

DOI: 10.11766/trxb202108290461

张君, 陈洪松, 付智勇, 聂云鹏, 连晋姣, 覃常, 文振兴. 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 Jun, CHEN Hongsong, FU Zhiyong, NIE Yunpeng, LIAN Jinjiao, WEN Zhenxing. 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.

西南喀斯特小流域关键带含水介质分布特征^{*}

张君^{1, 2, 3}, 陈洪松^{1, 2†}, 付智勇^{1, 2}, 聂云鹏^{1, 2}, 连晋姣^{1, 2}, 覃常⁴,
文振兴⁴

(1. 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; 2. 广西重点实验室, 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 广西水文地质工程地质勘察院, 广西柳州 545006)

摘要: 地球关键带 (Earth's Critical Zone) 含水层结构的评估和量化对水文水循环和水资源管理有重要意义。然而, 表征小流域尺度复杂关键带含水层结构仍存在巨大挑战。以桂西北喀斯特白云岩峰丛-洼地小流域 (1.20 km^2) 为研究对象, 共设置 21 条、总长度为 12605 m 的高密度电法测线, 并结合水文地质钻井, 解析小流域尺度含水介质的分布特征及其影响因素。结果发现, 构造运动和动力变质作用导致小流域发育多条断层带, 为岩溶含水介质 (包括土壤、表层岩溶带和表层岩溶泉) 的空间分布提供了物质和动力基础。断层带集中发育在洼地, 具备良好的水动力和溶蚀环境, 导致洼地土壤和表层岩溶带厚度高于坡地且与海拔呈显著 ($P < 0.05$) 负线性相关关系。同时, 土壤和表层岩溶带厚度空间耦合度高, 呈显著正线性关系 ($R^2 = 0.63$, $P < 0.01$), 与坡面侵蚀和汇流以及土壤-表层岩溶带系统特殊的水-CO₂-岩石作用有关。岩溶泉出流于洼地或坡脚, 其水文特征与土壤-表层岩溶带系统的分布及储水特性有关。该研究可为流域尺度岩溶含水层的表征及未来陆面模型的构建提供数据与技术支撑。

关键词: 地质钻井; 高密度电法; 构造运动; 地层岩性; 峰丛-洼地

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

Investigation on the Aquifer Structure of Small Watershed Critical Zone on Karst Dolomite in Southwest China

ZHANG Jun^{1,2,3}, CHEN Hongsong^{1,2†}, FU Zhiyong^{1,2}, NIE Yunpeng^{1,2}, LIAN Jinjiao^{1,2}, QIN Chang⁴, WEN Zhenxing⁴

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Guangxi Key laboratory of Karst Ecological Processes and Services, Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Science, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Guangxi Hydrogeology and Engineering Geology Team, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

* 国家自然科学基金项目(41930866)和广西自然科学基金创新研究团队项目(2018GXNSFGA281003)共同资助。Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41930866) and Guangxi Natural Science Foundation (No. 2018GXNSFGA281003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hbchs@isa.ac.cn

作者简介: 张君(1990—), 男, 湖北恩施人, 博士研究生, 主要从事生态水文方面研究工作。E-mail: zhangjun@mails.ccnu.edu.cn

收稿日期: 2021-08-29; 收到修改稿日期: 2022-02-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-04-17

Abstract: The evaluation and quantification of aquifer structure in the Earth Critical Zones (CZ) are of great significance to the hydrological cycle and water resources management. 【Objective】However, the characterization of complex CZ structures at spatial scales remains a huge challenge. In this paper, research was conducted on a small karst dolomite watershed (1.20 km^2) in northwest Guangxi province, China, to quantify the distribution characteristics of aquifer media in CZ and analyze its influencing factors. 【Method】A total of 21 electrical resistivity tomography survey lines with a total length of 12,605 meters were set up and combined with hydrological drilling at the watershed scale. 【Result】The results show that tectonic movement and dynamic metamorphism resulted in the development of multiple fault zones in the small watershed. This provided the material and dynamic basis for the spatial distribution of karst water-bearing media (including soil, surface karst zone, and surface karst spring). The fault zone was concentrated in the depression, which has a good hydrodynamic and dissolution environment. As a result, the soil and epikarst thickness in the depression was higher than that in hillslope, and there was a significant ($P < 0.05$) negative linear relationship with elevation. Besides, the spatial coupling degree of soil and epikarst thickness was high, showing a significant positive linear relationship ($R^2 = 0.63, P < 0.01$) between soil and epikarst thickness. It was related to slope erosion and confluence, and special water-CO₂-rock interaction in the soil-epikarst zone system. Karst aquifer flows out of the depression or down hillslope, and its hydrological characteristics were related to the distribution and water storage features of the soil-epikarst system. 【Conclusion】This study provides data and technical support for the characterization of the karst aquifer at the catchment scale and construction of the land surface model in future studies.

Key words: Geology drilling; Electrical resistivity tomography; Tectonic movement; Lithology; Peak cluster depression

地球关键带是研究地球表层系统自基岩不透水层向上至植被冠层顶部范围内各物质（例如水、气、能量等）流通和存储的多学科交叉的科学^[1]，强调地表-地下结构、过程和功能的有机统一，在全球尺度成为热点研究区域^[2-4]。以岩溶地貌为主的喀斯特关键带占全球陆地面积的7%~12%^[5]，发育的岩溶泉水为全球近1/4的人口提供稳定水源^[6]。岩溶含水层的复杂性和各异向性是喀斯特关键带区别于其他关键带的基本特征^[7]，如何刻画其结构特征仍然是当前难以解决的难题，极大地限制了生态水文循环和数值模拟研究的深化。

水文地质方法是传统评估含水层特征的主要手段，通过地质钻井并结合水力学试验可以量化点尺度上含水层结构及其水文特征^[8]。然而，这些方法耗时、费钱，且空间上具有不连续性。近年来，地球物理方法例如地质雷达（ground-penetrating radar, GPR）、高密度电法（electrical resistivity tomography, ERT）、电磁感应法（electromagnetic induction, EMI）的应用为时空尺度上含水层特征的刻画和数值模型的构建提供了新的技术途径^[9-18]。探地雷达具有较高的分辨率，但解译精度受天线频率及局部条件的影响^[9, 13]；电磁感应法可用于大范围的调查，但分辨率和探测深度有限，还容易受温度的影响^[9]。基于电阻率值的空间变化，高密度电法可以判断含水

介质（例如孔隙及裂隙等）的空间分布特征，同时解译分辨率较高，被广泛用于喀斯特关键带含水层结构的评估^[10-12, 15-18]。然而，以往的研究大多基于单个地貌单元（例如落水洞、洞穴或者大的管道裂隙等）^[19-21]，局限于点到坡面尺度^[12, 22]，而流域尺度的相关研究鲜有报道^[23]，数据代表性的不足限制了岩溶含水层非均质性的表征。

为回答以上不确定性，本文以西南喀斯特白云岩峰丛-洼地小流域为研究对象，开展以高密度电法为主、地质钻井为辅的地球物理勘探工作，以表征小流域尺度岩溶含水介质的分布特征，以期为流域尺度的模型构建和水文地质的深入研究提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

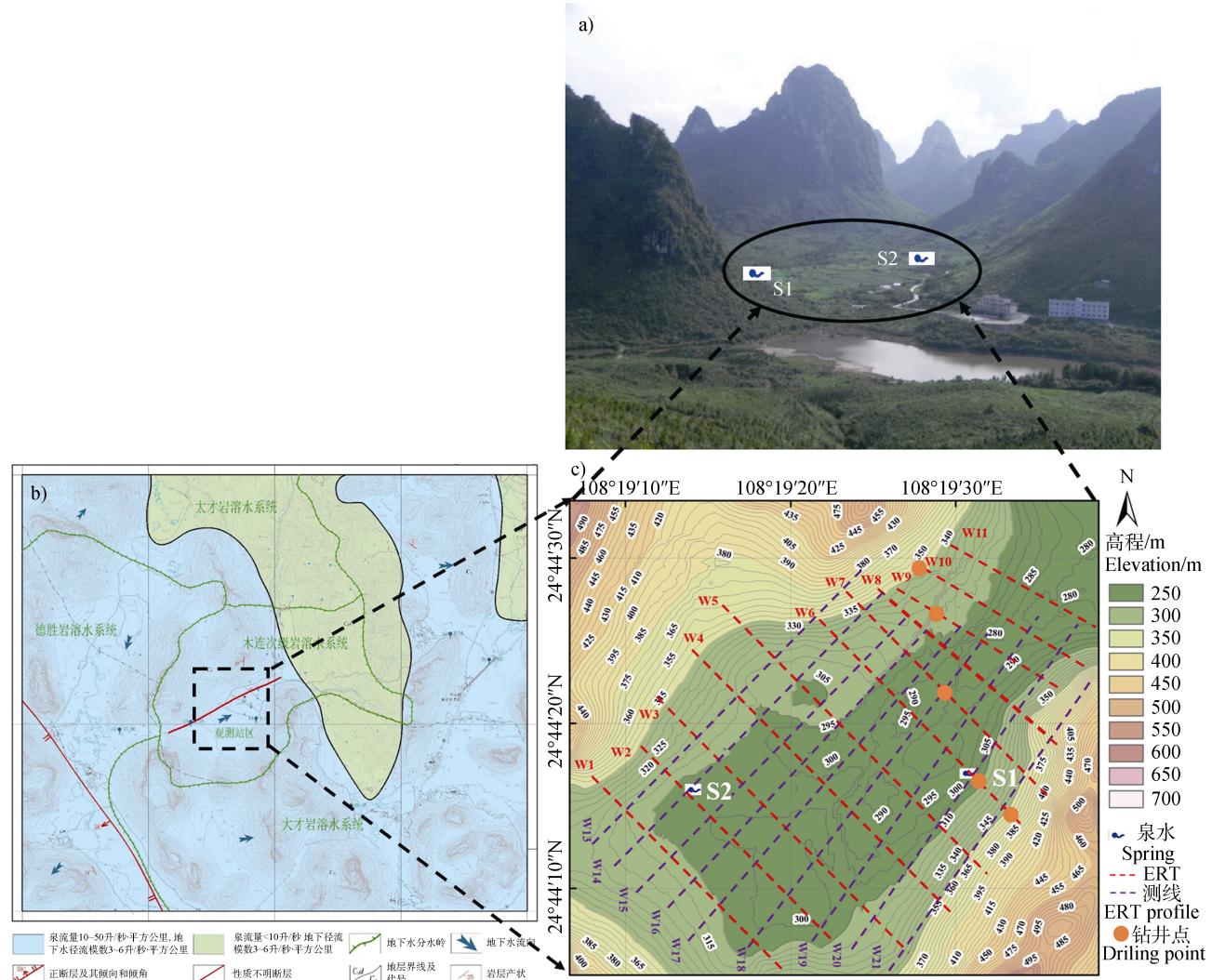
1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区西北环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站木连综合试验示范区（ $24^{\circ}43'58.9''$ — $24^{\circ}44'48.8''\text{N}$, $108^{\circ}18'56.9''$ — $108^{\circ}19'58.4''\text{E}$ ），属典型的喀斯特峰丛-洼地地貌，总面积约 146 hm^2 （图1）。洼地地形平坦，高程介于276~305 m，西、南、东部均为峰丛地貌（图1a），峰顶标高450~560 m，坡度介于 10° ~ 40° ，局

部为陡峭岩壁。研究区地处亚热带季风气候区, 多年平均气温19.6℃, 最高温出现在7—9月, 最低温出现在1—3月。年均降雨量1389 mm, 雨季(5—9月)平均降雨量为972 mm, 占全年降雨量的75%左右^[24]。1985年前, 小流域遭受严重的耕作、火烧、放牧、砍伐等。1985年之后, 坡地被保护起来并开展了“退耕还林”政策, 植被经自然恢复达30多年。主要乔木有菜豆树(*Radermachera sinica*)、紫弹树(*Celtis biondii*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、鹅掌柴(*Schefflera heptaphylla*)等, 灌木以黄荆(*Vitex negundo*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)为主, 草本以五节芒(*Misanthus floridulus*)、鬼针

(*Bidens pilosa*)及蕨(*Pteridium aquilinum*)为主。

研究区地下水埋深较浅, 一般在地下1 m至3 m之间且季节性波动小^[25]。地下水类型属碳酸盐岩溶洞裂隙水, 主要赋存于溶蚀裂隙及孔洞中。在洼地自然形成了一条从西南至东北走向的小溪, 贯穿整个小流域的洼地部分, 在小流域东北出口与一处碎屑岩形成的水库相连。此外, 洼地还形成了多处表层岩溶泉, 本研究主要涉及2处(图1中S1和S2), 其中S1为间歇泉, S2为常流泉。常流泉和溪水的流量在降雨过后出现明显的增加, 但无雨时变化不明显^[24]。间歇泉则只在较大的降雨后才会出流, 一般出现在雨季(5—9月)。



注: 地貌照片及S1和S2岩溶泉位置a), 水文地质图b), 地球物理勘探线c)。Note: The landform of the study area and the karst spring of S1 and S2 (a), hydrologic map (b), geophysical exploration profile line (c).

图1 木连流域地理和地质概况

Fig. 1 Geographical and geological description of Mulian watershed

1.2 地层及岩性

研究区地层岩性为石炭系中统(C_2)白云岩(表1);背斜核部地层岩性为石炭系下统东岗领组(C_1d)砂泥岩(水库);东翼为石炭系中统(C_2)白云岩。根据地面调查及地质钻井岩芯,研究区地层随深度自上而下可分为第四系种植土层(Q_4^{pd})、残坡积层(Q_4^{dl+el})和石炭系中统(C_2)白云岩以及断

层角砾岩(图2)。

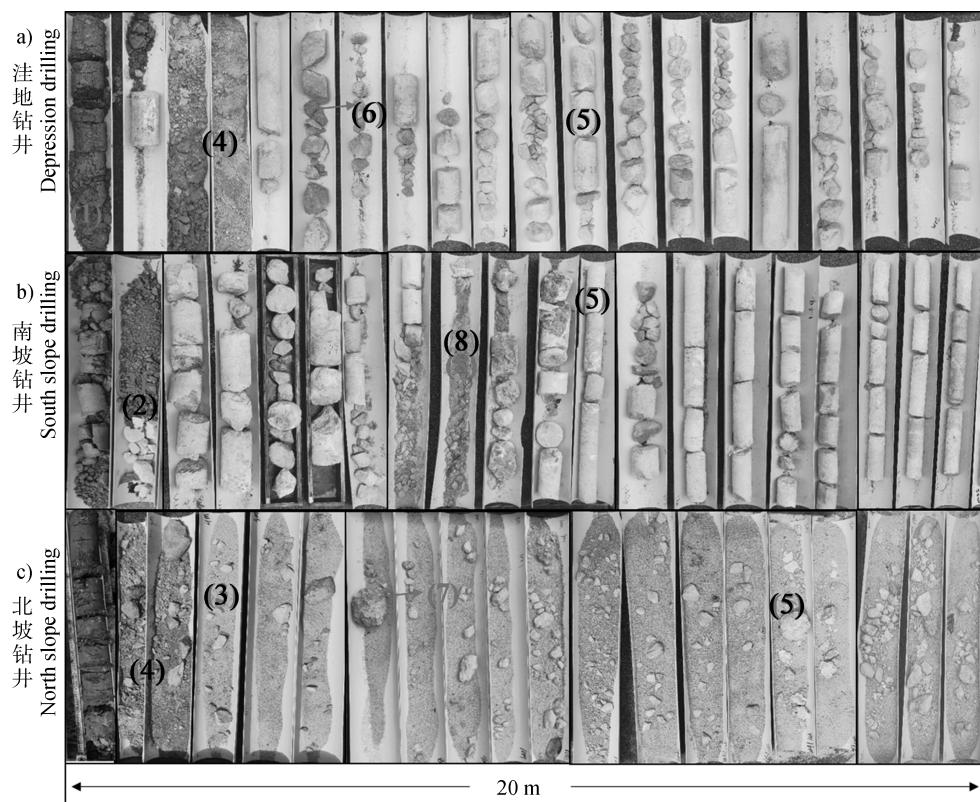
第四系土壤层(Q_4)分为种植土和硬塑状黏土。种植土呈褐色,结构松散,含植物根系和碎石,主要连续分布于坡脚及洼地。硬塑状黏土呈黄色,土质均匀,结构致密,局部含少量硅质小碎石及铁锰质结合物,主要分布于洼地,于坡地零星分布。

表1 不同位置岩石样品元素含量

Table 1 Element contents of bedrock at different positions/%

坡位 Slope position	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
洼地 Depression	0.48	0.32	0.06	31.15	21.54	<0.01	0.02	0.06	<0.01	<0.01
南坡 South slope	0.36	0.26	0.04	32.19	20.45	<0.01	0.03	0.03	<0.01	<0.01
北坡 North slope	0.67	0.16	0.09	30.91	21.54	0.01	0.03	0.02	<0.01	<0.01

注:样品均为埋藏型岩石,距离地表深度约为40 m。Note: The samples were buried rocks with a depth of about 40 m from the surface.



注:(1)褐色种植土;(2)黄色硬塑状黏土;(3)强风化白云岩;(4)强风化断层角砾岩;(5)中风化白云岩;(6)硅质岩;(7)溶孔断面;(8)溶蚀裂隙及其黄色泥质填充物。Note: (1) Brown planting soil, (2) Yellow hard plastic clay, (3) Strong weathered dolomite bedrock, (4) Strong weathered fault breccia, (5) Moderately weathered dolomite, (6) Silicalite bedrock, (7) Profile of dissolution pore, (8) Dissolution fissures and yellow argillaceous fillers.

图2 研究区洼地、南坡和北坡地质钻井剖面照片

Fig. 2 Geological drilling profile photos of depression, south hillslope, and north hillslope in the study area

断层角砾依风化强度分为2个亚层,即强风化断层角砾岩(第④₁₀₁层)和中风化断层角砾岩(第④₁₀₂层)。强风化断层角砾岩为浅灰白色或黄色,原岩结构已大部分破坏,取芯呈角砾夹土状。中风化断层角砾岩呈浅灰色,母岩为中风化白云岩,角砾呈棱角状,呈紧密镶嵌状。闭合节理裂隙发育,发育方解石晶洞及溶蚀小孔。

石炭系中统(C₂)白云岩依风化程度划分为2个亚层,分别为强风化白云岩和中风化白云岩。强风化白云岩(C₂,第③₁₀₂层)岩石结构大部分被破坏,风化裂隙发育且局部充填风化白云岩砂及少量泥质。洼地风化强度相对强烈,多呈角砾夹土状,与中风化岩体界限清晰;坡脚岩体多为风化裂隙切割成裂隙块状及碎裂镶嵌结构,多夹中风化碎块,与下部中风化岩体呈过渡关系。中风化白云岩(C₂,第③₁₀₃层)呈细晶结构,局部含硅质,岩质较硬,断口新鲜,滴稀盐酸无明显气泡。闭合~微张裂隙发育程度高,局部发育张开裂隙。该层于研究区连续分布,洼地及北坡中风化岩体质纯,贯穿性溶蚀小孔及微裂隙发育强度相对南坡强烈。南坡受断层构造显著影响,个别岩芯角砾化,岩石多含硅质,岩溶化程度差异大,一般呈突变型。

1.3 试验设计及方法

为探明小流域尺度不同含水介质包括土壤、表层岩溶带、断层带及表层岩溶泉的空间分布特征,于2019年5月11日—5月27日在研究区布设并完成电阻率探测线共21条(W1~W21),探测面积约1.12 km²,剖面总长12 605 m,总物理点2494个,具体测线布置见图1d,测线信息见表2。此外,为解析表层岩溶泉分布及形成特征,S1和S2共设计3条测线开展高密度电法工作(详见结果2.3部分),测线以泉水出水口为中心点向两侧各延伸150 m。基于电阻率法解译,发现研究区由一条自东北向西南走向的断层分隔成两个断面,故分别在北坡、南坡和洼地开展地质钻井及抽/注水相关工作,以辅助解译地球物理勘探结果,钻探时间自2019年7月3日—2019年12月11日。

(1) 地质钻井。如图1d,采用GY-100型钻机,于洼地、北坡及南坡开展地质钻孔工作。共计5个钻孔,钻井深度介于40~60 m,开孔直径110~150 mm,终孔直径为91~130 mm。对松散岩层采用翼

片合金钻头钻进,对软质或较坚硬岩层采用复合片钻头钻进,坚硬岩则采用金刚石钻头钻进。土层一般采用冲击钻或干钻回转钻进,松散风化层一般采用干钻回转钻进,基岩采用金刚石清水正循环回转钻进,破碎带及溶洞采用无泵干钻,并下入套管护臂。钻取岩芯采用PVC管封装,由于20 m深度以下岩体岩芯相对均匀,故结果部分仅展示0~20 m范围的岩芯以识别垂直剖面介质分布特征(见1.2部分)。

(2) 高密度电法及验证。第四系覆盖层与基岩之间、完整基岩与岩溶发育的溶洞、溶槽、裂隙等之间存在明显的物性差异(表3),为开展高密度电法提供了良好的地球物理前提^[12]。现场测量时将全部电极布置在5 m间隔的测点上,由主机自动控制供电电极和接收电极的变化,并完成测量^[26]。采用重庆奔腾数控技术研究所生产的WDJD-4型多功能数字直流激电仪和WGMD-4高密度测量系统,每个探测剖面电极数36~60个,最大AB/2为127.5 m。

表2 研究区高密度电法探测剖面统计

Table 2 Statistical of geophysical (high-density electrical resistivity) profile in the study area

编号 Number	纵向测线 Lengthways profile			纵向测线 Lengthways profile		
	长度 Length/m	物理点 Point number	编号 Number	长度 Length/m	物理点 Point number	
			W1	645	127	W13
W2	565	111	W14	595	117	
W3	595	117	W15	695	137	
W4	535	105	W16	595	117	
W5	540	106	W17	850	168	
W6	550	105	W18	895	177	
W7	550	108	W19	655	129	
W8	520	120	W20	850	168	
W9	445	87	W21	895	177	
W10	295	57	S1	300	60	
W11	445	87	S2-1	300	60	
W12	295	57	S2-2	300	60	

表3 研究区主要介质物性参数一览表^[27]

Table 3 List of physical parameters of main media in the study area

介质名称 Medium	电阻率 Resistivity $\rho / \Omega \cdot m$	相对介电常数 Relative dielectric constant ϵ_r	密度 Density $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	电磁波速度 Electromagnetic velocity $V / (m \cdot ns^{-1})$
空气 Air	—	1	—	0.3
水 Water	50~60	80	1	0.03
黏土 Clay	$10 \sim 6 \times 10^2$	$5 \sim 40$	$1.60 \sim 2.04$	0.06
白云岩 Dolomite	$50 \sim 6 \times 10^3$	6	$2.80 \sim 3.00$	0.12
砂岩 Sandstone	$10 \sim 3 \times 10^3$	$5 \sim 15$	$2.42 \sim 2.77$	0.09

将各剖面探测数据由仪器传输到计算机并完成数据格式转换，转换后运用 Res2dinv 软件进行地形校正、数据滤波、反演计算等一系列处理。反演计算过程中进行了坏点或畸变点删除、数据圆滑等一系列处理操作，以消除地形起伏造成的影响。随后结合钻探数据分析、拟合，并绘制物探剖面视电阻率等值线（图 3a）及断面反演图（图 3b），根据图中视电阻率分布形态，了解地下一定深度范围内横向和垂向电性的变化特征。同样在该小流域，前期本团队基于坡地尺度开展了土壤及表层岩溶带厚度

与地球物理勘探方法的校准工作，以地质钻井获取的土壤和表层岩溶带深度为实际值，与地球物理勘探获取的推断深度进行相互验证^[12]。结果表明，高密度电法对土壤和表层岩溶带厚度的解释率较高，推断深度与实际深度（地质钻井）吻合度高、平均绝对误差和均方根误差值小，为本研究土壤和表层岩溶带厚度空间分布提供了技术支撑^[12]。

经过数据处理和反演拟合计算后绘制视电阻率等值线图及反演图，在反演色谱上，横向坐标表示测线物探点号，垂直坐标表示深度，图中用颜色区

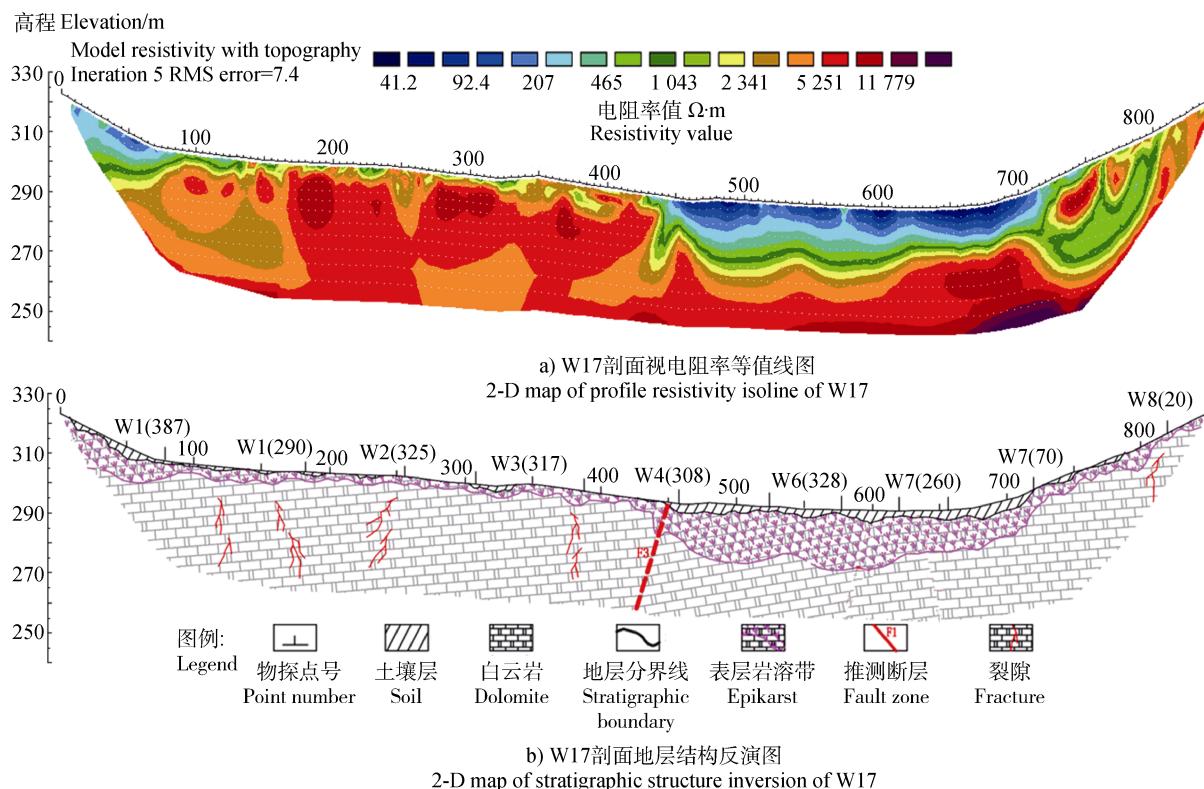


图3 电阻率等值线（a）及土壤和表层岩溶带剖面反演（b）—以 W17 线为例

Fig. 3 Inversion of resistivity isoline (a) and soil-epikarst system profile (b) — take W17 as an example

分电阻率值, 同一颜色的等电阻率条带的深度、位置及形状, 反映同一电性层的埋深和起伏形态, 在反演过程中对阻尼深度计层厚递增系数等进行调整, 使解释推断结果与实际情况相吻合。以 W17 探测线为例(图 3), 在视电阻率等值线断面图上, 由于风化残留、含水率及碎石含量不同, 土壤层电阻率低, 一般在 $30\sim600\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间, 而风化岩层的电阻率介于 $80\sim1\ 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 间, 起伏形态应根据实际地质情况综合推断、圈定。基岩视电阻率由上至下梯度递增, 岩溶发育段表现为视电阻率等值下凹, 有明显的深“V”型及“U”型低阻异常, 视电阻率等值线下部稀疏, 伴有闭合圈及等值线断开等现象, 这种高低电阻率明显反差易形成断层, 如 F3; 视电阻率等值线下凹、稀疏, 异常范围较窄, 则多为裂隙发育或浅部溶沟、溶槽发育。根据视电阻率图可提取测深曲线, 圈定断层界面和土壤/表层岩溶带发育深度(图 3b)。

2 结 果

2.1 断层带空间分布

如图 4, 基于小流域尺度高密度电法的判定结果, 绘制出主要的含水介质空间分布特征。整体而言, 小流域岩溶含水介质空间分布不均, 并发育多条断层带(F1~F6), 直接影响土壤、岩溶发育区及泉水的空间分布。F1 断层带自东北-西南贯穿整个研究区, 岩溶强发育区(图 4)沿 F1 断层两侧呈对称分布, 且两侧土壤厚度也较大。F3 和 F6 断层带在样地中北部呈东西向与 F1 断层带交汇于洼地中部, F2、F4 及 F5 断层带在 F3 和 F6 断层带之间。此外, F2~F6 断层带走向均由洼地或坡脚延伸至中、上坡位置, 且集中分布于南坡。

F1 断层带为东北-西南走向, 地表为第四系覆盖土壤, 高密度电法显示断层带低阻异常, 深度较大; F2 断层带东北走向, 分布于洼地中部, 地质钻

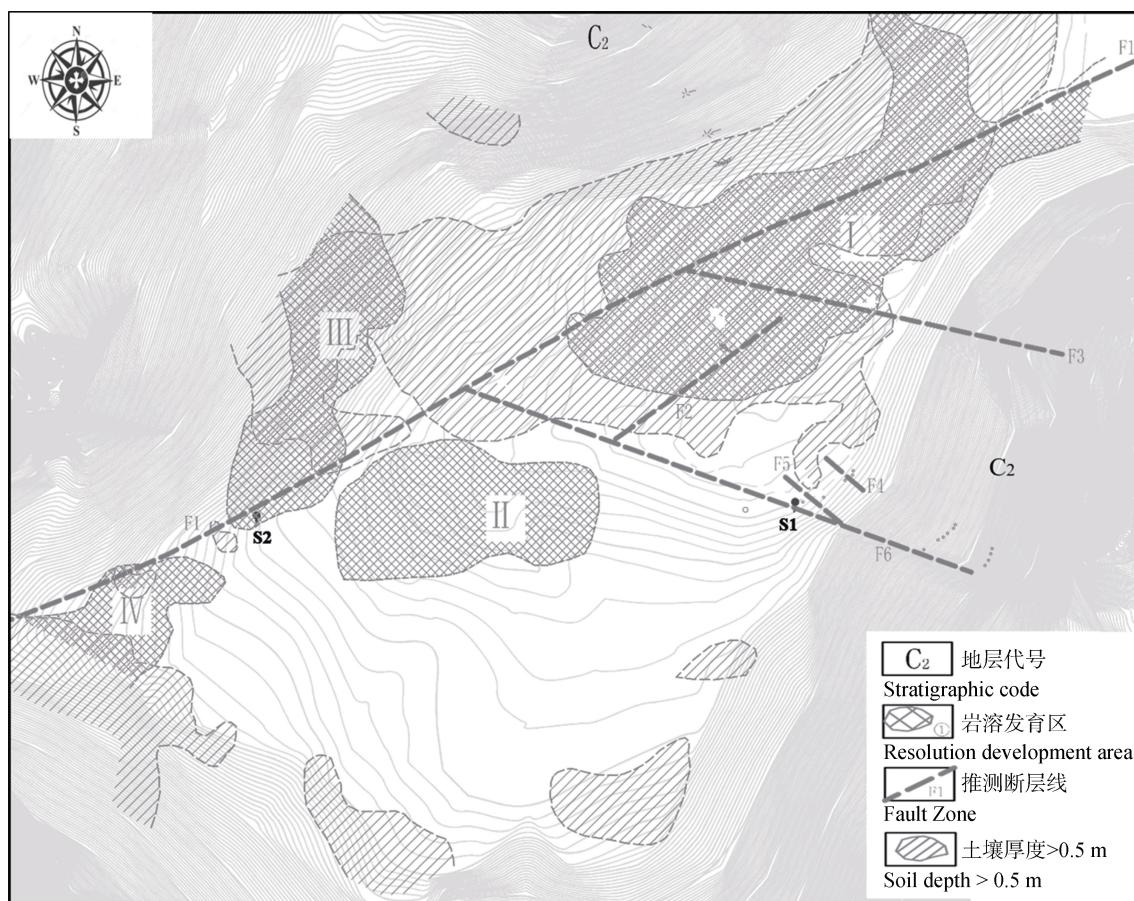


图 4 研究区土壤、主要岩溶发育区及断层分布

Fig. 4 Distribution of soil, main karst development features, and fault at the study area

井剖面发现属于高倾角断层；F3断层东西走向，高密度电法显示低阻异常，深度较大；F4断层东南走向，为高倾角不明性质断层，断层两侧岩性为白云岩；F5东南走向，断层东北侧岩性为白云岩，西南岩性个别岩芯角砾岩化，推测为东北倾向；F6断层东南走向，高密度电法显示低阻异常，深度较大，断层带发育S1岩溶泉（间歇泉）。

2.2 土壤和表层岩溶带空间分布

土壤层视电阻率值一般小于 $600\Omega\cdot m$ ，基于此反演流域尺度土壤厚度空间分布图（图5a）。高密度电法测线范围总面积约为 1.20 hm^2 ，总土壤体积

约为 $6.23\times 10^5\text{ m}^3$ 。土壤集中分布于洼地，约占总面积的21.3%，但土壤体积则占总体积的53.2%。其中洼地南部大部分基岩裸露，土壤厚度小于0.3m；西南、东南坡麓处土壤碎石含量高，厚度介于0.5~3.0m，平均土壤厚度约为1.0m；洼地北侧及中部地区土壤覆盖度高且厚度大，介于2~6m，平均土壤厚度高达3.0m。坡地面积占总面积的78.7%，土壤主要集中分布于西北方向的坡脚处，厚度介于0.5~3.0m，平均厚度约为1.0m；其余坡面基岩连续出露，土层以风化碎石夹黏土及溶蚀裂隙中的黏土为主，平均厚度约为0.2m。

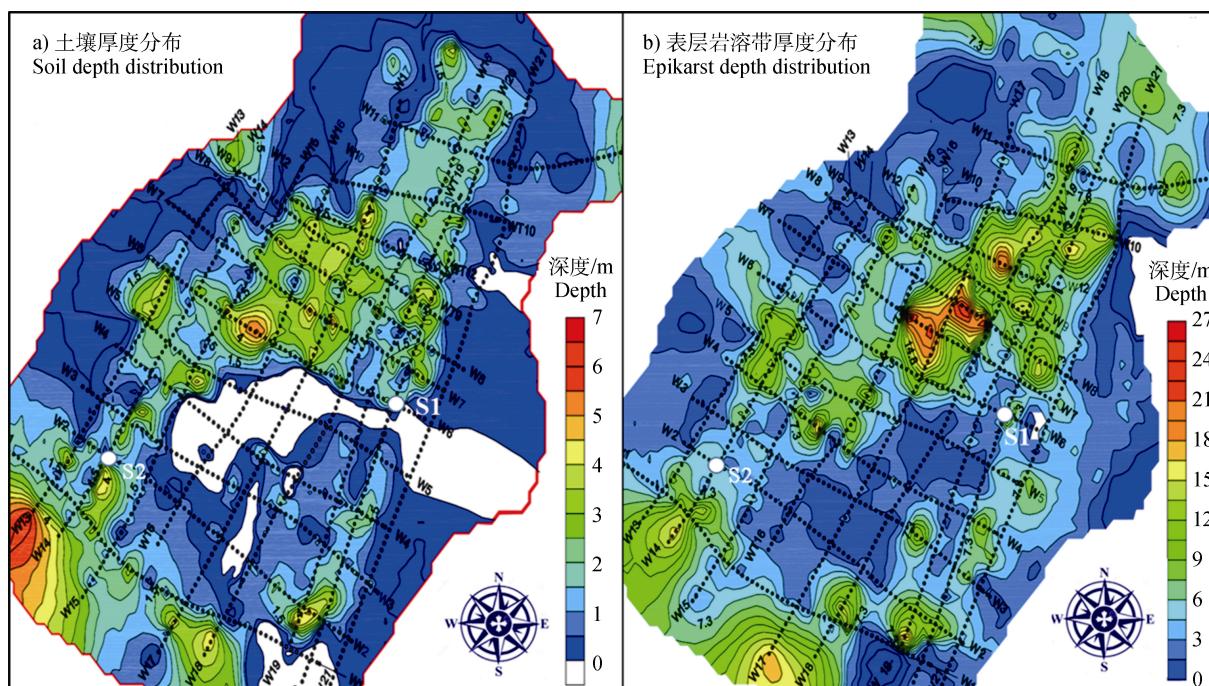


图5 研究区土壤(a)及表层岩溶带(b)厚度分布图

Fig. 5 Distribution of soil (a) and epikarst (b) thickness at the watershed scale

表层岩溶带视电阻率一般在 $800\sim 5\,000\Omega\cdot m$ 之间，基于此反演小流域尺度表层岩溶带厚度空间分布图（图5b）。根据电性及地质特征将表层岩溶带划分为浅覆盖型和裸露型两类。浅覆盖型主要表现为上覆土壤层，主要分布于洼地（南部除外）及坡脚，其中I、IV号（图4）表层岩溶发育区厚度大，最大厚度达29.8m；III号表层岩溶发育区以全强风化基岩为主，岩体破碎，节理裂隙发育，厚度介于0.5~25.0m之间。值得注意的是，III号和IV号岩溶发育区之间发育常流泉S2。裸露型主要分布在洼地南部和坡地上坡，表现为基岩直接出露地表，上覆土层

极薄。其中II号区域溶蚀强烈，局部发育溶洞，探测剖面视电阻率等值线图在浅部多呈高阻夹低阻的异常，结合钻井调查推测主要以溶沟、溶槽发育为主。

高密度电测线范围的平均土壤厚度为1.29m，其中洼地至坡脚土壤厚度大，坡地土壤厚度小；土壤厚度与高程呈显著($P<0.05$)负线性关系，即土壤厚度随海拔的升高而减小（图6）。表层岩溶带与高程的相互关系和土壤厚度与高程的相互关系一致，表现为显著($P<0.05$)负线性关系。此外，300~315m高程范围土壤和表层岩溶带厚度均呈现上升

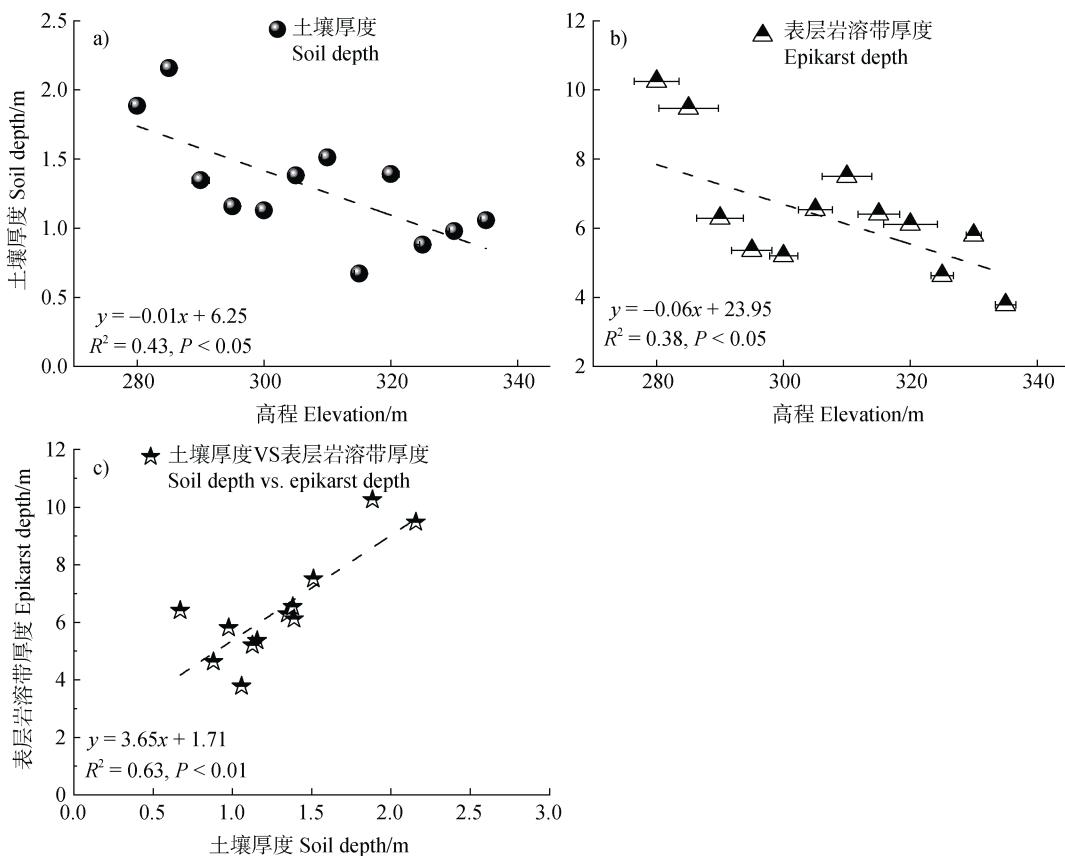


图 6 土壤及表层岩溶带厚度与高程的相互关系

Fig. 6 Relationship between soil and epikarst depth with elevation

趋势, 与该高程范围多位于洼地与坡地连接的坡麓地带有关。土壤和表层岩溶带厚度拟合度较好, 呈现出极显著 ($P < 0.01$) 的正线性关系, R^2 为 63%。

2.3 表层岩溶泉

S1 和 S2 表层岩溶泉出流于洼地中东部及西南的坡脚(图 4), 其形成受到断层的影响(图 7, 图 8)。S1 间歇性岩溶泉泉域附近地形极其复杂, 发育 3 条断层构造 (F4、F5 和 F6), 其中 F6 断层带沿线坡地裸岩直接出露地表且地表及其破碎, 植被类型以高大乔木为主, 显著区别于小流域范围其他坡地。S2 常流泉泉域附近为规模较大的 F1 断层带贯穿, 泉域周围土壤层覆盖且厚度大(图 4), 成为岩溶泉可能的稳定补给来源。

岩溶泉两侧近地表视电阻率均表现为低阻特性, 但 S2 泉域的赋水性优于 S1, 表现为更大的低阻覆盖区域, 与上覆土壤层厚度大且赋水性强有关。S1 泉水补给来源主要来自于其东部及东南部赋水的土层、岩体节理裂隙通过贯通的溶孔、溶蚀裂隙, 其总体径流方向为东南至西北。S2 表层岩溶泉主要

由其西部、西南部赋水的土层、岩体节理裂隙通过贯通的溶孔、溶蚀裂隙进行补给, 总体径流方向为西南至东北, 最终随溪流水汇入水库。

3 讨论

前期在山坡关键带尺度的研究结果表明地球物理勘探技术可以有效揭示岩溶环境中土壤-表层岩溶带的复杂形态^[12], 为我们对流域尺度岩溶含水层特征进行评估提供了可能, 本研究结果进一步发现喀斯特岩溶含水介质(包括土壤层、表层岩溶带、断层、表层岩溶泉)与电阻率值有密切的联系, 并反演了含水介质的空间分布特征, 为后续喀斯特关键带陆地表层系统模型的构建提供技术和数据支撑。

尽管电阻率技术解释小尺度范围的精度受制于技术和方法的限制, 其准确性仍然存在一定的挑战, 但大的裂隙/断层由于明显的高、低阻差异能容易被识别^[28]。虽然在非喀斯特地区小流域尺度也发现断层带的存在^[28], 但断层带普遍发育 (F1~F6) 可能

是喀斯特区别于非喀斯特区域的显著特征，也导致了岩溶含水介质高度的空间异质性。裂隙和断层的形成是由于不整合边界的构造运动和动力变质作用形成^[28]，F1断层自东南向西北贯穿整个小流域，这是导致南坡和北坡钻孔剖面差异明显的可能原因（图2）。此外，虽然F2至F6断层规模相对较小，但深刻影响着小流域尺度土壤、表层岩溶带、泉水和植被的分布。断层的作用导致岩体破碎，钻井揭露部分存在强风化角砾岩。张信宝等^[29]研究指出，和完整的岩层相比，松散岩层更容易遭受溶蚀作用，因此断层带范围的岩溶程度更强。此外，坡地断层带的形成直接影响地貌形态。如图9，尽管小流域岩性为典型喀斯特白云岩，但F6断层带地貌外观表现为明显的石灰岩特征。再者，断层带还是表层岩溶泉发育和形成的促成条件之一，S1岩溶泉区域附

近发育F4、F5和F6断层带，S2岩溶泉区域发育F1断层。然而，岩溶泉的特征还与断层附近介质的性质有关，S1岩溶泉为间歇泉与岩体破碎、下伏基岩低阻渗透性大有关^[30]；S2岩溶泉为常流泉，下伏基岩电阻率值较高，具有不透水特征。

在前期高分辨率的电阻率探测和地质钻井工作的基础上^[12]，本研究将物探尺度从坡面扩展至小流域。结果表明，土壤电阻率值较小（<600 Ω·m），且与基岩明显区分，主要分布在研究区的洼地及坡脚，而坡地土壤厚度较浅。洼地平缓的坡度能够有效地减少土壤侵蚀，同时也是山坡冲积物的良好滞留场所^[31]，是土壤厚度大的主要原因。此外，坡地除了存在水土流失的风险外，土壤漏失即土壤通过管道直接进入表层岩溶带也是坡地土壤少的影响因素之一^[32]。中国南方喀斯特岩层具有质纯、厚度大且坚

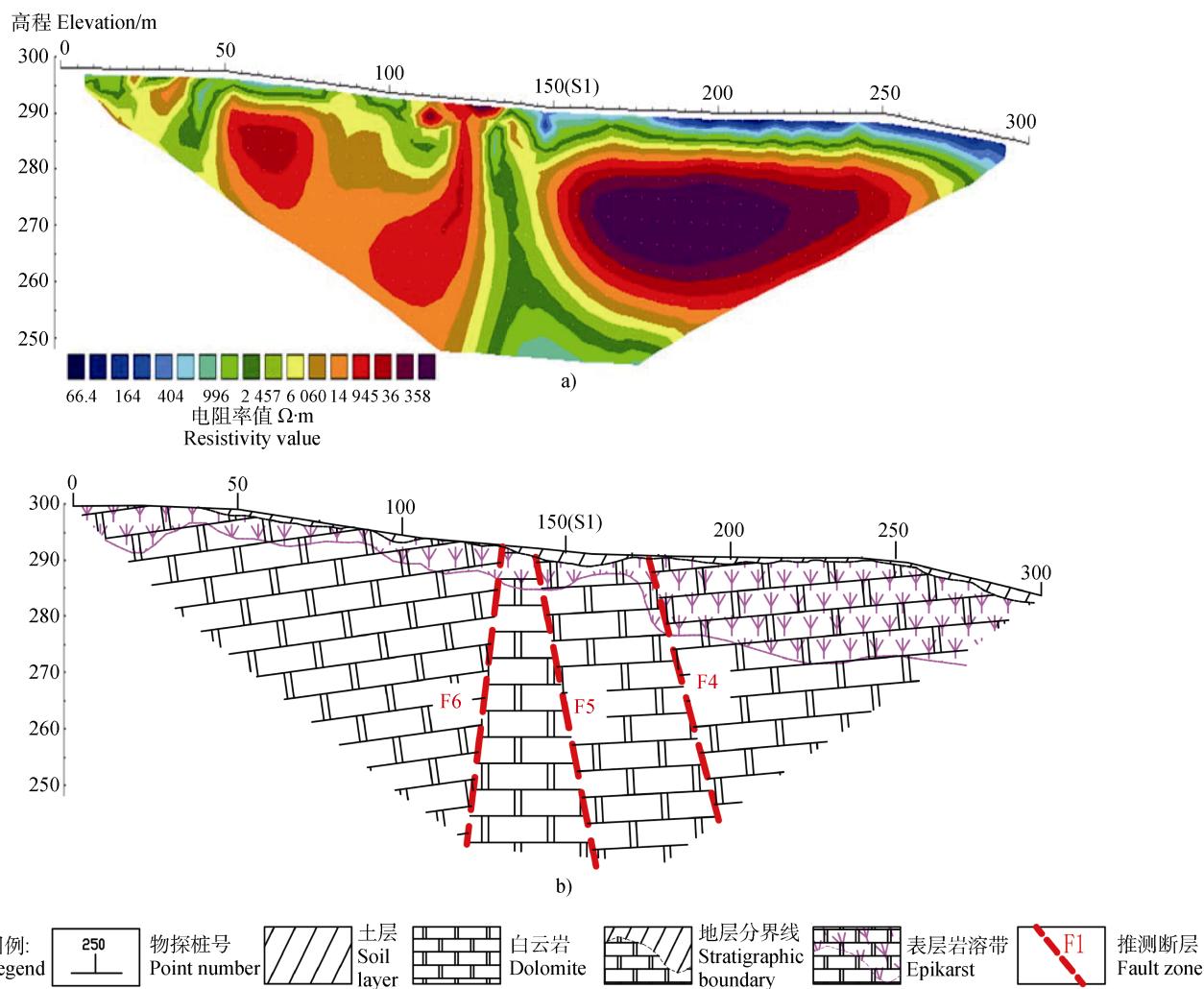
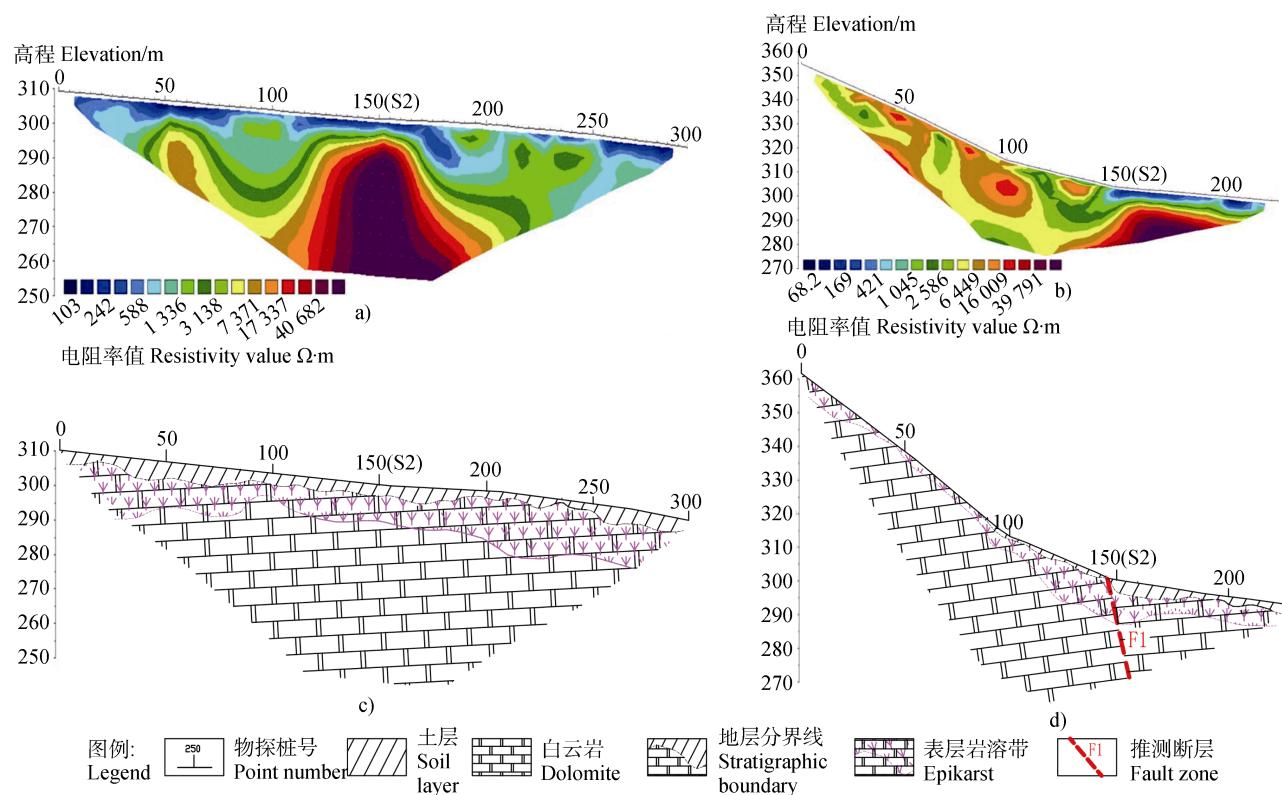


图7 S1 表层岩溶泉发育区域电性特征
Fig. 7 Electrical characteristics of spring S1 in the study area



注: a) 电阻率值横向剖面; b) 电阻率值纵向剖面; c) 横向剖面推断图; d) 纵向剖面推断图。Note: a) Transverse of resistivity value, b) Resistivity longitudinal profile, c) Transverse section inference map, d) Longitudinal inference map.

图 8 S2 表层岩溶泉发育区域电性特征
Fig. 8 Electrical characteristics of spring S2 at the study area

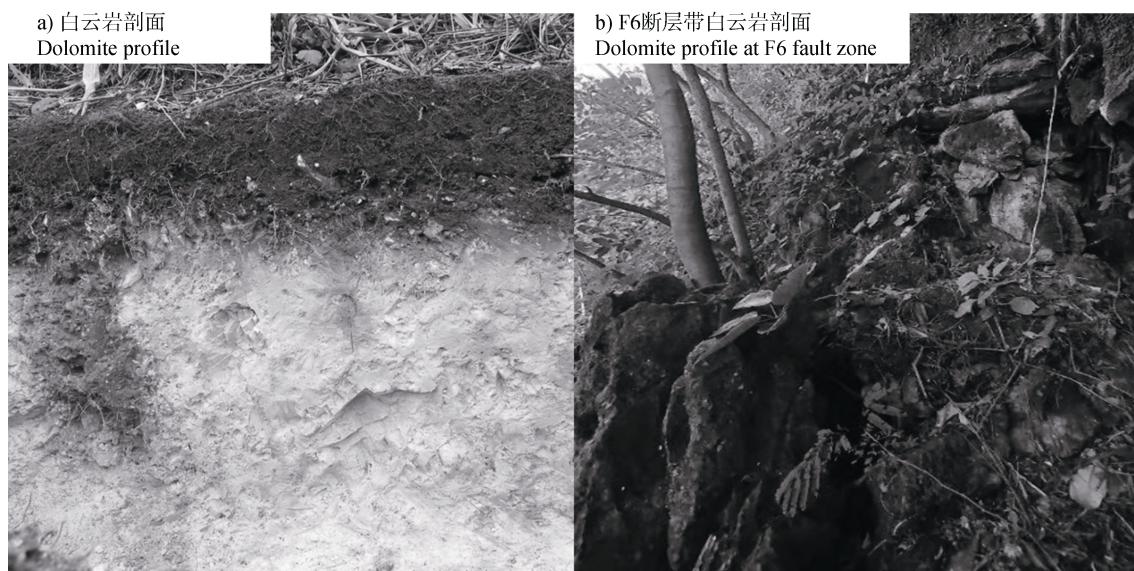


图 9 断层带影响下的岩土结构及植被特征
Fig. 9 Rock, soil structure, and vegetation characteristics affected by a fault zone

硬的特点,连片出露地表的岩石一般具有低风化或未风化特征,发生溶蚀的机会相对较少,只有在产

生大的降雨而导致地表存在水流经过时,溶蚀作用才会相对较强^[33]。蒋忠诚^[33]通过埋藏岩石试片发现

只要不将试片放置于水流中心，试片丢失的重量极小。这也是喀斯特岩性与非喀斯特岩性的典型区别，例如 Heimsath 等^[34-35]发现非喀斯特区裸岩的成土速率远快于有土覆盖的岩石风化壳的成土速率。另一方面，碳酸盐岩溶蚀速率还和水与 CO₂ 的作用密切相关，土壤中 CO₂ 储量显著高于空气，并且与水的作用更强烈，也是基岩出露区溶蚀速率低的主要原因。值得注意的是，在表层岩溶泉发育的 S2 的洼地西南区域，断层及山坡崩积物的堆积导致土壤厚度大且连续，土壤层深厚可能是岩溶泉水 S2 长期出流的原因之一。这得到了 Wang 等^[36]的证实，该文基于同位素和水化学示踪的方法，发现表层岩溶带和土壤层厚度对 S2 泉水具有重要的调控作用；S1 则短期出流，近期的雨水比例和快速流比例均高于 S2。尽管洼地土壤分布较相对均匀，但洼地基岩出露地区（洼地东南）无土层覆盖，这也体现了喀斯特关键带含水介质空间分布的巨大异质性。坚硬的碳酸盐岩地层从沉积过程中产生了岩石的多孔介质-原生孔隙，而且在新构造运动过程中又形成了节理、断层等新的构造形迹，从而为雨水向地表岩石的渗透溶蚀提供了基础条件^[33]，而裂隙不发育的位置随着土壤被剥蚀而出露地表。

张信宝等^[29]探讨了西南喀斯特地貌溶蚀的形成机制，认为降水诱导的碳酸盐岩的高化学溶蚀速率是我国西南喀斯特地貌形成的基本原因，而表层岩溶带的顺坡径流侵蚀则是导致坡地和洼地表层岩溶带发育差异的关键因素。降水产生的径流入渗至表层岩溶带，一部分沿表层岩溶带的顺坡裂隙流动，一部分沿垂直裂隙向下入渗，部分垂向入渗的径流有可能又沿水平或者斜向裂隙返流至表层岩溶带。表层岩溶带的顺坡径流随坡长的增加而增加，溶蚀速率也相应的增大。随着时间的推移，洼地和坡脚溶蚀的厚度越来越大于坡地上部，也是导致洼地土壤和表层岩溶带厚度普遍大于坡地的原因。土壤厚度与表层岩溶带的空间分布具有一致性，线性拟合达到极显著水平，意味着一定程度上喀斯特白云岩小流域尺度的土壤和表层岩溶带厚度可以进行相互验证，这对水文模型的构建具有重要意义。导致这种线性关系与岩溶发育环境有关，即洼地和坡麓地带水分条件好，同时土壤厚度大，是土壤空气(CO₂) 和生物有机酸的主要汇库，为碳酸盐岩的溶蚀提供了优良的场所。相似的结果与张志才等^[37-38]在普定

陈旗喀斯特小流域研究结果一致。除了上述原因外，水动力条件也是解释这种现象的主要因素。喀斯特坡地岩溶作用的水动力主要为内源水，由降雨补给并快速入渗，沿裂隙运动。相对于峰丛，洼地地形较凹，是降雨或洪水的汇集区域，增加了水流的侵蚀能力和溶蚀时间。地形低凹，水流垂向作用增强，加强了水流的垂向侵蚀^[39]，从而促进表层岩溶带的深部发育。

4 结 论

地球物理勘探解译结果发现小流域尺度发育多条断层带(F1~F6)，影响含水介质包括土壤、表层岩溶带及岩溶泉水的空间分布特征，也是喀斯特关键带相对于非喀斯特关键带具有更高异质性的可能原因；土壤集中分布在洼地，但受岩溶程度（例如基岩是否出露地表）的影响；土壤厚度与海拔呈显著($P < 0.05$)负线性关系，岩溶水土环境及水动力因素是主要影响因素；土壤和表层岩溶带厚度具有高度的异质性，显著($P < 0.01$)的正线性相关关系被观察到；断层带的存在是形成表层岩溶泉的基础，但岩溶泉出流或补给特征（间歇性或常流泉）受介质赋水特性的影响。本研究可为中国西南喀斯特地区水文地质研究的进一步深化及陆面模型的构建提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Rempe D M, Dietrich W E. A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111 (18): 6576—6581.
- [2] Fan Y, Clark M, Lawrence D M, et al. Hillslope hydrology in global change research and earth system modeling[J]. Water Resources Research, 2019, 55 (2): 1737—1772.
- [3] Rempe D M, Dietrich W E. Direct observations of rock moisture, a hidden component of the hydrologic cycle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115 (11): 2664—2669.
- [4] Fan B H, Liu X B, Zhu Q, et al. Exploring the interplay between infiltration dynamics and Critical Zone structures with multiscale geophysical imaging : A review[J]. Geoderma, 2020, 374 (114431): 1—17.
- [5] Williams P. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology : A review[J]. International Journal of Speleology, 2008, 37: 1—10.

- [6] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52 (3): 218—242.
- [7] Bakalowicz M. Karst groundwater: A challenge for new resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13 (1): 148—160.
- [8] Goldscheider N , Drew D. Methods in karst hydrogeology[M]. Taylor & Francis, Group, 2007
- [9] Cheng Q B, Chen X, Tao M, et al. Characterization of karst structures using quasi-3D electrical resistivity tomography[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78 (9): 285—297.
- [10] Lesmes D P, Friedman S P. Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils// Rubin Y S S. *Hydrogeophysics*. Water Science and Technology Library. vol 50. Springer, Dordrecht. t. <https://doi.org/10.1007/1-40>.
- [11] Zhu J F, Currens J C, Dinger J S. Challenges of using electrical resistivity method to locate karst conduits—A field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75 (3): 523—530.
- [12] Zhang J, Fu Z Y, Chen H S, et al. Soil-epikarst structures and their hydrological characteristics on dolomite slopes in karst region of southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (6): 2107—2118.[张君,付智勇,陈洪松,等.西南喀斯特白云岩坡地土壤-表层岩溶带结构及水文特征[J].应用生态学报,2021,32(6):2107—2118.]
- [13] Al-fares W, Bakalowicz M, Guérin R, et al. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 51 (2/3/4): 97—106.
- [14] Chalikakis K, Plagnes V, Guerin R, et al. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19 (6): 1169—1180.
- [15] Margiotta S, Negri S, Parise M, et al. Mapping the susceptibility to sinkholes in coastal areas, based on stratigraphy, geomorphology and geophysics[J]. *Natural Hazards*, 2012, 62 (2): 657—676.
- [16] Margiotta S, Negri S, Parise M, et al. Karst geosites at risk of collapse: The sinkholes at nociglia (Apulia, SE Italy) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 75 (1): 1—10.
- [17] Metwaly M , Al-Fouzan F. Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia[J]. *Geoscience Frontiers*, 2013, 4 (4): 469—476.
- [18] Kaufmann O, Deceuster J. Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournaisis area through geophysical methods: an overview[J]. *Geologica Belgica*, 2014, 17 (1): 17—26.
- [19] Meyerhoff S B , Karaoulis M , Fiebig F , et al. Visualization of conduit-matrix conductivity differences in a karst aquifer using time-lapse electrical resistivity[J]. *Geophysical Research Letters* , 2012 , 39 (24): 2012GL053933.
- [20] Gutiérrez F, Parise M, de Waele J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 61—88.
- [21] Parise M, Gabrovsek F, Kaufmann G, et al. Recent advances in karst research: From theory to fieldwork and applications[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2018, 466 (1): 1—24.
- [22] Chen X, Zhang Z C, Soulsby C, et al. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function : An integrated approach[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32 (19): 2932—2946.
- [23] Cheng Q B, Tao M, Chen X, et al. Evaluation of electrical resistivity tomography (ERT) for mapping the soil–rock interface in karstic environments[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78 (15): 1—14.
- [24] Hu K, Chen H S, Nie Y P, et al. Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10215.
- [25] Yang J, Chen H S, Nie Y P, et al. Variation of precipitation characteristics and shallow groundwater depth in the typical karst peak-cluster depression areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (5): 239—243.[杨静,陈洪松,聂云鹏,等.典型喀斯特峰丛洼地降雨特性及浅层地下水埋深变化特征[J].水土保持学报,2012,26(5):239—243.]
- [26] Yan J Y, Meng G X, Lü Q T, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36 (4): 576—584.[严加永,孟贵祥,吕庆田,等.高密度电法的进展与展望[J].物探与化探,2012,36(4):576—584.]
- [27] Code for investigation of geophysical in Guangxi Zhuang Autonomous Region DB45/t 983-2014[C]. Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Quality and Technical Supervision, 2014.[广西壮族自治区地方标准工程物探规范:DB45/t 983-2014[C].广西壮族自治区质量技术监督局,2014.]
- [28] Kumar D, Rajesh K, Mondal S, et al. Groundwater exploration in limestone–shale–quartzite terrain through 2D electrical resistivity tomography in Tadipatri , Anantapur district, Andhra Pradesh[J]. *Journal of Earth System Science*, 2020, 129 (1): 1—16.
- [29] Zhang X B, Liu Z H, Wang S J, et al. Dynamic mechanism of runoff corrosion in the epikarst zone on the formation of cone and tower karst landforms[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29 (5): 529—533.[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[J]. 山地学报, 2011, 29 (5): 529—533.]
- [30] Hasan M, Shang Y J, Jin W J, et al. Investigation of fractured rock aquifer in South China using electrical resistivity tomography and self-potential methods[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16 (4): 850—869.
- [31] Li Z W, Xu X L, Zhu J X, et al. Sediment yield is closely related to lithology and landscape properties in heterogeneous karst watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 437—446.
- [32] Feng T, Chen H S, Polyakov V O, et al. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with ^{137}Cs measurements[J]. Geomorphology, 2016, 253: 217—224.
- [33] Jiang Z C. Features of epikarst zone in South China and formation mechanism[J]. Tropical Geography, 1998, 18 (4): 322—326 [蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. 热带地理, 1998, 18 (4): 322—326.]
- [34] Heimsath A M, Dietrich W E, Nishiizumi K, et al. The soil production function and landscape equilibrium[J]. Nature, 1997, 388 (6640): 358—361.
- [35] Heimsath A M, Dietrich W E, Nishiizumi K, et al. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth[J]. Geomorphology, 1999, 27 (1/2): 151—172.
- [36] Wang F, Chen H S, Lian J J, et al. Seasonal recharge of spring and stream waters in a karst catchment revealed by isotopic and hydrochemical analyses[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125595.
- [37] Zhang Z C, Chen X, Cheng Q B, et al. Hydrogeology of epikarst in karst mountains-A case study of the Chenqi catchment[J]. Earth and Environment, 2011, 39 (1): 19—25.[张志才, 陈喜, 程勤波, 等. 喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析——以陈旗小流域为例[J]. 地球与环境, 2011, 39 (1): 19—25.]
- [38] Zhang Z C, Chen X, Liu J T, et al. Influence of topography on epikarst in karst mountain areas-A case study of Chenqi catchment[J]. Earth and Environment, 2012, 40 (2): 137—143.[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[J]. 地球与环境, 2012, 40 (2): 137—143.]
- [39] Liu J T, Feng D Z, Chen X, et al. Distribution characteristics of hillslope curvature and its effects on hydrological processes: A real-world test[J]. Advances in Water Science, 2011, 22 (1): 1—6.[刘金涛, 冯德锃, 陈喜, 等. 山坡地形曲率分布特征及其水文效应分析——真实流域的野外实验及相关分析研究[J]. 水科学进展, 2011, 22 (1): 1—6.]

(责任编辑: 檀满枝)