

余磊, 范时杰, 梁洪, 等. 川西前陆盆地红层岩溶地貌形态特征及其地质意义[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 532-543, 571.

DOI: 10.11932/karst2025y006

川西前陆盆地红层岩溶地貌形态特征及其地质意义

余磊, 范时杰, 梁洪, 宇天奇, 王博, 麦高飞

(四川水发勘测设计研究有限公司, 四川 成都 610015)

摘要: 红层岩溶在川西前陆盆地的山地中广泛发育, 查明红层岩溶的形成及演化模式, 对认识红层岩溶发育具有重要意义。基于引大济岷工程野外调查数据, 通过数理统计和数字地形分析的方法, 量化了红层岩溶形态的参数特征, 总结其空间发育规律, 最后对红层岩溶演化模式进行了探讨。结果表明: 岩溶泉主要分布在 797~852 m、962~1 017 m 和 1 037~1 292 m, 岩溶洼地主要分布在 775~875 m、1 075~1 175 m 和 1 575~1 675 m, 红层岩溶的发育具有高程聚集效应; 洼地长轴、短轴、周长和面积均呈显著的左偏分布特征, 表明在红层中发育的洼地比在碳酸盐岩中发育的规模更小, 形态也更简单; K 函数、核密度和面积高程积分的空间分布规律指示了红层岩溶发育严格受构造和岩性控制, 研究区地貌整体处于中年阶段, 受构造抬升影响, 构造裂隙发育和岩体可溶性强的区域正处于地貌回春过程中。相关成果揭示了红层岩溶与碳酸盐岩岩溶在形成演化模式上有显著差异, 丰富了红层岩溶研究的理论知识体系, 为该地区引调水工程中可能遭遇的岩溶灾害分析提供了理论支撑。

关键词: 红层岩溶; 引大济岷; 岩溶形态特征; 川西前陆盆地; 龙门山断裂带

创新点: 以数理统计及数字高程模型的分析阐明红层岩溶与碳酸盐岩岩溶在演化模式上的显著差异, 以多源数据揭示红层岩溶分布受构造与岩性控制, 通过面积高程积分值的空间分布及野外现场勘察分析出部分地区处于地貌回春过程中。

中图分类号: P931.5 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2025) 03-0532-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

红层岩溶是指在胶结物为钙质或其它可溶性物质, 或含有碳酸盐岩砾石成分的红色陆相岩层中发育的岩溶^[1]。相关研究表明, 红层岩溶作为一种独特的岩溶类型, 其地貌特征、发育驱动力、演化模式均与碳酸盐岩中发育的岩溶存在一定差异^[2]。碳酸盐岩岩溶的发育理论及应用研究已取得深厚理论基础和学界广泛共识^[3-4], 但红层岩溶的研究尚未得到学界充分关注, 相关研究资料匮乏。

当前, 关于红层岩溶的研究大都围绕岩相古地

理、沉积环境、岩性、构造等方面开展, 以探讨红层岩溶发育的机理与特征为主^[5-12]。少部分以红层岩溶工程案例^[13-14]、灾害风险^[15-16]、岩溶水文^[17-19]、自然景观^[20]等方面为切入点展开研究。关于红层岩溶发育规律、地貌空间分布特征、演化阶段量化研究, 在国内相关文献资源更为稀缺。国外针对与红层岩溶具有相似定义的假岩溶(Pseudo-karst)现象的相关研究, 也仅局限于地貌因子的量化分析^[21-25], 尚未对各地貌因子所蕴藏的岩溶、地质、水文信息进行深入挖掘。

川西前陆盆地西南缘因其独特的地理位置和沉

第一作者简介: 余磊(1996—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事岩溶地质、水文地质研究工作。E-mail: 1279552783@qq.com。

通信作者: 范时杰(1995—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事岩溶地质、水文地质研究工作。E-mail: 905950573@qq.com。

收稿日期: 2024-07-29

积环境,有面积红层出露。其中,龙门山断裂带地区,因其复杂的物质来源和频繁的构造活动,地层中富含钙质胶结物或钙质角砾(图1)。在四川盆地丰富的水系和温暖湿润的气候影响下,红层中发育有丰富多样的岩溶形态(图2)。因此,在该区域的交通和水利工程建设过程中常面临红层塌陷、红层岩溶涌突水等工程难题^[26]。本文以位于龙门山断裂带南段的莲花山地区为例,结合引大济岷引调水工程在该区实测的各类红层岩溶基础数据,综合运用地表调查、数理统计与数字地形分析等技术手段,对红层岩溶形态参数、地貌量化因子及空间分异特征进行分析,挖掘红层岩溶形态及地貌中所蕴含的岩溶地质信息,探讨红层岩溶与碳酸盐岩岩溶之间的异同。以期为相关工程中面临的红层岩溶工程难题提供地貌学和地质学的理论支撑,丰富红层岩溶的理论知识体系。

1 研究区概况

龙门山断裂带位于川西前陆盆地西南缘,是青藏高原东侧边界之一,其北西侧为松潘—甘孜褶皱带,南东侧为扬子地台。晚三叠世前,龙门山断裂带处于被动大陆边缘的拉张环境。晚三叠世末期,受印支期和喜马拉雅期等大型造山运动影响,逐渐转变为前陆盆地挤压环境,在此期间龙门山构造带发生强烈的冲断隆升^[27]。随着大巴山、米仓山、龙门山等造山带的周期性活动,龙门山地区沉积中心还不断发生着转换,导致岩层相变迅速且显著。该区分布着自前寒武系到三叠系的变质岩、海相沉积岩、杂岩以及少量火成岩^[28]。强烈的构造隆升、复杂多变的沉积环境共同造就了区域岩体空间展布的复杂性。

引大济岷工程是解决成渝地区双城经济圈环成都经济区的重大水资源配置工程,工区位于川西前陆盆地西缘,将以多隧洞间断跨越龙门山断裂带。在工程勘察过程中,发现该区红层岩溶发育规模之大、数量之多,在红层中极为罕见,四川雅安芦山县的莲花山地区最为典型。该地位于龙门山断裂带南端,出露有白垩系上统灌口组(K_{2g} , 钙质砾岩)、夹关组(K_{js} , 粉砂岩),白垩系下统天马山组(K_{1t} , 钙质砂岩),侏罗系上统蓬莱镇组(J_{3p} , 细砂岩-粉砂岩)、遂宁组(J_{3sn} , 钙质细砂岩-粉砂岩),以及侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s} , 含钙质细砂岩-粉砂岩)等地层。历经多次大型造山运动后,南宝山向斜与高家场背斜由南西至北东贯穿该

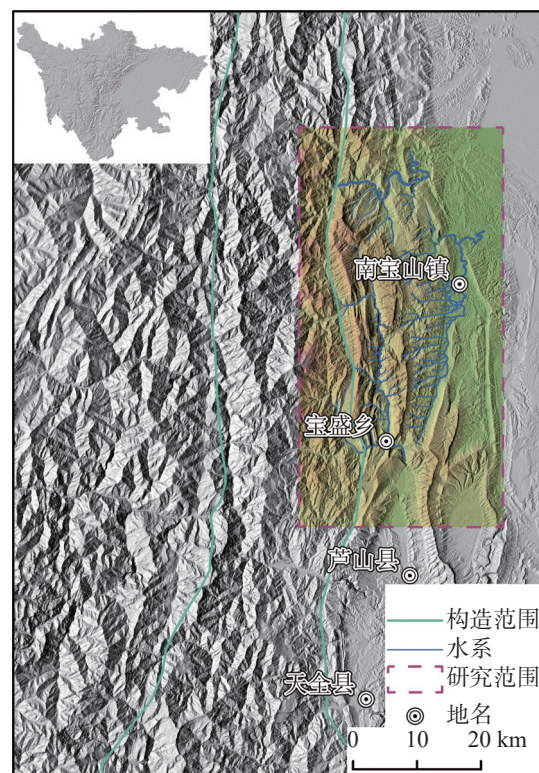


图1 区域位置图

Fig. 1 Location map of the study area

区域,强烈的构造变动导致岩体发育大量构造裂隙。该区域属于大渡河支流—青衣江流域,内有邛江河、玉溪河、西河等多条河流沿着构造线方向径流。

岩溶的发育得益于岩石中的可溶矿物成分、通道条件、溶质以及流动的水^[29]。区域岩体中含有的钙质可溶成分和极为发育的构造裂隙,使得研究区红层具备了岩溶发育的物质基础及优越的通道条件,温暖多雨的气候条件形成了丰富的水系,区内山地较大的高程差提供了水动力条件。优越的岩溶发育条件,使得莲花山南端的红层中发育有极为丰富且典型的洼地(图2c)、落水洞(图2b)、溶洞(图2a)、岩溶泉(图2d)等岩溶形态(图2),在龙门山地区甚至川西前陆盆地的红层中也具有代表性。

2 红层岩溶形态空间分布研究

2.1 研究方法及其结果

2.1.1 数据来源

2.1.1.1 人工地质调查

目前对岩溶泉、洼地、落水洞、溶洞等岩溶形态的调查,有遥感、物探解译之类的先进技术方法^[30],

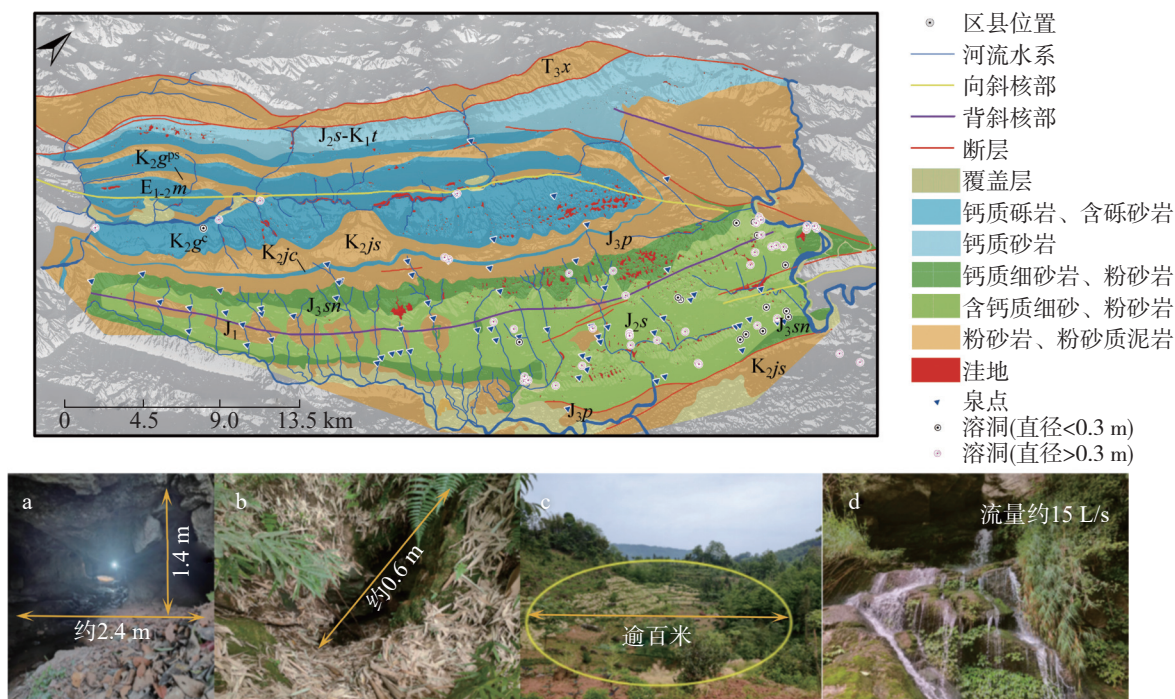


图 2 区域地质简图及典型岩溶形态

Fig. 2 Regional geological sketch and typical karst morphology

但在植被茂密区,人工调查仍是最为直接、准确的手段。为对研究区各类红层岩溶形态进行全面详尽的调查,采用多批次、长时间的野外测绘及访问调查工作,其间,仅在莲花山地区就查明泉点 68 余处、溶洞 54 余个、洼地若干,其空间位置采用 i93 VISUAL IMU-RTK GNSS 接收机测定,图区玉溪河两岸地形陡立,人工调查困难,以无人机测绘和调查走访为主。

2.1.1.2 数字地形解译

山区地下水补给量主要受地貌及岩性、构造等因素影响,岩溶洼地作为最典型的汇水构造,其空间分布格局严格受控于地质构造背景,可体现山区红层岩溶发育规律。随着数字地形分析技术的发展,岩溶地貌的调查,已由传统野外测绘,逐渐转为基于数字地形解译,辅以人工复核的工作方式。本文数字地形数据,部分采用无人机测绘的 5 m 精度数据,将其与 30 m DEM 数据(数据下载自美国地质调查局(<https://lpdaac.usgs.gov>))镶嵌而成。岩溶洼地,基于 ArcGIS 软件采用填洼溢流法^[31]提取,结合现场调查及目视解译进行剔除、复核,最终于红层中提取岩溶洼地 1066 个。

2.1.2 岩溶形态参数量化及分析方法

2.1.2.1 高程分布

高程作为岩溶形态的重要参数指标之一,与岩

溶发育期次具有极强相关性,是划分岩溶期次的重要依据。全局莫兰指数(Global Moran's I, I_G)被广泛用于度量地理对象空间自相关性和聚散特征,可度量岩溶形态在垂向高程上是否具备空间聚集特征和聚集程度^[32]。

2.1.2.2 洼地形态参数

洼地是红层岩溶区和典型岩溶区地下水最主要的补给形态,同时也是最能反映岩溶发育规律的岩溶形态之一,各因素对岩溶发育的影响会通过洼地的形态参数及空间分布格局体现。

2.1.2.3 红层岩溶形态的空间分布

Ripley's K 函数是分析点状(近点状)属性空间分布格局最常用的工具之一^[33],核密度可直观反映岩溶形态的聚散特征。各岩溶形态在分析尺度上可近视为点状要素,本文使用 K 函数(Ripley's K)及核密度对红层岩溶的平面分布格局进行分析。K 函数观测值曲线高于预测值曲线,红层岩溶形态在空间上呈聚集状态;观测值曲线低于预测值曲线,在空间上呈离散状态。面积高程积分值(Hypsometric index, HI)是美国地貌学家 Strahler 于 1952 年提出的该指数以二维曲线反映地表物质相对侵蚀量^[34-35],并对 Davis 地貌侵蚀循环理论中提出的地貌演化阶段进行量化描述,是目前划分流域地貌演化阶段最为

有效的工具之一,其认为 $HI \in [0,0.35]$, 流域处于老年期; $HI \in (0.35,0.6)$, 流域处于中年期; $HI \in [0.6,1]$, 流域处于幼年期^[36-38]。HI 值的计算主要有积分曲线法、体积比例法及起伏比法三种。相关研究显示, 三种计算方法结果误差较小。考虑到研究区划分的小流域较多, 选择便捷的起伏比法计算小流域 HI 值^[39]。选取的红层岩溶形态的量化参数及意义见表 1。

2.2 结果分析

2.2.1 高程分布特征

研究区岩溶洼地与岩溶泉(或溶洞)高程的莫兰指数分别为 0.677425 和 0.364625, Z 值通过 0 假设检验(图 3), 表明红层岩溶形态高程在垂向上具备聚集状态。据统计显示(图 2): 岩溶洼地可观察到三个聚集分布的高程区间, 分别为 775~875 m、1075~1 175 m 和 1 575~1 675 m, 分别占 13.04%、25.05% 和 10.41%; 岩溶泉(或溶洞)亦存在三个较为聚集分布的高程区间, 分别为 797~852 m、962~1 017 m 和

1 037~1 292 m, 分别占 11.90%、13.49% 和 10.32%。

2.2.2 洼地形态参数特征

洼地是岩溶区(红层岩溶区)主要汇水构造, 在岩溶发育过程中各影响因素对岩溶(红层岩溶)地貌演化的影响结果, 会在洼地的形态参数中反映。统计显示(图 4), 洼地的长轴、短轴、周长和面积均表现出显著的左偏分布, 其中, 超过 90% 的洼地长轴和短轴长度分别小于 200 m 和 100 m, 洼地周长小于 550 m, 面积小于 10 hm²。

长轴、短轴、周长和面积作为洼地的基本形态参数, 其反映的岩溶地质信息有限。为此, 本文引入洼地展布方向、偏心率(E)、紧度系数(T)三个参数, 进一步探索洼地形态中所蕴藏的岩溶地质信息。如图 5 所示, 洼地展布方向主要集中在 0°~10°, 同时在 40°~50°、80°~90°、270°~280°、310°~320°、350°~360° 等五个方向上也有少量分布, 与野外测窗实测节理在方向具有很好的一致性, 但数量上存在一定差异, 应是由于实测解理数据量有限导致。

表 1 红层岩溶形态的量化参数及意义
Table 1 Quantitative parameters and significance of red-bed karst morphology

指标类型	指标名称	量化方式	形态参数的意义
高程分布参数	泉点、溶洞高程	中绘i80 GNSS接收机测定泉点、溶洞出露点的海拔高程	
	洼地高程	ArcGIS平台Extract Multi Values To Points工具	洼地最低点海拔高程
	全局莫兰指数(IG)	ArcGIS平台Spatial Autocorrelation工具	度量地理对象的空间自相关程度和聚散特征。IG ∈ (0,1], 空间聚集形态; IG=0,随机分布; IG ∈ [-1,0),空间离散形态; 绝对值越大, 自相关性越显著
	洼地长轴、短轴	ArcGIS平台Minimum Bounding Geometry工具	长轴(L): 洼地外接最小矩形的长边 短轴(W): 洼地外接最小矩形的短边
洼地形态参数	洼地展布方向	ArcGIS平台Calculate Polygon Main Angle工具	洼地长轴的走向, 反映洼地发育趋势方向
	偏心率(E)	公式 $E = \sqrt{1 - \frac{(W/2)^2}{(L/2)^2}}$ 计算	反映洼地多边形的标准程度。E=0, 洼地外接多边形为正多边形, E ∈ (0,1), 数值越大, 外接多边形越狭长 ^[32]
	面积(A) 周长(S)	ArcGIS平台直接计算	洼地最大封闭等高线的投影面积和长度
	紧度系数(T)	由公式 $T = \frac{0.028\ 2S}{\sqrt{A}}$ 计算	洼地实际周长与相同面积标准圆周长之比。T ∈ (1,∞], T 值越大, 洼地外接多边形边缘越复杂 ^[40]
红层岩溶形态 空间分布指标	Ripley's K函数	ArcGIS平台Multi-Distance Spatial Cluster Analysis工具	反映红层岩溶形态分布状态。K观测值>HiConfEnvz值(Monte Carlo空间模式检验上限), 具备显著统计性, 反之为不具备 ^[33]
	核密度	ArcGIS平台Kernel Density工具	点状数据空间分布状态, 以描述红层岩溶形态的空间分布特征
	面积高程积分值(HI)	ArcGIS平台实现	以二维曲线或数值反映地表物质相对侵蚀量, 可用以量化流域发育阶段, $HI = \frac{(\text{流域平均高程} - \text{流域最小高程})}{(\text{流域最大高程} - \text{流域最小高程})}$ 。

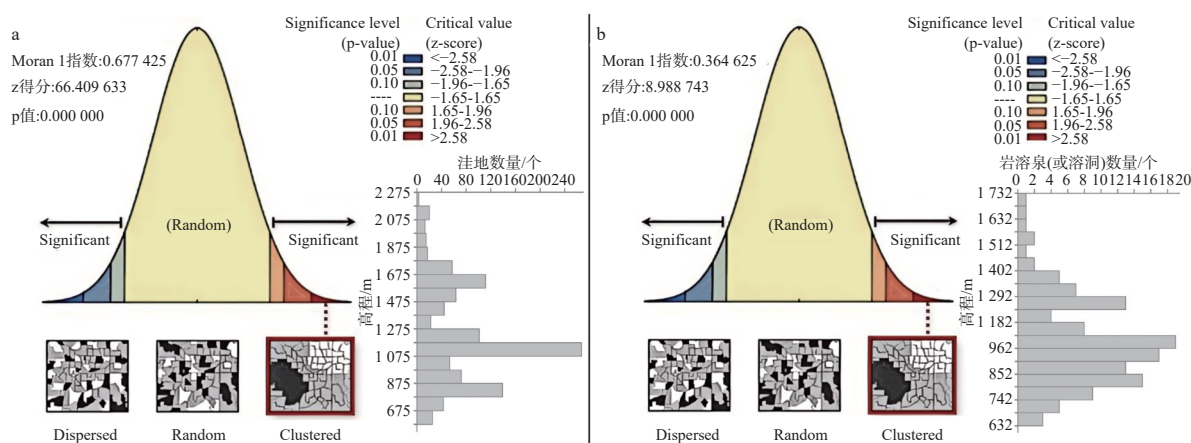


图3 岩溶洼地(a)、岩溶泉或溶洞(b)高程统计及莫兰指数

Fig. 3 Elevation statistics and Moran's index of karst depression (a), karst spring or karst cave (b)

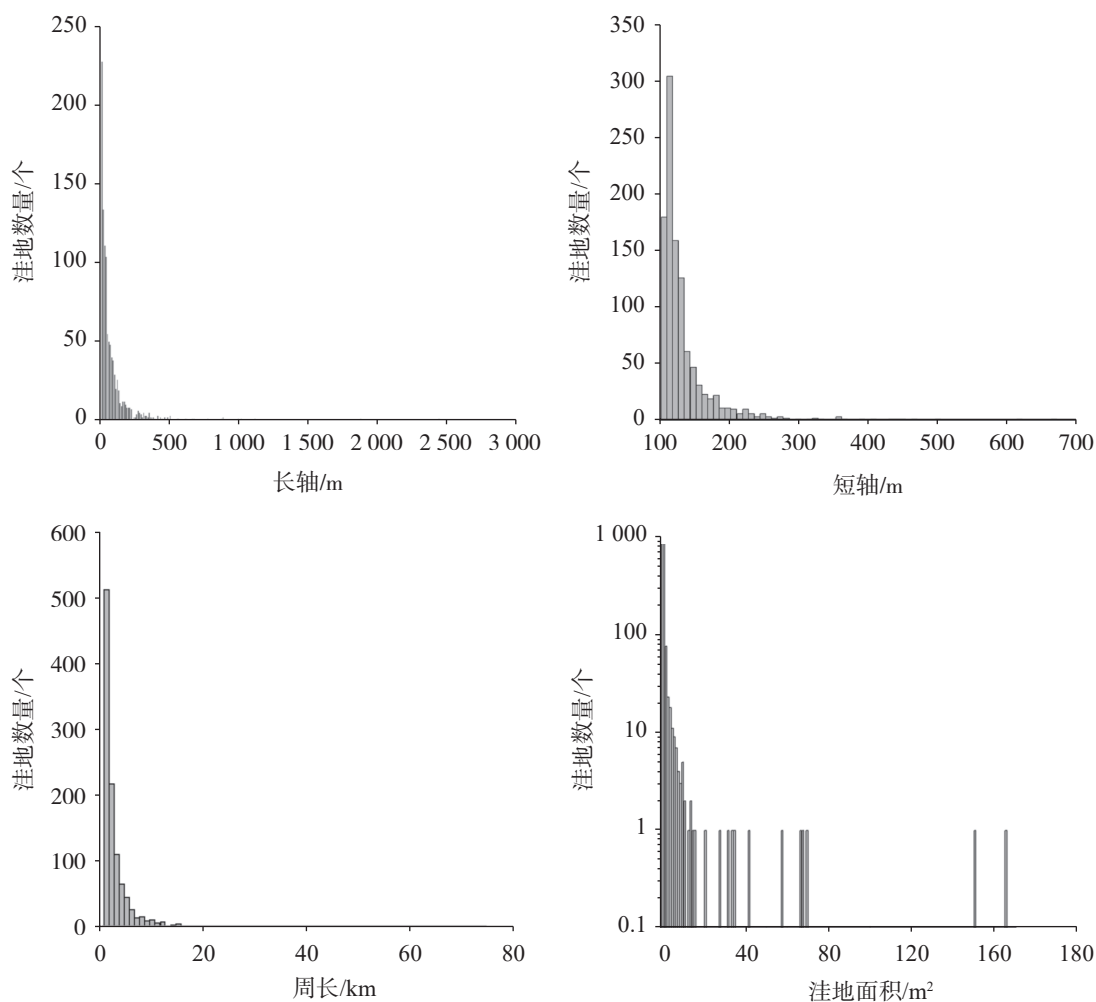


图4 洼地形态参数统计

注: 洼地面积与数量统计柱状图(右下), 纵坐标为对数刻度。

Fig. 4 Statistics of morphological parameters of depressions

偏心率(E)与紧度系数(T)均能一定程度上反映岩溶演化的趋势, 分别体现了洼地形态中心与理想正多边形中心的差距以及洼地形态与标准圆的差异。

偏心率(E)通过长、短轴计算得出, 更直观地反映了红层岩溶发育的趋向和强度差异。紧度系数(T)则基于面积和周长计算得出, 还能在一定程度上揭示

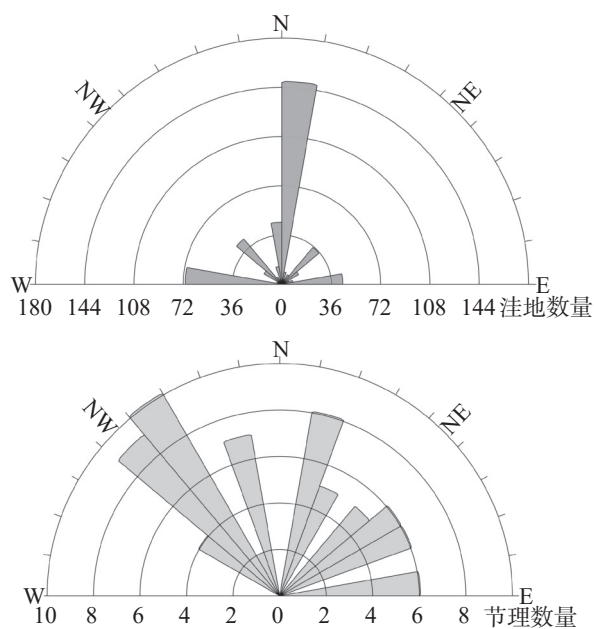


图5 洼地展布方向与节理走向统计

Fig. 5 Statistics of depression distribution orientation and joint trend

洼地边缘的复杂程度。数据统计显示(图6), 区内洼地偏心率(E)绝大多数大于0.45, 主要分布在0.75~1.00的范围内; 紧度系数(T)几乎全部小于1.8, 主要集中在1.0~1.6的区间。表明研究区的洼地主要为类圆状至椭圆状, 且洼地边缘复杂程度较低。

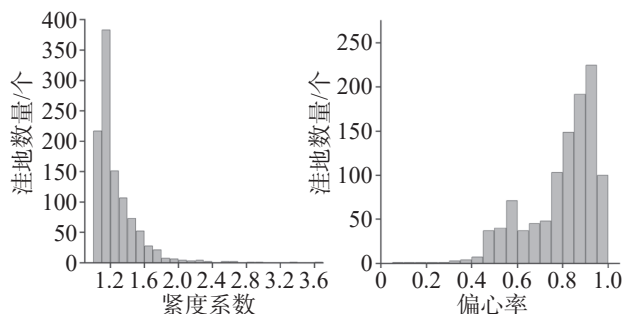


图6 洼地偏心率与紧度系数统计

Fig. 6 Statistics of depression eccentricity and compactness coefficient

2.2.3 红层岩溶形态空间分布特征

2.2.3.1 K函数分析

由图7可知, 研究区内红层岩溶洼地的K函数观测值曲线高于K预测值曲线, 且K值均大于检验上限, 指示岩溶洼地在区内呈现聚集状态, 且在1.677 km分析尺度时聚集程度最显著(即为核密度分析最优尺度), 据曲线趋势分析K观测值会在大

于12 km后逐渐低于K预测值, 指示岩溶洼地聚集状态对分析尺度具有依赖性。岩溶泉(或溶洞)的K函数在0~6.5 km尺度范围内K观测值曲线高于K预测值曲线, 且K值大于检验上限, 在研究区呈现聚集状态, 并在2.1 km分析尺度时聚集程度最显著。当分析尺度大于6.5 km后, K观测值曲线低于K预测值曲线, 指示其在研究区呈现离散状态, 结果亦表明岩溶泉和溶洞的聚集状态具有尺度依赖性。

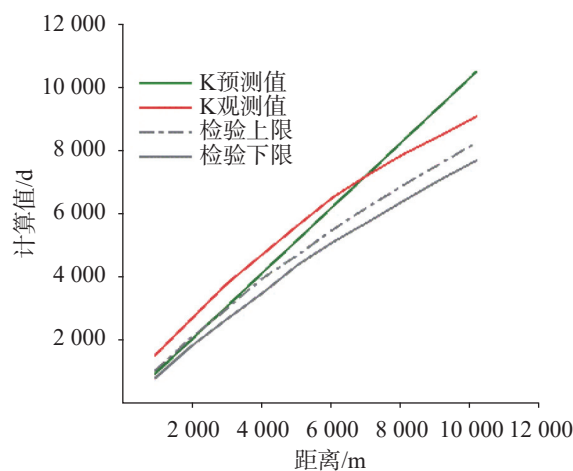
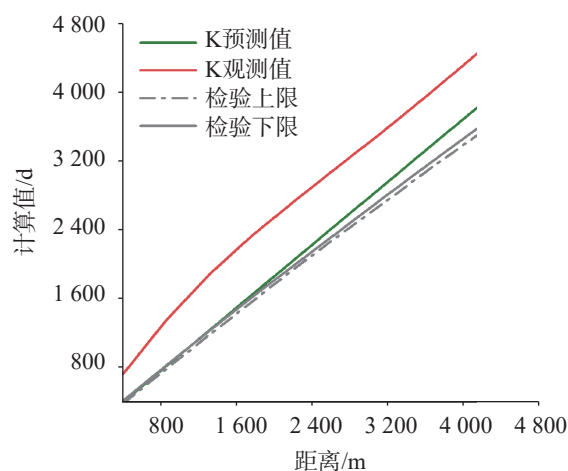


图7 Ripley's K函数分析

注: 岩溶泉(或溶洞)K函数(左), 红层岩溶洼地K函数(右)。

Fig. 7 Analysis of Ripley's K function

2.2.3.2 核密度分析

据K函数分析得出的最优分析尺度, 绘制了岩溶点平面分布核密度图(图8), 以直观分析岩溶点的平面分布格局。研究区域内, 红层岩溶洼地呈多点聚集分布特征, 以北中部聚集状态最显著, 核密度最高可达 $11.3 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 。结合岩溶发育的要素分析, 红层岩溶洼地聚集至少需满足以下条件之一: ①岩体可溶性较强; ②裂隙发育区。岩溶泉、溶洞在图幅南

东侧西河、邕江河附近呈多点聚集分布特征,最大核密度为 $0.87 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 。这些聚集区附近岩体可溶性较差,构造裂隙密布,降雨补给入渗后,以南宝山背斜为界,向南东侧河谷附近排泄,泉点具有补给快、径流短、流量小、多点分布的特点。北西侧排泄点较少,调查过程中通过现场远观及无人机测绘,发现北西侧玉溪河谷两岸深切沟谷密布,推测北西侧降雨补给后沿层下渗径流,经多条深切沟谷集中排泄,与调查访问中西侧泉点的中长距离径流,集中排泄的特点相符。

2.2.3.3 面积高程积分值(HI 值)

HI 值是流域受各种因素改造结果的综合反映,这些因素大多具有空间分异性,则 HI 值也应具有显著的空间依赖性。因此,流域划分尺度对 HI 值空间分布具有较大影响。研究表明,小尺度流域的 HI 值主要体现岩体抗侵蚀能力对地貌的影响,大尺度流域的 HI 值则主要反映构造条件对地貌的影响^[41]。相关研究亦证实,划分流域时,阈值小于 1 km^2 的集水流域,HI 值主要受岩性控制;阈值大于 2 km^2 的集水流域,HI 值主要受构造影响^[42]。

为进一步探讨研究区红层岩溶地貌演化阶段的空间分布特征及影响因素,本研究选取 0.5 km^2 和 2.5 km^2 为阈值,对小流域进行提取,并计算相应的面积高程积分(HI)值,并结合前人研究方法,选择以反距离插值生成研究区 HI 值分布图(图 9)。按 0.5 km^2 为阈值提取子流域 927 个,老年期子流域 303 个,面积占比 31.8%;中年期子流域 549 个,面积占比 61.1%;青年期子流域 75 个,面积占比 7.1%。 2.5 km^2 为阈值提取子流域 202 个,老年期子流域 86 个,面积占比 41.3%;中年期子流域 110 个,面积占比 55.6%;青年期子流域 5 个,面积占比 3.1%。

阈值为 2.5 km^2 的 HI 空间分布图显示,左侧可溶性强的向斜区整体为中年阶段($\text{HI} \in [0.35, 0.6]$),部分子流域处于老年阶段($\text{HI} \in [0, 0.35]$),右侧可溶性弱的背斜区子流域整体处于老年阶段($\text{HI} \in [0, 0.35]$),部分子流域处于中年阶段($\text{HI} \in [0.35, 0.6]$)。左侧流域地貌演化阶段明显低于右侧。阈值为 0.5 km^2 的 HI 空间分布图显示,高家场背斜和左侧岩体可溶性较强的区域处于中老年阶段($\text{HI} \in [0.35, 0.86]$),右侧岩体可溶性较弱区域和南宝山向斜区域 HI 值较低,地貌演化阶段较高。

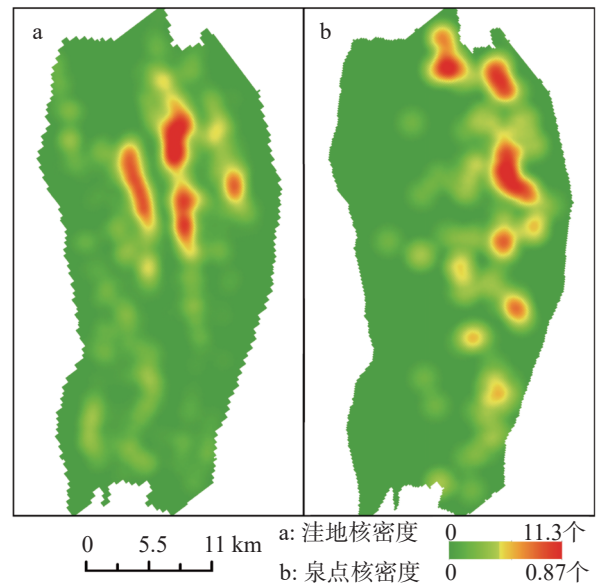


图 8 核密度分布图

Fig. 8 Kernel density distribution map

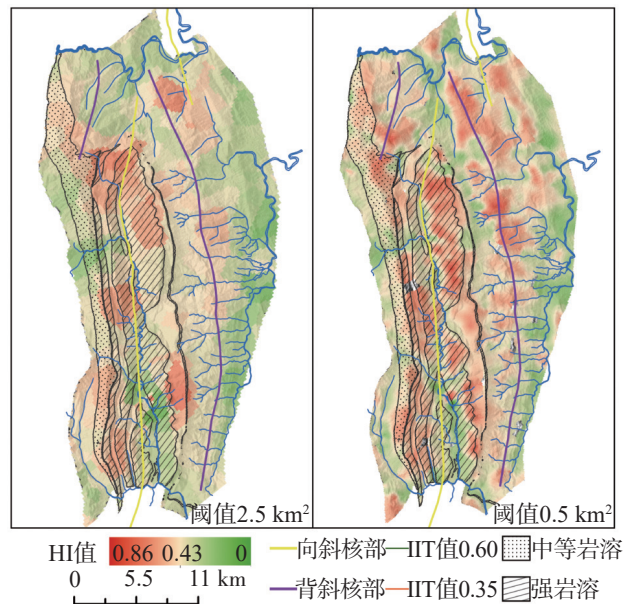


图 9 HI 空间分布图

Fig. 9 HI spatial distribution map

3 讨论

地貌是地质体本身在内外地质作用力共同刻画出的地形景观。地貌形态参数中,包含了多种因素对地质体影响的模式以及地貌演化的内在规律。

3.1 地貌特征反映的岩溶地学意义

数理统计显示,红层岩溶洼地周长和面积呈现出明显的左偏特征,表明发育在红层中的岩溶洼地

以小规模为主。长轴方向与构造裂隙方向吻合,说明红层岩溶发育特征与典型岩溶相似,其发育方向与构造裂隙密切相关^[43]。洼地偏心率统计数据显示,研究区洼地形态大都呈椭圆—狭长多边形;研究区紧度系数主要分布在1.0~1.6之间,相较于典型岩溶洼地^[44],红层岩溶洼地边缘复杂程度低于典型岩溶洼地,形态更加简单。结合洼地周长和面积的强烈左偏特征,认为红层岩溶洼地在发育过程以边缘整体扩张为主,受区域构造裂隙控制,形成有趋向性的独立、简单洼地,少有沟通、合并等现象。

K函数结果显示,红层岩溶洼地(补给)和泉、溶洞(排泄)在分布上均具有空间聚集状态,结合核密度分布图,显示红层岩溶洼地的发育严格受控于构造、岩性条件,高家场背斜弱岩溶区相较于研究区西南侧的强岩溶砾岩区,岩溶洼地密度高而面积小,表明裂隙条件的好坏决定了红层岩溶洼地是否普遍发育,岩体可溶成分则决定岩溶洼地的发育规模;红层岩溶泉和溶洞的发育除受控于构造、岩性条件外,水系统、地貌等条件控制区域径流,影响地下水排泄,也会对岩溶泉和溶洞的空间分布产生较大影响。

以上形态参数和空间分布特征体现了红层岩溶发育特点。岩溶发育初期,构造裂隙是典型岩溶(红层岩溶)发育的初始界面,这些狭窄的构造裂隙为水岩作用提供了理想的场所,促进了可溶矿物的溶解,使得构造裂隙在不断扩展,形成地表溶隙、溶沟,集水面积有限,汇集的降水可通过地下裂隙网络径流、分散排泄。岩溶发育中期,红层岩溶与典型岩溶之间的差异逐渐显现。随着裂隙面的不断拓宽,裂隙中水动力也不断增强,红层岩体的高渗透性使得地下水能够更先一步侵入裂隙围岩,引发围岩中可溶物的溶解,从而导致裂隙附近岩体的胶结程度降低。在水动力作用下,围岩中非可溶矿物颗粒易从岩体中剥离,这些颗粒在水力作用下不断“切割”岩体,使红层岩溶发育速率异常迅速。相比之下,碳酸盐岩岩体更为致密,其渗透系数相对较小,岩溶主要沿着溶隙面进行,其发育速率相较于红层岩溶更缓慢,在这一阶段,地表逐渐形成汇水洼地,集水面积增加,岩溶优势裂隙快速扩张,逐渐形成集中排泄的泉点。岩溶发育的晚期,物理破坏成为岩溶发育的主要驱动力。碳酸盐岩中的裂隙面进一步拓宽,导致水动力逐渐增强,对围岩的物理破坏过程不断加速。然而,红层中的大量非可溶物质会在非优势岩溶裂隙

网络的末端淤积和堵塞,成为延缓甚至阻碍红层岩溶持续发育的关键因素。优势红层岩溶裂隙迅速扩张,形成大型岩溶泉或溶洞,其余洼地、地下岩溶管道会因非可溶物质堵塞而停止扩张,使得岩溶发育的红层岩体呈现出极强的非均一性。典型岩溶的发育速率随着溶蚀面的扩大和水动力的增强而不断加快,整个发育过程呈现出正反馈的特点^[45]。由于非可溶物的淤积和堵塞,非优势岩溶裂隙的红层岩溶发育晚期速率会减缓甚至停滞,呈现出负反馈的特点。这与区域岩溶洼地简单、小型,却存在大型岩溶泉和溶洞的特点相符。

3.2 构造抬升对区域地貌的影响

研究区HI平均值分别为0.41(阈值 0.5 km^2)和0.36(阈值 2.5 km^2),总体处于壮年时期,与相关研究结果一致^[41-42]。从岩性上看(阈值 0.5 km^2),可溶性较强的钙质砾岩区HI值高于区域平均水平,整体以青年期为主,表明钙质砾岩区红层岩溶发育较为活跃,但地貌演化阶段相对较低。考虑区域强烈抬升背景,认为钙质砾岩区在侵蚀基准面下降后,地貌演化处于从壮年期向青年期过渡的地貌回春过程中。这一现象与调查及统计过程中钙质砾岩区洼地处于演化初期的形态特征相吻合。从构造角度看(阈值 2.5 km^2),高家场背斜核部与南宝山向斜两翼的区域同样处于抬升背景下的地貌回春过程。在构造裂隙发育的部位,可溶性较弱、抗侵蚀能力较差的钙质砂泥岩区,也会在区域整体从壮年向老年演化的过程中呈现出青年阶段。构造升降引起的侵蚀基准面变化,往往使得HI值的空间分布呈现出异常,以山地向平原转化的过渡地带,尤其是岩溶(红层岩溶)发育基本条件优越的区域最为明显^[38]。

3.3 岩溶空间分布在勘察中的指导意义

岩溶区常以夷平面高程(地面特征)和地下岩溶洞穴高程(地下特征)为基础来初步识别地文期或岩溶发育高程^[43, 46-47]。然而,龙门山地区活动频繁,区域地层发生强烈的变形变位,地块破碎复杂,难有稳定且可横向比对的夷平面保留。加之地壳稳定期与抬升期转换迅速,红层岩溶向深发育条件亦有限。因此,以夷平面或地下岩溶来识别红层岩溶区地文期或岩溶发育高程显得尤为困难。数据显示,红层岩溶区洼地高程呈现明显聚集状态,洼地作为相对

独立且与夷平面紧密关联的地貌形态,其聚集高程可成为识别构造复杂区岩溶发育期次的一种有效方法。红层岩溶具有规模小、连通性差等特点,但在钙质砾岩区、构造裂隙发育区等岩溶发育的优势部位仍会存在大规模、高危害的岩溶形态。通过分析红层岩溶的空间聚集形态和发育规律,可合理地避免地表岩溶发育区,减轻人工调查的负担,增加调查的精准性和针对性。对具有强烈抬升背景下的工区的工程建设,还应当避免红层岩溶地貌回春区域,这些区域地貌回春,上一期次地貌特征被破坏,现今岩溶发育阶段较低,在前期人工调查过程易被忽视、疏漏。在引大济岷莲花山段工程勘察中,基于高精度 DEM 或机载雷达等数据,结合数字地形分析技术,提取的洼地高程聚集段,可与区域地质的构造抬升背景,物探、钻探等技术手段揭示的岩溶发育段相对应。通过空间聚集形态和发育规律分析,指导物探、钻探等技术手段探查了近百处隐伏岩溶形态。对工程前期勘察、勘探工作具有指导意义。

4 结 论

本文通过红层岩溶地貌空间分布特征及红层岩溶形态参数的研究,挖掘红层岩溶地貌中蕴含的地质学信息及与碳酸盐岩岩溶演化规律的差异。研究结果显示,红层岩溶发育的高程呈现显著的聚集状态,这反映了红层岩溶形态在空间分布上的聚集特征。聚集高程可与区域构造抬升相对应,岩溶聚集高程或可作为探究岩溶发育高程的手段之一;洼地长轴(L)、短轴(W)、周长(A)和面积(S)表现出明显的左偏分布特征,结合洼地展布方向(RL)、偏心率(E)和紧度系数(T)等统计数据,表明红层中发育的洼地形态与典型岩溶具有相似性,但红层岩溶洼地的形态相对简单,规模更小;此外,红层岩溶在空间分布上呈现明显的聚集特征,其分布规律受到区域构造和地层岩性的共同控制。通过面积高程积分值的空间分布状态分析,显示研究区地貌发育阶段大体处于中年期,并受构造抬升影响,在红层岩溶发育条件优越的区域,呈现出明显的地貌回春现象;结合相关研究成果总结了红层岩溶与典型岩溶在不同发育时期的异同,认为红层岩溶发育晚期具负反馈特点;龙门山地区广泛发育的红层岩溶对工程建设具有极大影响,数字地形分析技术对工程建设勘察具

有一定指导意义。

参考文献

- [1] 袁道先主编. 岩溶学词典[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
YUAN Daoxian. Glossary of karstology[M]. Beijing: Geology-PublishingHouse, 1988.
- [2] 姜伏伟, 董颖, 苏孝良, 陈友智, 于宁, 曹晓娟. 试论红色岩溶概念及其科学价值[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 775-780.
JIANG Fuwei, DONG Ying, SU Xiaoliang, CHEN Zhiyou, YU Ning, CAO Xiaojuan. Preliminary discussion on the concept of red karst and its scientific value[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 775-780.
- [3] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 等. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, et al. Modern Karst Science[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
YUAN Daoxian, ZHU Dehao, WENG Jintao, et al. Karst in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [5] 漆继红, 许模, 钱玲, 马莹. 观音岩地区钙质砂(砾)岩溶蚀试验模拟研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 64-66.
Qi Jihong, Xu Mo, Qian Ling, Ma Ying. Experimental simulation of dissolution for cal-gritstone and cal-conglomerate from Guanyingyan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 64-66.
- [6] 韩浩东, 王春山, 王东辉, 等. 成都市白垩系灌口组富膏盐红层溶蚀特征与机理[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 768-782.
HAN Hao-dong, WANG Chun-shan, WANG Dong-hui, et al. Dissolution characteristics and mechanism on red bed enriched gypsum salt of Guankou formation, Cretaceous, Chengdu[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(5): 768-782.
- [7] 刘功余. 桂南红层岩溶及其发育控制因素探讨[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 145-155.
LIU Gongyu. Karst features and the controlling factors of redbeds in South Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(2): 145-155.
- [8] ZHU Weibin, ZHU Siren, ZHANG Hua, HUANG Hui. On the genesis of karst in red beds and underground engineer risks analysis[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 570: 052030.
- [9] 刘尚仁. 广东的红层岩溶及其机制[J]. 中国岩溶, 1994, 13(4): 395-403.
Liu Shangren. Red beds karst of Guangdong and its mechanism. Carsologica Sinica, 1994, 13(4): 395-403.
- [10] 刘尚仁, 黄瑞红. 广东红层岩溶地貌与丹霞地貌[J]. 中国岩溶, 1991, 10(3): 16-22.
Liu Shangren, Huang Ruihong. Red bed karst landform and the Danxia landform in Guangdong Province. Carsologica Sinica, 1991, 10(3): 183-189.

- [11] 贾龙, 吴远斌, 潘宗源, 殷仁朝, 蒙彦, 管振德. 我国红层岩溶与红层岩溶塌陷刍议[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 67-73.
JIA Long, WU Yuanbin, PAN Zongyuan, YIN Renchao, MENG Yan, GUAN Zhende. A review of the research on karst and sinkhole of red beds in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(1): 67-73.
- [12] 吴应科, 梁永平. 长江中上游红层岩溶刍议[J]. 中国岩溶, 1987, 6(2): 22-30.
WU Ying-ke, LIANG Yong-ping. Preliminary opinion on the red bed karst in the upper-middle reaches of Yangtze River[J]. *Carsologica Sinica*, 1987, 6(2): 22-30.
- [13] 王子忠. 四川盆地红层岩体主要水利水电工程地质问题系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
WANG Zi-zhong. Systematic Researches on Red Bed Rock Mass Engineering Geological problems of Water Resources and Hydropower Projects in Sichuan Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [14] 竺维彬, 张华, 黄辉. 红层岩溶发育区地下工程风险分析及防治对策[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 179-186, 212.
ZHU Weibin, ZHANG Hua, HUANG Hui. Analysis of and Prevention Countermeasures for Underground Engineering Risks in Red Bed Areas with Developed Karst[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(5): 179-186, 212.
- [15] 冯启言, 韩宝平. 鲁西南地区的红层岩溶及其水文地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 1998(1): 53-57.
FENG Qi-yan, HAN Bao-ping. Red Bed Karst and its hydrogeological significance in Southwestern Shandong[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1998(1): 53-57.
- [16] 刘伟, 甘伏平, 张伟, 贾龙. 红层区岩溶塌陷调查地球物理勘探技术应用研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2923-2930.
LIU Wei, GAN Fu-ping, ZHANG Wei, JIA Long. Application of geophysical prospecting to Karst collapse in red bed area[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(6): 2923-2930.
- [17] 黄胜东, 赵龙, 黄贵任, 陈积普, 王宇. 滇中红层膏盐溶蚀特征及其对水质的影响: 以楚雄谢家河河谷为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 610-622.
HUANG Shengdong, ZHAO Long, HUANG Guiren, CHEN Jipu, WANG Yu. Dissolution characteristics of gypsum salt in the red beds of central Yunnan Province and their effects on groundwater quality: A case study of Xiejiahe valley in Chuxiong City[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(4): 610-622.
- [18] 郭成刚, 郭永发, 朱孟龙, 张庆文. 红层环境下的碳酸盐岩岩溶隧道暗河水文地质调查研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 58-64.
GUO Chenggang, GUO Yongfa, ZHU Menglong, ZHANG Qingwen. Hydrogeological Investigation of the Underground River of Karst Tunnel in Carbonate, Rock of Red Bed [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(1): 58-64.
- [19] 林永生, 裴建国, 邹胜章, 杜毓超, 卢丽. 清江下游红层岩溶及其水化学特征[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 113-120.
LIN Yongsheng, PEI Jianguo, ZOU Shengzhang, DU Yuchao, LU Li. Red bed karst and its hydrochemical characteristics of groundwater in the downstream of Qingjiang river, China[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 36(3): 113-120.
- [20] ZHU Cheng, WU Li, ZHU Tongxin, HOU Rongfeng, HU Zhi-nong, TAN Yan, SUN Wei, JIA Tianjiao, PENG Hua. Experimental studies on the Danxia landscape morphogenesis in Mt. Danxiashan, South China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(8): 943-966.
- [21] Sharples C, Eberhard R. Appropriate terminology for karst-like phenomena: The problem with 'pseudokarst'[J]. *International Journal of Speleology*, 2013, 42(2): 109-113.
- [22] Jan Lenart, Jan Miklín. Pseudokarst caves of the Outer Western Carpathians map[J]. 2017, 13(2): 37-46.
- [23] Mörner, Nils-Axel, Sjöberg Rabbe. Merging the concepts of pseudokarst and paleoseismicity in Sweden: A unified theory on the formation of fractures, fracture caves, and angular block heaps[J]. *International Journal of Speleology*, 2018, 47(3): 393-405.
- [24] Nathan J Wood, Daniel H Doctor, Jay Alderm, Jeanne Jones. Current and future sinkhole susceptibility in karst and pseudokarst areas of the conterminous United States[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11.
- [25] Walker L N, Mylroie J E, Walker A D, Mylroie J R. Symmetrical Cone-Shaped Hills, Abaco Island, Bahamas: Karst Or Pseudokarst? [J]. *Journal of caves and karst studies*, 2010, 72(3): 137-149.
- [26] 张强, 曾开帅, 张宇, 何文君, 邵江, 彭琪. 红层地区飞仙关隧道特大涌水模型试验[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 166-171.
ZHANG Qing, ZENG Kaishuai, ZANG Yu, HE Wenjun, SHAO Jiang, PENG Qi. Model simulation test for large-scale water inflow in Feixianguan Tunnel in Red Bed Area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5): 166-171.
- [27] 罗志立, 龙学明. 龙门山造山带崛起和川西前陆盆地沉降[J]. 四川地质学报, 1992(1): 1-17.
LUO Zhili, LONG Xueming. The uplifting of the Longmenshan orogenic zone and the subsidence of the west Sichuan foreland basin. *Acta Geologica Sichuan*, 1992, 12(1): 1-17.
- [28] 梅冥相. 中上扬子印支运动的地层学效应及晚三叠世沉积盆地格局[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 99-111.
Mei Ming-xiang. Stratigraphic forcing of the Indo-China movement and its related evolution of sedimentary-basin pattern of the late Triassic in middle-upper Yangtze region, south China. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 99-111.
- [29] 中国科学院地质研究所岩溶研究组著. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Research Group of Karsts, Institute of Geology, CAS. *Research of China Karsts*[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [30] 李晓民, 燕云鹏, 刘刚, 李冬玲, 张兴, 庄永成. ZY-102C 星数据在西藏札达地区水文地质调查中的应用[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4): 141-148.

- LI Xiaoming, YAN Yunpeng, LIU Gang, LI Dongling, ZHANG Xing, ZHUANG Yongcheng. Application of ZY-102 C satellite data to hydrogeological investigation in Zanda area, Tibet. [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(4): 141-148.
- [31] 钟玲敏. 川东高陡背斜区岩溶空间分异特征及评价系统构建研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- ZHONG Lingmin. Research on the karst development characteristics of high-steep anticline in eastern Sichuan and evaluation system construction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [32] 杨先武. 基于 DEM 的喀斯特峰林峰丛地形特征与空间分异研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- YANG Xianwu. DEM Based Research on the Topographic Characteristics and Spatial Variation of Fenglin and Fengcong Karst landforms[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.
- [33] Ripley B D. Modelling spatial patterns[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1977, 39(2): 172-212.
- [34] Arthur N Strahler. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [35] 彭建, 杨明德, 梁虹. 基于 GIS 的路南巴江喀斯特流域地貌演化定量研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 19-24.
- PENG Jian, YANG Mingde, LIANG Hong. A quantitative study on Bajiang karst drainage basin in Lunan county, Yunnan province based on GIS. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 19-24.
- [36] Julie Jeanpert, Pierre Genthon, Pierre Maurizot, Jean-Luc Folio, Myriam Vendé-Leclerc, Jeremy Sérino, Jean-Lambert Join, Marion Iseppi. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific)[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(13): 1854-1868.
- [37] 信忠保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积-高程分析及其侵蚀地貌学意义[J]. 山地学报, 2008(3): 356-363.
- XIN Zhongbao, XU Jiongxin, MA Yuanxu. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3): 356-363.
- [38] 丁智强, 王平, 李玉辉. 基于面积-高程积分值的喀斯特地貌演化动力机制研究[J]. 第四纪研究, 2021, 41(6): 1546-1557.
- DING Zhiqiang, WANG Ping, LI Yuhui. Dynamic mechanism of karst geomorphology evolution based on Hypsometric Index[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(6): 1546-1557.
- [39] 常直杨, 王建, 白世彪, 张志刚. 面积高程积分值计算方法的比较[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 171-175.
- CHANG Zhiyang, WANG Jian, BAI Shibiao, ZHANG Zhigang. Comparison of hypsometric integral methods[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 171-175.
- [40] 孟欣. 基于 DEM 的峰丛区岩溶洼地提取与形态特征分析[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- MENG Xin. Extraction and Morphological Characteristics Analysis of Karst Depressions in Fengcong Area Based on DEMs[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.
- [41] 常直杨, 王建, 白世彪, 张志刚. 空间自相关分析在面积高程积分中的应用[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 1-10.
- CHANG Zhiyang, WANG Jian, BAI Shibiao, ZHANG Zhigang. The technique of spatial autocorrelation for the hypsometric integral. *Journal of Mountain Science*, 2014, 32(1): 1-10.
- [42] 秦川, 李敬波, 郑立龙, 白赞. 云南莲峰、昭通—鲁甸断裂带面积—高程积分的构造地貌研究[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1649-1660.
- QIN Chuan, LI Jingbo, ZHENG Llong, BAI YUN. Study on tectonic geomorphology of area-elevation integral in Lianfeng and Zhaotong-Ludian fault zone[J]. *EOLOGICAL REVIEW*, 2023, 69(5): 1649-1660.
- [43] Karna Lidmar-Bergström, Johan M. Bonow, Peter Japsen. Stratigraphic Landscape Analysis and geomorphological paradigms: Scandinavia as an example of Phanerozoic uplift and subsidence[J]. *Global & Planetary Change*, 2013, 100(JAN): 153-171.
- [44] 许模, 王迪, 漆继红, 杨艳娜. 基于分形理论的喀斯特地貌形态分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 328-333.
- XU Mu, WANG Di, Qi Jihong, YANG Yanna. Study on morphological characteristics of karst landform based on the fractal theory[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(3): 328-333.
- [45] 余磊, 杨艳娜, 许模, 贺苏和巴特尔, 曾宪明, 刘洋. 川东明月峡背斜区岩溶形态分异与构造裂隙表征参数的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 92-100.
- YU Lei, YANG Yanna, XU Mo, HE Suhebater, ZENG Xianming, LIU Yang. Relationship between karst morphology differentiation and structural fracture characterization parameters in Mingyuxia anticline area, eastern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(1): 92-100.
- [46] François Guillocheau, Brendan Simon, Guillaume Baby, Paul Bessin, Cécile Robin, Olivier Dauteuil. Planation surfaces as a record of mantle dynamics: The case example of Africa[J]. *Gondwana Research*, 2017: S1342937X17302496.
- [47] Julien Morin, Marc Jolivet, Laurie Barrier, Amandine Laborde, Haibing Li, Olivier Dauteuil. Planation surfaces of the Tian Shan Range (Central Asia): Insight on several 100 million years of topographic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 177(JUN. 15): 52-65.

Morphological characteristics and geological significance of karst landforms developed in red-bed strata of the western Sichuan foreland basin

YU Lei, FAN Shijie, LIANG Hong, YU Tianqi, WANG Bo, MAI Gaofer

(*Sichuan Water Development Investigation, Design and Research Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610015, China*)

Abstract As a uniquely developed karst type in terrestrial clastic rocks, red-bed karst is widely distributed across the mountainous terrain of the western Sichuan foreland basin. Its development rules and evolution model differ significantly from those of traditional carbonate karst systems. Although academic research on traditional carbonate karst has reached a relatively advanced stage, systematic investigations into the spatial distribution characteristics, genetic mechanisms, and evolution models of red-bed karst still require in-depth exploration. In recent years, transportation tunnels and water resource allocation projects in western Sichuan have frequently encountered geological hazards such as water inrush and collapses caused by red-bed karst. These engineering-induced changes in water environment have become increasingly severe. Therefore, systematically revealing the spatial distribution patterns of red-bed karst and exploring its formation mechanisms are not only critical for deepening the scientific understanding of red-bed karst development, but also of great significance for ensuring the safety and sustainability of major engineering projects in mountainous areas of western Sichuan.

This study is supported by the National and Sichuan Provincial Water Network Key Project—the Dadu–Minjiang Water Diversion Project. Based on red-bed karst morphology data collected during the engineering investigation phase in the Lianhua Mountain area (southern segment of the Longmenshan Fault Zone and western margin of the western Sichuan foreland basin), this study applied comprehensive mathematical statistics and digital terrain analysis methods. By quantifying the parameter characteristics of red-bed karst landforms, it clarified their spatial distribution patterns (including planar distribution and vertical zoning) and examined the driving factors behind the spatial differentiation of red-bed karst landforms, as well as the impact of neotectonic movements on the evolutionary stages of red-bed karst geomorphology.

The results show: (1) Vertical distribution of red-bed karst landforms exhibits a significant elevation aggregation effect. Karst springs are primarily concentrated in the elevation ranges of 797 m to 852 m, 962 m to 1,017 m, and 1,037 m to 1,292 m, while karst depressions are predominantly distributed at 775 m to 875 m, 1,075 m to 1,175 m, and 1,575 m to 1,675 m. Results from K-function and kernel density analyses indicate that the spatial distribution of red-bed karst landforms is significantly scale-dependent, with rock mass solubility and fracture density serving as the main controlling factors. Further analysis shows that red-bed karst depressions tend to aggregate in areas with high concentrations of soluble components in clastic rocks and well-developed groundwater runoff paths. Karst springs in red-bed strata are generally characterized by rapid recharge, short flow paths, low discharge, and a scattered distribution from multiple points. However, in regions with intense tectonic activities, large karst springs with concentrated discharge can still be developed, though their scale is significantly smaller than that of springs in carbonate karst areas under similar tectonic conditions.

(2) As a typical karst feature in red beds, depressions show smaller morphological parameters (e.g., major axis, minor axis, perimeter, and area) compared to those developed in carbonate rocks, with a significantly negatively skewed distribution, indicating smaller scales in red-bed strata. The eccentricity (E) predominantly ranges from 0.75 to 1, and the compactness coefficient is mainly concentrated in the interval of 1 to 1.6, suggesting simpler edge morphology of red-bed karst depressions.

(3) The spatial distribution pattern of Hypsometric Integral (HI) values further reveals that red-bed karst

(下转第 571 页)

exceed the ESVs recorded for the study area in 2020. From a spatial distribution perspective, the ESVs for Puding county as a whole present the characteristics of being higher in the east and west and lower in the center. Furthermore, the ESV of each land use type has passed the sensitivity test, indicating strong credibility in the results.

Key words karst mountainous area, land use change, ecosystem service value, multi-scenario simulation, PLUS model, Puding county

(编辑 黄晨晖)

(上接第 543 页)

development is strictly controlled by tectonics and lithology, indicating that the overall geomorphic evolution of the study area has reached the mature stage. In the area where calcareous conglomerate is distributed, the drainage basin landforms exhibit significantly higher HI values than the regional average due to the highest solubility of the rock mass. This results in geomorphic evolution predominantly in the youthful stage, corresponding to active karst development. However, the low degree of actual evolution of karst landforms in these basins highlights a tectonically induced geomorphic rejuvenation process. The core of the Gaojiachang Anticline and the limbs of the Nanbaoshan Syncline, characterized by intensive structural fracture development, actively respond to tectonic uplift and are currently undergoing geomorphic rejuvenation.

These results reveal significant differences in spatial distribution patterns and formation-evolution models between red-bed karst and carbonate karst. This study examines the spatial differentiation characteristics of red-bed karst and its primary developmental drivers, thereby enriching the theoretical framework of red-bed karst research. The findings provide a theoretical basis for analyzing potential red-bed karst hazards in transportation and water diversion projects in this region.

Key words red-bed karst, the Dadu-Minjiang water diversion project, karst morphological characteristics, western Sichuan foreland basin, the Longmenshan Fault Zone

(编辑 张玲)