

文章编号: 1008 - 2786 - (2020)1 - 083 - 10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000493

川东高陡背斜区水文网控制的地下岩溶空间分异研究

黄思霜¹, 许模^{1*}, 杨艳娜¹, 成胜¹, 张贵铜²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中铁二院 重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023)

摘 要: 川东隔挡式构造区不同等级的排泄基准面控制了地下水循环, 从而影响着岩溶发育, 探讨川东地区地下岩溶发育规律, 对指导川东高陡背斜区隧道工程选址及建设具有重要的意义。本文基于 ArcGIS 对岩溶地貌、沟(河)谷水系统分析, 研究了明月峡背斜南段岩溶地貌的空间分布和水文网组合特征, 提出水文网控制下的地下水循环模式和地下岩溶发育规律。研究表明:“深、浅切横沟”和“岩溶化山地”组合下的扬起区, 其核部地下岩溶弱发育, 东、西翼表现为横切沟谷之上岩溶强发育, 之下弱发育的二元结构; 在“浅切横沟、贯穿型河谷”和“缓丘溶注”组合下的过渡区, 地下岩溶以浅层网状岩溶管道发育; 在“贯穿型河谷”和“槽谷洼地”组合下的倾伏区, 地下岩溶以阶梯状岩溶管道发育。

关键词: 川东高陡背斜区; 横切沟(河)谷; 地下水循环模式; 岩溶发育规律

中图分类号: P642.25

文献标志码: A

岩溶发育主要受气候、地质条件、水文网等因素控制, 当气候、地质条件相似时, 水文网则是控制地下水循环和岩溶发育的主要因素, 通常情况下, 岩溶系统中发育的大型水平和垂直岩溶管道可以反映水文网的稳定和下切的过程^[1]。近年来, 国内外学者运用遥感、洞穴沉积物测年等手段在探究河流演化与岩溶作用之间的关系时, 发现地下岩溶的特征与河流下切侵蚀有着密切的联系, 并提出河流切割和岩溶演化之间的概念模型, 认为深切河谷为岩溶水的区域排泄基准面, 深切河谷的下切深度直接影响两岸支流对可溶岩的侵蚀作用, 也就影响岩溶发育的深度和强度^[2-4]。

川东地区岩溶有独具一格的岩溶地貌景观和岩溶发育条件。20 世纪 60 年代末开始, 王士天^[5]提

出川东地区岩溶发育的某些基本特征后, 学者们对川东地区岩溶发育的影响因素做了大量研究, 普遍认为岩溶发育主要受控于隔挡式地质构造和这种构造条件下的岩性空间展布及水文网变迁, 在排泄基准面的交替变化过程中, 地表和地下水沿着有利结构面溶蚀运移, 水平和垂直岩溶管道交互出现、相互叠加, 形成多层网状岩溶系统^[6-8]。在地壳间接抬升过程中, 岩溶水循环与岩溶地貌演化密切相关, 一方面岩溶地貌的演化是一个随时间变化而变化的过程, 水循环交替条件控制岩溶地貌演化; 另一方面地貌对水文控制, 可在短期内表现出来, 岩溶地貌的多样性和差异性导致岩溶系统的不同水文功能, 地下水表现为区域和局部排泄特征^[9-11]。目前众多学者在岩溶发育的控制因素方面做了大量研究, 但对

收稿日期(Received date): 2019 - 7 - 16; 改回日期(Accepted date): 2019 - 11 - 17

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41472275)。[National Natural Science Foundation of China(41472275)]

作者简介(Biography): 黄思霜(1994 -), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水文地质、工程地质。[HANG Sishuang(1994 -), female, born in Chengdu, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on hydrogeology and engineering geology] E-mail: 1151339470@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 许模(1963 -), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 环境工程地质、工程水文地质。[XU Mo(1963 -), male, Ph. D., professor, research on environmental engineering geology and engineering hydrogeology] E-mail: xm@cdut.edu.cn

于特有的水文网背景下岩溶发育特征、规律及机理尚未形成全面、系统的认识。基于 GIS 和数字高程模型 (DEM), 分析岩溶区水文—地貌的相互联系, 建立两者定量关系, 已成为岩溶研究的一种趋势; 通过定量地貌和水文, 探讨水文网作用下地下岩溶发育规律是比较前沿的科学问题^[12-14]。本文利用 ArcGIS、勘探等手段, 分析了明月峡背斜南段沟谷切割类型和地貌演化特征, 研究在不同水文网控制下的地下岩溶发育规律, 为川东及重庆地区的未来山区交通走廊建设提供理论支撑, 更好地预测与规避川东地区隧道建设时面临的岩溶涌突水灾害, 减小对地质环境的影响。

1 地质背景

川东隔挡式构造带地处扬子地块中部, 东南侧为湘鄂西隔槽式褶皱带, 北东以齐岳山断裂为界, 西北侧接川中地块, 北接南大巴山断褶带^[15]。自白垩纪以来, 在燕山和喜山两期构造作用影响下, 川东地区形成了一系列高陡背斜和宽缓向斜相间排列的隔挡式褶皱带, 背斜区可溶岩与非可溶岩呈条带状相间分布, 这种特殊的地质条件控制了地貌在空间上

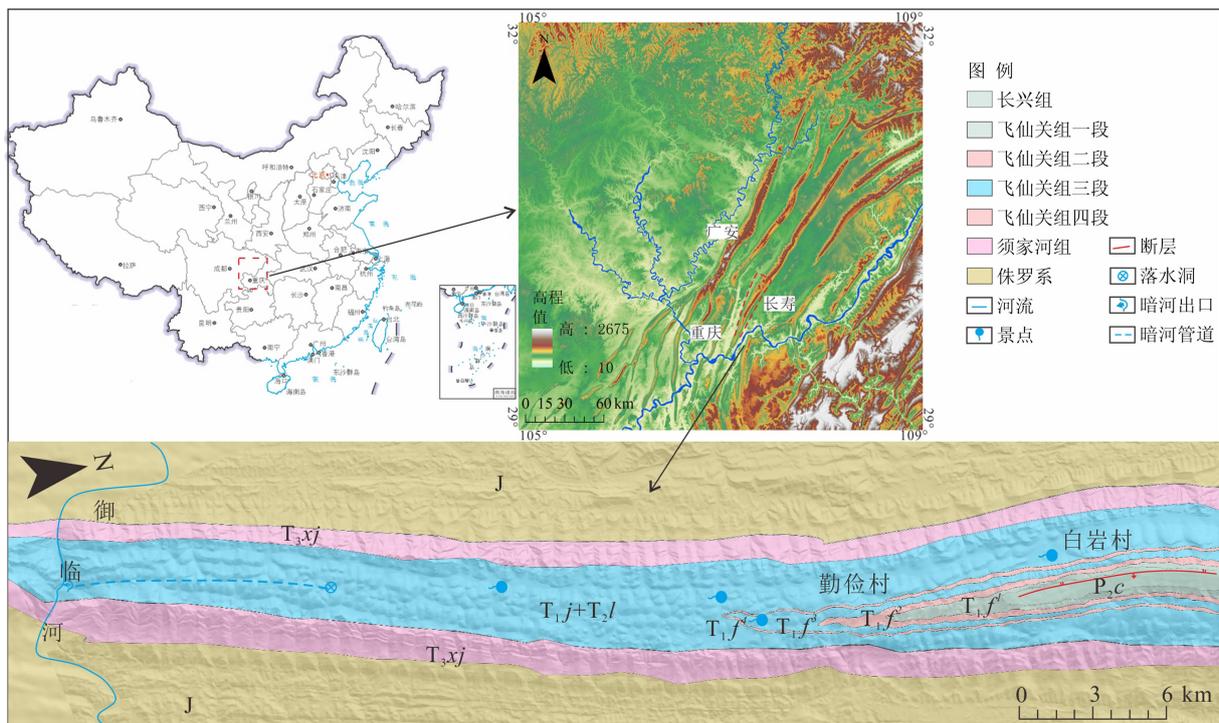
的分异性。河流深切使得岩溶地下水不断向深循环, 背斜区不同部位对河流下切适应的敏感程度的差异则会表现出不同的岩溶发育特征^[16-17]。

研究区位于明月峡背斜南段(图 1), 背斜两翼大致对称, 东、西翼岩溶槽谷发育明显, 呈“一山三岭二槽”岭谷地貌特征; 在背斜扬起区, 二叠系地层出露, 剖面较陡, 岩溶槽谷形态发育不太明显, 仅显示西槽特征(图 2)。在区域地质应力场与基底断裂控制的影响下, 背斜的深浅构造组合样式呈现一定程度的东西差异, 使可溶岩地层呈不同的出露状态, 其中嘉陵江及雷口坡组 ($T_2l + T_{2j}$)、飞仙关组三段 (T_1f^3)、飞仙关组一段及长兴组 ($T_1f^1 + P_2c$) 可溶岩地层在非可溶岩分隔下相互独立, 顺背斜轴向呈条带状相间排列。随着地壳间接性抬升, 横切支流选择性切入高陡背斜可溶岩区, 贯穿型河流持续下切和溯源侵蚀从而形成现今的水文网络格局。

2 川东水文、地貌特征

2.1 排泄基准面类型

川东高陡背斜区各岩溶层组中发育不同切割深度的横向河流和沟谷, 构成岩溶地下水不同等级排



(中国地图下载地址: <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>; 审图号 GS(2019)1823 号)

图 1 研究区位置图及地质简图

Fig. 1 Location map and geological sketch map of the study area

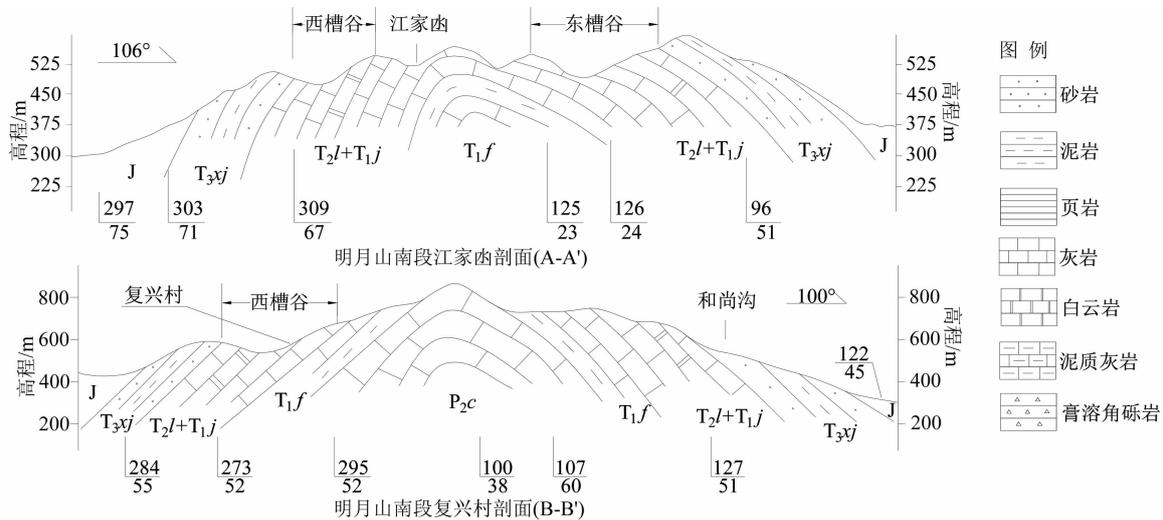


图 2 研究区剖面形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of the study area

泄基准面,不同级次排泄基准面的空间组合控制了地下水循环从而影响了岩溶作用的进行。根据高陡背斜区横向沟(河)谷切割深度差异^[18-21],将沟谷切割类型划分为三类(图 3):

浅切横沟:横切沟谷仅切入背斜可溶岩一翼,作为岩溶槽谷内的地下水局部排泄通道,浅表水横向排泄,深部水向贯穿型河谷纵向运移。

深切横沟:横切沟谷切开围限背斜核部的非可溶岩地层,核部地下水就深切横沟排泄,槽谷地下水受深切横沟切入可溶岩深度控制,浅部水横向排泄,深部地下水纵向运移。

贯穿型河谷:沟谷切穿整个背斜区,为背斜区最低排泄基准,降雨主要通过洼地落水洞深部运移,沿层面及暗河管道向河谷纵向径流排泄。

其中浅切、深切横沟控制岩溶地下水的浅循环,贯穿型河谷控制岩溶地下水的深循环。

2.2 地下水循环交替对岩溶地貌演化的影响

在川东地区,岩溶地貌的演化经历了几个不同地质时期,各个时期由于地下水排泄基准面类型的差异而形成了不同的岩溶地貌^[22-23],川东褶皱带大致形成于喜山运动时期,而后进入华蓥山期及歌乐山期,地壳稳定,地表剥蚀作用强烈,但这一时期背斜可溶岩尚未出露地表,无溶蚀作用。歌乐山期后(第三纪末),背斜核部的三叠系可溶岩逐渐被剥蚀出来,开始形成初期的岩溶槽谷,这时长江及嘉陵江切割不深,背斜两翼的横向溪沟尚未成型,岩溶地下水循环缓慢,垂直入渗带厚度较小,岩溶作用微弱,地下水循环交替对岩溶地貌演化影响微弱。第四纪开始,川东地区地壳继续表现为间歇性抬升,期间出现“山盆期”与“雅安期”两次地壳稳定期,长江、嘉陵江等贯穿型河谷进一步深切,部分横向沟谷切入岩溶槽谷,岩溶水循环加强,这一时期地下水循环交替对岩溶地貌演化的影响较为强烈。更新世晚期至现在,随着河流的不断深切,地下水排泄基准面急剧下降,川东地区岩溶地貌演化在新的地下水循环交替条件呈现出不同地貌特点:(1)岩溶水垂直循环加大,贯穿型河谷及深切横切沟谷两个表现最为显著,岸边水力坡度很大,存在地下“裂点”,有多层水

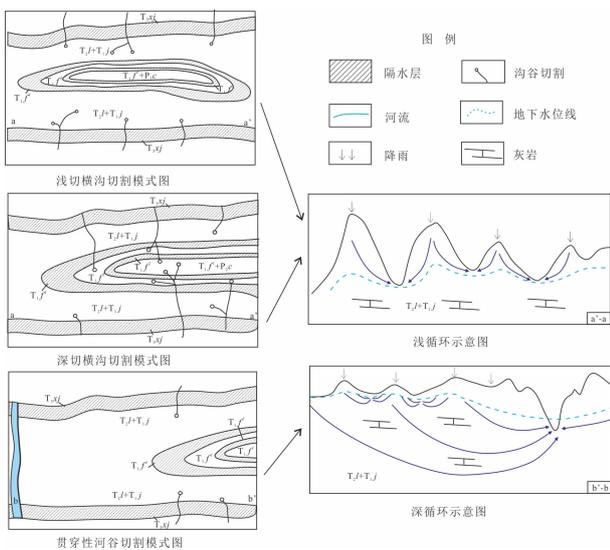


图 3 横沟切割类型划分(据文献[20],有改动)

Fig. 3 Horizontal groove cutting type division (according to literature [20], there are some changes)

平岩溶管道,表现出岩溶水强烈的向深发育特性;
 (2)排泄区与分水岭之间的过渡地带,早期的洼地、落水洞逐渐扩大、加深,其下逐渐形成暗河管道;
 (3)背斜两侧横切沟谷大量发育,部分浅切割横切沟谷控制的地下水被其他深切的沟谷袭夺,无地下水排泄。

3 岩溶水文—地貌耦合效应

3.1 参数提取原理和方法

基于数字高程模型 (DEM) 与地理信息系统 (GIS) 数据实现岩溶负地形、河流水系的自动化提取。岩溶负地形的提取是以须家河和雷口坡组界限作为洼地溢出点,保留闭合轮廓的部分,对不闭合的轮廓进行消除后填洼处理 (图 4),填洼深度越深,洼地发育规模越大;水文特征是提取切入可溶岩横切

沟谷的发育密度及切入岩溶槽谷 (须家河组与雷口坡组界线) 的切割深度^[24-26]。

3.2 研究区水文—地貌耦合效应

研究区岩溶洼地从东到西大致可分为 3 列,每一列均呈串珠状排列,洼地发育深度均自北向南增加,西翼洼地发育深度值较大,岩溶向深发育最为强烈,其次为东翼,核部洼地发育深度较浅,其岩溶发育也相对较弱。根据横向沟谷发育密度、对岩溶槽谷的切割深度与洼地形态、空间分布的特征组合等,将研究区划分扬起区、过渡区、倾覆区 (图 5)。

扬起区:“浅切、深切横沟”共同控制地下水循环,背斜西翼沟谷发育密度 0.67 条/km,切入可溶岩深度 30~67 m,东翼沟谷发育密度 0.4 条/km,切入可溶岩深度 42~48 m,有部分切入背斜核部 (表 1、表 2)。该区地形陡峻,主要发育溶蚀裂隙和溶沟,少见岩溶负地形,岩溶地貌表现为“岩溶化山

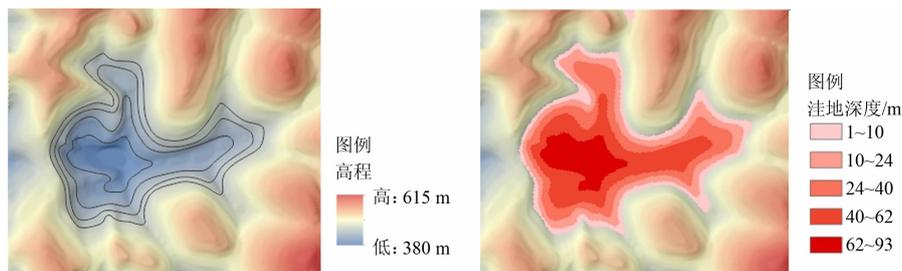


图 4 填洼溢流图

Fig. 4 Filling pattern of overflow

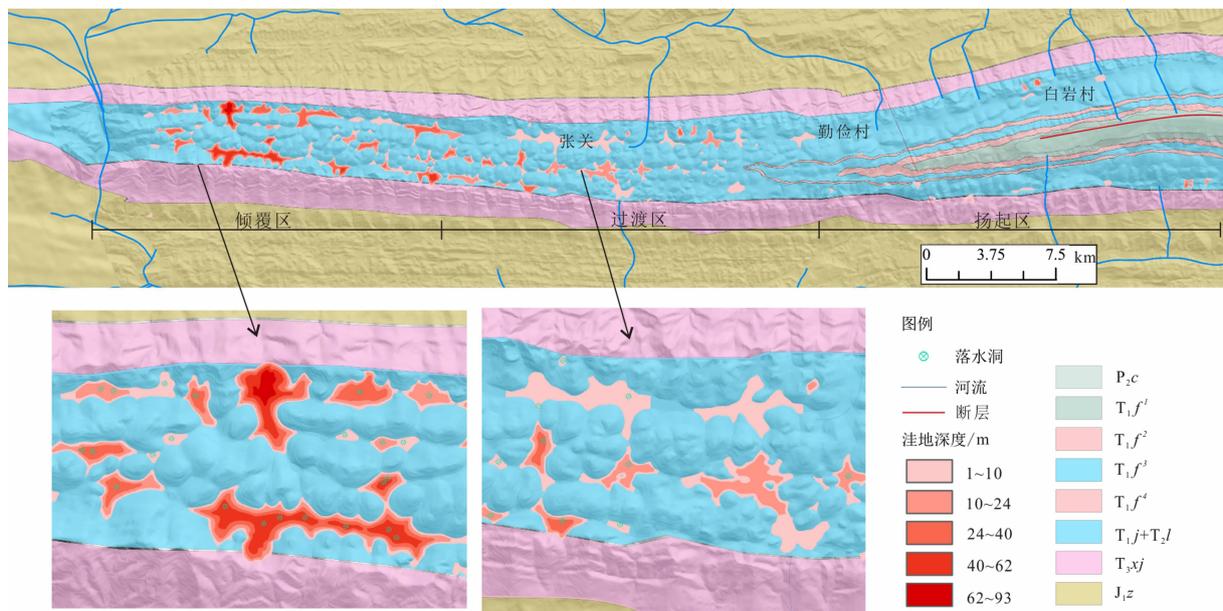


图 5 研究区洼地平面分布

Fig. 5 The depression plane distribution map of the study area

地”,浅层地下水主要向横向沟谷排泄,极少部分地下水向御临河纵向径流,指示了横切沟谷对隆起区岩溶向深发育的控制作用。

表 1 不同部位发育深度统计

Tab. 1 Statistical table of depression development depth

分区	部位	洼地高程/m	发育深度/m
过渡区	西翼	530 ~ 500	5 ~ 28
	东翼	540 ~ 400	5 ~ 47
	核部	530 ~ 500	5 ~ 30
倾伏区	西翼	490 ~ 380	32 ~ 93
	东翼	410 ~ 450	29 ~ 57
	核部	495 ~ 465	20 ~ 37

表 2 各区段横切沟谷发育密度统计

Tab. 2 Transverse trough development density statistics

分区	西槽谷		东槽谷	
	沟谷	密度	沟谷	密度
	数量	/(条·km ⁻¹)	数量	/(条·km ⁻¹)
扬起区	6	0.67	3	0.4
过渡区	1	0.17	1	0.17
倾伏区	0	0	0	0

过渡区:“浅切横沟”发育少,分布稀疏,背斜东、西翼分别仅有一条浅切横沟切入可溶岩。地表表现为丘陵和岩溶洼地相间排列的“缓丘溶洼”地貌,横向沟谷的发育导致地下水分散排泄,且沟谷的切割深度小,洼地落水洞呈受贯穿型河谷与横切沟谷共同控制的扁平状分布。

倾伏区:随着地壳迅速抬升,“贯穿型河谷”深切导致侵蚀基准面下降,地下水循环加深,使早期的横切沟谷失去排泄能力,早期岩溶槽谷逐步分割,形成“槽谷洼地”的地貌组合。岩溶洼地发育深度和规模随着与御临河距离缩短而不断增大,发育深度

西翼达 93 m,东翼达 57 m,核部达 37 m,洼地发育规模为区域最高,西翼洼地呈“漏斗状”,向深发育最强,东翼呈“碗状”,均有利于降雨的迅速入渗,从而抑制地表沟谷的溯源侵蚀。

因此,在明月峡背斜南段,扬起区为“浅切、深切横沟”和“岩溶化山地”水文地貌耦合模式;过渡区则为“浅切横沟、贯穿型河谷”和“缓丘溶洼”耦合模式;倾伏区为“贯穿型河谷”和“槽谷洼地”耦合模式。

4 水文网控制下的岩溶发育规律研究

岩溶地貌的差异分化制约着不同的水文过程,含水介质类型、水动力特征、产汇流机制等控制着地下岩溶的发育^[27-30]。在研究区特有的水文地质背景下,高幅度的地形斜坡为横向水系的孕育和扩展提供了优越条件,封闭式的岩溶槽谷洼地制约了水系的扩展,这种水文网络在空间上的展布是导致不同地区岩溶发育差异的主导因素,使地下岩溶发育具有明显规律(图 6),为推断地下岩溶与构造破碎带等发育情况,采用大地电磁法(V8/EH4)和测绘手段,对明月峡背斜南段进行综合探测。

扬起区为岩溶水补给段,地形坡度大,地表水迅速向东、西槽谷汇集,在背斜核部转折端有断层出露,岩体破碎,节理、裂隙较发育,有利于地下水的垂向运移;此外,核部的可溶岩在非可溶岩围限下,地下水径流条件较弱,溶洞分布零散,规模较小,为小型“孤立”溶洞发育(R17、R18);背斜转折端两侧的东、西翼地层弯曲幅度较大,浅切和深切横沟均有切入,地下岩溶表现为二元结构:横向沟谷以上岩溶强发育而以下则微弱发育,岩溶发育随深度的增大而减弱的特征明显(图 7、表 3)。

过渡区为地下水径流段,该段背斜倾覆,飞仙关

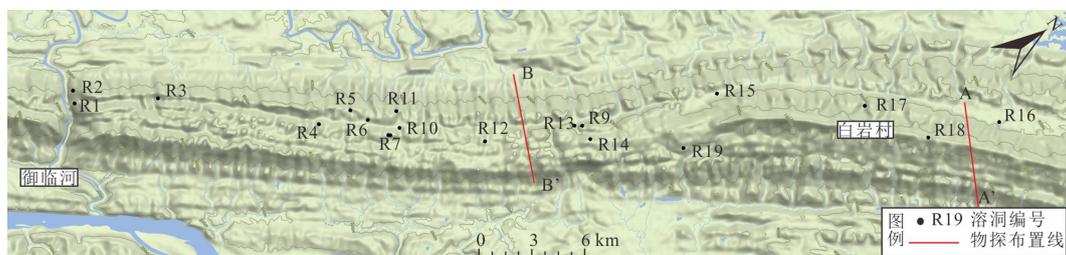


图 6 地下溶洞分布位置图

Fig. 6 Location map of underground karst distribution

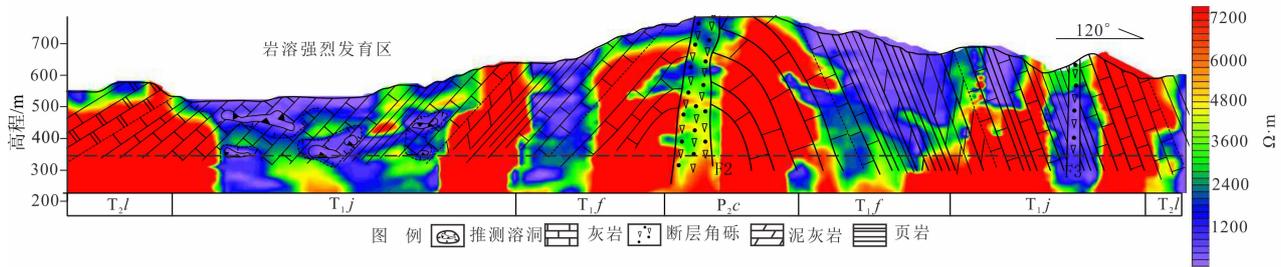


图 7 扬起区物探揭示地下岩溶特征

Fig.7 Geophysical exploration of the uplift of the core reveals the characteristics of underground karst

表 3 研究区溶洞发育规模及特征

Tab.3 Development scale and characteristics of caves in the study area

名称	编号	发育高程/m	构造部位	发育层位	规模及主要特征
排花洞 暗河 系统	R1	200	明月峡背斜 西翼近轴部	T_{1j}^2	洞口形状呈溶厅状,洞底宽 8~10 m,洞高 7~8 m,洞深约 15 m 溶洞大致沿岩层走向发育。溶洞应为裂隙倍流水溶蚀扩张而成。
	R2	255	明月峡背斜 轴部偏西翼	T_{1j}^2	溶洞顺岩层轴向延伸发育,洞深 100 余 m。溶洞空间形态多变,洞口呈溶厅状,宽 10~15 m,高 8~10 m,深 30~50 m。洞深 50~80 m 段溶洞呈三角形,洞宽 10~12 m,洞高 5~7 m,溶洞以阶梯形态斜向下方暗河发育。
干洞子	R3	303	明月峡背斜 轴部偏西翼	T_{1j}^2	地表由 25~30 m 竖井连接下面洞口,溶洞室内形态呈溶厅状,大致呈南北向延伸发育,洞底宽 30 m。
岩峰洞	R4	380	背斜西翼	T_{1j}^1	地表由 25 m 竖井连接下面洞口,溶洞室内形态呈溶厅状,大致呈南北向延伸发育。
御临洞	R5	465	背斜西翼	T_{1j}^3	三个溶洞均位于张关岩溶水系统中且相互连通,御临洞口出露地表,洞口宽 13~15 m,高 8~9 m,洞口为厅堂型,较宽阔;泫恋河洞口位于地面以下 50 m,洞口狭窄,可坐船前往御临洞;张家洞为暗河出口,洞口外有一池塘。
泫恋河	R6	447	背斜西翼	T_{1j}^2	
张家洞	R11	459.5	背斜西翼	T_{1j}^3	
仙女洞	R9	550	背斜西翼 倾伏端	T_{1j}^1	洞口呈三角形,洞宽 5~6 m,高 6~7 m,雨季洞内有水,旱季干涸,溶洞口有较多钙华堆积物。
天险洞	R15	南:670 北:705	背斜转轴 段西翼	T_{1j}^1	一个沿岩层面发育的溶洞,有两个入口,南入口:670 m,北入口:705 m,南洞口宽 8~10 m,高 7~8 m,现被铁门封住。

地层未出露,嘉陵江组为唯一的岩溶发育层,U型岩溶槽谷内洼地深度浅,面积大,多积水成湖,地下水埋藏较浅,岩溶向深发育弱,地下岩溶以浅层网状岩溶管道发育为主,之下则发育溶隙,如 R5、R6、R11 均位于张关岩溶水系统中,内部有暗河管道连通,暗河发育底板高程在 400 m 以上(图 8、表 3)。

倾伏区为地下水排泄段,多期次构造运动伴随御临河持续下切,降雨不断通过洼地汇集向地下快速入渗,地下水在向河谷运移时,陡倾结构面及高水头差为岩溶向深发育提供有利条件,流水侵蚀作用强烈,在地壳相对稳定期形成适应排泄基准面的水平岩溶管道,地壳上升期则多形成竖向岩溶形态,河谷继续下切,暗河向下继续溶蚀,致使先期发育的管道高悬,形成阶梯式岩溶管道发育,如:“干洞子(R3)”、“岩峰洞(R4)”溶腔型溶洞和“排花洞

(R2)”大型暗河管道(图 9、表 3)。

川东地下岩溶的分布规律具有独立性和系统性,溶洞发育方向、形态受地层岩性、构造和水文地貌因素等综合控制,通过探讨水文网控制下的地下岩溶发育规律,发现从分水岭到排泄区,地下岩溶依次呈现孤立孔洞、连通洞穴、大型溶洞、地下暗河等岩溶形态。扬起区核部可溶岩受非可溶岩围限,其地下水与槽谷没有直接水力联系,地下水运移速度较慢,岩溶发育无明显规律,呈“孤立”溶洞发育模式;过渡区地下水主要向槽谷汇流,溶洞、管道主要受槽谷影响,发育浅层网状岩溶管道,其溶洞发育模式则是“槽谷汇流型”;倾伏区,降雨通过落水洞、垂向管道与下层溶洞形成直接水力联系,并与地下暗河连通,呈“河谷控制型”溶洞发育模式(图 10)。

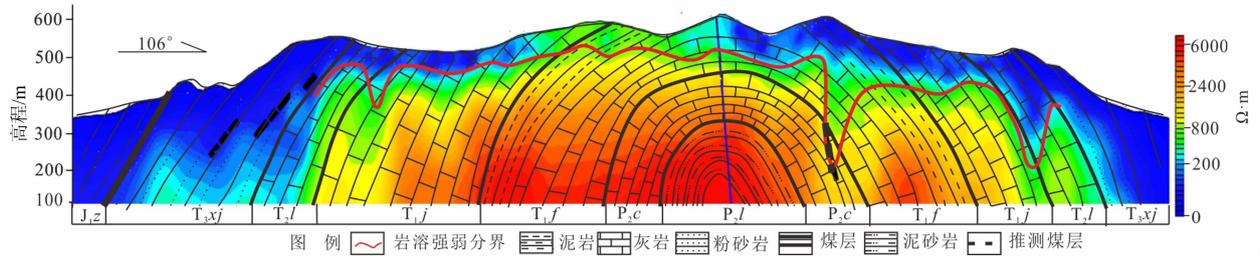


图 8 过渡区物探揭示地下岩溶特征

Fig. 8 Geophysical exploration of the transition zone reveals the characteristics of underground karst

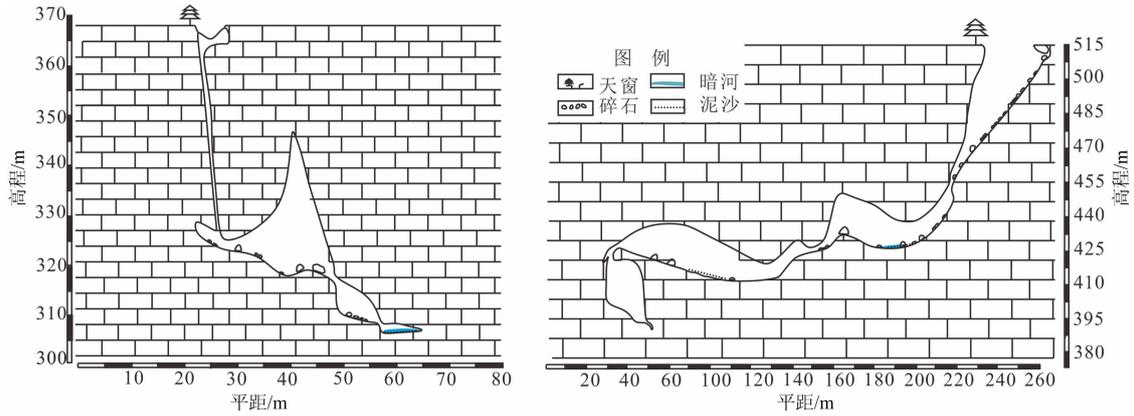


图 9 倾伏区地下岩溶剖面形态特征 (左:图 5 中 R3; 右:图 5 中 R4)

Fig. 9 Morphological characteristics of underground karst in drainage area (Left: R3; right: R4)

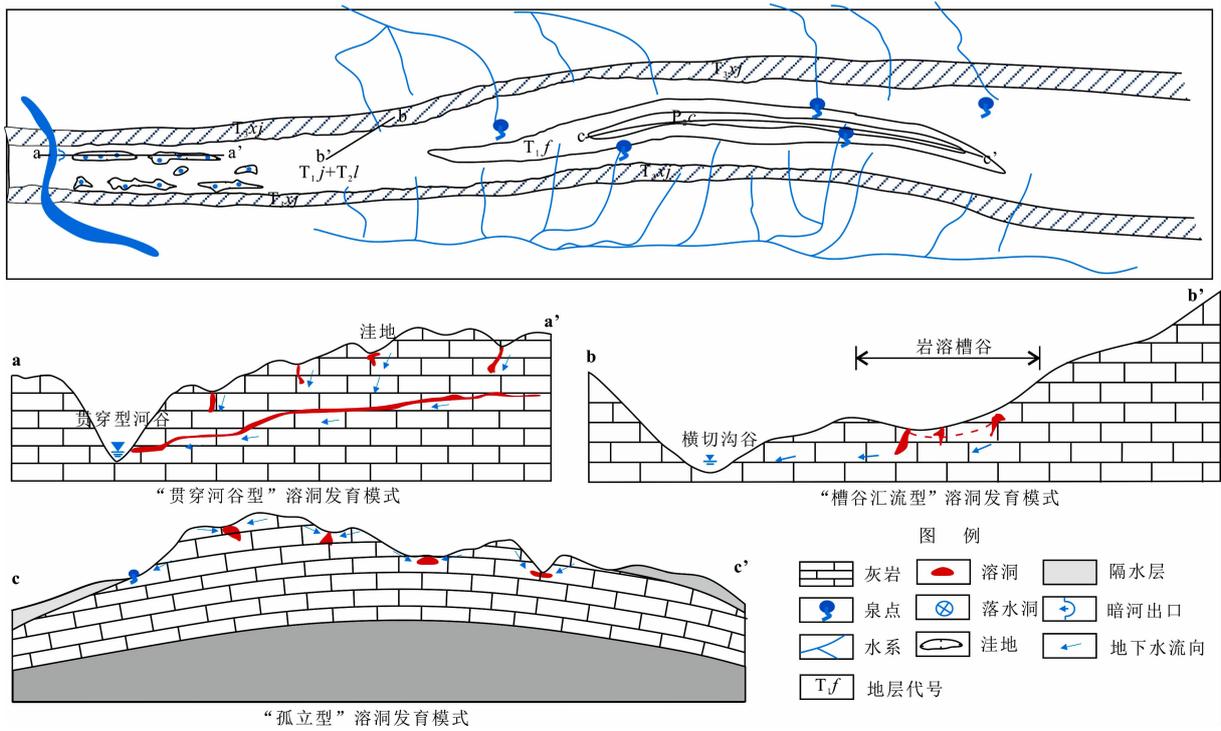


图 10 溶洞发育模式图

Fig. 10 Model diagram of karst cave development

5 结论

在地壳抬升过程中,川东地区岩溶地貌经历了强烈的剥蚀和侵蚀过程,岩溶谷地被侵蚀破坏,在河流深切的同时,横向沟谷开始发育,每条横切沟(河)谷对邻近地下水的排泄起着控制作用。

(1)明月山及川东地区河(沟)谷主要可分为贯穿型河谷、浅切横沟、深切横沟3种不同等级的排泄基准面,其中浅切、深切横沟控制岩溶地下水的浅循环,贯穿性河谷控制岩溶地下水的深循环。

(2)在明月山南段:扬起区水文—地貌耦合形式是浅切横沟、深切横沟与岩溶化山地的耦合;过渡区是浅切横沟、贯穿型河谷与缓丘溶洼的耦合形式;倾伏区则是贯穿型河谷与槽谷洼地的耦合形式。

(3)在川东地区,不同水文网控制下,溶洞、管道的成因模式也不经相同。扬起区核部段,溶洞发育无明显规律,呈现“孤立型”溶洞发育模式;过渡区溶洞、管道发育主要受槽谷影响,其溶洞发育模式是“槽谷汇流型”;倾伏区溶洞、管道明显受贯穿型河谷控制,发育模式呈“河谷控制型”。

研究川东地区水文网控制下的地下岩溶发育规律,进一步为川东及重庆地区隧道建设提供理论支撑。

参考文献 (References)

[1] 任美镔,刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京:商务印书馆,1983: 101-128. [REN Meie, LIU Zhenzhong. Introduction to karstology [M]. Beijing: The commercial press, 1983: 101-128]

[2] DOMINIQUE H, KATHRYN A, GILLES R, et al. Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions [J]. Quaternary Science Reviews, 2017, **166**: 38-56.

[3] DANIEL B, SANTIAGO G, TOAQUIN G, et al. Quaternary regional evolution based on karst cave geomorphology in Picos de Europa (Atlantic Margin of the Iberian Peninsula) [J]. Geomorphology, 2019, **336**: 133-151.

[4] ZHOU Zhongfa, ZHANG Shaoyun, XIONG Kangning, et al. The spatial distribution and factors affecting karst cave development in Guizhou Province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, **27** (8): 1011-1024.

[5] 王士天,王家昌,张倬元. 喀斯特研究中某些基本问题的初步探讨(以川东和黔西为例)[J]. 成都地质学院学报,1962,(1): 65-77. [WANG Shitian, WANG Jiachang, ZHANG Zhuoyuan. A

preliminary study on some basic problems in karst research taking eastern Sichuan and western Guizhou as examples [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1962, (1): 65-77]

[6] 曹聪,刘智,孙一博,等. 川东平行岭褶皱区岩溶发育规律特征研究[J]. 地下水,2018,**40**(3):34-35+38. [CAO Cong, LIU Zhi, SUN Yibo, et al. Characteristics of karst development in parallelridge fold area of eastern Sichuan [J]. Ground Water, 2018, **40**(3): 34-35+38]

[7] 蒲俊兵. 重庆地区岩溶地下河发育与分布的基本特征[J]. 中国岩溶,2013,**32**(3):266-279. [PU Junbing. Development and distribution of karst subterranean streams in Chongqing, China [J]. Carsologica Sinica, 2013, **32**(3): 266-279]

[8] 芮孝芳,蒋成煜. 流域水文与地貌特征关系研究的回顾与展望[J]. 水科学进展,2010,**21**(4):444-449. [RUI Xiaofang, JIANG Chengyu. Review of research of hydro-geomorphological processes interaction [J]. Advances in Water Science, 2010, **21** (4): 444-449]

[9] 邹成杰,何宇彬. 喀斯特地貌发育的时空演化问题初论[J]. 中国岩溶,1995,**14**(1):49-59. [ZOU Chengjie, HE Yubin. Time space evolution of karst landform development [J]. Carsologica Sinica, 1995, **14**(1): 49-59]

[10] KAUFMANN G. Karst landscape evolution [J]. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2002.

[11] 郭娣,许模. 西南地区紧密背斜岩溶地下水赋存与运移特征[J]. 四川地质学报,2009,**29**(1):66-69. [GUO Di, XU Mo. Occurrence and migration of Karst groundwater in compact anticlines, Southwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, **29** (1): 66-69]

[12] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报,2014,**69**(9):1305-1325. [SHANG Guoan. Progress of DEM and digital terrain analysis in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, **69**(9): 1305-1325]

[13] 谢顺平,都金康,王腊春. 利用DEM提取流域水系时洼地与平地的处理方法[J]. 水科学进展,2005,**16**(4):535-540. [XIE Shunping, DU Jinkang, WANG Lachun. Methods for processing depression and flat areas in extracting drainage networks based on the DEM [J]. Advances in Water Science, 2005, **16**(4): 535-540]

[14] 徐精文,张万昌,符淙斌. 适用于大尺度水文气候模式的DEM洼地填充和平坦区处理的新方法[J]. 水利学报,2007,**38** (12): 1414-1420. [XU Jingwen, ZHANG Wanchang, FU Congbin. A new method for treating the depressions and flat areas in DEM for large-scale hydrology and climate models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **38**(12): 1414-1420]

[15] 张月华. 川东地区构造叠加作用[J]. 石油学报,1986,**7**(4): 25-30. [ZHANG Yuehua. Analysis of structural overlapping in eastern Sichuan [J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, **7**(4): 25-30]

[16] 李皎. 湘鄂西—渝东地区构造几何学和运动学特征及其成因

- 机制研究[D]. 北京:中国地质大学,2015:15-31. [LI Jiao. Structural geometrics and kinematics and formation mechanism in West Hubei and Hunan and East Chongqing province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015: 15-31]
- [17] 王平,刘少峰,郑洪波,等. 扬子北缘晚造山阶段弧形构造特征与盆地演化[J]. 古地理学报,2013,15(6):819-838. [WANG Ping, LIU Shaofeng, ZHENG Hongbo, et al. Late-orogenic arcuate fold-thrust belts in northern Yangtze area structural characteristics and basin evolution [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(6): 819-838]
- [18] 何明亮. 川东互层式可溶岩背斜地下水径流特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2013:67-78. [HE Mingliang. The study of groundwater runoff characteristics in the interlaid karst anticlines of East Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013: 67-78]
- [19] 林三益,缪韧,易立群. 中国西南地区河流水文特性[J]. 山地学报,1999,17(3):49-52. [LIN Sanyi, MIAO Ren, YI Liqun. Hydrological features of rivers in southwest China [J]. Mountain Research, 1999, 17(3): 49-52]
- [20] 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,2018:38-55. [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: 67-78]
- [21] 钟玲敏,许模,吴明亮,等. 多级水流系统耦合下深部岩溶分异研究——以川东隔挡式构造区中梁山背斜南段为例[J]. 水文地质工程地质,2018,45(1):45-51. [ZHONG Lingmin, XU Mo, WU Mingliang, et al. Development of deep karst under the coupling of multistage flow systems: a case of southern part of the Zhongliang Mountain anticline of the parallel barrier structure in Eastern Sichuan [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, 45(1): 45-51]
- [22] 秦万成. 重庆附近地区的岩溶地貌[J]. 西南师范学院学报(自然科学版),1982,8(1):52-65. [QIN Wancheng. The karst landform near Chongqing [J]. Journal of Southwest Normal University, 1982, 8(1): 52-65]
- [23] 朱学稳. 喀斯特与洞穴研究-朱学稳论文集[M]. 北京:地质出版社,2010:21-50. [ZHU Xuewen. Karst and cave studies [M]. Beijing: Geological press, 2010: 21-50]
- [24] PAVEL B, MICHAL V, LUDOVITL G, et al. J6svafo paleopolje: morphology and relation to the landform evolution of Aggtelek Karst and J6sva River valley, Hungary [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 2016, 60(3): 219-235.
- [25] WU Qiusheng, DENG Chengbin, CHEN Zuoqi. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models [J]. Geomorphology, 2016, 266: 1-10.
- [26] MENG Xin, XIONG Liyang, YANG Xianwu, et al. A terrain openness index for the extraction of karst Fenglin and Fengcong landform units from DEMs [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(4): 752-764.
- [27] 彭建,梁虹,王剑. 贵州普定后寨河流域喀斯特水文地貌空间耦合分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2000,18(2):1-5. [PENG Jian, LIANG Hong, WANG Jian. Karst hydor-geomorphological spatial coupling analysis of the Houzhaihe drainage area in puding cocmty Guizhou province [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2000, 18(2): 1-5]
- [28] 李源,鲁新便,蔡忠贤,等. 塔河油田海西早期古水文地貌特征及其对洞穴发育的控制[J]. 石油学报,2016,37(8):1011-1020. [LI Yuan, LU Xinbian, CAI Zhongxian, et al. Hydrogeomorphologic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 1011-1020]
- [29] 李源,鲁新便,王莹莹,等. 塔河油田海西早期岩溶水文地貌特征及其演化[J]. 石油与天然气地质,2016,37(5):674-683. [LI Yuan, LU Xinbian, WANG Yingying, et al. Hydrogeomorphologic characterization and evolution of the Early Hercynian karstification in Tahe oilfield, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 674-683]
- [30] SZCZYGIEL J, GOLICZ M, HERCMAN H, et al. Geological constraints on cave development in the plateau-gorge karst of South China(Wulong, Chongqing) [J]. Geomorphology, 2018, 304: 50-63.

Spatial Differentiation of Underground Karst Controlled by Hydrological Network in High-Steep Anticline in Eastern Sichuan, China

HUANG Sishuang¹, XU Mo^{1*}, YANG Yanna¹, CHENG Sheng¹, ZHANG Guitong²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group CO., LTD., Chongqing 400023, China)

Abstract: Different levels of drainage datum in the parallel barrier structure in Eastern Sichuan control the groundwater circulation, which affects karst development. It is of great significance for exploring the development law of underground karst to guide the site selection of tunnel projects in the karst area of Eastern Sichuan. This paper studied the spatial differentiation and the hydrological network combination characteristics of karst landform in the southern segment of the Mingyuexia anticline based on ArcGIS analysis of karst geomorphology and gully valley water system, and proposed the groundwater circulation model and underground karst development under the control of hydrological network. It illustrated that the uplifting area under the combination of deep and shallow cut transverse ditch and karst mountain was weakly developed in the underground karst, and the east and west wings was characterized by strong karst evolution on the cross-cut valley and weaker, developmental binary structure. The underground karst developed shallow network karst pipeline in the transition zone under the combination of shallow-cut transverse trench, penetrating valley and difficult hill-solvent. The underground karst developed a stepped karst pipeline in the discharge area under the combination of through-flow valley and the slot valley.

Key words: Eastern Sichuan anticlinal; crossing valleys; groundwater circulation mode; Karst development law