

吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 等. 湖南怀化盆地岩溶发育特征与分布规律[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 759-772, 807.

DOI: 10.11932/karst2022y22

## 湖南怀化盆地岩溶发育特征与分布规律

吴远斌<sup>1,2</sup>, 刘之葵<sup>1</sup>, 殷仁朝<sup>2</sup>, 杨建兴<sup>3</sup>, 罗伟权<sup>2</sup>, 雷明堂<sup>2</sup>, 戴建玲<sup>2</sup>, 潘宗源<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 湖南省地质矿产勘查开发局四零七地质队, 湖南 怀化 418000)

**摘要:** 怀化盆地位于沅麻盆地和雪峰山冲断带2个构造单元接触带上, 区内地质构造条件复杂, 岩溶强烈发育。文章以区内碳酸盐岩为研究对象, 通过资料收集、野外调查、钻探以及测试等工作手段分析空间上的地层、岩性组合特征, 从岩溶形态、地层与岩性、构造条件、侵蚀基准面、地貌与水动力条件、可溶岩与非可溶岩接触带六个方面, 系统总结怀化盆地岩溶发育特征。结果发现: 研究区以覆盖型岩溶区为主, 区内各类岩溶形态发育; 区内自高向低存在三个溶蚀最发育段, 其标高分别为500~600 m、210~270 m以及190~210 m, 分别受历史侵蚀基准面、沅阳—怀化—中方谷地局部侵蚀基准面与舞水河侵蚀基准面控制; 区内各地层钻孔遇洞率一般为57.1%~61.5%, 最高为87.5%; 谷地内各地层岩溶发育强度依次为厚层灰岩>白云岩>红层灰砾岩>薄层灰岩, 但受地貌、水动力条件影响, 溶蚀构造峰脊洼区的白云岩岩溶发育明显较谷地内更为强烈; 舞水河沿岸、断层带附近、可溶岩与非可溶岩接触带以及山前冲洪积区等地下水交替循环强烈的地带, 岩溶发育相对更为剧烈; 区内岩溶强发育区主要分布于沅阳—城东新区、白沙—菜门溪一带。

**关键词:** 怀化盆地; 岩溶塌陷; 岩溶发育; 钻孔遇洞率; 水动力条件

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)05-0759-14 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### 0 引言

怀化盆地位于湘、鄂、渝、黔、桂五省(区)交界中心, 沪昆高铁、张吉怀高铁、怀桂高铁(规划中)、渝怀高铁、怀邵衡高铁等呈“米”字型交汇于此, 使得怀化市成为新兴全国性综合交通枢纽城市。怀化盆地地质构造十分复杂<sup>[1-3]</sup>, 岩溶强烈发育<sup>[4-5]</sup>。孟庆文等<sup>[6]</sup>在某客运专线怀化城区段选线时对该地区岩溶发育特征进行分析评价, 认为北线通过地区溶洞、暗河发育, 施工工程风险及环境风险极大, 线路应绕

避。林春洪等<sup>[7]</sup>采用管波探测法对该地区桩基进行岩溶勘探, 发现单孔线岩溶率高达24.7%~26.1%, 岩溶强烈发育。邬健强等<sup>[8]</sup>采用综合电法在怀化长塘村进行找水勘探, 圈出岩溶发育带并成功出水。现有研究多集中于场地型小范围内的岩溶发育特征研究, 且并不详尽。此外, 目前1:5万区域地质、水文地质测量仍未覆盖此地区。因此, 总体来说, 区内地质研究程度较低, 现有地质资料难以满足当地城市规划建设的需求, 如怀化市鹤城区黄金坳镇汪家村一带的谷地内, 以往地质资料将该地区划分为碎屑

基金项目: 中国地质调查项目(DD20221637, DD20190266, DD20160254); 国家自然科学基金项目(41867039, 42077273, 41877300); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2020002, 2020016)

第一作者简介: 吴远斌(1987—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事岩溶地质灾害监测预警与风险防控工作。E-mail: wuyb86@qq.com。

通信作者: 刘之葵(1968—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: Liuzhikui@126.com。

收稿日期: 2021-12-15

岩地区<sup>[9-11]</sup>,但2018年6月某高铁桩基础施工在该地区诱发2个岩溶塌陷,其中一个塌陷坑直径4.5 m、深5.0 m,离最近的桩基不到40 m,严重威胁线路安全<sup>[12]</sup>。

现有岩溶发育程度研究多是针对场地型的小范围区域,主要是通过地面调查<sup>[13]</sup>、钻探<sup>[14]</sup>、物探<sup>[7,15-16]</sup>等手段进行。对区域性岩溶发育程度划分多以地层“岩组”为单位进行划分<sup>[17-19]</sup>,未考虑到不同地貌单元的水动力条件差异,进而影响到对岩溶发育程度的判别。

本文在大量收集、整理、分析以往地质资料的基础上,通过补充地质调查、钻探等工作手段,对怀化盆地岩溶发育特征及影响因素进行总结分析,系统阐述怀化盆地岩溶发育特征,并对怀化盆地岩溶发育程度进行分区,以期对怀化市区域交通枢纽城市的规划建设、地下水开采以及岩溶塌陷地质灾害防治等工作提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区属亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛。历年平均降雨量1 326.3 mm,最大降雨量1 663 mm,降雨主要集中在4-8月份,占历年平均降水量的70%以上。

研究区地貌类型主要为中低山、溶蚀谷地地貌(图1),西部为中坡山—狮子岩山脉、东部为凉山山脉,总体地势为北西、南东高,中部低,呈现一个NNE—NE向展布的盆地形态。区内最高点位于凉山,海拔948.1 m,最低点位于牌楼坳一带,海拔209.0 m,最大相对高差739.1 m。区内岩溶区主要有两种地貌类型:一种为溶蚀构造低丘谷地,主要分布于沅阳—怀化—中方一带,地面标高210~250 m;一种为溶蚀构造峰脊洼地,主要分布于白沙—菜门溪一带,地面标高400~800 m。

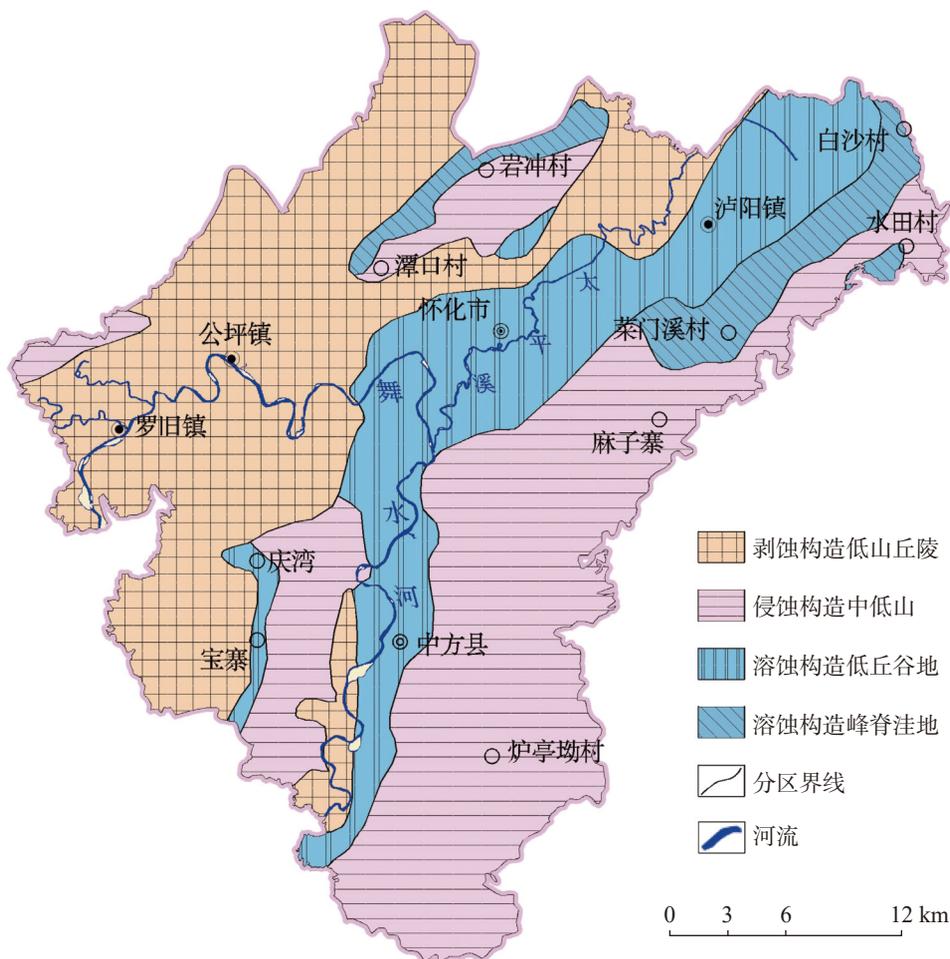


图1 研究区地貌及水系图

Fig. 1 Geomorphology and drainage map of the study area

研究区属舞水河流域,舞水河自北向南流经怀化盆地,其一级支流太平溪发育于沅阳镇聂家村金鸡洞地下河,在沅阳谷地内自北东向南西流动于怀化南站附近汇入舞水河,舞水河为研究区的排泄基准面。

## 2 岩溶发育条件

### 2.1 可溶岩分布及埋藏特征

研究区内碳酸盐岩分布面积为 219.86 km<sup>2</sup>,占整个研究区的 19.6%,主要分布于沅阳—怀化—中方、白沙—菜门溪、岩冲—潭口、庆湾—宝寨一带,其地貌类型主要为溶蚀构造低丘谷地及溶蚀构造峰脊洼地(图 1)。

根据上覆盖层的不同,隐伏岩溶可分为覆盖型

和埋藏型两种类型<sup>[20-21]</sup>。区内主要为覆盖型岩溶区,仅在鹤城区炉天冲村以及新家庄村—凤坪村一带由于上覆小江口群(T<sub>3</sub>-J<sub>1</sub>)碎屑岩,为埋藏型岩溶区,且局部埋藏深度较浅,如凤坪洼地一带,埋藏深度小于 5 m,且多以“天窗”形式露出下方碳酸盐岩。

### 2.2 岩溶层组类型

可溶岩是岩溶发育的物质基础,由于不同的沉积环境和沉积旋回,使得地层在纵向上形成不同的岩溶岩组类型,造成不同时代碳酸盐岩地层岩溶发育程度的差异<sup>[19]</sup>。

根据碳酸盐岩的岩性、溶蚀差异、连续厚度及其组合关系,以地层“组”为单位,将研究区地层划分为均匀状纯碳酸盐岩层组、不纯碳酸盐层组 2 种岩溶层组大类,并进一步细分为 5 种亚类(表 1)。

表 1 岩溶层组类型划分  
Table 1 Classification of karst strata group

岩溶层组类型	碳酸盐岩占比/%	地层	主要岩性	连续厚度	分布地区
均匀状纯碳酸盐岩层组	>90	CPm、P <sub>2</sub> q、P <sub>2</sub> m、P <sub>3</sub> w、T <sub>1</sub> d <sup>2</sup>	灰色中厚层状、薄层状微晶灰岩	>200 m	沅阳—怀化—中方、岩冲—潭口、庆湾—宝寨、公坪水泥厂一带
		C <sub>2</sub> d、T <sub>1</sub> d <sup>3</sup>	浅灰色、肉红色厚层块状白云岩	>200 m	沅阳—怀化—中方一带的谷地东侧
不纯碳酸盐层组	40~60	∈ <sub>3-4</sub> t	灰岩夹炭质板岩、灰岩夹炭质页岩	>200 m	麻子寨—水田
		Z <sub>1</sub> j、Z <sub>2</sub> l、∈ <sub>2-3</sub> w	硅质岩、硅质泥岩夹灰岩、泥灰岩	<200 m	麻子寨—水田
	\	K <sub>1</sub> s	灰砾岩	<100 m	沿沅阳—怀化—中方谷地北西侧边缘分布

区内纯碳酸盐岩地层从老到新序列为石炭系中统大浦组(C<sub>2</sub>d)、上统马平组(CPm)、二叠系中统栖霞组(P<sub>2</sub>q)、茅口组(P<sub>2</sub>m)、上统吴家坪组(P<sub>3</sub>w)、三叠系下统大冶组二段(T<sub>1</sub>d<sup>2</sup>),主要分布在沅阳—怀化—中方、岩冲—潭口、庆湾—宝寨一带谷地内(图 2)。

不纯碳酸盐岩主要包括均匀状或间层状不纯碳酸盐岩层组、碎屑岩夹碳酸盐岩层组及红层灰砾岩 3 种类型,从老到新序列为震旦系金家洞组(Z<sub>1</sub>j)、留茶坡组(Z<sub>2</sub>l),寒武系中上统污泥塘组(∈<sub>2-3</sub>w)、探溪组(∈<sub>3-4</sub>t)以及白垩系下统石门组(K<sub>1</sub>s),主要分布于麻子寨—水田一带。不纯碳酸盐层组中除红层灰砾岩外的其他两种岩溶层组类型岩溶发育微弱,岩溶

形态不明显。此外,三叠系下统大冶组三段(T<sub>1</sub>d<sup>3</sup>)厚层白云岩呈条带状仅分布于与沅阳西北侧山腰至山顶一带,分布面积小,仅 2.07 km<sup>2</sup>,在此不对这 5 套地层进行对比分析。

### 2.3 地质构造

研究区区域构造属于新华夏系构造体系,位于沅麻盆地与雪峰山冲断带构造单元接触带上(图 2),其主干构造为 N(N)E 向压性构造,其他为伴生构造。区内主要褶皱有沅阳向斜(㊟)、四丘田向斜(㊟)。向斜区内构造、岩溶发育,是岩溶水的富集区。区内断裂构造发育密集,主要为 N(N)E 和 N(N)W 向断裂,

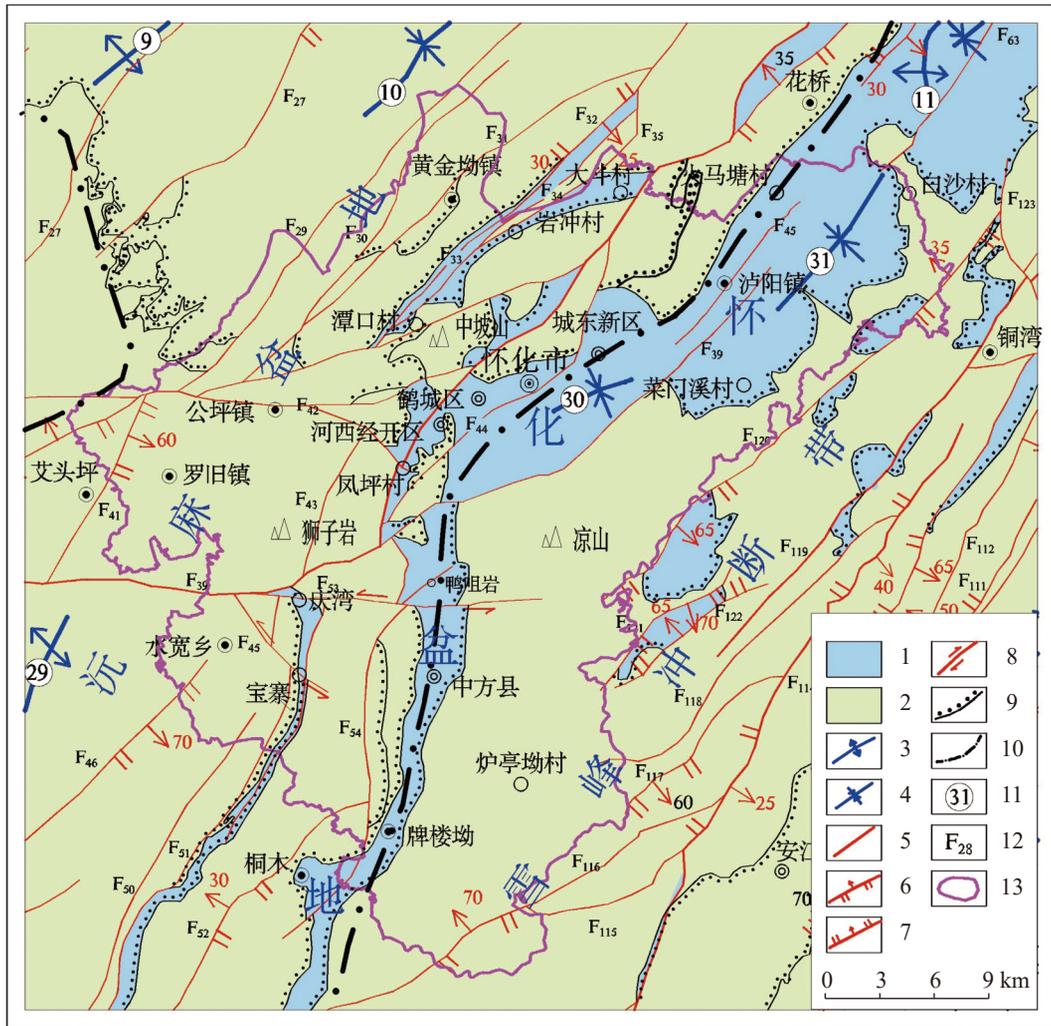


图2 研究区构造纲要及纯碳酸盐岩分布图(据 1 : 25 万怀化市幅区域地质调查报告修改)

- 1.纯碳酸盐岩区 2.非岩溶区或不纯碳酸盐岩区 3.背斜 4.向斜 5.断裂 6.逆断裂 7.正断裂 8.平移断裂
- 9.角度不整合地质界线 10.构造分区界线 11.褶皱编号 12.断裂编号 13.研究区范围

Fig. 2 Structural outline of the study area (based on the 1 : 250,000 Regional Geological Survey Report of Huaihua City)

其中 N(N)W 向为张性、张扭性断裂,其规模虽然较小,但对岩溶发育影响较大。

### 2.4 地下水类型及水动力条件

根据地下水赋存特征及含水层性质,研究区岩溶地下水类型主要为纯碳酸盐岩与灰砾岩溶洞裂隙水以及碳酸盐岩夹碎屑岩与碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙水等 4 类,主要接受大气降雨以及盆地附近碎屑岩山区的外源水补给。在白沙—菜门溪一带主要通过落水洞灌入式或溶蚀裂隙渗入式补给地下水<sup>[22]</sup>,通过管道—裂隙形式径流,最后以地下河形式向泸阳谷地集中排泄;在泸阳—怀化—中方谷地一带,地下水位常年高于舞水河水位(图 3),区内地下水主要通过管道—裂隙或岩溶裂隙形式径流,最后以岩溶大泉形式集中排泄或以岩溶泉形式分散排泄,并最终

流入舞水河。其中灌入式补给岩溶管道—裂隙集中排泄型主要分布于白沙—菜门溪一带的高位溶蚀构造峰脊洼地区,以垂直入渗为主,地下水水力坡度较大,为 0.192~0.230;而渗入式补给管道—裂隙集中排泄型与渗入式补给岩溶裂隙分散排泄型主要分布在溶蚀构造低丘谷地区,地下水水力坡度较小,为 0.012。

## 3 岩溶发育特征

控制区域岩溶发育的影响因素主要有地层岩性、地质构造、地形地貌和水动力条件<sup>[23]</sup>。

### 3.1 岩溶形态特征

(1)溶沟、石牙

研究区内除石门组灰砾岩(K<sub>1</sub>s)的溶沟、石牙不

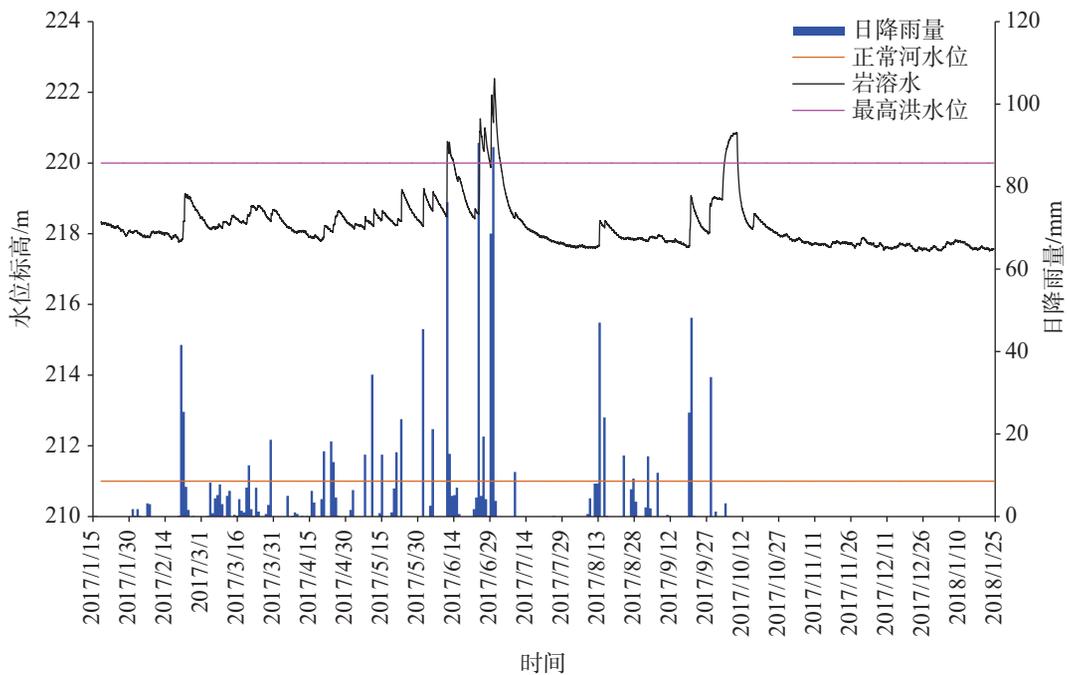


图 3 区内地下水波动情况及舞水河正常水位、最高洪水位示意图

Fig. 3 Fluctuation of groundwater in the study area and diagram of normal water level and maximum flood level of Wushui river

甚明显外(图 4a), 其他纯碳酸盐岩区广泛发育溶沟及石牙(图 4b)。溶蚀沟槽一般深 0.1~0.5 m, 多为黏土半填充。石牙高度一般为 0.2~1.5 m, 多不超过 3 m。

(2) 溶孔、溶隙

区内普遍发育溶孔, 常见直径有 2.0~30.0 mm, 最大直径 45.0 mm(图 5), 孔口一般呈椭圆形, 少量呈槽状。它们或零星分布, 或成串珠状、蜂窝状形态发育, 溶孔中往往充填少量的方解石晶体或土黄色钙质溶蚀物, 多呈半充填或仅孔壁充填状态。溶隙多沿地层已有裂隙发育(图 6), 一般呈张开—微张开状, 少量闭合状。溶隙宽度一般在 2.0~5.0 mm 之间,

少量>5.0 mm。

(3) 溶洞

如表 2 所示, 区内钻探揭露的溶洞总数为 167 个, 主要发育于  $P_2q$ 、 $P_2m$ 、 $P_3w$ 、 $CPm$  等纯灰岩地层中。溶洞洞高 0.1~17.9 m, 其中洞高小于 1 m 和 2 m 的溶洞占总溶洞数量的比例分别为 34.13%、64.67%, 溶洞半充填和无充填的比例为 79.6%, 说明研究区地下水交替循环条件较好, 水动力条件较强, 溶洞充填物易被潜蚀、搬运。

(4) 溶蚀洼地

溶蚀洼地分布广泛, 是区内常见的岩溶形态之



a. 发育于  $K_2s$  灰砾岩中的石牙, 表面为强风化灰砾岩, 多呈浑圆状



b. 发育于  $CPm$  灰岩中的石牙

图 4 溶沟、石牙

Fig. 4 Dissolve ditches and stone tooth



图5 碳酸盐岩类发育的溶孔

Fig. 5 Dissolution pores of carbonate rocks



图6 碳酸盐岩类发育的溶隙

Fig. 6 Dissolution cracks of carbonate rocks

一, 主要分布于泸州东侧的白沙—菜门溪一带(分布高程 340~860 m), 其次分布于岩冲—潭口、庆湾—宝寨一带(280~450 m), 但数量较少, 泸州—怀化—中方一带(210~250 m)的谷地内零星分布。洼地平面形态主要为圆形、椭圆形或长条槽谷形, 受 NE 向构造影响, 其长轴方向多为 NE 向展布或呈 NE 向串珠状分布。洼地底部平坦, 为黏性土覆盖, 土层厚度较薄, 一般不超过 5 m, 洼地内常叠加发育一个或多个落水洞, 落水洞多与地下河、地下溶洞相通, 成为

地表水灌入式补给地下水的入口。

### (5) 地下河

研究区共发育 10 条地下河(表 3), 其中 8 条发育于白沙—菜门溪一带的高位溶蚀构造峰脊洼地区(图 7), 地下河主干总流程为 16.6 km, 最短的地下河有 270 m, 最长的地下河有 4 840 m。地下河出口主要受泸州谷地局部侵蚀基准面控制, 洞口高程多在 239~269 m 之间。地下河走向主要受 NW 向张性断裂影响(占 80.0%), 其次受 NE 向构造及非可溶岩控制, 如岩底洞地下河基本沿马平组(CPm)与梁山组(P<sub>2</sub>l, 煤系地层)地层接触带展布。

### 3.2 岩溶发育受地层岩性控制

总体来说, 碳酸盐岩岩性越纯(碳酸盐岩中 CaO 的含量高)、连续分布厚度及单层厚度越大, 对岩溶发育越有利, 而不溶岩夹层或者薄层状碳酸盐岩的岩溶发育则相对较弱。

如表 4 所示, 纯灰岩 P<sub>2</sub>q、P<sub>2</sub>m、P<sub>3</sub>w、CPm 以及 T<sub>1</sub>d<sup>2</sup> 的 CaO 平均含量及 CaO/MgO 比值均较高且较接近, 但由于成层厚度对岩溶发育的影响作用较大, 薄层片状的 T<sub>1</sub>d<sup>2</sup> 钻孔遇洞率为 0.0, 明显较其他灰岩、白云岩地层 57.1%~61.5% 的钻孔遇洞率低。从线岩溶率来说, 厚层灰岩的线岩溶率整体较白云岩、薄层灰岩及灰质砾岩的高。这说明研究区岩溶发育主要受岩溶层组控制, 其次才是岩性。

研究区大浦组(C<sub>2</sub>d)白云岩的 CaO 平均含量较低, CaO/MgO 比值偏小, 溶蚀速率慢。同时, 与生物碎屑灰岩(图 8)相比其结构上无明显溶蚀优势方向(图 9)。因此, 一般情况下, C<sub>2</sub>d 白云岩整体上岩溶发育较弱但较均匀, 如在泸州—怀化—中方一带的谷地内, C<sub>2</sub>d 参与统计的钻孔遇洞率较其他纯灰岩地

表 2 研究区主要碳酸盐岩地层溶洞发育情况

Table 2 Statistical table of the development of underground karst cave in carbonate rock strata

地层	溶洞个数	溶洞高度统计/个					溶洞充填情况/个		
		<1 m	1~3 m	3~5 m	5~10 m	>10 m	无充填	半充填	全充填
C <sub>2</sub> d	15	7	6	0	2	0	9	1	5
CPm	34	10	19	1	4	0	21	/	13
P <sub>2</sub> m	58	20	25	5	8	0	33	22	3
P <sub>2</sub> q	12	5	4	0	3	0	4	4	4
P <sub>3</sub> w	44	15	19	6	3	1	7	28	9
T <sub>1</sub> d <sup>2</sup>	0	/	/	/	/	/	/	/	/
K <sub>1</sub> s	4	0	3	1	0	0	3	1	0

表 3 研究区地下河一览表

Table 3 List of underground rivers in the study area

序号	野外编号	名称	洞口高程/m	发育层位	洞长/m	流量/L·s <sup>-1</sup>	水力坡度	总体走向	洞口位置控制因素
1	SD1659	金鸡洞	269	C <sub>2</sub> d	270	137.5	1.226	NW	侵蚀基准面控制
2	SD0849-1	裕鸿电站	325	C <sub>2</sub> d	2160	595.0	0.053	NW-NE	层面控制
3	SD1454-2	岩门洞地下河	524	C <sub>2</sub> d	1125	7.5	0.192	NW	侵蚀基准面控制
4	SD1254-1	岩底洞	264	CPm	4250	95.8	0.093	NE	侵蚀基准面控制
5	SD1555	裤应洞	435	CPm	900	145.5	0.183	NW	层面控制
6	SD0952-1	旱塘地下河	239	CPm	4840	20.0	0.087	NW	侵蚀基准面控制
7	SD0850	老君洞	262	C <sub>2</sub> d	1120	6.6	0.230	NW	侵蚀基准面控制
8	YR1149	王洞	492	C <sub>2</sub> d	600	1.0	0.038	EW	层面控制
9	1-SD054	凤坪地下河	211	P <sub>2</sub> q	540	55.7	0.035	NW	侵蚀基准面控制
10	SD9343-1	青子坪地下河	235	CPm	830	1.5	0.102	NW-NE	侵蚀基准面控制

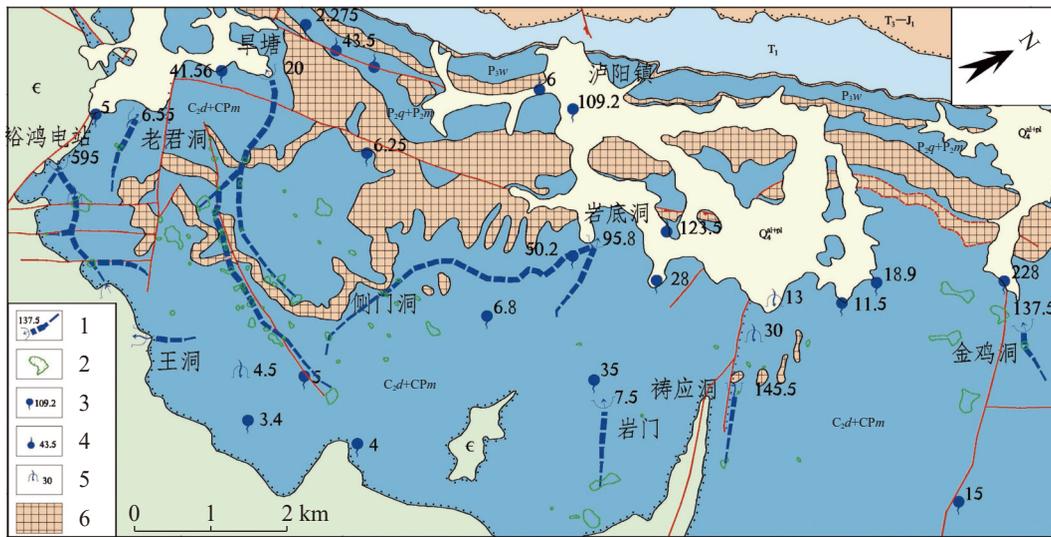


图 7 泸阳地区地下河、洼地、岩溶大泉分布示意图

1.地下河及流量/L·s<sup>-1</sup> 2.岩溶洼地 3.下降泉及流量/L·s<sup>-1</sup> 4.上升泉及流量/L·s<sup>-1</sup> 5.溶洞泉及流量/L·s<sup>-1</sup> 6.相对隔水层

Fig. 7 Distribution diagram of underground rivers, depressions and karst springs in Luyang

表 4 研究区主要碳酸盐岩地层岩石化学成分与岩溶发育情况

Table 4 Chemical composition of rock and karst development in the study area

地层层位	岩性特征	地层连续 厚度/m	地层单层 厚度/cm	平均化学成分/%			钻孔遇洞 率/%	线岩溶率/%			塌陷数量 /个
				CaO	MgO	CaO/MgO		平均	最大	最小	
C <sub>2</sub> d	厚层块状白云岩、灰质白云岩	116~605	50~100	33.21	18.63	1.8	40.0(15)	10.7	23.8	1.7	34
CPm	厚层块状(生物碎屑)灰岩	150~410	50~100	52.40	0.33	158.8	57.1(28)	9.3	42.9	0.6	27
P <sub>2</sub> m	厚层块状(生物碎屑)灰岩	100~316	50~100	51.60	0.26	198.5	61.5(26)	22.8	58.7	0.7	20
P <sub>2</sub> q	厚层块状(生物碎屑)灰岩	38~66	50~100	54.17	0.39	138.9	60.0(10)	13.6	56.7	1.7	25
P <sub>3</sub> w	厚层块状含硅质条带(团块)灰岩	270	50~100	51.70	0.35	147.7	87.5(16)	8.7	24.1	0.4	0
T <sub>1</sub> d <sup>2</sup>	薄层片状灰岩、泥灰岩, 夹页岩或泥质条带	226	1~10	52.23	0.26	200.9	0.0(3)	/	/	/	2
K <sub>1</sub> s	厚层块状灰质砾岩	20.0~91.3	50~100	/	/	/	66.7(3)	6.6	8.5	4.7	2

注：白沙—菜门溪村一带的高位溶蚀构造峰脊洼地(C<sub>2</sub>d)内发育29个岩溶塌陷；化学成分数据来源于文献[24]、[25]；表中括号内数字为钻孔统计样本个数。

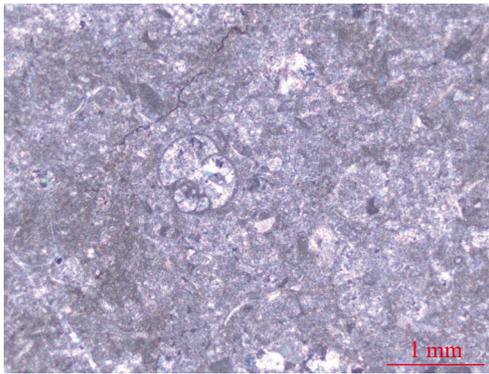
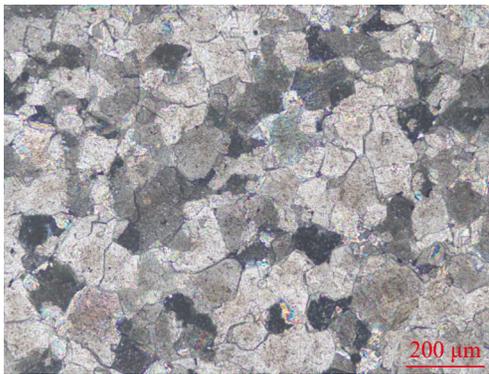


图8 生物碎屑灰岩的孔隙结构(CPm)

Fig. 8 Pore structure of bioclastic limestone (CPm)

图9 白云岩颗粒镶嵌状结构(C<sub>2d</sub>)Fig. 9 Inlaid texture of dolomite particles (C<sub>2d</sub>)

层的低,但在白沙—菜门溪村一带的高位溶蚀构造峰脊洼地区,受地貌及水动力条件影响,其塌陷个数超过其他地层,岩溶发育相对更为强烈。

根据各地层岩性特征,并结合其平均化学成分、钻孔遇洞率、线岩溶率以及岩溶塌陷发育情况等因素综合考虑,研究区谷地内可溶岩地层的岩溶发育强度依次为厚层灰岩(CPm、P<sub>2m</sub>、P<sub>2q</sub>、P<sub>3w</sub>)>白云岩(C<sub>2d</sub>)>红层灰砾岩(K<sub>1s</sub>)>薄层灰岩(T<sub>1d</sub>)。但受地貌、水动力条件影响,溶蚀构造峰脊洼区的白云岩(C<sub>2d</sub>)岩溶发育明显较谷地内更为强烈。

### 3.3 岩溶发育受构造控制

岩溶发育除了受地层岩性控制,同样也明显受地质构造控制<sup>[13,26]</sup>。地质构造决定岩溶层的空间展布及构造应力的性质和分布,而构造应力的性质和分布又直接影响岩层的断裂发育特点与发育程度,从而控制岩溶的发育方向。

#### (1) 构造体系控制岩溶谷地的展布方向

如图1所示,研究区岩冲—潭口谷地、泸州—怀化—中方谷地、庆湾—宝寨谷地均呈N(N)E向展布,

与研究区主干构造体系—N(N)E向构造体系的构造线方向基本一致。

#### (2) 构造体系复合部位岩溶发育

构造体系复合部位岩层承受应力变形强烈,产状急剧变化,断裂、裂隙发育,水与岩石的接触面加大,地下径流条件好,岩溶作用强烈,故岩溶发育。位于新垦村高枳的天仙洞即位于一组NE向压性断裂带和NW向张断裂交汇带上(图10),洞口见20余米张性破碎带,岩石破碎、胶结松散,地下水交替循环强烈,有利于岩溶发育(图11),洞内见大量石笋、石钟乳、石柱发育。

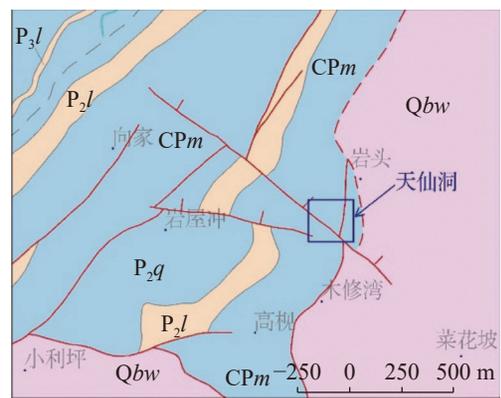


图10 天仙洞位置示意图

Fig. 10 Location of Tianxian cave



图11 洞口破碎带

Fig. 11 Fracture zone at the entrance to cave

另外,碳酸盐岩地区断裂本身即为一条地下水优势通道,岩溶水点常沿断层串珠状发育(图7),如泸州谷地内沿阳塘—泸州断裂带呈串珠状出露的岩溶大泉,其中泸州镇上的洞坎井流量最大,达109.2 L·s<sup>-1</sup>。

### 3.4 岩溶发育深度受侵蚀基准面控制

对研究区岩溶大泉(流量>5 L·s<sup>-1</sup>)、地下河出口、洼地底部高程以及溶洞高程进行分段统计(图12),

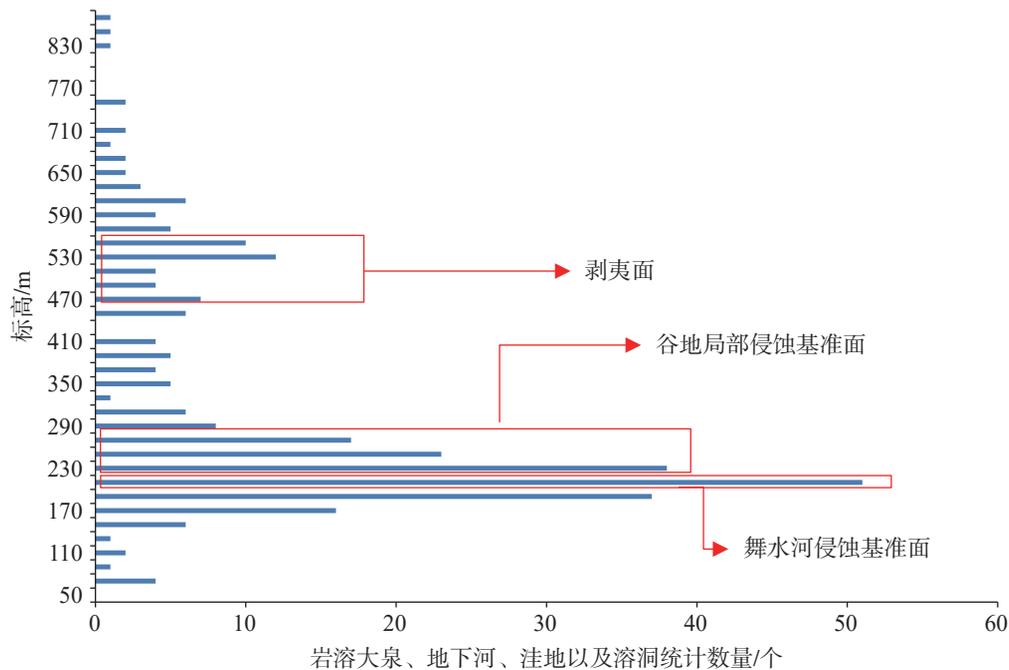


图12 研究区岩溶形态垂向发育特征统计

Fig. 12 Statistics of vertical development characteristics of karst morphology in the study area

按照岩溶形态集中分布的高程,发现研究区自高向低存在三个溶蚀最发育段,其标高分别为500~600 m、210~270 m以及190~210 m。

其中,500~600 m基本对应于该地区500~600 m的剥夷面<sup>[27]</sup>,岩溶形态主要为洼地及个别地下河、岩溶大泉;210~270 m对应沅阳—怀化—中方谷地这一局部侵蚀基准面,岩溶形态主要为岩溶大泉、地下河出口;190~210 m则对应舞水河侵蚀基准面<sup>[28]</sup>,岩溶形态主要为谷地内覆盖层下的溶孔、溶隙及溶洞,溶洞一般发育3~4层,最多可达9层。500~600 m溶蚀发育段反映出历史侵蚀基准面对岩溶发育的控制,而210~270 m及190~210 m溶蚀发育段总体反映出现今侵蚀基准面对岩溶发育的控制作用。

### 3.5 岩溶发育受地貌与水动力条件控制

一般来说,灰岩的岩溶发育强度高于白云岩,但是在不同的地貌单元,其水动力条件不同,岩溶发育程度差异性较大。例如,白沙—菜门溪一带虽为C<sub>2</sub>d白云岩,但该地区为高位溶蚀构造峰脊洼地,与沅阳谷地的高差相差150~550 m,远高于侵蚀基准面,地形坡度和岩溶地下水水力坡度大(0.192~0.230),属地下水补给径流区,其间发育大量洼地及落水洞,大气降水以垂直入渗或直接灌入形式补给地下水,地下水径流方向以垂直入渗为主,其循环交替条件佳,岩溶发育强烈,区内岩溶塌陷、岩溶洼地密度分

别为0.55、0.98个·km<sup>-2</sup>,地下河密度达20.7 km·(100 km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>,远高于岩冲—潭口、庆湾—宝寨以及沅阳—怀化—中方一带的地下河、洼地发育密度。同时,该地区地下河流量占研究区地下河总流量的94.6%,达1 007.9 L·s<sup>-1</sup>,富水性强。

其次,谷地内舞水河沿岸岩溶发育强烈,因为就研究区而言,舞水河为区域地下水排泄基准,排泄区地下水径流交替迅速,有利于岩溶发育。例如,区内某高铁线路舞水特大桥40#墩勘探揭露石炭系马平组(CPm)灰岩岩溶强烈发育,钻孔遇洞率甚至达到100%,且多孔遇到串珠状溶洞,最大洞高达7 m(图13)。

第三,山前冲洪积区岩溶发育强度相对强烈,其原因主要是因为该地区第四系覆盖层多为冲洪积层,除接受大气降雨补给外,还持续大量接受碎屑岩山区外源水补给,地下水交替循环强烈,岩溶发育也相对强烈,典型地段如中方谷地内的主要供水机井多位于东侧碎屑岩山区的山前冲洪积区,机井单井出水量一般为603.4~891.9 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,大者达1 639.9 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>。

### 3.6 可溶岩与非可溶岩接触带岩溶发育特征

可溶岩与非可溶岩接触地带,由于非可溶岩的阻隔作用,有利于地下水的富集,水动力条件增强,同时,由于大量碎屑岩区外源水汇入,地下水溶蚀能

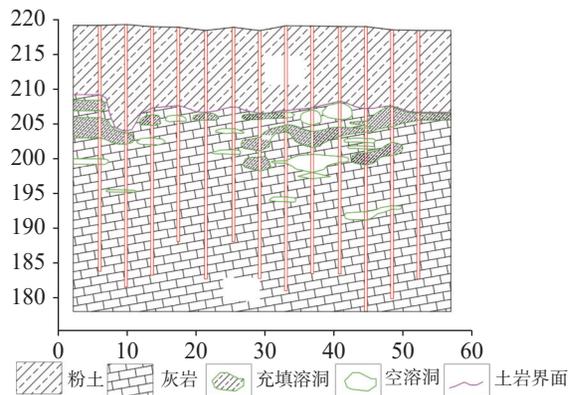


图 13 舞水特大桥 40#墩剖面图

Fig. 13 Cross section of Wushui bridge 40# pier

力增强,有利于岩溶发育。例如,裕鸿电站地下河发育于大埔组白云质与污泥塘组炭质板岩接触带上(图 14),岩溶发育,水量丰富,其流量达  $595.0 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,占研究区地下河总流量的 55.9%;沪昆高铁沿怀化盆地边缘通过,恰位于可溶岩与非可溶岩接触带上,线路勘察资料揭示钻孔遇洞率 65.6%~67.7%,线岩溶率 2.1%~31.8%,溶洞呈多层串珠状发育,单个溶洞最大高度达 13.65 m<sup>[7]</sup>,岩溶发育强度明显高于非接触带上的岩溶发育强度。此外,由表 3 可知,区内二叠系上统吴家坪组( $P_3w$ )的遇洞率高达 87.5%,明显高于其他地层,这主要与其下伏龙潭组( $P_3l$ )煤系地层的阻隔作用有关。

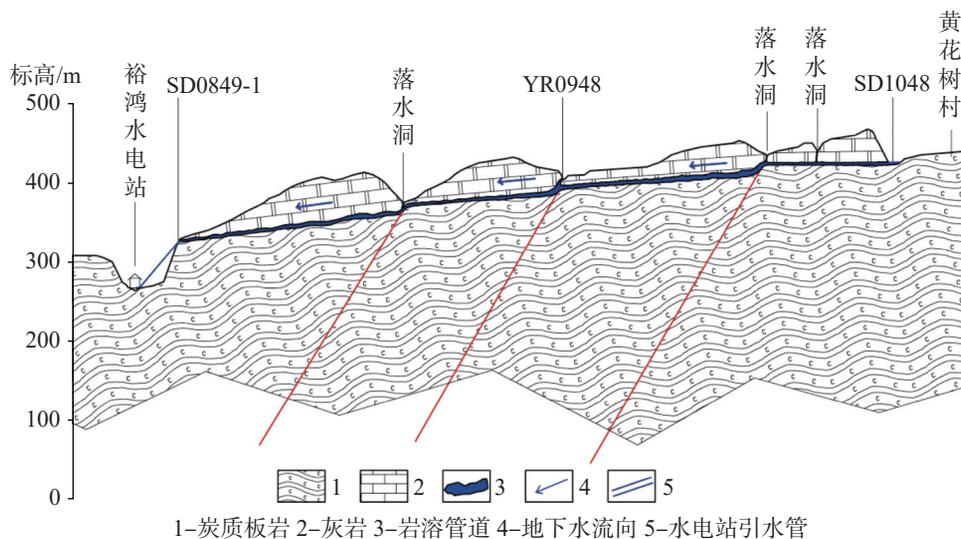


图 14 裕鸿电站地下河剖面示意图

Fig. 14 Schematic diagram of underground river section of Yuhong hydropower station

#### 4 岩溶发育分区

根据上述岩溶发育特征分析,并结合区内岩溶调查资料的统计结果(表 5),以《岩溶塌陷调查规范》(试行稿)<sup>[29]</sup>相关规定为依据,将研究区碳酸盐岩岩溶发育划分为强、中、弱三个等级,红层灰砾岩划分为弱发育。灰岩强岩溶发育地段分布于沅阳—城东新区—主城区一带;白云岩强岩溶发育地段分布于白沙—菜门溪村一带(图 15)。

#### 5 结论与建议

(1)研究区可溶岩空间分布不均匀,以覆盖型岩

溶区为主,局部为埋藏型岩溶区。溶沟、石牙、落水洞等形态全区发育,而地下河则主要发育于研究区东部白沙—菜门溪一带的溶蚀构造峰脊洼地区;

(2)区内岩溶发育主要受地层层组控制,其次为岩性。其谷地内各地层岩溶发育强度依次为厚层灰岩( $CPm$ 、 $P_2m$ 、 $P_2q$ 、 $P_3w$ )>白云岩( $C_2d$ )>红层灰砾岩( $K_1s$ )>薄层灰岩( $T_1d^2$ ),但受地貌、水动力条件等影响,溶蚀构造峰脊洼区的白云岩( $C_2d$ )岩溶发育明显较谷地内更为强烈;

(3)研究区自高向低存在三个溶蚀最发育段,其标高分别为 500~600 m、210~270 m 以及 190~210 m,分别受历史侵蚀基准面以及沅阳—怀化—中方谷地局部侵蚀基准面与舞水河侵蚀基准面控制。其中,

表 5 岩溶发育分区及特征描述

Table 5 Karst development zoning and characteristic description

分区	分布范围	面积/km <sup>2</sup>	地层代号	岩溶发育特征	水文地质指标
强	泸阳—西牛泉一带	52.83	CP <sub>m</sub> 、P <sub>2</sub> q、P <sub>2</sub> m、P <sub>3</sub> w	主要为覆盖型岩溶，水量丰富；岩溶水点密度平均0.73个·km <sup>-2</sup> ，塌陷密度平均0.82个·km <sup>-2</sup> ；区内有23个钻孔，14孔遇洞39个，遇洞率60.9%；最大单孔线岩溶率57.0%，平均线岩溶率13.9%	区内有49处泉点，流量一般为11.5~41.6 L·s <sup>-1</sup> ，最大流量为228.0 L·s <sup>-1</sup> (SD1159)，总流量为1 164.7 L·s <sup>-1</sup> ；区内机民井10处，开采强度较小，装泵量一般为5~10 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ；本次收集及施工的25处水文地质钻孔资料，14孔单井涌水量>1 000 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ，占总数的56.0%
中	怀化城区—高铁南站一带	15.32	CP <sub>m</sub> 、P <sub>2</sub> q、P <sub>2</sub> m、P <sub>3</sub> w	主要为覆盖型岩溶，水量丰富；岩溶水点密度平均0.46个·km <sup>-2</sup> (由于城区发展，大多数水点已消失)，塌陷密度平均0.20个·km <sup>-2</sup> ；区内有11个钻孔，5孔遇洞15个，遇洞率45.5%。最大单孔线岩溶率42.1%，平均线岩溶率3.8%	区内有16处泉点，流量一般为1.0~4.0 L·s <sup>-1</sup> ，最大流量为15.4 L·s <sup>-1</sup> (1-SD067)，总流量为65.3 L·s <sup>-1</sup> ；区内机民井6处，民井开采强度较小，机井装泵量一般为10~25 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ；本次收集及施工的23处水文地质钻孔资料，4孔单井涌水量>1 000 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ，占总数的17.4%
弱	金鸡洞—菜门溪村一带	53.02	C <sub>2</sub> d	主要为裸露型岩溶，水量丰富；岩溶水点密度平均0.55个·km <sup>-2</sup> ，塌陷密度平均0.55个·km <sup>-2</sup> ；区内有4个钻孔，1孔遇洞1个，遇洞率25.0%，单孔线岩溶率1.4%	区内有19处泉点，6条地下河，泉点流量一般为2.6~5.0 L·s <sup>-1</sup> ，最大流量为6.8 L·s <sup>-1</sup> (SD1353)，地下河流量最大为595.0 L·s <sup>-1</sup> (裕鸿水电站)，总流量为906.0 L·s <sup>-1</sup> ；区内主要引用泉点岩溶水，未调查到机民井

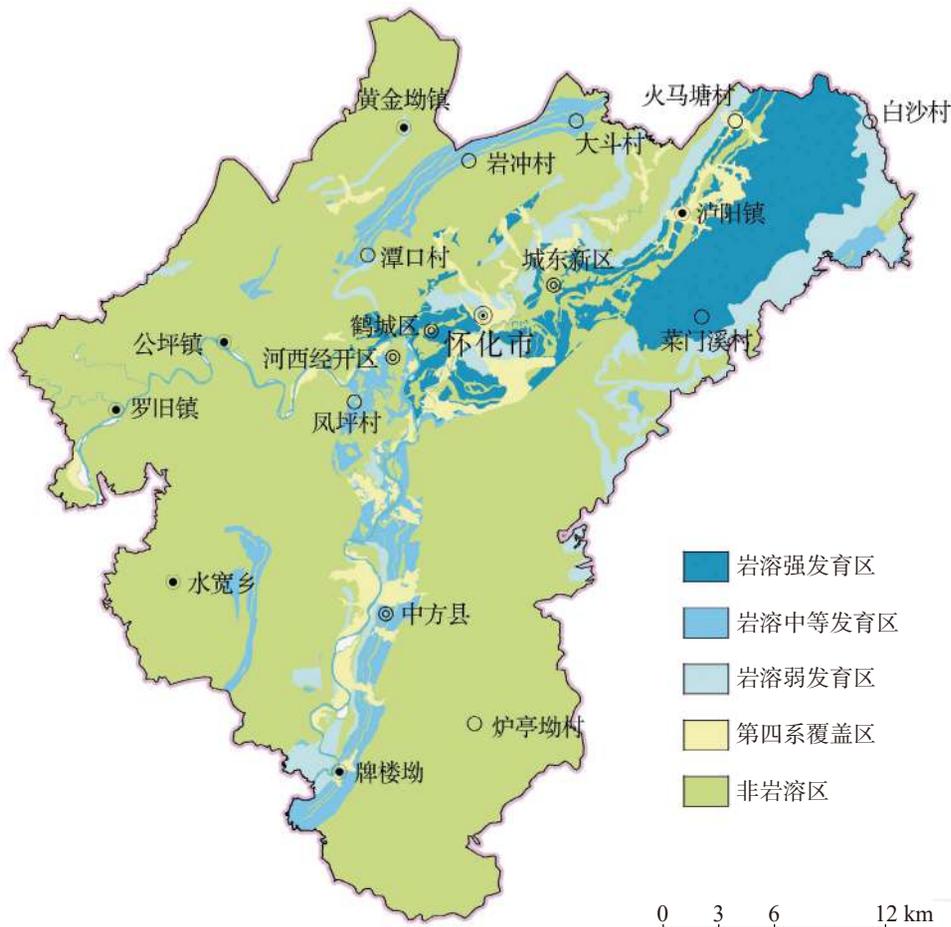


图 15 研究区岩溶发育程度分区图

Fig. 15 Zoning map of karst development in the study area

210~270 m 与 190~210 m 溶蚀发育段的主要岩溶形态分别为岩溶大泉、地下水及谷地覆盖层下的溶孔、溶隙及溶洞;

(4)在舞水河沿岸、断层带附近、可溶岩与非可溶岩接触带以及山前冲洪积区等地下水交替循环强烈地带,岩溶发育相对更为强烈;区内岩溶强发育区主要分布于沅阳—城东新区以及沅阳谷地南东侧的白沙—菜门溪村一带。在这些地区进行地下水开采、基坑疏干、桩基施工、隧道建设等工程活动时,需进行场地范围内的岩溶塌陷地质灾害专项风险评估。

### 参考文献

- [1] 马慧. 湖南省怀化市地质灾害区划与防治规划研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
MA Hui. Study on geological hazard zoning and prevention planning in Huaihua City, Hunan Province[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [2] 柏道远, 姜文, 钟响, 熊雄. 湘西沅麻盆地中生代构造变形特征及区域地质背景[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1851-1875.  
BAI Daoyuan, JIANG Wen, ZHONG Xiang, XIONG Xiong. Mesozoic-Cenozoic structural deformation characteristics of Yuanling-Mayang basin and regional tectonic setting[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1851-1875.
- [3] 李国亮, 刘耀荣, 柏道远, 王先辉, 何江南, 凌跃新, 杨俊. 湖南 1: 25万怀化幅区域地质调查主要成果及新认识[J]. 中国地质调查, 2016, 3(3): 38-46.  
LI Guoliang, LIU Yaorong, BAI Daoyuan, WANG Xianhui, HE Jiangnan, LING Yuexin, YANG Jun. New understanding and achievements in regional geological survey of 1:250,000 Huaihua sheet, Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(3): 38-46.
- [4] 雷旭友, 程凯. 电磁波CT在重庆至怀化铁路岩溶塌陷病害抢险勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(5): 561-565.  
LEI Xuyou, CHENG Kai. The application of electromagnetic wave CT method in exploration of dealing with emergency in the K419 karst collapse hazard on Chongqing-Huaihua railway line[J]. Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(5): 561-565.
- [5] 周笑, 林春洪. 沪昆客运专线怀化某段的工程地质问题分析[J]. 土工基础, 2012, 26(5): 72-74.  
ZHOU Xiao, LIN Chunhong. Some engineering geology problems in Huaihua section of Shanghai-Kunming passenger rail[J]. Geotechnical Foundation, 2012, 26(5): 72-74.
- [6] 孟庆文, 徐永明. 铁路客运专线岩溶发育区工程地质选线[Z]. 2012.3.  
MENG Qingwen, XU Yongming. Engineering-geological route selection of passenger dedicated railway in karst development area[Z]. 2012.3.
- [7] 林春洪, 张海鹏, 李文谦, 姚建强. 管波探测法在沪昆客运专线怀化段桩基岩溶勘探中的应用[J]. 福建建筑, 2013(8): 60-62.  
LIN Chunhong, ZHANG Haipeng, LI Wenqian, YAO Jianqiang. Tube wave detecting method on the Shanghai-Kunming passenger line pile of bedrock in Huaihua in karst exploration[J]. Fujian Architecture, 2013(8): 60-62.
- [8] 邬健强, 赵茹玥, 甘伏平, 张伟, 刘永亮, 朱超强. 综合电法在岩溶山区地下水勘探中的应用: 以湖南怀化长塘村为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 93-98.  
WU Jianqiang, ZHAO Ruyue, GAN Fuping, ZHANG Wei, LIU Yongliang, ZHU Chaoqiang. The application of electrical prospecting method to groundwater exploration in karst mountainous areas: A case study of Changtang village, Huaihua area, Hunan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 93-98.
- [9] 湖南省革命委员会地质局区测队. 1: 20万区域地质调查报告(芷江幅)[R]. 湖南怀化, 1973.  
Survey Team of Geological Bureau of Hunan Revolutionary Committee. 1: 200,000 Regional Geological Survey Report (Zhijiang) [R]. Huaihua, Hunan, 1973.
- [10] 中国人民解放军部队七三零部队. 1: 20万区域水文地质普查报告(芷江幅)[R]. 湖南怀化, 1975.  
Chinese People's Liberation Army 730 Unit. 1: 200,000 Regional Hydrogeological Survey Report (Zhijiang) [R]. Huaihua, Hunan, 1975.
- [11] 湖南省地质调查院. 1: 25万区域地质调查报告(怀化幅)[R]. 湖南长沙, 2014.  
Hunan Geological Survey Institute. 1: 250,000 Regional Geological Survey Report (Huaihua) [R]. Changsha, Hunan, 2014.
- [12] 吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 罗伟权, 潘宗源. 基于AHP和GIS技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价与应用[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 21-33.  
WU Yuanbin, LIU Zhikui, YIN Renchao, LEI Mingtang, DAI Jianling, LUO Wei-quan, PAN Zongyuan. Evaluation and application of karst collapse susceptibility in Huaihua area, Hunan Province based on AHP and GIS[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 21-33.
- [13] 姜文, 柏道远, 尹欧, 杨帆, 彭祖武, 钟响, 李彬, 李银敏. 湘中灰山港—煤炭坝地区岩溶发育特征及其构造控制[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 1-12.  
JIANG Wen, BAI Daoyuan, YIN Ou, YANG Fan, PENG Zuwu, ZHONG Xiang, LI Bin, LI Yinmin. The characteristics of karst development and its structural control in the Huishangang-Meitanba area of central Hunan[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 1-12.
- [14] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳晖. 基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 577-583.  
CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 577-583.

- [15] 贾龙, 雷明堂, 程小杰. 基于钻孔超声波成像的岩溶发育特征高精度探测和评价[J]. 地质通报, 2021: 1-9.  
JIA Long, LEI Mingtang, CHENG Xiaojie. High precision detection and evaluation of karst features based on borehole ultrasonic imaging[J]. Geological Bulletin of China. The geological report, 2021: 1-9.
- [16] Jia Long, Meng Yang, Li Lujuan, Yin Renchao. A multidisciplinary approach in cover-collapse sinkhole analyses in the mantle karst from Guangzhou City[J]. Natural hazards (Dordrecht), 2021, 108(1): 1389.
- [17] 蒙彦, 郑小战, 雷明堂, 李卓骏, 贾龙, 潘宗源. 珠三角地区岩溶分布特征及发育规律[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 746-751.  
MENG Yan, ZHENG Xiaozhan, LEI Mingtang, LI Zhuojun, JIA Long, PAN Zongyuan. Karst distribution and development in the Pearl River Delta[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 746-751.
- [18] 黎志豪, 许光泉, 高加林, 张海涛, 杨婷婷. 安徽淮南舜耕山岩溶发育特征及其塌陷模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 86-93.  
LI Zhihao, XU Guangquan, GAO Jialin, ZHANG Haitao, YANG Tingting. Characteristics of karst development and collapse mechanism in Shungeng Mountain, Huainan, Anhui Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 86-93.
- [19] 罗利川, 梁杏, 周宏, 谢凯, 陈标典. 香溪河流域岩溶洞穴发育与分布特征[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 450-461.  
LUO Lichuan, LIANG Xing, ZHOU Hong, XIE Kai, CHEN Biaodian. Development and distribution characteristics of karst caves in the Xiangxi river basin[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 450-461.
- [20] 李慧娟, 金小刚, 涂婧, 魏瑞均, 李海涛, 杨涛. 湖北武汉典型地区岩溶发育特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 40-47.  
LI Huijuan, JIN Xiaogang, TU Jing, WEI Ruijun, LI Haitao, YANG Tao. Analysis on characteristics of karst development in Wuhan of Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 40-47.
- [21] 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京: 地质出版社, 1988.  
YUAN Daoxian. Karst Dictionary [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [22] Luo Mingming, Chen Zhihua, Zhou Hong, Hamza Jakada, Zhang Liang, Han Zhaofeng, Shi Tingting. Identifying structure and function of karst aquifer system using multiple field methods in karst trough valley area, South China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 824.
- [23] 谭开鸥, 李玉生. 重庆地区的岩溶塌陷及其形成机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995(3): 23-27.  
TAN Kaiou, LI Yusheng. Karst collapse and its formation mechanism in Chongqing region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995(3): 23-27.
- [24] 湖南省地质矿产局四零七队. 湖南省怀化地区石灰岩区划地质报告[R]. 湖南怀化, 1985.  
Team 407, Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources. Geological Report of Limestone Regionalization in Huaihua Area of Hunan Province [R]. Huaihua, Hunan, 1985.
- [25] 湖南省怀化市国土资源局. 怀化市地质矿产志[R]. 湖南怀化, 2014.  
Huaihua City, Hunan Province Land and Resources Bureau. Geology and Mineral Resources of Huaihua City [R]. Huaihua, Hunan, 2014.
- [26] 魏永耀, 孙树林, 黄敬军, 姜素, 缪世贤. 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 52-57.  
WEI Yongyao, SUN Shulin, HUANG Jingjun, JIANG Su, MIAO Shixian. Spatial-temporal distribution and causes of karst collapse in the Xuzhou area[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(1): 52-57.
- [27] 中国人民解放军建字七三零部队. 1:20万区域水文地质普查报告(溆浦幅)[R]. 湖南怀化, 1976.  
730 Unit of Chinese People's Liberation Army. Report of 1:200,000 Regional Hydrogeology Survey (Xupu) [R]. Huaihua, Hunan, 1976.
- [28] 湖南省建设工程勘察院. 怀化经济开发区高铁以北指定的经开区范围场地岩土工程可行性研究勘察报告[R]. 湖南怀化, 2011.  
Hunan Construction Engineering Investigation Institute. Investigation Report of Geotechnical Engineering Feasibility Study in Designated Area North of High-speed Railway in Huaihua Economic Development Zone [R]. Huaihua, Hunan, 2011.
- [29] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 1:50 000岩溶塌陷调查规范(报批稿)[S]. 桂林, 2022.  
Institute of Karst Geology, CAGS. Code for Geological Investigation of Karst Collapse (1:50,000) (Draft for approval) [S]. Guilin, 2022.

## Karst development characteristics and distribution law in Huaihua basin, Hunan Province

WU Yuanbin<sup>1,2</sup>, LIU Zhikui<sup>1</sup>, YIN Renchao<sup>2</sup>, YANG Jianxing<sup>3</sup>, LUO Weiquan<sup>2</sup>,  
LEI Mingtang<sup>2</sup>, DAI Jianling<sup>2</sup>, PAN Zongyuan<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/  
Key Laboratory of Karst Dynamic, MNR&GZAR/ Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS, Guilin, Guangxi 541004, China;  
3. 407 Geological Party of Hunan Province, Huaihua, Hunan 418000, China)

**Abstract** Huaihua basin is located at the center of the marginal areas of Hunan, Hubei, Chongqing, Guizhou and Guangxi. Shanghai-Kunming high-speed railway, Zhangjiajie-Jishou-Huaihua high-speed railway, Huaihua-Guilin high-speed railway (under planning), Chongqing-Huaihua high-speed railway and Huaihua-Shaoyang-Hengyang high-speed railway converge in Huaihua basin in the shape of Chinese character "mi", which makes Huaihua City a new national comprehensive transportation hub.

Located in the zone of temperate subtropical monsoon climate, the study area is humid with abundant rainfall. The average rainfall over the year is 1,326.3 mm, with the maximum of 1,663 mm. Rainfall is mainly concentrated in April to August, accounting for more than 70% of the average annual precipitation. The landforms of the study area are mainly middle and low mountains and karst valleys. In the west is Zhongpo mountain-Shiziyan mountain range, and in the east is Liangshan mountain range. The overall topography is high in the northwest and southeast, and low in the middle, showing a basin form spreading in the NNE to NNE. The pure carbonate strata in the study area from old to new sequence are middle Dapu formation of Carboniferous ( $C_2d$ ), upper Maping formation (CPm), middle Qixia formation of Permian ( $P_2q$ ), Maokou formation ( $P_2m$ ), upper Wujiaping formation ( $P_3w$ ), second section of lower Daye formation of Triassic ( $T_1d^2$ ), and lower Shimen formation of Cretaceous ( $K_1s$ ). The regional structure in the area belongs to the Neocathaysian tectonic system, which is located in the contact zone of thrust-fold belt between the Yuanma basin and the Xuefengshan. The main structure in the area is the north (north) east compressive structure, and the others are associated structures.

The geological structure of Huaihua basin is very complex and karst is strongly developed. However, the previous studies mainly focus on the basic introduction of karst development characteristics in a small area. In addition, the 1 : 50,000 regional geological-and-hydrogeological survey has not yet covered the study area. Therefore, the geological research in this area is generally not profound, and the existing geological data is difficult to meet the needs of urban planning and construction. Taking carbonate rocks in the area as the research object, a large number of previous geological data has been collected and analyzed. New geological investigation and drilling have been used to explore the space characteristics of strata and lithology combination. The characteristics of karst development in Huaihua basin have been systematically summarized from six aspects, namely, karst morphology, strata and lithology, tectonic conditions, base level of erosion, landform and hydrodynamic conditions, the contact zones of soluble and non-soluble rocks. Furthermore, Huaihua basin has been zoned according to the development degree of karst.

The research findings show as follows,

(1) The spatial distribution of soluble rocks in the study area is not uniform, mainly in covering karst areas and partially in buried-karst areas. Solution grooves, stone teeth and sinkholes are developed in the whole area, while the underground river is mainly developed in the tectonically dissolved peak ridge depression in the Baisha-Caimenxi area in the eastern part of the study area.

(2) Karst development in the area is mainly controlled by the stratigraphic group, and the next controlling factor

(下转第 807 页)