	7.3	4.1	7	土-石混合测线
8	2.5	11.5	6.1	14	土-石混合测线
9	3.0	6.6	4.7	10	土质测线
10	2.4	11.9	5.8	13	土-石混合测线
11	2.6	15.4	6.7	53	土-石混合测线
12	4.6	11.5	8.0	23	石质测线
13	2.5	10.7	7.8	10	土-石混合测线
14	3.8	13.4	8.4	25	石质测线
15	4.3	9.6	7.0	17	土-石混合测线
16	2.4	14.7	6.2	45	土-石混合测线
17	2.5	13.7	4.9	32	土-石混合测线
18	2.3	18.8	5.8	43	土-石混合测线
19	2.3	11.9	5.2	19	土-石混合测线
20	3.1	11.8	6.9	13	土-石混合测线
21	3.9	9.9	6.1	17	土-石混合测线
22	2.1	6.1	3.8	10	土质测线
23	3.8	12.8	6.5	36	土-石混合测线
24	4.1	11.0	7.4	10	土质测线
25	4.0	8.8	5.8	15	土质测线
26	3.5	9.9	7.1	9	土质测线
27	2.5	10.8	5.8	53	土质测线
28	2.1	14.5	4.7	26	土-石混合测线
29	2.2	10.5	6.6	17	石质测线
30	2.7	11.9	6.3	53	土-石混合测线
31	1.3	14.7	6.3	51	土-石混合测线
32	5.1	17.0	9.6	20	石质测线
33	1.6	12.8	4.1	35	土-石混合测线
34	1.7	5.8	3.2	16	土质测线
35	2.2	8.9	4.2	25	土质测线

(图 4)。但如图 5 所示, 基于空间插值结果, 从坡地到坝地切 5 条剖面线(见图 4), 位于坡地的表层岩溶带(1~4 号剖面线)发育厚度的异质性变化高于坝地(5 号剖面线)。这也反映了表层岩溶带溶蚀作用的异质性和不均一性方面坡地明显高于坝地。

### 3.2 表层岩溶带发育与地面物质组成的关系

#### 3.2.1 雷达测线变化特征

根据地面物质组成差异将 35 条测线划分为 3 个不同的类型分析(表 1): 1) 土质测线; 2) 土-石混合测线; 3) 石质测线。其中, 土质测线 11 条, 土-石混合测线 20 条, 岩石裸露率高的石质测线 4 条。由于以上 3 种类型测线表层岩溶带发育规律相

近, 本文不一一举例描述, 每类测线选取距离长、测点多, 能涵盖较多信息的测线举例说明如下。

土质测线: 共计测线 11 条, 表层岩溶带下界发育的平均深度为地表以下 5.1m, 但整体变化幅度小, 均一性好, 变异系数为 0.262, 见图 6 所示。

土-石混合测线: 共计测线 20 条, 表层岩溶带发育深度变化随地面物质组成变化而变化, 当地表以土质为主时, 表层岩溶带发育较浅, 转变为石质坡地后, 表层岩溶带发育加深。如 33 号测线(表 2 和图 7), 在地表岩石裸露高的 0~50m 处, 表层岩溶带发育的平均厚度为 7.9m, 在土质为主的区域 50~350m, 表层岩溶带的平均厚度仅为 3.5m; 又如 31 号测线(表 3 和图 8), 在地表裸露高的 70~270m 与 460~510m 处, 表层岩溶带发育的平均厚度分别为 9.8m 与 5.6m, 在纯土的 0~70m 与 270~460m 处, 表层岩溶带的平均厚度为 3.5m 与 3.4m; 再如测线 11(表 4 和图 9), 在 0~110m 地表土质为主时, 表层岩溶带发育平均厚度为 3.8m, 110m 后基岩大面积裸露表层岩溶带发育厚度加深。因此, 土-石混合测线在地表物质组成发生变化时, 表层岩溶带亦发生变化。

石质测线: 岩石裸露率高的石质测线有 4 条, 表层岩溶带发育的平均厚度为 8.1m, 整体发育厚度高于土质测线, 其最大值可达 17.0m, 但是变异系数变化不大(图 10)。

#### 3.2.2 地面物质组成与表层岩溶带厚度变化关系

根据 35 条测线 799 个 GPS 测点的表层岩溶带发育厚度和位于测点 10m×10m 网格地面物质组成(岩土比例)调查结果的对比分析发现(图 11), 表层岩溶带厚度的变化与所在测点周边岩石裸露率呈显著正相关关系( $p=0.004$ )。反映了基岩大面积裸露区域表层岩溶带发育出现厚度加深的现象, 与常规认识相悖。一般而言, 土下溶蚀速率要高于裸岩, 即土下岩溶发育要快于裸岩区, 土多的喀斯特流域由于根系和微生物作用溶蚀速率高于土少喀斯特地区溶蚀速率<sup>[17]</sup>。但笔者认为, 土下高溶蚀速率和溶蚀作用, 是当前土壤景观格局下存在的客观事实, 而表层岩溶带的形成, 是水岩反应长期作用的结果。当下土壤景观造成的土多溶蚀作用强并非代表土下地质历史时期已溶蚀发育的表层岩溶带, 现在的表层岩溶带的结构和上覆土壤景观产生的溶蚀速率并无直接关系, 随着地质时间尺度溶蚀作用加强, 表层岩溶带发育, 水土持续漏失, 基岩逐步暴露, 因此, 笔者认为当下表层岩溶带的发育特征

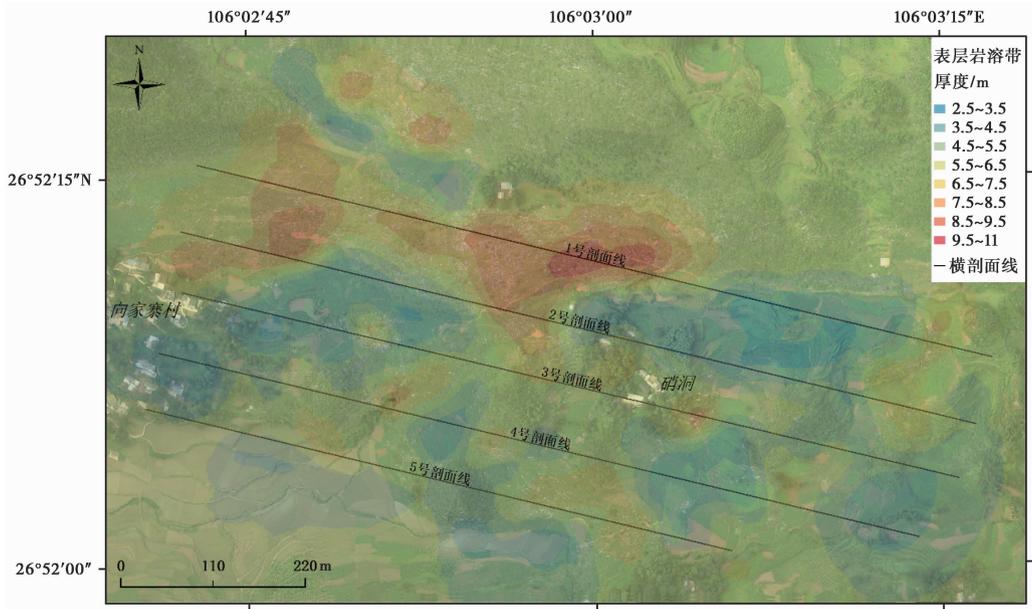


图 4 表层岩溶带厚度发育空间插值图

Fig. 4 The thickness of epikarst zone space interpolation figure

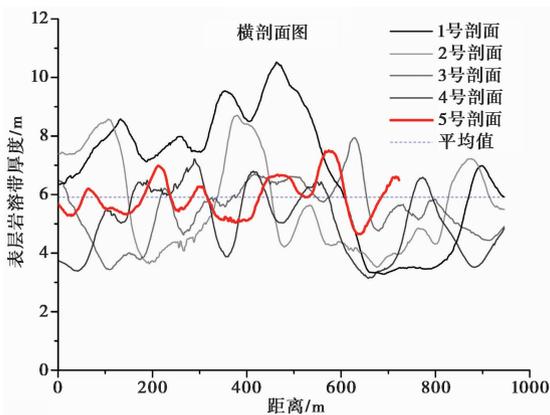


图 5 坡地和坝地表层岩溶带发育异质性变化

Fig. 5 The variation thickness of epikarst zone from slope to paddy field

是水土物质地质历史时期发生漏失的产生的结果。

### 3.3 表层岩溶带的发育与喀斯特坡地石质化

喀斯特表层岩溶带的发育形成本质上是水中 CO<sub>2</sub> 与可溶性碳酸盐岩长期水岩反应的结果，总体上受到气候条件、构造特点、汇水地形、岩石性质等方面影响，生物作用成因所增加的土壤 CO<sub>2</sub> 也会在表层岩溶带形成后通过溶蚀作用促使进一步发育，其形成过程是多种因素综合作用的结果<sup>[5]</sup>。

喀斯特坡地石漠化，是青藏高原隆升在其东南翼所诱发的重要地质生态灾害问题，是自然过程和人类活动共同密切作用的结果<sup>[18]</sup>：表象上是土壤受到侵蚀作用损失殆尽、岩石裸露地表比例增加、

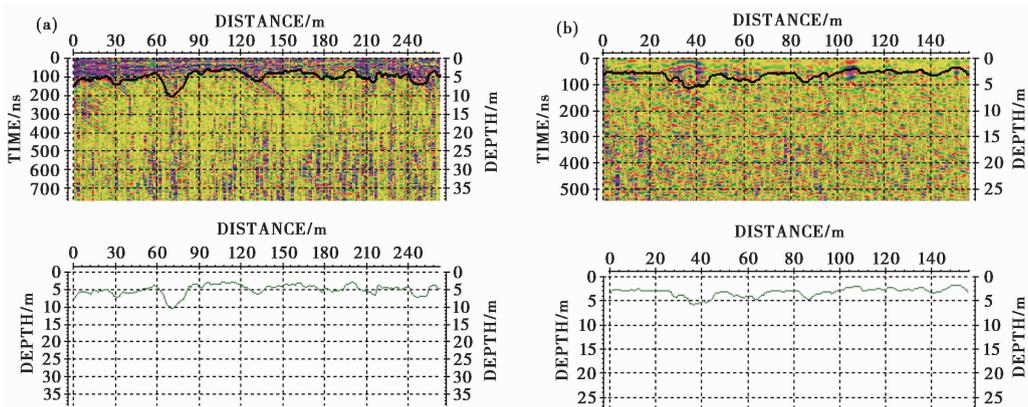


图 6 2号 (a) 和 34号 (b) 土质测线雷达解译图像

Fig. 6 The result of section No. 2 (a) and No. 34 (b) for GPR

表 2 测线 33 表层岩溶带厚度统计表

Table 2 The statistic table of No. 33 epikarst thickness

测线分段 /m	平均值 /m	最大值 /m	最小值 /m	变异系数 /%	地面物质	岩石裸露率
0~50	7.9	12.8	4.7	0.215	岩石	30%~40%
50~350	3.5	8.8	1.6	0.326	土	<5%

表 3 测线 31 表层岩溶带厚度统计表

Table 3 The statistic table of No. 31 epikarst thickness

测线分段 /m	平均值 /m	最大值 /m	最小值 /m	变异系数 /%	地面物质	岩石裸露率
0~70	3.5	9.4	2.3	0.367	土	<5%
70~270	9.8	14.7	3.0	0.256	岩石	40%~50%
270~460	3.4	7.1	1.3	0.357	土	<5%
460~510	5.6	11.6	1.8	0.532	岩石	30%~50%

土地退化、形成类似荒漠化的景观,但本质上是地质背景控制影响下,在地质时间尺度内不可逆的土地石质化演化过程,不合理的人为活动加剧了地表土壤流失和土地退化过程,其根本原因是地质历史时期延续至今的持续溶蚀作用造成的表层岩溶带发育带来的水土漏失的结果。

喀斯特坡地由于溶蚀作用地表以下的表层岩溶带形成类似布满筛孔的“筛子”<sup>[19]</sup>,溶孔、裂隙发育,正是这些“筛孔”,导致坡地入渗速率高<sup>[20,21]</sup>,水

表 4 测线 11 表层岩溶带厚度统计表

Table 4 The statistic table of No. 11 epikarst thickness

测线分段 /m	平均值 /m	最大值 /m	最小值 /m	变异系数 /%	地面物质	岩石裸露率
0~110	3.8	4.4	2.5	0.267	土	<5%
110~530	9.8	15.9	4.0	0.356	岩石	30%~60%

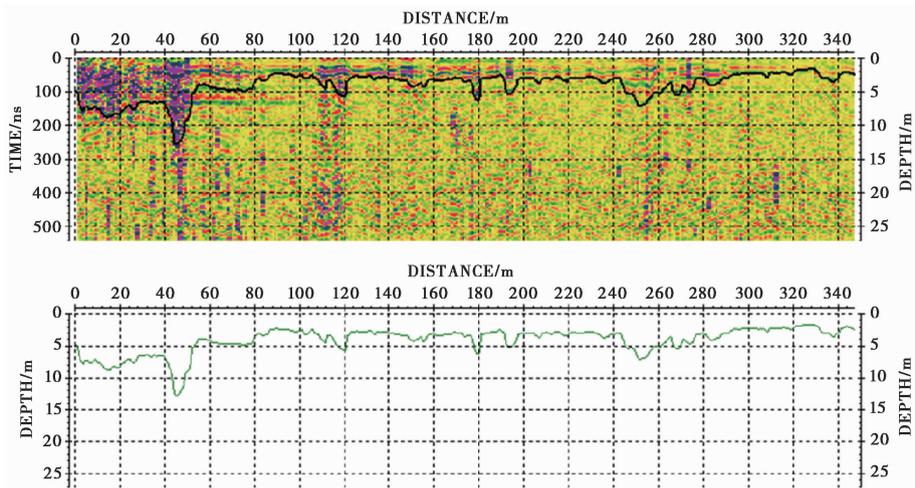


图 7 33 号土-石混合测线雷达解译图像

Fig. 7 The GPR results of section No. 33

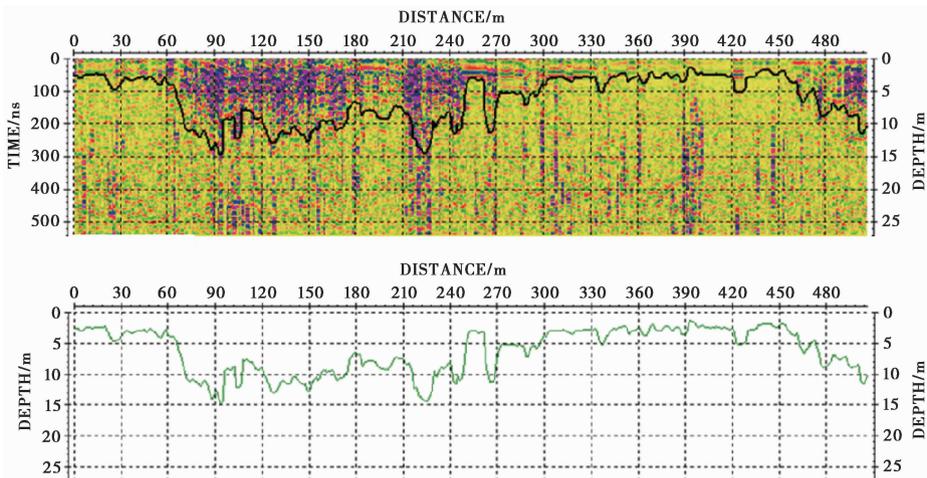


图 8 31 号土-石混合测线雷达解译图像

Fig. 8 The GPR results of section No. 31

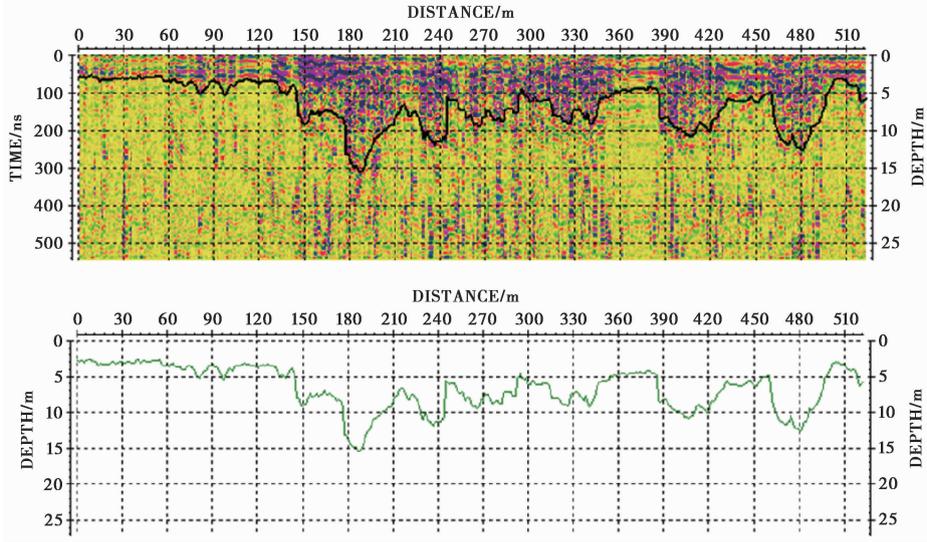


图9 11号土-石混合测线雷达解译图像  
Fig. 9 The GPR results of section No. 11

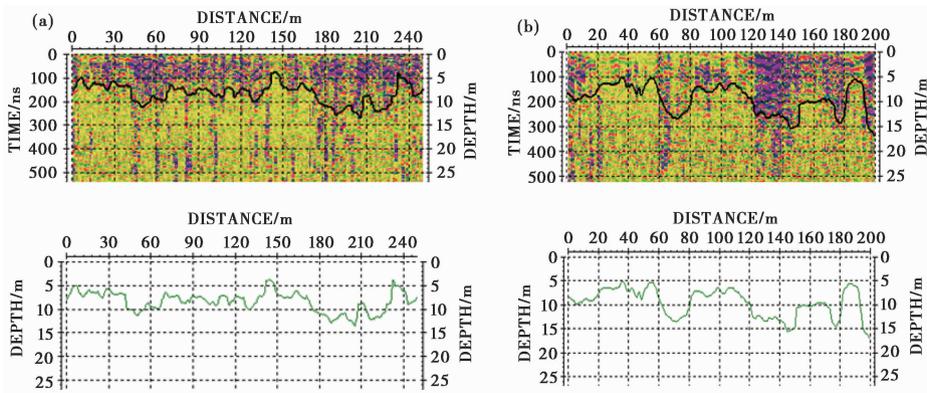


图10 14号(a)和32号(b)石质测线雷达解译图像  
Fig. 10 The GPR results of section No. 14(a) and No. 32(b)

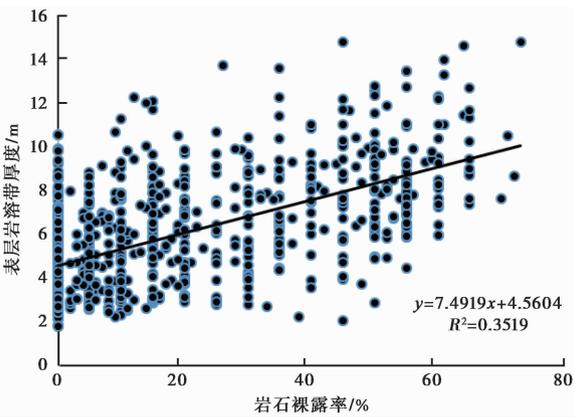


图11 岩石裸露率与表层岩溶带厚度变化关系  
Fig. 11 The relationship between rock coverage and epikarst thickness

反应,扩大原有溶隙,增强、增厚表层岩溶带的发育。此次研究大量的雷达解译结果指示了表层岩溶带厚度发育与地表土地质化密切相关,表层岩溶带的发育可为水土进一步向下漏失提供了空间基础,水土进一步向下漏失也进一步加剧了岩土界面的水岩反应过程。因此,随着此过程在地质历史时间尺度的反复加剧,坡地局部土体下沉,地表岩石进一步裸露,类似石林的坡地石质化景观出现。

#### 4 结论

本文利用探地雷达技术探测喀斯特高原坡地表层岩溶带发育厚度并讨论分析其空间分布特征得到以下结论:

- (1)喀斯特峰丛地貌区坡地表层岩溶带发育较好,平均发育厚度2~8m,最深可达18.8m。
- (2)表层岩溶带空间分布异质性强,坡地表层

土物质基本不从坡地地表发生迁移<sup>[22,23]</sup>,而是优先沿着表层岩溶带中已形成的溶孔、裂隙向地下蠕滑迁移,并在迁移过程中沿岩土界面进一步加强水岩

岩溶带厚度发育异质性变化强于坝地。

(3) 地面物质组成和表层岩溶带发育厚度关系密切, 坡地石质化比例提高, 表层岩溶带发育较厚, 地面物质组成可作为反映表层岩溶带发育程度的代用性综合指标。

(4) 喀斯特坡地土地石质化是表层岩溶带地质历史时期不断溶蚀发育演化、土壤在地质历史时期持续漏失的结果。表层岩溶带的发育为水土漏失提供了空间基础, 水土持续漏失也进一步加剧了岩土界面的水岩反应过程, 促进了表层岩溶带的进一步发育, 导致土体下沉, 土地石质化。

**致谢** 感谢贵州省水土保持技术咨询研究中心和黔西县水保办张毅等同志以及中国科学院地球化学研究所洪冰课题组提供的野外工作大力协助, 感谢中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员野外考察给予的指导帮助以及审稿专家提出的宝贵修改意见。

## 参考文献 (References)

- National Research Council (NRC). Basic Research Opportunities in Earth Science. Washington, DC: National Academies Press, 2001. Chapter 2: 35~36
- Banwart S A, Chorover J, Gaillardet J *et al.* Sustaining Earth's Critical Zone Basic Science and Interdisciplinary Solutions for Global Challenges. Sheffield: University of Sheffield, 2013. Chapter 1: 2
- 袁道先. 现代岩溶学 and 全球变化研究. 地学前缘, 1997, 4 (Z1): 21~29  
Yuan Daoxian. Modern karstology and global change study. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4 (Z1): 21~29
- Williams P W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1985, 29 (4): 463~482
- Williams P W. The epikarst: Evolution of understanding. *Karst Waters Institute Special Publication*, 2004, 9: 8~15
- Mangin A. Contribution a l'etude hydrodynamique des aquifers karstiques. *Annales de Speleologi*, 1974, 29(1): 283~332
- 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应. 科学通报, 2011, 56(26): 2174~2180  
Zhang Cheng. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56 (26): 2174~2180
- 莫雪, 蒲俊兵, 袁道先等. 亚热带典型岩溶区地表溪流溶解无机碳昼夜变化特征及其影响因素. 第四纪研究, 2014, 34 (4): 873~880  
Mo Xue, Pu Junbing, Yuan Daoxian *et al.* Diel variation and influence factors of dissolved inorganic carbon in a surface creek fed by a karst suberranen stream in subtropical area, SW China. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 873~880
- 曹建华, 袁道先, 章程等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 地球与环境, 2004, 32(1): 1~8  
Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Zhang Cheng *et al.* Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1~8
- 袁道先. 论岩溶环境系统. 中国岩溶, 1988, 7(3): 9~16  
Yuan Daoxian. On the karst environment system. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(3): 9~16
- 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理. 热带地质, 1998, 18(4): 322~326  
Jiang Zhongcheng. Features of epikarst zone in South China and formation mechanism. *Tropical Geography*, 1998, 18(4): 322~326
- 张信宝, 刘再华, 王世杰等. 锥峰和塔峰溶丘地貌的表层喀斯特带径流溶蚀形成机制. 山地学报, 2011, 29(5): 529~533  
Zhang Xinbao, Liu Zaihua, Wang Shijie *et al.* Dynamic mechanism of runoff corrosion in the epikarst zone on the formation of cone and tower karst landforms. *Mountain Research*, 2011, 29(5): 529~533
- 蒋忠诚, 袁道先. 中国南方表层岩溶带的结构、岩溶动力学特征及其意义. 地球学报, 1999, 20(3): 302~308  
Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources. *Acta Geoscientica Sinica*, 1999, 20(3): 302~308
- 李玲珑, 刘再华. 不同植被条件下岩溶地下水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的差异研究——以贵州夜郎洞、天钟洞和普定岩溶水碳通量模拟试验场为例. 第四纪研究, 2015, 35(4): 913~921  
Li Linglong, Liu Zaihua. Study on the difference in  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  of karst groundwater under different conditions of vegetation——Examples from Yelang Cave, Tianzhong Cave and Puding Simulation Test Site. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(4): 913~921
- 章程, Mahippong Worakul, 汪进良等. 泰国热带典型岩溶峰丛谷地区不同土地利用土下的溶蚀速率. 第四纪研究, 2016, 36 (6): 1393~1402  
Zhang Cheng, Mahippong Worakul, Wang Jinliang *et al.* Dissolution rates in soil of different landuses of typical tropical karst peak depression valley in Thailand. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(6): 1393~1402
- 张志才, 陈喜, 刘金涛等. 喀斯特山体地形对表层岩溶带发育的影响——以陈旗小流域为例. 地球与环境, 2012, 40(2): 137~143  
Zhang Zhicai, Chen Xi, Liu Jintao *et al.* Influence of topography on epikarst in karst mountain areas——A case study of Chenqi catchment. *Earth and Environment*, 2012, 40(2): 137~143
- Zhao Min, Zeng Cheng, Liu Zaihua *et al.* Effect of different land use/land cover on karst hydrogeochemistry: A paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China. *Journal of Hydrology*, 2010, 388 (1): 121~130
- 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657~666  
Wang Shijie, Li Yangbing, Li Ruiling. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657~666

- 19 张信宝, 王世杰, 贺秀斌等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. *地球与环境*, 2007, **35**(3): 202~206  
Zhang Xinbao, Wang Shijie, He Xiubin *et al.* Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes. *Earth and Environment*, 2007, **35**(3): 202~206
- 20 孟凡德, 彭 韬, 王世杰等. 石灰岩与白云岩坡地土壤饱和导水率对比研究. *水土保持通报*, 2015, **35**(1): 85~89  
Meng Fande, Peng Tao, Wang Shijie *et al.* Comparative study on saturated hydraulic conductivity of limestone and dolomite slope. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(1): 85~89
- 21 方 胜, 彭 韬, 王世杰等. 喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究. *地球与环境*, 2014, **42**(1): 1~10  
Fang Sheng, Peng Tao, Wang Shijie *et al.* Spatial variation of soil steady-state infiltration rates in karst hillslopes. *Earth and Environment*, 2014, **42**(1): 1~10
- 22 彭 韬, 王世杰, 张信宝等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报. *地球与环境*, 2008, **36**(2): 125~129  
Peng Tao, Wang Shijie, Zhang Xinbao *et al.* Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes. *Earth and Environment*, 2008, **36**(2): 125~129
- 23 彭 韬, 杨 涛, 王世杰等. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报. *地球与环境*, 2009, **37**(2): 126~130  
Peng Tao, Yang Tao, Wang Shijie *et al.* Monitoring results of soil loss in karst slopes. *Earth and Environment*, 2009, **37**(2): 126~130

## STUDY ON SPATIAL DISTRIBUTION OF EPIKARST ZONE ON PLATEAU KARST SLOPE BASED ON GROUND-PENETRATING RADAR

Peng Tao<sup>①②</sup> Zhou Changsheng<sup>①②③</sup> Ning Maoqi<sup>④</sup> Fu Lei<sup>④</sup> Dai Deqiu<sup>③</sup> Wang Shijie<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; <sup>②</sup>Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100; <sup>③</sup>School of Resource Environment and Safety Engineering, Huan University of Science and Technology, Xiangtan 411100; <sup>④</sup>Guizhou Water and Soil Conservation Technology Research Center, Guiyang 550021)

### Abstract

Epikarst, as a mark layer of geotechnical structure of karst critical zone different from other critical zones, plays an important role in water and nutrient infiltration, reserves, retention and also vegetation water nutrient utilization. Epikarst is the most critical zone of the biogeochemical process in rock-soil-vegetation system. Describing and understanding epikarst zone have very important theoretical and practical significance on the researches of the karst critical zone structure information, water and soil cycling and surface and groundwater resources utilization. Using the ground-penetrating radar (GPR) technology detect the thickness of epikarst zone on karst slope at karst plateau Houchang Village, Qianxi County, Guizhou Province. 35 GPR profiles within three types (main soil, soil mix rock and main rock) of different Ground material composition (Bedrock exposure proportion) and 799 GPS points were analyzed, and the results show that: the epikarst developed very well in the karst plateau peak cluster depression area, the average thickness below ground is about 2~8 meters, and the deepest can reach 18.8 meters. The spatial distribution of epikarst has high heterogeneity, and the variation of epikarst heterogeneity decreased from top to the toe of mountain. Ground material composition (bedrock exposure proportion) has close relation to the thickness of epikarst development. With sloping bedrock explosion proportion increasing, the epikarst thickness also increased. That means the ground material composition can be used as the a comprehensive index which can reflecting the epikarst development degree on karst slope area. In addition, this study also indicates that the strong relationship between epikarst development and karst rocky desertification. As the epikarst zone development on slope, epikarst zone can provide more space for soil and water leakage; on the other hand, the soil and water easily leak through fissure and grikes to the underground can enhance the bedrock dissolution and enlarge the epikarst. As this progress cycling at geological time, more bedrock expose to the slope surface and the rocky lithology landscape appeared.

**Key words** karst, rocky desertification, epikarst, critical zone, Ground-penetrating Radar