

峰丛洼地小流域不同地貌部位岩土结构特征差异

蔡显雄^{1,2}, 付智勇^{2,3}, 徐勤学⁴, 李科¹

(1. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院亚热带农业

生态研究所, 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. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的] 探明上覆土壤与下伏基岩强风化层间的共同发育关系, 为喀斯特区地下岩土结构的定量预测提供基础数据支撑。[方法] 在广西环江木连小流域利用智能摄影技术以 3 m 高标准水准尺为对照, 调查上坡、中坡、下坡和洼地 4 个不同地貌部位各 17 条 5 m 宽岩土剖面共 68 条。通过 AutoCAD 图像刻画与 ArcGIS-Fragstats 对图像矢量化处理获取土岩剖面等效厚度(T)、斑块数量(NP)、斑块形状指数 $SHAPE$ 、等效厚度周长比 PTR 、斑块分形维数 $FRAC$ 、厚度变异系数 CV 等结构指标进行比较。[结果] 1) 土壤层与基岩强风化层等效厚度由上坡向洼地不均匀递增, 上坡土层厚度 < 25 cm, 洼地基岩强风化层厚度在 110~250 cm。2) 中坡斑块数量($NP > 4$)及形状指数显著高于其他坡位, 呈现破碎的岩土交错镶嵌特征, 乔灌木植被数量、根系最大深度与土壤及基岩强风化层厚度特征显著正相关($r = 0.86$, $r = 0.65$), 且增加木本植被能有效降低土壤厚度的空间变异。3) 线性模型显示, 基岩强风化层厚度约为土壤层的 69%, 可通过地表易测指标(T, S_d)有效预测地下隐蔽结构的复杂特征。[结论] 岩土剖面尺度的量化研究揭示不同地貌部位的结构特征差异, 为喀斯特生态修复中的地貌部位分区精准治理提供科学依据。

关键词: 喀斯特表层岩溶带; 白云岩峰丛洼地; 岩土结构特征; 浅地表预测模型

中图分类号: S152.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0046-10

Differences in Rock-Soil Structural Characteristics Across Different Geomorphic Positions in Small Watersheds of Peak-Cluster Depressions

Cai Xianxiong^{1,2}, Fu Zhiyong^{2,3}, Xu Qinxue⁴, Li Ke¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi

541004, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Huanjiang

Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China;

4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the co-developmental relationship between the overlying soil and the underlying strongly weathered bedrock layer, thereby providing fundamental data for the quantitative prediction of subsurface rock-soil structures in karst areas. [Methods] In the Mulian small watershed of Huanjiang, Guangxi, intelligent photogrammetry technology was employed, using a 3 m high standard leveling staff as a reference, to investigate 68 rock-soil profiles, each 5 m in width, across four different geomorphic positions: upper slope, middle slope, lower slope, and depression (17 profiles per position). Through image characterization in AutoCAD and vectorization processing using ArcGIS-Fragstats, structural indicators of the rock-soil profiles were obtained and compared, including equivalent thickness (T), number of patches (NP), shape index ($SHAPE$), perimeter-to-thickness ratio (PTR), fractal dimension ($FRAC$), and coefficient of variation of thickness (CV). [Results] 1) The equivalent thickness of the soil layer and the strongly weathered bedrock layer

收稿日期: 2026-01-03

修回日期: 2026-02-06

录用日期: 2026-03-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1902801); 国家自然科学基金面上项目(42577409)

第一作者: 蔡显雄(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事地貌部位生态分区治理研究。E-mail: 2120230844@glut.edu.cn

通信作者: 李科(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事环境岩土研究。E-mail: likeniko@glut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

increased non-uniformly from the upper slope to the depression. The soil thickness on the upper slope was less than 25 cm, while the thickness of the strongly weathered bedrock layer in the depression ranged from 110 cm to 250 cm. 2) The number of patches ($NP > 4$) and the shape index (SHAPE) on the middle slope were significantly higher than those at other slope positions, exhibiting fragmented and interlocked rock-soil mosaic characteristics. The number of trees and shrubs and the maximum root depth were significantly positively correlated with the thickness of the soil and the strongly weathered bedrock layer ($r=0.86$, $r=0.65$), and increasing woody vegetation effectively reduced the spatial variability of soil thickness. 3) A linear model indicated that the thickness of the strongly weathered bedrock layer was approximately 69% of the soil layer thickness. The complex characteristics of the concealed subsurface structure could be effectively predicted through easily measurable surface indicators, such as soil thickness (T) and woody stem density (Sd). [Conclusion] Quantitative research at the rock-soil profile scale reveals differences in structural characteristics among various geomorphic positions, providing a scientific basis for precise zonal management of geomorphic positions in karst ecological restoration.

Keywords: karst epikarst zone; dolomite peak-cluster depression; rock-soil structural characteristics; shallow subsurface prediction model

Received: 2026-01-03

Revised: 2026-02-06

Accepted: 2026-03-20

Online(www.cnki.net): 2026-04-14

西南喀斯特地区成土速率低,缺水少土,是典型的生态脆弱区,在人类活动加剧和极端气候背景下,生态退化风险高。土壤和表层岩溶带的共同演化使得其关键带成为一个由植物根系、土壤填充物、岩溶裂隙管道和碳酸盐岩基质共同形成的复杂三维网络结构^[1-3]。该特殊复杂网络结构是喀斯特关键带区别于非喀斯特区的主要核心特征。气候变化及人类生存扰动导致的石漠化和地下水流失是喀斯特区最重要的生态环境问题,制约当地生态安全平衡可持续发展^[4-6]。峰丛洼地作为该地区的典型地貌类型,在极短水平距离内由陡峭坡顶快速过渡到缓坡坡脚和平坦洼地,伴随势能急剧降低和汇水面积迅速增加,理论上具备形成沿坡连续土链格局的势能梯度与水文驱动条件^[7-8]。受喀斯特成土缓慢且土壤分布不连续的一般性传统认识的影响,将喀斯特峰丛洼地土壤简单分为坡地黑色石灰土、洼地棕色石灰土、黄色石灰土^[9]。对于土壤与基岩强风化层的分布特征和结构指标(如岩土剖面介质斑块数量、斑块周长面积比例及等效厚度等)间是否存在明确的定量关系尚未形成统一结论。尤其在峰丛洼地流域尺度下,基于野外剖面开挖的浅地表土壤及下伏基岩强风化层剖面空间分异特征系统性研究仍显不足。

在地球关键带(earth's critical zone, ECZ)科学框架推动下,表层岩溶带(epikarst zone)作为喀斯特关键带的核心区和水土运移最为活跃的层位,喀斯特区浅地表结构研究逐步由定性描述走向定量刻画和跨尺度预测。张君等^[10]对关键带结构刻画、模型模拟表明,上覆土壤与下伏表层岩溶带(epikarst zone)构成的

二元异质结构,是调控区域生物地球化学循环的关键边界。陈洪松等^[11]研究发现,表层岩溶带是通过复杂的裂隙网络形成入渗通道,在干旱季节为植被提供关键的水源维持喀斯特生境稳定性的核心机理;陈喜等^[3]通过植被、水文、土壤和溶蚀等观测试验提出,喀斯特地区大气-植被-土壤-岩石系统结构和组成及协同演变理念;王发等^[12]使用高密度电法(ERT)探测45条样线,研究土壤和表层岩溶带厚度的空间分布格局及其影响因素。地球物理勘探、钻孔剖面与地形分析技术的交叉研究进一步揭示,土壤厚度与表层岩溶带厚度在小流域尺度上的空间变异及对水文动态变化的影响^[13-14]。在三维结构刻画成本高、难度大的条件约束下,钻孔和剖面取样方法,仍然是获取精准岩土结构指标不可替代的方法。现有研究多侧重于单一厚度层的空间异质性,忽略不同介质层的几何形态(如斑块形状、斑块数量等)对不同地貌部位地下结构分布的影响。但如何利用少数易获取的关键指标来评估地下复杂岩土空间结构,并与生态恢复过程建立可量化联系,仍是亟待回答的科学问题。

景观生态学发展出一套成熟的斑块几何形态指标体系,如形状指数(SHAPE)、分形维数(FRAC)、斑块数量(NP)和斑块面积(AREA)等,在平面景观格局对不同地貌类型的斑块时空演化和石漠化程度研究中应用广泛^[15-16]。然而,该类指标在岩土剖面视角下分析空间结构分布的关注较少。而传统的定性研究难以量化比较土壤层及基岩强风化层间差异性特征,也难以与植被根系行为建立联系。因此,有必要构建一套适用于剖面尺度的结构量化体系,探索

关键生态过程间的关联性。

以典型白云岩峰丛洼地小流域的不同地貌部位岩土结构剖面为对象,定量刻画岩土结构的几何形态特征。拟解决土壤层和基岩强风化层在不同地貌部位的结构特征分布差异及与乔灌木数量 and 植被最大根系深度的关联性问题。最后建立简单线性回归模型,确定地表有哪些易测指标可以预测地下岩土结构的复杂性特征指标。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于中国西南典型喀斯特地貌区广西

河池环江白云岩峰丛洼地木连小流域($24^{\circ}43'59''\sim 24^{\circ}44'49''N, 108^{\circ}18'57''\sim 108^{\circ}19'58''E$)。小流域面积为 146 hm^2 ,是云贵高原东南缘向广西丘陵过渡地带,地形起伏显著,坡度 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$,长期受溶蚀作用形成峰丛洼地复合地貌单元,洼地周围被峰丛环绕。区域气候属亚热带季风气候,年平均气温 $19\sim 21^{\circ}\text{C}$,年降水量约 $1\,380\text{ mm}$ (图 1)。白云岩峰丛洼地小流域土壤类型呈土链分布格局,坡地土壤以高砾石粗骨土为主,沿坡向下逐步演变为半淋溶土,洼地以淋溶土为主。土壤下伏基岩与土壤刚性接触,基岩风化程度由浅部至深部逐渐降低。

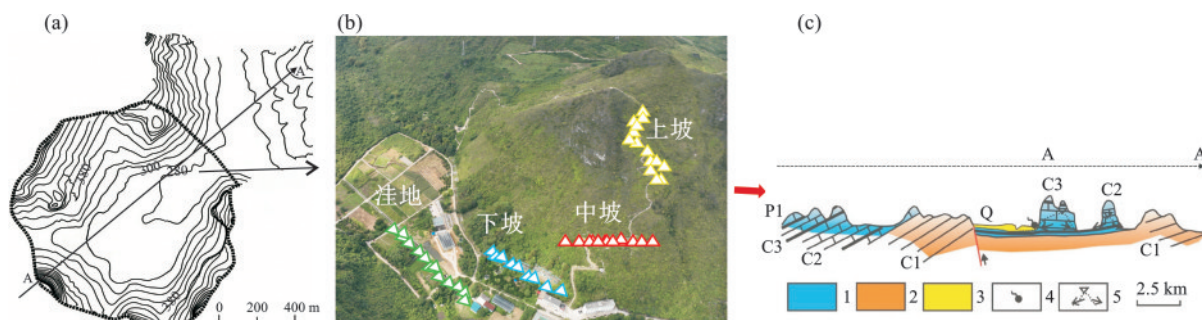


图 1 研究区概况及采样点分区

Fig.1 Overview of study area and distribution of sampling sites

1.2 剖面选择和调查方法

在峰丛洼地研究小流域内设置洼地、下坡、中坡和上坡 4 个不同地貌部位,各地貌部位调查 17 条宽度 5 m 的岩土剖面共计 68 条,深 2~4 m,均为开挖形成的裸露剖面。采用高分辨率智能相机,拍摄角度与剖面垂直。在每个剖面竖立 3 m 标准水准尺作为几何实际尺寸的基准参照。岩土结构剖面调查过程中,对不同介质层的定义为:A 介质(黑色有机质层)厚度为 0~20 cm,受植被凋落物分解影响,有机质含量高;B 介质位于 A 介质之下,呈黄褐色淀积层,黏粒含量较高,A 介质与 B 介质共同构成土壤层(A+B);C 介质为基岩强风化层,呈灰白色细砂状。

1.3 数据处理与几何指标计算

将图像导入 AutoCAD 2014,人工辅助识别剖面介质颜色、质地等特征。以标尺为参照,使用多段线和曲线描摹工具,对岩土剖面进行 1:100 的比例闭合刻画,通过属性面板得到斑块面积、周长。同时使用 Adobe Photoshop CS6 中的快速选择功能,调整色彩阈值后进行批量获取 A 层(表层黑色有机质土)、B 层(黄褐色黏质土)及 C 层(砂糖状白云岩强风化层)参数并通过表 1 公式计算斑块面积、等效厚度和等效厚度周长比。使用 ArcGIS 把 CAD 导出的岩土刻画图像进行矢量化处理,把矢量化的刻画图转换为 300 dpi 分辨率的灰度图像。进一步转化为标准 TIF 栅格

格式文件,配置空间坐标及实际尺寸参考,对介质斑块进行编号,最后导入 Fragstats 4.2 软件批量计算景观格局指数。

1.4 统计分析

采用 Excel 2021 和 R 4.3 软件对各指标进行统计分析。通过单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同坡位间介质结构指标的显著差异($\alpha=0.05$)。当方差不齐时使用 Tamhane's T2 进行多重比较。使用 Origin 2021 864 Bit 软件作图。试验为探求白云岩不同地貌部位的土壤及基岩强风化层空间分异特征,采用皮尔逊相关分析(Pearson's correlation analysis)方法,在显著相关的基础上,建立简单线性回归预测模型。

2 结果与分析

2.1 不同地貌部位岩土剖面特征

岩土剖面的(A+B)土壤层和(C)基岩强风化层的面积占比中洼地占比最大,分别为 43.53%、71.06%。中坡和下坡占比在土壤层中 $>20\%$,而基岩强风化层在中坡占比 9.26%。洼地和下坡乔灌木植被数量(Sd)占比分别为 31.56% 和 34.69%,上坡 12.52% 最小,中坡 21.22% 次之。在根系最大深度(Mrd)平均值分布上,洼地的 99.6 cm 显著高于下坡、中坡、上坡(57、41、18 cm)。

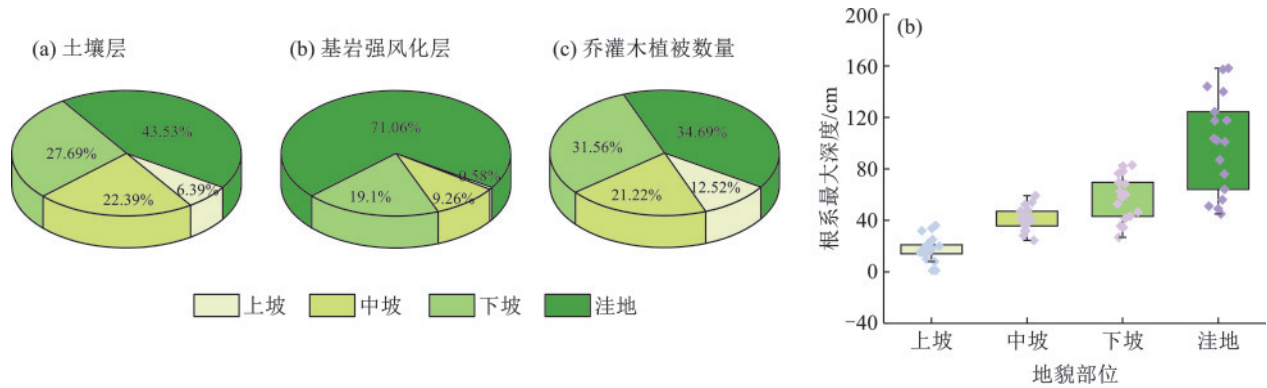
表 1 岩土结构指标定义与计算方法
Table 1 Definitions and calculation methods for rock-soil structural indicators

名称	指标缩写	计算公式/方法	单位	定义
土壤层的面积	A+B	AutoCAD 刻画土壤层获取	cm ²	土壤层的面积
基岩强风化层的面积	C	AutoCAD 刻画基岩强风化层获取	cm ²	基岩强风化层的面积
乔木灌木植被数量	Sd	野外实际调查	株	5 m×1 m 范围内乔木灌木植株数量
根系最大深度	Mrd	野外对裸露根系实地测量	cm	植被根系最大深度
等效厚度	T	$T = \frac{\sum_{i=1}^n A}{L}$	cm	表征土岩剖面内的厚度特征
斑块数量	NP	AutoCAD 统计	个	反映空间结构斑块数量差异性
形状指数	SHAPE	$SHAPE = \frac{0.25 \times P}{\sqrt{A}}$	—	表示斑块几何形状特征
等效厚度的周长比	PTR	$PTR = \frac{L \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$	—	表示斑块的边界复杂性
分形维数	FRAC	$FRAC = \frac{2 \ln(0.25 \times P)}{\ln A}$	—	斑块边界几何形态特征
厚度变异系数	CV	$CV = \frac{K}{T} \times 100\%$	—	厚度变化差异

注:计算公式中L为土岩剖面横向宽度5 m;P为计算斑块周长;A为计算斑块面积;P_i为土岩剖面中第i个计算斑块周长;A_i为第i个计算斑块面积;k为计算介质(土壤层、基岩强风化层)等效厚度的标准差。

土壤层表现为地表黑色有机质层(A层)平均厚度为0~20 cm,黄褐色沉积层(B层)土壤由0~120 cm 区间分布波动大,随梯度势能增大。基岩强风化层在局部用手抠、戳、捏有一些颗粒感,硬度低,结构松散,用锤子敲击声音沉闷,颜色为白灰色粉砂状。

整体强风化后,质地均匀,干燥情况下细颗粒感强,黏度低不聚团,一捏就散,易流失。值得注意的是,上坡区坡度陡峭且基岩表层埋深浅,岩石裸露度高,具体表现为地表及土壤层中砾石含量高、硬度大不易风化,不随坡面水土流失而迁移,常裸露于地表(图2)。



注:箱体的底端和顶端分别为第一四分位数和第三四分位数;箱体内部的水平黑线为中位数;垂直线为除异常值以外的数值范围;每个点为各剖面中植物根系长度值。下同。

图 2 不同地貌部位岩土剖面特征
Fig.2 Characteristics of rock and soil profiles in different geomorphic units

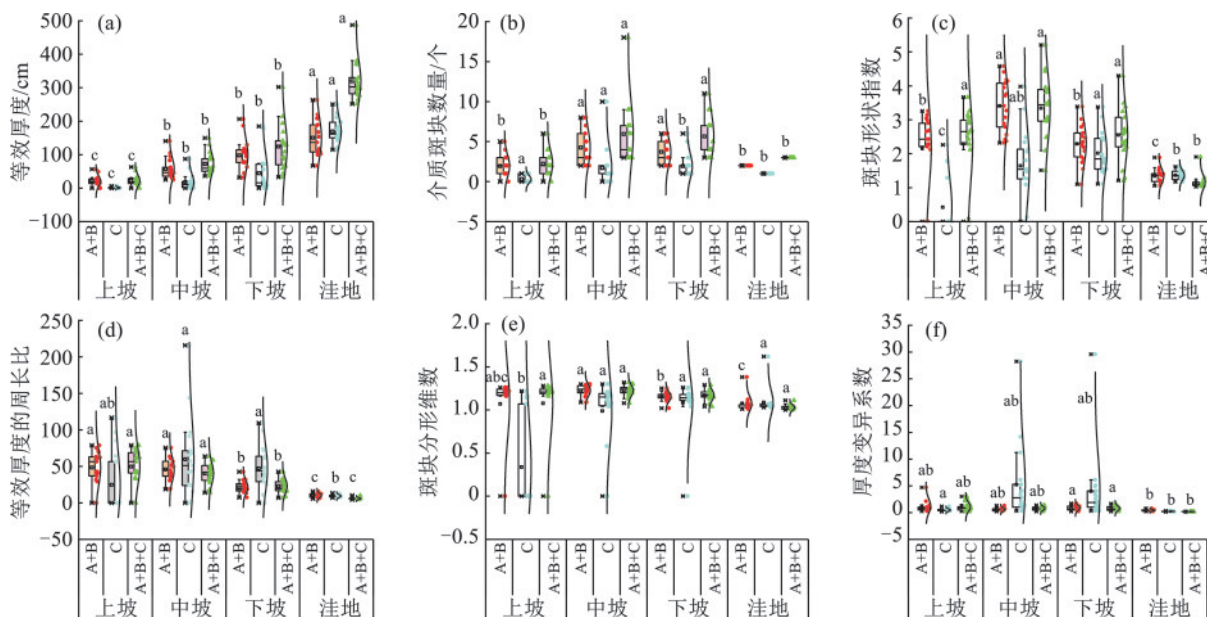
2.2 土壤及强风化层空间结构特征

西南喀斯特浅地表结构隐蔽性高,难以直接观测到土壤及基岩强风化层的空间分布及形态差异,给进一步了解表层岩溶带结构特征带来挑战。仅从定性的表述难以全面表征不同地貌部位的空间分异特征,需要增加一些新的结构指标对岩土剖面进行量化分析。

等效厚度是体现不同地貌部位厚度特征差异的重要指标。由图 3 可知,上坡土壤层等效厚度的分布区间为(21±14) cm、基岩强风化层为(1±1) cm,中坡分别增厚至(56±31)、(18±23) cm,下坡分别为(97±46)、(44±57) cm,洼地层最大值分别为(150±54)、(169±37) cm。说明上坡介质层薄等效厚度变化幅度小,而下坡和洼地等效厚度变化幅度大。随

着地貌地势降低,等效厚度值整体越大。与等效厚度分布规律不同,介质斑块数量总体上呈先增加后减少趋势。中坡土壤层斑块数量(4 ± 2)个高于下坡(4 ± 1)个,二者无显著性差异。而洼地(2 ± 1)个与上坡(2 ± 1)个在斑块数量上无显著性,但在等效厚度上差异最为显著。对于基岩强风化层下坡斑块数量为(2 ± 1)个与中坡(2 ± 2)个相近。洼地稳定在 2 个以下,上坡平均不足 1 个,说明上坡基岩强风化层发育程度受到限制。形状指数趋势先增大后减小,中坡土壤斑块形状指数(3.41 ± 0.76)最高,其次是上坡(2.31 ± 0.31)和下坡(2.29 ± 0.57),洼地(1.34 ± 0.57)最小。基岩强风化层下坡(2.01 ± 0.62)与中坡(1.64 ± 1.07)无显著性,二者高于洼地(1.36 ± 0.36)。综合来看,中坡斑块几何形状最为复杂,最简单是洼地。

上坡(43)和中坡(45)土壤层等效厚度的周长比平均值显著高于下坡(20)和洼地(10),表明上坡和中坡的斑块边界周长大、厚度薄。而上坡(24)、中坡(59)、下坡(47)基岩强风化层等效厚度的周长比数值离散,三者显著高于洼地(9)。与形状指数相比,分形维数相对抽象,需要理解分形概念,FRAC 指标试图在消除尺度的影响下判断几何形状边界复杂性。土壤层与基岩强风化层总体上斑块分形维数不显著,只有个别极值与洼地比较时有显著性。上坡土壤厚度变异系数最大值为 4.69,中坡、下坡厚度变异系数分别为 0.58、0.88,而洼地区厚度变异系数最小(0.39)。与该地区洼地平缓而上坡、中坡、土壤厚度存在差异变化大有关。基岩强风化层在厚度变异系数上,中坡和下坡分别为 5.20、3.98 但存在极大值,分别为 28.27、29.61,上坡区为 0.47,洼地区为 0.23。



注:不同小写字母表示不同地貌部位存在显著差异($p < 0.05$)。

图 3 不同地貌部位岩土结构特征参数

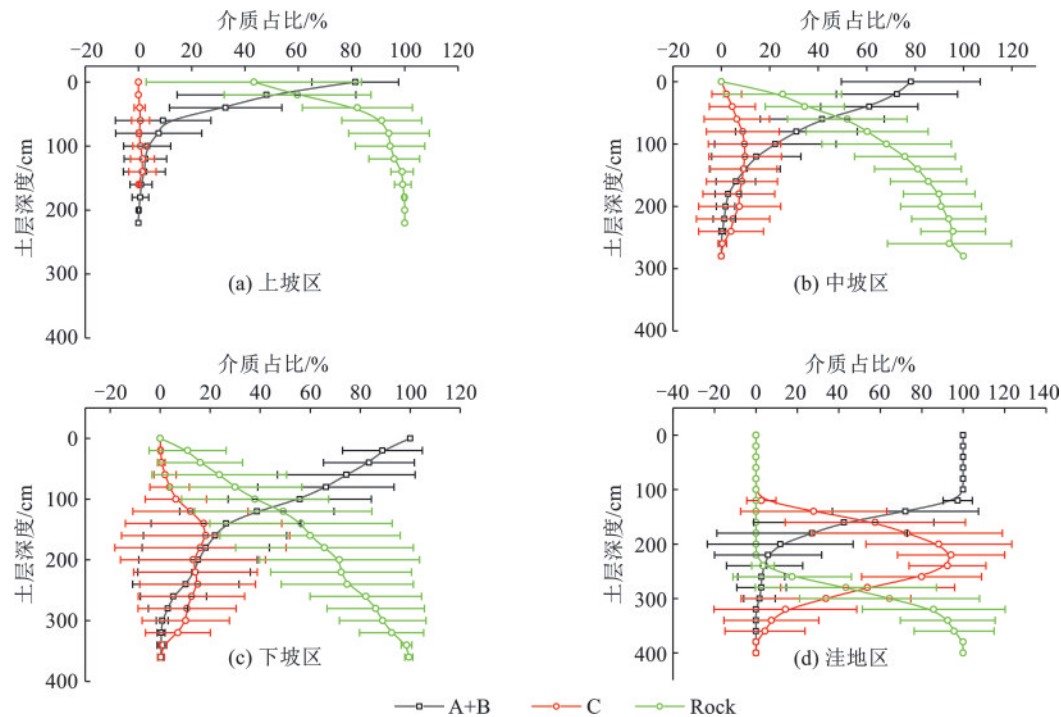
Fig.3 Rock-soil structural parameters across different geomorphic positions

上坡土壤层在 0~20 cm 深度内迅速降低至 48%,在接近 40 cm 时趋近于 0,基岩强风化层占比低于 5%,基岩在地表 0~10 cm 的占比约为 43%,40 cm 以下迅速增至 100%。中坡土壤层在 0~60 cm 深度维持在 60%~40%,80 cm 以下逐渐低于 5%。基岩强风化层主要分布在 40~150 cm 土层中,占比低于 10%。基岩从 60 cm 深度起占比超过 50%,在 200 cm 达到 100%。下坡土壤层 0~100 cm 深度内由 100% 递减至约 55%,随后逐渐低于 10%。基岩强风化层在 40~60 cm 深度出现,主要分布在 100~250 cm 深度,占比为 10%~15%,基岩在 100 cm 以下逐渐占主导。洼地区土壤层在 0~140 cm 深度范围内维持在 70% 以上。C 层在 100~220 cm 范围内占比超过

30%,与 A+B 层共同形成深度超过 2 m 的复合结构。基岩在 220~350 cm 深度后迅速增至 100%(图 4)。

2.3 地表易测指标(等效厚度、植被数量)与地下岩土结构指标的定量关系

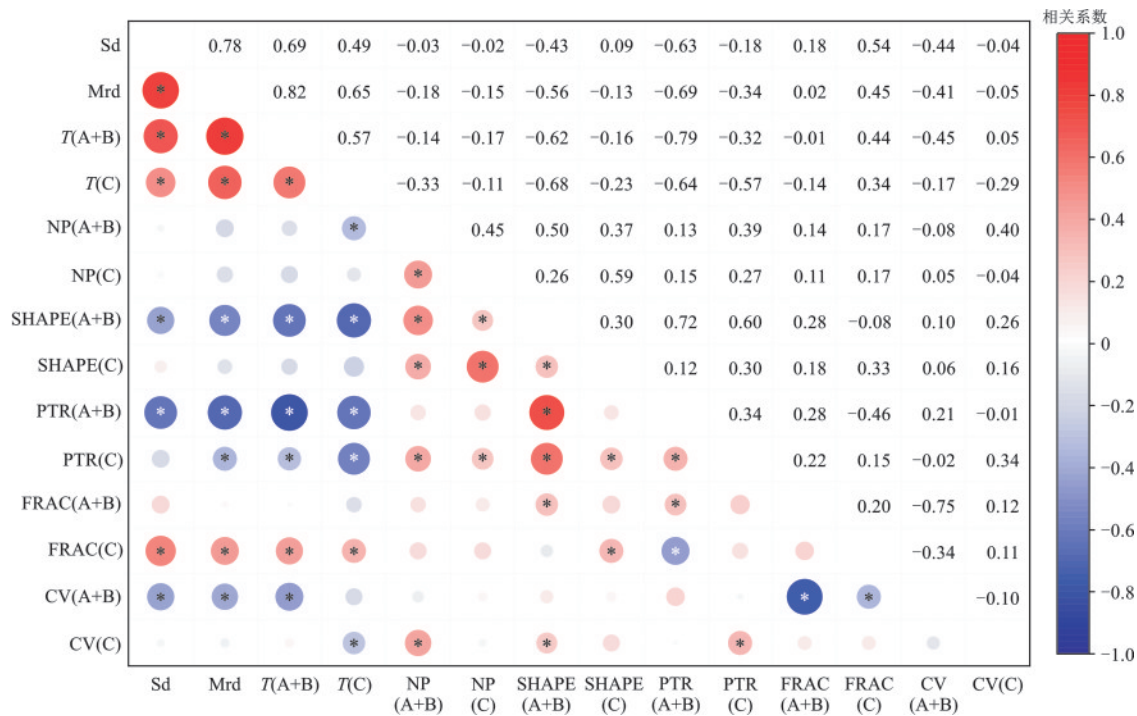
由图 5 可知,乔灌木数量与根系最大深度呈显著正相关($r=0.78$),二者又与土壤层 T(A+B)呈显著正相关($r=0.69$ 、 $r=0.82$),表明地表植被数量可有效反映土壤层厚度趋势的正向关系。而与斑块数量、分形维数、基岩强风化层等效厚度周长比不相关,但又与土壤等效厚度周长比呈显著负相关($r=-0.79$)。需进一步通过建立线性回归模型,对简单可获取的参数土壤层等效厚度、乔灌木数量与地下复杂难以观测的指标间的关系进行分析。



注：每条曲线为 17 个岩土剖面某一介质类型的面积占比随深度的变化趋势；A+B、C、Rock 分别为土壤层、强风化层、基岩；误差线为标准差。

图 4 不同地貌部位 5 m 宽度岩土剖面内土壤及基岩强风化层面积占比随土层深度变化

Fig.4 Depth-dependent variations in area proportion of soil and strongly weathered bedrock layer within 5 m-wide rock-soil profiles across different geomorphic positions



注：*表示 $p \leq 0.05$ 。下同。

图 5 不同地貌部位 5 m 宽度剖面内介质指标间相关性

Fig.5 Correlation between media indicators within 5 m-wide rock-soil profiles across different geomorphic positions

土壤等效厚度与根系最大深度 ($R^2=0.302, p<0.0001$)、强风化层等效厚度 ($R^2=0.329, p<0.0001$) 呈显著正相关,说明土层越厚可承载更多的水分、养分和生长条件。乔灌木植被数量与根系最大深度 ($R^2=0.609, p<0.0001$)、土壤等效厚度 ($R^2=0.474, p<0.0001$)、基岩强风化层等效厚度 ($R^2=0.243, p<0.0001$) 呈显著正相关,表明木本植物植被越多其根系能穿透和促进土壤层的积累与基岩风化。相

反的是,土壤等效厚度与土壤斑块形状指数呈负相关($R^2=0.385, p<0.0001$)。随着土壤等效厚度的增加,形状指数减小,对应坡度陡峭的上坡区和中坡区等地貌部位;反之,形状指数越小对应下坡区、洼地区形状越规整。与土壤等效厚度斑块周长呈显著负线性关系($R^2=0.619, p<0.0001$),随着等效厚度的增加,

其土壤等效厚度斑块周长比显著减小。而乔灌木数量与土壤斑块形状指数呈负相关,表明随着植被数量的增加,斑块形状复杂度、等效厚度周长比、厚度变异系数而减小。土壤等效厚度和乔灌木数量与NP(A+B)、NP(C)、SHAPE(C)、PTR(C)、FRAC(A+B)、FRAC(C)、CV(C)关系不显著(图6)。

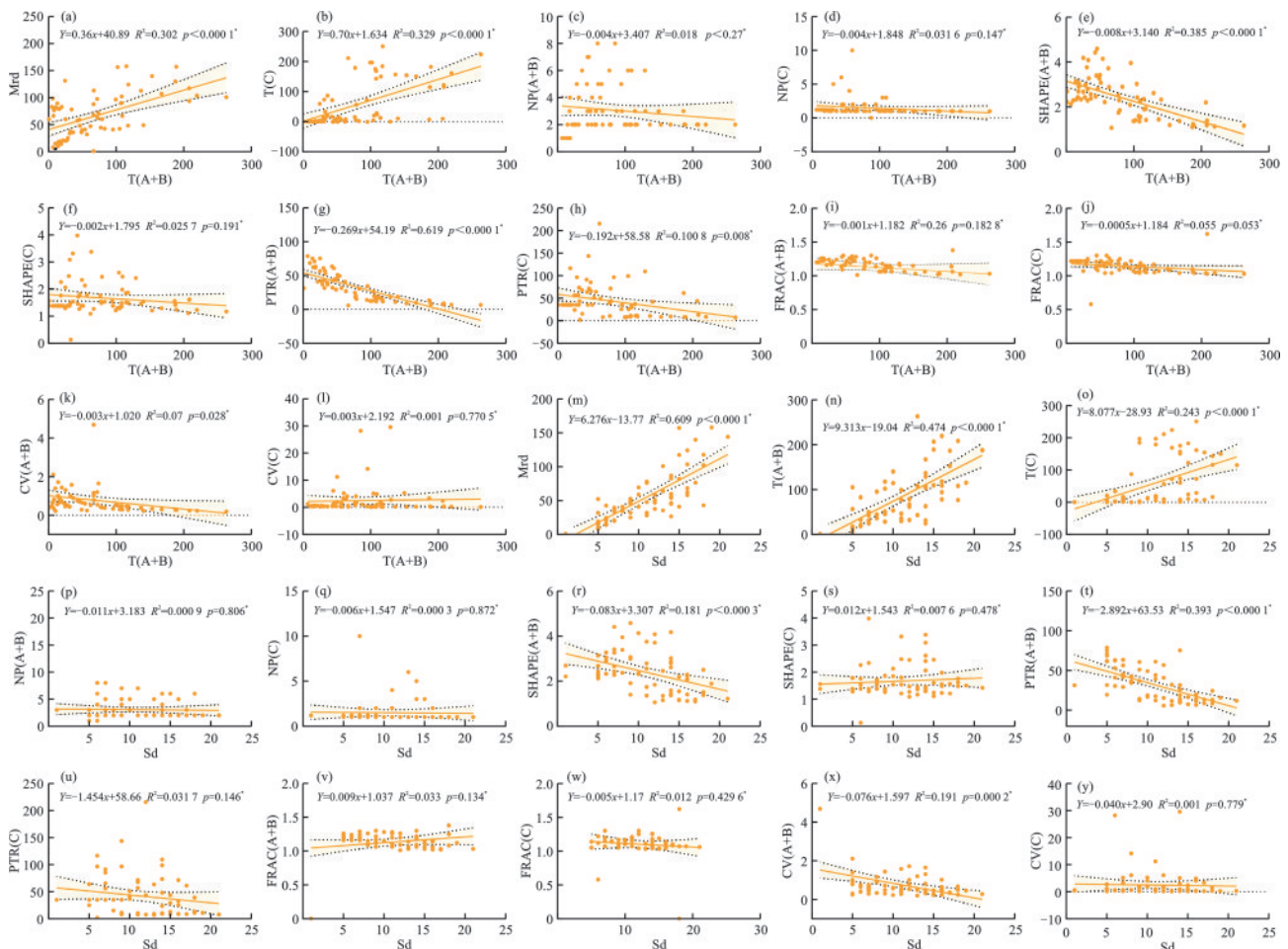


图6 地表易测指标与地下岩土结构指标的线性回归

Fig.6 Linear regression between easily measurable surface indicators and subsurface rock-soil structural indicators

3 讨论

3.1 土壤层及基岩强风化层的特征分布差异

土壤及基岩强风化层的厚度分布特征为由上坡向洼地以不均匀趋势递增,不同地貌部位表现出明确的梯度优势,与王发等^[12]在典型白云岩小流域的研究结果一致,其研究指出,洼地及坡脚处的表层岩溶带发育较厚,而坡面上部较薄,但以岩土剖面量化等效厚度特征,突出递增的非均匀性。而在非喀斯特地区的山地中也提到土壤层厚度随坡度变化而变化^[17-18]。同时,土壤层与基岩强风化层厚度间的显著正相关,进一步验证张君等^[19]的研究结论,土层覆盖的存在可延长保持水分时间和产生有机酸,从而加速下方基岩的风化剥蚀。

此次对岩土剖面的研究,与高密度电法(ERT)探测地下土壤-表层岩溶带的结构形成互补^[19]。该方法虽可实现大尺度连续探测,但却存在较大局限性。而本研究直接观测土壤层与基岩强风化层的厚度不连续性特征,可弥补物探在判别岩土界面形态连续性上的不足。具体来说,上坡坡度陡,受侵蚀和岩溶作用有限,土壤层等效厚度平均低于25 cm。基岩风化产物以中风化碎石为主,基岩强风化层无明显连续厚度特征,厚度20 cm以下结构总体以基岩为主导。且该区等效厚度与中坡、下坡、洼地相比具有显著差异,中坡区和下坡区等效厚度值变异波动性大,整体连续性受限。

通过定量分析斑块数量、形状指数及分形维数

参数,揭示岩土剖面的介质几何形态特征,与Yan等^[20]在对喀斯特浅层岩土剖面的裂隙定性描述如矩形、漏斗形等的分类研究相呼应,其研究重点在于裂隙的垂直形态分类,而此次研究进一步借鉴景观格局指数定量表征岩土结构的斑块形态特征。中坡区斑块数量最多、形状指数最大、结构最破碎,与Peng等^[21]从岩土剖面裂隙中发现土壤结构差异的认识具有相关性;魏兴琥等^[22]在粤北岩溶山地实地对岩土结构剖面进行研究,并建立土壤地下漏失评价指标,为岩土剖面研究提供直观的几何学支撑,本次定量研究在此基础上量化结构几何特征差异,具有重要参考价值。复杂的等效厚度周长比增加岩土界面的接触面积,从而有效促进Liu等^[23]研究的岩土界面优先流过程,在后续可考虑相结合的方式进一步论证。下坡及洼地的土壤层形状指数低、面积大、结构连续单一,解释该土壤在越厚的生境条件下具有更强的水分调蓄能力,比Luo等^[24]在岩土裂隙发现的土壤生境条件下水分储量更显著。该种基于矢量斑块的定量分析方法,能有效解决传统研究中不规则岩土空间结构定性描述多、定量对比难的问题,在具有清晰辨识度如颜色、质地介质层的岩土结构中都可适用该方法。

尽管下坡乔灌木植被数量和洼地相近,但洼地根系最大深度(Mrd)显著更大,表现出地上乔灌木数量相近而地下根系发育差异显著,土壤及基岩强风化层变厚可支撑植被根系生长,与陈洪松等^[11]提出的表层岩溶带与植被相互作用的机理相一致。植被通过生物作用如根系穿透、有机质添加改造土壤,促进风化层发育,而发育较厚的土壤及基岩强风化层又反过来支撑更多数量、根系发达的植被,与Yan等^[25]团队发现的裂隙土壤越多总钾含量越高,可促进植被获取钾生长具有相似性,并与早期Shouse等^[26]在阿肯色州瓦奇塔山脉的研究表明单棵树木通过根部穿透基岩的机制局部加厚风化层具有高度一致性,表明在喀斯特地区土壤及基岩强风化层厚度是构成植被扎根潜力的关键结构性约束。值得注意的是,土壤填充裂隙已被Zhang等^[27]证实,土壤存储与植被根系生长的重要通道,并与线性回归模型中(图6)结果相互联系发现,与上述已有研究进展一致的岩土裂隙现象(图7)。Meng等^[28]研究表明,基岩崩解产生微小裂隙导致土壤侵蚀,从而促进风化程度,容纳更多的水分、土壤及养分并反作用于植被生长发育。解释野外喀斯特白云岩岩土裂隙土壤层与植被根系的相互关系,实质上反映的是土岩结构对植被根系生长反馈的空间差异性。

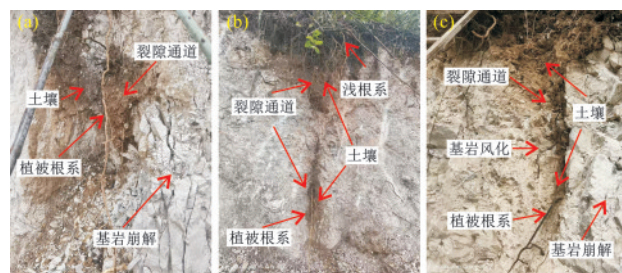


图7 研究区野外植被、土壤、基岩强风化层间多协同发育关系岩土剖面

Fig.7 Rock-soil profile illustrating multiple synergistic developmental relationships among field vegetation, soil, and strongly weathered bedrock layers within study area

3.2 地表易测指标预测地下岩土结构隐蔽指标的线性定量模型

通过容易获取的参数土壤等效厚度(A+B)、乔灌木数量表征典型喀斯特白云岩峰丛洼地的浅地表岩土剖面结构中难以直接观测、工作量大且获取成本更高的其他复杂指标,在一定程度上预估岩土空间结构分异特征趋势。根据简单线性回归模型显示,土壤层每增加10 cm(按照斜率算),促进植被最大根系深度平均生长增加约4 cm,土壤层形状指数下降0.09,土壤层等效厚度周长比为土壤层等效厚度的0.27倍。基岩强风化层等效厚度在模型预测上是土壤层的69%,土壤层等效厚度与斑块数量、厚度变异系数相关性不显著,表明岩土结构间差异性大、受侵蚀和岩溶作用因素控制强且不稳定,无法通过简单线性回归方程建立预测模型。在乔灌木数量(Sd)预估地下结构指标方面,每多1株乔灌木,使土壤层厚度变异系数降低0.076,与Shouse等^[26]研究结果一致。单个树木的生物力学效应可能增厚土层而降低厚度变异系数,尤其是在相对浅的土壤中最为明显。根系最大深度平均增加6 cm,土壤层SHAPE(A+B)降低0.08,表明植被数量增加,有利于促进地表土壤层厚度的积累。另外,其与FRAC(A+B)、FRAC(C)模型呈非线性关系,表明介质斑块边界复杂,无法通过该简单指标建立线性回归模型评估。综上所述,土壤层等效厚度(A+B)在预测(Sd)、(Mrd)、T(C)、SHAPE(A+B)、PTR(A+B)最好,而乔灌木数量(Sd)在预测NP(A+B)、NP(C)、SHAPE(C)、PTR(C)、CV(A+B)、FRAC(A+B)、FRAC(C)最差。

3.3 研究的不足和意义

本研究对典型白云岩峰丛洼地的68条横剖面、厚度、几何形态参数定量比较分析,阐述不同地貌部位土壤及基岩强风化层空间分异特征,并进一步解

释岩土结构与植被根系系统的相关性。建立典型白云岩峰丛洼地 5 m 宽度岩土剖面微地形下土壤等效厚度及乔灌木植被数量简单线性回归预测模型,为理解喀斯特浅地表空间结构差异性比较提供新的理论视角,并给喀斯特地区生态恢复明确地貌部位分区治理提供科学依据。尽管得出有价值的见解,但有限的剖面研究,还需要大量同类型典型峰丛洼地相关数据的扩展支撑,以全面评估喀斯特关键带土壤及基岩强风化层的空间分异特征。

由于该研究集中于典型白云岩峰丛洼地微地貌单元,岩性单一,几何形态指标存在尺度敏感性,尚不能完全代表喀斯特区多岩性、多气候、不同剖面尺度及地貌背景条件下的普适格局。在广东粤北、贵州、云南等中国喀斯特其他岩性(如石灰岩)地区,在不同尺度剖面尺度下也取得具有差异性的研究成果^[22-24]。突显西南喀斯特地区不同岩性发育下的浅地表结构存在高度异质性。未来的研究不仅要侧重于对比不同岩性(白云岩、石灰岩、碎屑岩)地貌部位的岩土结构或岩土裂隙的几何形态量化特征分析,还可对比喀斯特地区和非喀斯特地区岩土结构的差异,以更好地诠释喀斯特地区的脆弱性。尽管有很多局限性,但该类发现为分析白云岩峰丛洼地中土壤及基岩强风化层空间分异特征提供有价值的见解。

4 结 论

1) 基岩强风化层等效厚度是土壤层等效厚度的 69%,二者均表现为沿坡向下不均匀递增的趋势。其中上坡土层厚度低于 25 cm,基岩强风化层缺乏明显的连续性;中坡和下坡斑块数量多、形状指数高,呈岩土交错镶嵌;洼地介质层厚度大,连续性最强。

2) 乔灌木植被数量与根系发育深度受地下岩土空间结构的复杂程度及厚度影响,最大根系深度与土壤层及基岩强风化层的等效厚度呈正相关。

3) 简单线性回归模型结果显示,利用土壤层等效厚度(T)和乔灌木植被数量(S_d)易测指标,能够有效预测根系最大深度、等效厚度、形状指数、等效厚度周长比和变异系数等地下隐蔽结构特征指标。

参考文献:

- [1] Wang Sheng, Yan Yan, Zhao Yinjun, 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.
- [2] Zhang Jun, Wang Sheng, Fu Zhiyong, et al. Soil thickness controls the rainfall-runoff relationship at the karst hillslope critical zone in southwest China [J]. *Journal of*

Hydrology, 2022, 609: e127779.

- [3] 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 Xi, Zhang Zhicai. 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.
- [4] 陈洪松,岳跃民,王克林.西南喀斯特地区石漠化综合治理:成效、问题与对策[J].*中国岩溶*, 2018, 37(1): 37-42.
Chen Hongsong, Yue Yuemin, Wang Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of southwestern China: Achievements, problems, and countermeasures [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 37-42.
- [5] Qiu Sijing, Peng Jian, Quine T A, et al. Unraveling trade-offs among reforestation, urbanization, and food security in the South China karst region: How can a hinterland province achieve SDGs? [J]. *Earth's Future*, 2022, 10(12): e2022EF002867.
- [6] 袁道先.我国岩溶资源环境领域的创新问题[J].*中国岩溶*, 2015, 34(2): 98-100.
Yuan Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 98-100.
- [7] Wang Fa, Zhang Jun, Lian Jinjiao, et al. Spatial variability of epikarst thickness and its controlling factors in a dolomite catchment [J]. *Geoderma*, 2022, 428: e116213.
- [8] 姜光辉,刘凡,王奇岗,等.基于表层岩溶带调控的峰丛洼地低影响开发构建[J].*中国岩溶*, 2022, 41(2): 165-173.
Jiang Guanghui, Liu Fan, Wang Qigang, et al. Low impact development construction of peak cluster depression based on regulation of epikarst zone [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 165-173.
- [9] 曹建华,袁道先,潘根兴.岩溶生态系统中的土壤[J].*地球科学进展*, 2003, 18(1): 37-44.
Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Pan Genxing. Some soil features in karst ecosystem [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 37-44.
- [10] 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 Jun, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, 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.
- [11] 陈洪松,张君,连晋姣,等.西南喀斯特关键带水文过程与植被的相互作用[J].*应用生态学报*, 2026, 37(1): 1-14.
Chen Hongsong, Zhang Jun, Lian Jinjiao, et al. Interactions between hydrological processes and vegetation in karst critical zone, Southwest China [J]. *Chinese Journal*

- of Applied Ecology, 2026, 37(1): 1-14.
- [12] 王发, 聂云鹏, 陈洪松, 等. 典型喀斯特白云岩小流域土壤-表层岩溶带厚度空间异质性特征[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 306-314.
- Wang Fa, Nie Yunpeng, Chen Hongsong, et al. Spatial heterogeneity characteristics of soil-epikarst thickness in a typical karst dolomite small watershed[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 306-314.
- [13] Cheng Qinbo, Chen Xi, Tao Min, et al. Characterization of karst structures using quasi-3D electrical resistivity tomography[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(9): e285.
- [14] Zhang Jun, Wang Sheng, Fu Zhiyong, et al. Regulation of preferential flow by soil thickness on small hillslopes with complex topography through intensive high-frequency soil moisture monitoring [J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52(5): e2024GL112674.
- [15] Justeau-Allaire D, Ibanez T, Vieilledent G, et al. Refining intra-patch connectivity measures in landscape fragmentation and connectivity indices [J]. Landscape Ecology, 2024, 39(2): e24.
- [16] 赵卫权. 喀斯特湖库流域景观生态风险演变与预测[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2025.
- Zhao Wei-quan. Evolution and prediction of landscape ecological risks in karst lake and reservoir watershed [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2025.
- [17] Rasmussen C, Pelletier J D, Troch P A, et al. Quantifying topographic and vegetation effects on the transfer of energy and mass to the critical zone [J]. Vadose Zone Journal, 2015, 14(11): 1-16.
- [18] Donaldson A M, Zimmer M, Huang M H, et al. Symmetry in hillslope steepness and saprolite thickness between hillslopes with opposing aspects[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2023, 128(7): e2023JF007076.
- [19] 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.
- Zhang Jun, Fu Zhiyong, Chen Hongsong, 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.
- [20] Yan Youjin, Dai Quanhong, Jin Li, et al. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China [J]. Catena, 2019, 174: 48-58.
- [21] Peng Xudong, Wang Xiangdong, Dai Quanhong, et al. Soil structure and nutrient contents in underground fissures in a rock-mantled slope in the karst rocky desertification area [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 79(1): e3.
- [22] 魏兴琥, 刘淑娟, 徐喜珍, 等. 粤北岩溶山地土壤地下漏失程度评价指标构建探讨[J]. 热带地理, 2021, 41(5): 1000-1008.
- Wei Xinghu, Liu Shujuan, Xu Xizhen, et al. Grading standard for determining underground soil leakage in a mountain with karst topography in the north of Guangdong Province[J]. Tropical Geography, 2021, 41(5): 1000-1008.
- [23] Liu Tingting, Peng Xudong, Dai Quanhong, et al. Role of the preferential flow at rock - soil interface in the water leaking process in near-surface fissures filled with soils in the karst rock desertification area[J]. Applied Water Science, 2022, 12(9): e208.
- [24] Luo Jie, Luo Weixue, Liu Junting, et al. Karst fissures mitigate the negative effects of drought on plant growth and photosynthetic physiology[J]. Oecologia, 2024, 205(1): 69-80.
- [25] Yan Youjin, Dai Quanhong, Wang Xiangdong, et al. Response of shallow karst fissure soil quality to secondary succession in a degraded karst area of southwestern China[J]. Geoderma, 2019, 348: 76-85.
- [26] Shouse M, Phillips J. Soil deepening by trees and the effects of parent material[J]. Geomorphology, 2016, 269: 1-7.
- [27] Zhang Zhiyong, Fan Baomin, Song Chao, et al. Advances in root system architecture: Functionality, plasticity, and research methods [J]. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(1): 15-24.
- [28] Meng Qingmei, Wang Sheng, Fu Zhiyong, et al. Soil types determine vegetation communities along a toposequence in a dolomite peak-cluster depression catchment [J]. Plant and Soil, 2022, 475(1): 5-22.