

文章编号:1001-4810(2013)03-0266-14

# 重庆地区岩溶地下河发育与分布的基本特征

蒲俊兵

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室  
/联合国教科文组织国际岩溶研究中心,广西 桂林 541004)

**摘 要:**岩溶地下河是我国西南岩溶地区地下水资源赋存的主要形式,是重要的水源地。本文以重庆市域范围内 1:20 万水文地质普查报告为基础,结合大量的野外调查工作,从岩性、构造、地貌等角度总结了重庆岩溶区地下河发育、分布的基本特征。结果表明在质纯层厚的石灰岩中地下河最为发育,而在其它碳酸盐岩层组中,由于碳酸钙含量下降,岩溶率下降,地下河弱发育或不发育。在重庆地区,受到区域构造条件的影响,岩溶地下河管道多沿构造线展布。区域褶皱(向斜、背斜、褶皱转折部位)、构造复合部位、断裂等地质构造特征均影响了岩溶地下河的发育和分布。重庆地区的层状夷平面地貌,控制了岩溶地下河的补给和排泄,地下河多在低一级夷平面形成的河谷、沟谷中出露。根据重庆地区岩溶水的水动力特征和循环条件,将地下河分为汇流型、分流型和平行流型 3 种类型。

**关键词:**地下河;发育;分布;影响因素;重庆

**中图分类号:**P642.25 **文献标识码:**A

## 0 引 言

我国西南地区是世界上连片分布的最大的岩溶区,面积约 53.26 万 km<sup>2</sup>。袁丙华等最新的统计结果显示,西南岩溶地区地下河有 3 066 条<sup>[1]</sup>,构成该地区重要的地下水资源。在 2009 年底至 2010 年春季,我国西南岩溶区的滇、黔、桂、川、渝部分地区遭受了百年不遇的特大干旱<sup>[2]</sup>,在抗旱救灾的紧急关头,将岩溶地区广泛分布的地下河作为应急水源的需求显得非常迫切。时任国务院总理的温家宝在指导抗旱工作时指出<sup>[3]</sup>“西南石灰岩地区,水并没有完全跑掉,有的进入了地下水库、地下溶洞、地下暗河,要摸清石灰岩地区地下水分布状况”。对西南岩溶地下河的研究也历来受到众多学者的高度关注。近年来的岩溶地下河研究成果主要涉及到地下河形成分布及水资源特征<sup>[4]</sup>、地下河开发利用<sup>[5]</sup>、地下河水文动态研究

及水文数值模拟<sup>[6-8]</sup>、地下河流域脆弱性评价<sup>[9]</sup>、地下河示踪实验<sup>[10]</sup>、地下河水文地球化学特征<sup>[11-13]</sup>等工作,并取得了丰硕成果。然而,从国民经济发展和抗旱应急需要的角度来看,对区域上特别是一个行政区内的地下河的发育特征和分布的基本情况的总结显得不足。因此,本文以重庆市域范围内 1:20 万水文地质普查报告为基础,结合 2007—2011 年在重庆地区进行的地下河分布情况调查资料,从岩性、构造、地貌等角度系统总结了重庆岩溶区地下河发育、分布的基本特征,以期对重庆地区岩溶地下水资源合理开发、抗旱救灾工作及岩溶山区居民生产生活用水安全发挥参考作用。

## 1 重庆市岩溶水文地质概况

重庆市位于长江上游三峡库区,位于我国地貌第

基金项目:重庆自然科学基金项目(CSTC2007BC7001,CSTC2010BC7004)

作者简介:蒲俊兵(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事岩溶水文地质学的工作。E-mail:junbingpu@hotmail.com。

收稿日期:2013-02-19

二级阶梯和第三级阶梯的转折部位;其地理坐标为  $105^{\circ}17'\sim110^{\circ}11'E$ ,  $28^{\circ}10'\sim32^{\circ}13'N$ ;属亚热带湿润季风气候,多年平均气温为  $14^{\circ}C$  左右,多年平均降雨量  $1\ 200\ mm$ ,但降雨在时间分布上差异较大,约  $70\ \%$  集中在  $5-9$  月,且多暴雨。

重庆市域面积约  $8.24$  万  $km^2$ ,其中岩溶区(含碎屑岩夹碳酸盐岩)分布面积约  $3.0$  万  $km^2$ ,占全市总面积的  $36.49\ \%$ (图 1),是我国西南岩溶区的重要组成部分<sup>[14]</sup>。重庆岩溶区主要分布在渝东北大巴山褶皱山地和渝东南巫山一大娄山褶皱山地一带,其次分布在中西部平行岭谷区的背斜轴部。重庆市巫山、巫溪、彭水、城口、酉阳、武隆、奉节等 7 县碳酸盐岩分布面积在  $60\ \%$  以上,其中巫山、巫溪两县甚至超过了  $90\ \%$ <sup>[14]</sup>。从大地构造上来看,重庆地区的碳酸盐岩归属于扬子准地台区和秦岭地槽区,前者占  $90\ \%$  以

上。分布的地层主要是寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系。寒武系碳酸盐岩主要分布在渝东南大部分地区 and 渝东北巫溪、城口等地区,岩性以白云岩为主,总共出露面积约  $0.5$  万  $km^2$ ;奥陶系碳酸盐岩主要分布在渝东南大部分地区和渝东北巫溪、城口等地区,岩性以灰岩为主,总共出露面积约  $0.34$  万  $km^2$ ;二叠系碳酸盐岩在扬子地层区中广泛出露,岩性以灰岩为主,总共出露面积约  $0.43$  万  $km^2$ ;三叠系碳酸盐岩在扬子地层区中出露面积最大,岩性以灰岩为主,总共出露面积  $1.73$  万  $km^2$ 。重庆市地下水资源丰富,资源量约  $160.7$  亿  $m^3/a$ ,以岩溶水为主。岩溶水资源量约  $118.35$  亿  $m^3/a$ ,占地下水资源量的  $73.65\ \%$ <sup>[15]</sup>,主要分布在重庆市东北部和东南部。区内分布有岩溶地下河  $380$  条,水资源量约  $47.77$  亿  $m^3/a$ <sup>[4]</sup>(图 1)。

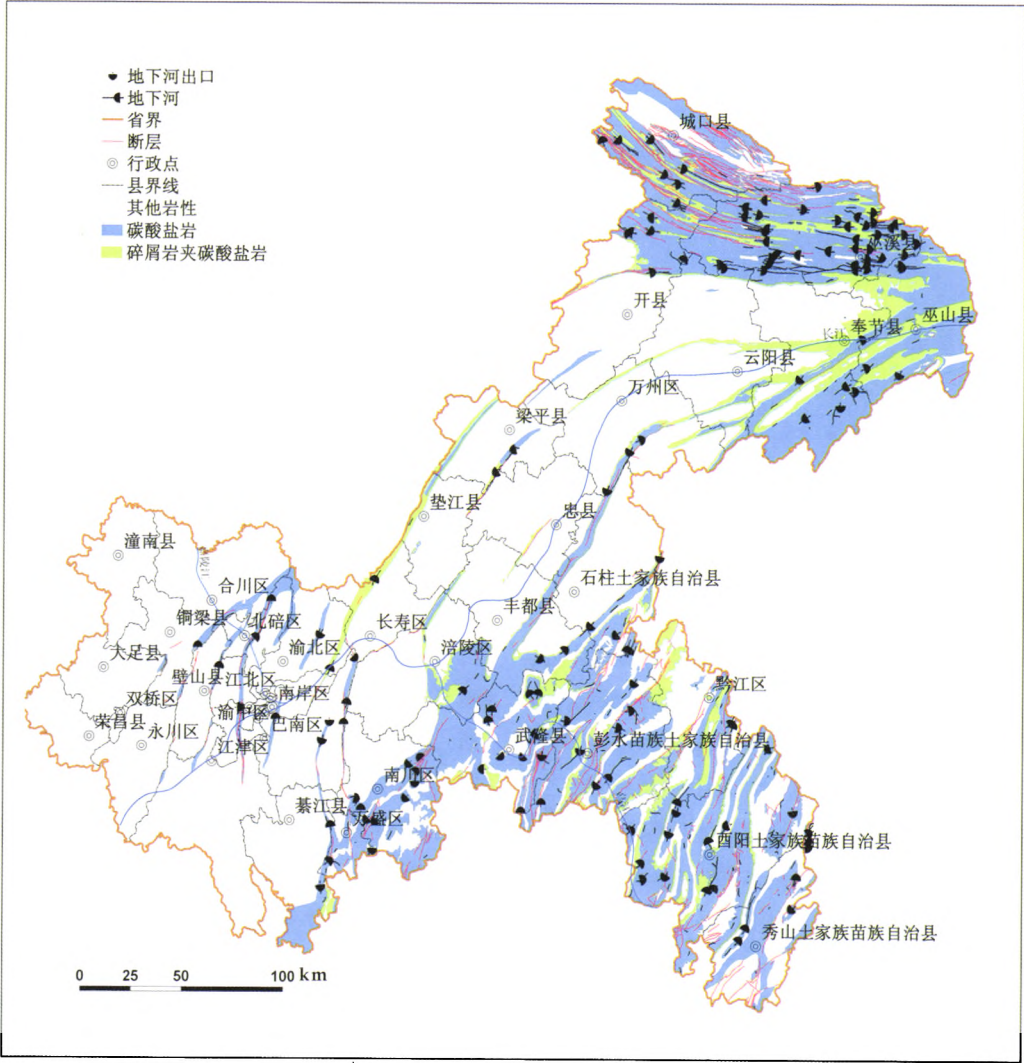


图 1 重庆市碳酸盐岩及地下河分布图

Fig. 1 Distribution of carbonate rocks and subterranean streams in Chongqing Municipality

重庆地区岩溶从中国岩溶区划来讲属于热带、亚热带湿润气候型岩溶区<sup>[16]</sup>。在季风气候控制下,水热配套条件较好,碳酸盐岩致密坚硬;加之,重庆地区新构造运动以来,区域大面积、大幅度间歇性的上升,而河流级级下切,给岩溶发育创造了良好的条件。另外,碳酸盐岩与非碳酸盐岩的间互状分布,使得在各个不同的海拔高度上发育了丰富多样的岩溶形态。其主要的宏观岩溶形态有溶丘—洼地、峰丛—洼地、垄脊—槽谷、垄岗—谷地、地下河、大型洞穴、天坑等。

2 地下河发育、分布的影响因素

2.1 岩组结构对地下河发育、分布的影响

岩组结构对地下河发育的影响体现在岩性、岩层

厚度和组合关系及分布面积等方面。

寒武系地层以白云岩地层为主,其溶解速率远远低于灰岩<sup>[17]</sup>,一般只在河谷地带和断裂带等地下水强烈循环带,溶蚀作用才较明显,也才有地下河或溶洞出现;另一个方面是白云岩抗压、抗拉、抗剪强度都低于灰岩,孔隙较灰岩发育,含水性比较均匀,多具有孔隙水的特征,导致其地下河不发育(图 2)。其余年代地层以灰岩为主,岩溶作用强烈,地下河较为发育。但在奥陶系、二叠系和三叠系中,又以三叠系的地下河数量最多,而奥陶系的地下河数量最少;这和碳酸盐岩厚度和分布面积有很大关系。前已述及,三叠系碳酸盐岩较其余碳酸盐岩地层出露面积广、厚度大,因此,三叠系中地下河分布数量多是有其物质基础的。

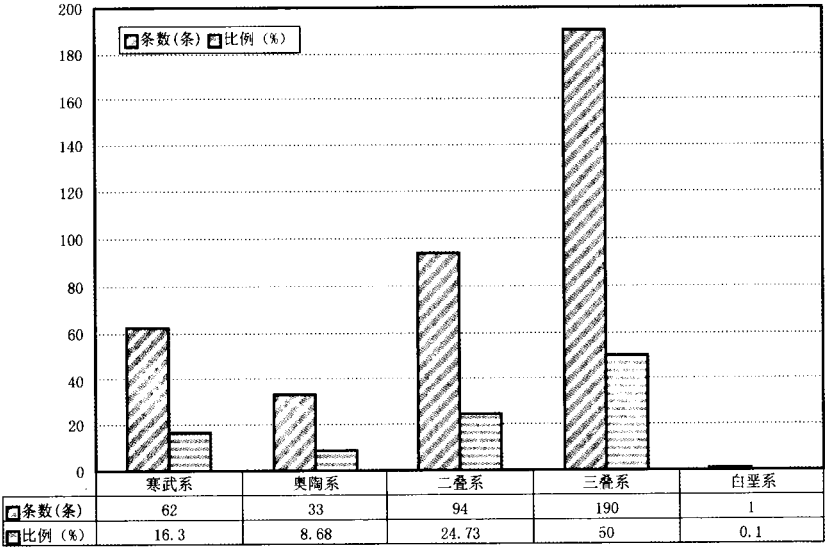


图 2 重庆地区各地层地下河分布情况图

Fig. 2 Distribution of subterranean streams in different strata in Chongqing

岩层的组合关系也是影响地下河发育、分布的重要因素之一。根据重庆地区的实际情况,将碳酸盐岩划分为以下岩溶岩组:①石灰岩,②石灰岩与白云岩互层,③白云岩,④碎屑岩、碳酸盐岩互层,⑤碎屑岩夹碳酸盐岩。在各岩组中,由于岩性不同其岩溶发育不同,因此其岩溶含水介质就不同。表 1 为南川南平镇附近地区岩溶统计表。第①岩组岩溶最为发育,溶洞、斗淋遍布,发育有石庆村(NC-7)地下河、湾滩老龙洞(NC-1)等大型地下河,以及史家大洞、猫儿洞等大型溶洞;第②岩组岩溶发育程度次之,溶洞、石芽、斗淋等也十分发育;后面几组岩溶发育程度均较差,特别是垂直岩溶形态不甚发育,第④、⑤岩组由于碳酸盐岩分布的成层性,岩溶多呈条带状发育,以顺

岩层走向的溶隙及规模不大的溶洞两种形态居多。表 2 为黔江、彭水、石柱地区的地下河的分布情况。第①、②岩组由于单层厚度大,碳酸钙百分比含量高,岩溶率较高,因此地下河数量多;第③岩组由于碳酸镁含量显著增加,岩溶率下降,因此地下河不甚发育,数量较第①、②岩组少;第⑤岩组由于有许多非可溶岩,碳酸盐岩分布成层性,因此限制了岩溶的发育,岩溶率较低,地下河不发育。

2.2 地质构造对地下河发育、分布的影响

构造格局影响了碳酸盐岩的分布及岩溶发育的方向和强度,进而控制了岩溶地下河的形成分布。总体来看,重庆地区岩溶发育及地下河展布的方向受到秦岭—昆仑纬向构造体系大巴山弧,川黔经向构造体

表 1 重庆南川南平镇一带岩溶发育统计表

Table 1 Statistics of karst phenomena in Nanping town, Nanchuan, Chongqing

| 岩组<br>类型 | 地层                             | 岩 性            | 面积/km <sup>2</sup> | 数 量/个 |     |     | 密 度/个/km <sup>2</sup> |      |      |
|----------|--------------------------------|----------------|--------------------|-------|-----|-----|-----------------------|------|------|
|          |                                |                |                    | 溶洞    | 斗淋  | 总计  | 溶洞                    | 斗淋   | 总计   |
| ①        | P <sub>1</sub>                 | 厚层灰岩           | 11.194             | 34    | 47  | 81  | 3                     | 4.2  | 7.2  |
| ①        | P <sub>2c</sub>                | 厚层灰岩           | 2.467              | 20    | 22  | 42  | 8.1                   | 9.9  | 18   |
| ①        | T <sub>1j</sub> <sup>1</sup>   | 灰岩夹白云质灰岩       | 4.769              | 10    | 2   | 12  | 2.1                   | 0.4  | 2.5  |
| ②        | T <sub>1j</sub> <sup>2-4</sup> | 白云质灰岩、灰岩、白云岩互层 | 26.673             | 28    | 27  | 55  | 1                     | 1    | 2    |
| ④        | T <sub>1f</sub>                | 灰岩、页岩互层        | 13.768             | 5     | 6   | 11  | 0.3                   | 0.4  | 0.7  |
| ⑤        | T <sub>2l</sub>                | 泥岩、页岩夹泥质白云岩、灰岩 | 2.698              | 1     | 0   | 1   | 0.37                  | 0    | 0.37 |
| 总计       | —                              | —              | 61.596             | 98    | 104 | 202 | 1.6                   | 1.69 | 3.29 |

注:修改自 1:20 万南川幅水文地质普查报告,p75。

表 2 黔江、彭水、石柱部分地区各岩组特征及地下河发育情况

Table 2 Characteristics of strata and distribution of subterranean streams in Qianjiang District, Pengshui County and Shizhu County

| 岩组 | 地层                | 岩 性       | 总厚度/m       | 单层厚度  | 碳酸盐岩含量/%          |                   | 面积岩溶率<br>/% | 地下河数量<br>/条 |
|----|-------------------|-----------|-------------|-------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
|    |                   |           |             |       | CaCO <sub>3</sub> | MgCO <sub>3</sub> |             |             |
| ①  | T <sub>1j</sub>   | 灰 岩       | 690.6~711.1 | 中至厚层  | 95                | —                 | 15~30       | 65          |
|    | T <sub>1d</sub>   | 灰 岩       | 341.7~427.9 | 薄至厚层  | 90                | —                 |             |             |
|    | P                 | 灰 岩       | 542~748     | 中至厚层  | 85~90             | <5                |             |             |
|    | ε <sub>1s</sub>   | 灰 岩       | 155~238     | 薄至厚层  | —                 | —                 |             |             |
|    | O <sub>1f+h</sub> | 灰 岩       | 112~127     | 中至巨厚层 | >85               | <5                |             |             |
|    | O <sub>1n</sub>   | 含生物碎屑灰岩   | 119~146     | 薄至厚层  | 90~100            | —                 |             |             |
| ②  | ε <sub>2gn</sub>  | 灰岩、白云岩互层  | 391~400     | 厚 层   | 30~40             | 50~60             | 10~20       | 12          |
|    | ε <sub>3m</sub>   | 白云岩、灰岩互层  | 146~255     | 中至厚层  | 80                | 15                |             |             |
| ③  | ε <sub>3g</sub>   | 白云岩       | 243~273     | 中至厚层  | —                 | —                 | 10~20       | 1           |
|    | ε <sub>2g</sub>   | 白云质灰岩与白云岩 | 63~74       | 厚 层   | 60                | 40                |             |             |
|    | ε <sub>2m</sub>   | 白云岩       | 212~343     | 薄至厚层  | 60                | 40                |             |             |
|    | Z <sub>dn</sub>   | 白云岩       | >463        | 中至巨厚层 | —                 | —                 |             |             |
| ⑤  | T <sub>2b</sub>   | 页岩夹灰岩     | 281~857     | 薄至中层  | 95                | —                 | <10         | 1           |
|    | O <sub>1d</sub>   | 页岩夹灰岩     | 109~172     | 中至薄层  | >90               | —                 |             |             |
|    | O <sub>2+3</sub>  | 灰岩        | 49.5~62.4   | 薄至中层  | 85                | —                 |             |             |

注:修改自 1:20 万黔江幅水文地质普查报告,p81。

系,华夏系和新华夏系的控制。大多数岩溶地下河的展布方向和区域的构造线方向相吻合。在渝东北地区受秦岭—昆仑纬向构造体系大巴山弧影响,地下河管道主要呈 NW—SE 展布;而在渝东南地区由于受到华夏系和新华夏系影响,地下河管道主要呈 NE—SW 展布。在川东褶皱带内由于地下河多位于背斜核部的碳酸盐岩中,因此地下河管道主要沿背斜呈纵向展布(主要为北东向、北北东向、南北向)。在一些构造复合部位由于断裂、裂隙高度发育,地下河管道的

分布情况比较复杂。具体来看,构造对岩溶地下河的影响主要分为以下 3 类:褶皱、构造复合部位及断裂。

2.2.1 褶皱构造对岩溶地下河的影响

2.2.1.1 向斜构造

碳酸盐岩位于向斜核部或出露于向斜两翼,有利于雨水及地表水的汇聚,在有良好隔水层时碳酸盐岩地层中常形成较大地下河。根据褶皱程度差异,向斜可分为宽缓向斜和紧密向斜。表 3 为黔江、彭水、石柱地区宽缓向斜和紧密向斜岩溶水文地质特征统计



形成与构造轮廓一致的垄脊山,构成区域性的地表分水岭。由于可溶岩往往分布于背斜核部,两翼受到非可溶岩的限制,核部往往被溶蚀形成槽谷,构成垄脊槽谷岩溶地貌,形成“一山二岭”或“一山三岭”的景观。核部往往分布有沿构造线延伸的地下河,多呈单

管道型,流量不大。地下河或排于横向谷中或在背斜倾伏端出露。重庆地区方斗山背斜、明月峡背斜、铜锣峡背斜、华蓥山帚状复背斜均是如此,分布十分广泛。图 5 为温塘峡背斜青木关地下河的水文地质图,地下河发育为典型的单管道型,地表岩溶形态发育,

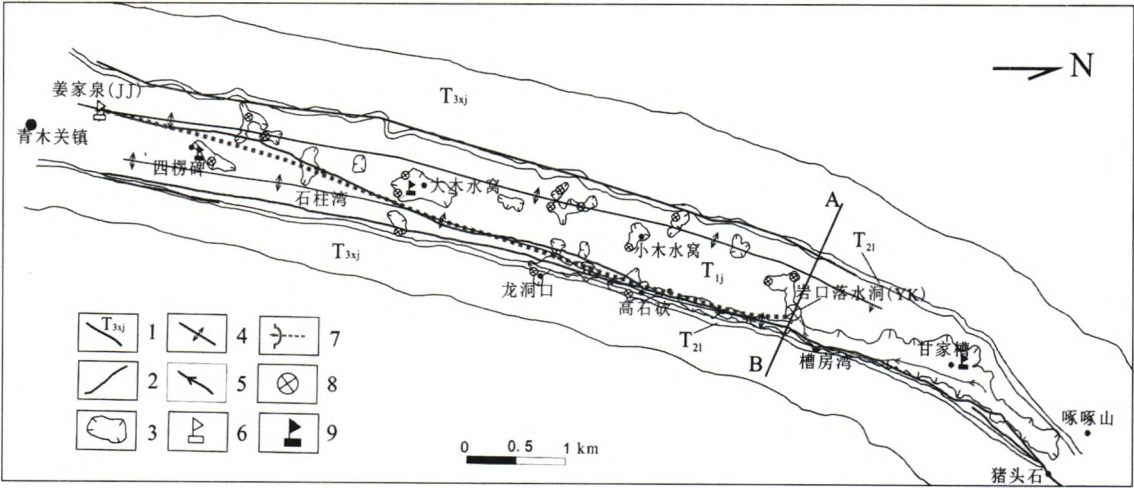


图 5 青木关水文地质简图<sup>[18]</sup>

Fig. 5 Hydrogeologic map of Qingmuguan subterranean stream system

1. 地层界线及代号;2. 断层;3. 洼地;4. 背斜轴线;5. 地表水流向;6. 观测站;7. 青木关地下河及出口;8. 落水洞;9. 气象站

洼地、落水洞遍布。

对于核部为可溶岩的穹隆构造,若周边为非可溶岩环绕,轴部则形成谷地,由于纵张裂隙发育,有利于岩溶作用进行,形成地下水富集地带,发育岩溶地下河。如接龙场背斜(图 6)核部为寒武系碳酸盐岩,周边被奥陶系的碎屑岩所夹持并形成隔水边界。轴部岩溶强烈发育,形成南北延伸的平行谷地、洼地,落水洞成串珠状分布,在近轴部发育成两条地下河(WL-7, WL-8)。另外一种情况是背斜轴部为非可溶岩,而两翼为可溶岩但周边又被非可溶岩所环抱,形成垄脊谷地地貌,形成大量的外源水,地下水由核部向两翼运动但又受到外部非可溶岩限制,翼部成为地下水汇集带,岩溶相当发育,地下河也多位于翼部。如石柱县与彭水县交界的老厂坪穹隆,其翼部发育了 4 条地下河(图 7)。

整个背斜由可溶岩构成的这种构造在重庆地区也广泛分布,主要在川东南陷褶带,大巴山弧等构造带。其特点为整个背斜轴部裂隙发育,形成垂直岩溶形态发育的良好通道,落水洞、漏斗等十分发育,使得地下水由轴部向两翼分散运动,形成的地下河、泉等多不在轴部而在两翼出露。但这还和原始裂隙发育程度以及两翼岩层倾角有关,其地下河分布规律较为复杂,既可以分布在岩层倾角较缓一翼,也可分布在岩层较陡一翼。

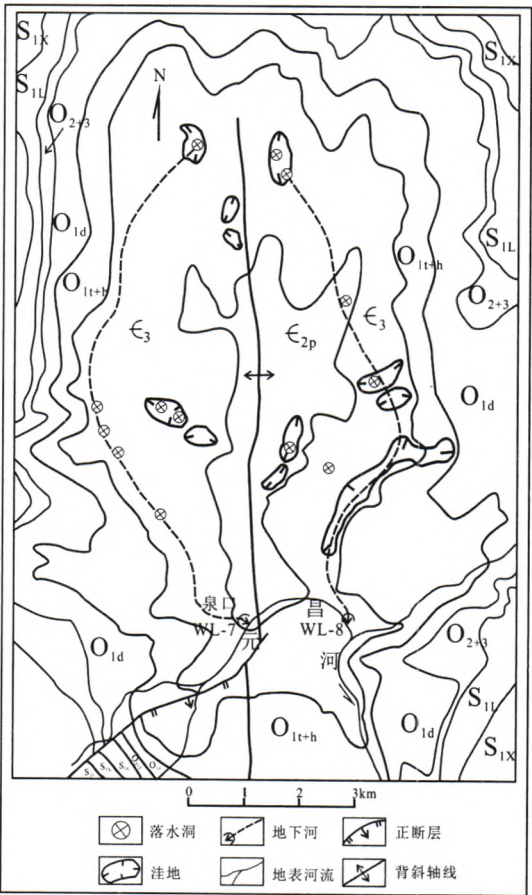


图 6 武隆接龙场穹隆水文地质图

(修改自 1:20 万涪陵幅水文地质普查报告, p74)

Fig. 6 Hydrogeologic map of Jielongchang dome structure in Wulong County

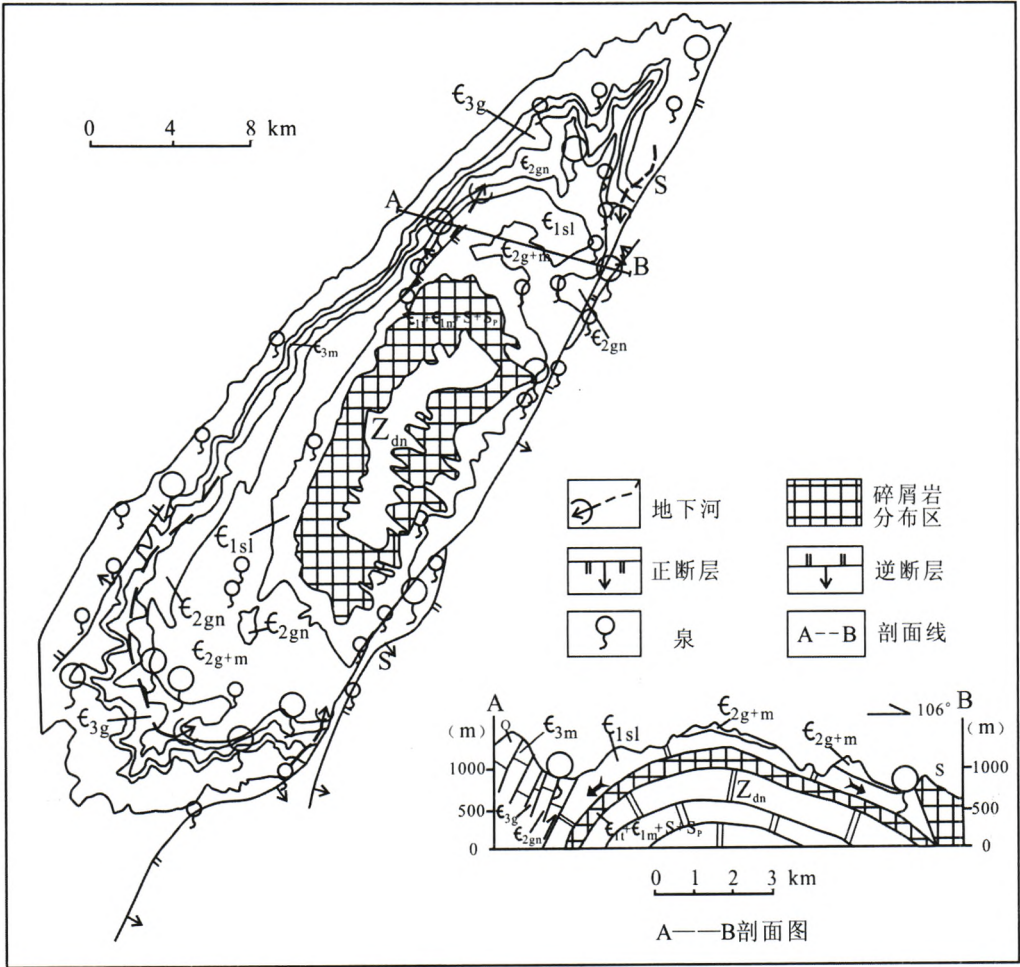


图 7 石柱县—彭水县老厂坪背斜水文地质图(改自 1:20 万黔江幅水文地质普查报告, p98)  
Fig. 7 Hydrogeologic map of Laochangping anticline in Shizhu County and Pengshui County

总的来看,无论地下河是发育在背斜的翼部还是核部,其展布方向都严格受构造线控制,有的甚至与地表水系平行成反向运动。如巫溪县土城乡杜家坪地下河(WX-17, WX-16),地下水由背斜核部向北翼流动过程中,由于受到北翼高倾角地层的阻隔,顺背斜北翼层间裂隙折为纵向径流,加之背斜向西部倾伏,又受西部横向河谷的影响,地下河的管道发育方向和流动方向就和区域性的地下水排泄基准面——西溪河流向相反(图 8),形成一种独特的岩溶水文地质现象。

2.2.1.3 褶皱转折部位

主要是指背斜倾没端和向斜翘起端。由于这些部位岩层走向及倾向均发生改变,岩体破裂,有利于岩溶发育,富水性较好。有两种情况:一种是在构造端部,层间滑动加剧,导致层面裂隙发育,岩溶管道也随岩层转折而转折。如涪陵区悦来镇大木峡背斜南端大木峡地下河(FL-1)管道先沿近南北方向发育

后转向北西—南东向(图 9),前述老厂坪背斜南部倾没端亦是如此(图 7);另一种是在构造变形过程中,沿端部产生的放射状张裂隙,岩溶管道沿纵向穿层发育。如涪陵罗云乡大耳山背斜倾没端形成的东脑壳伏流管道(图 10)。

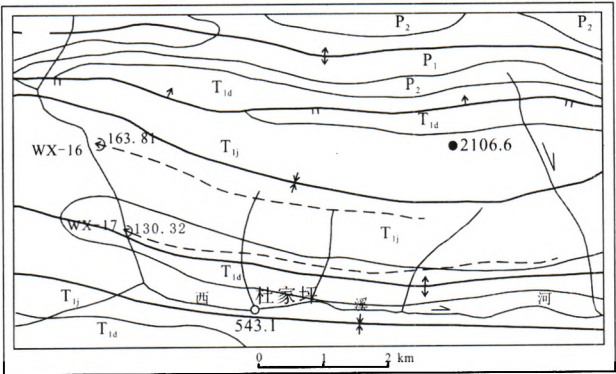


图 8 巫溪县土城乡杜家坪地下河水文地质图  
(修改自 1:20 万巫溪幅水文地质普查报告, p47)  
Fig. 8 Hydrogeologic map of Dujiaping subterranean stream in Tucheng town, Wuxi County

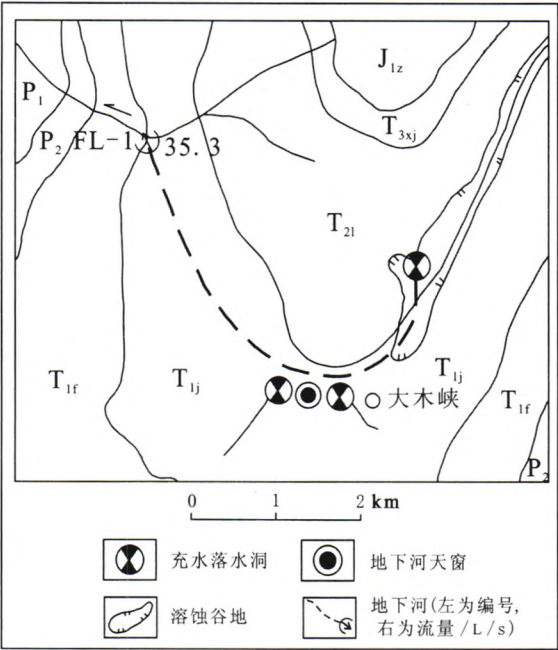


图 9 涪陵大木峡背斜倾没端水文地质图  
(修改自 1:20 万涪陵幅水文地质普查报告,p77)  
Fig. 9 Hydrogeologic map on the pitching tip of  
Damuxia anticline in Fuling County

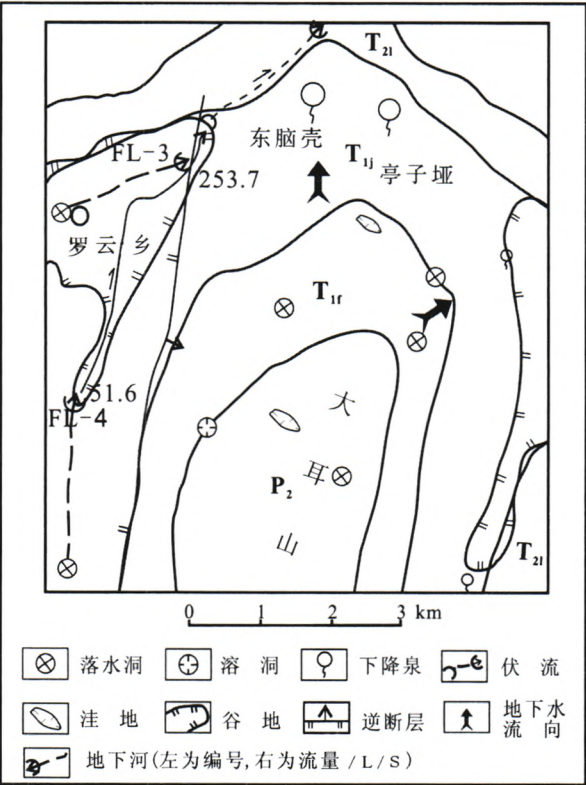


图 10 涪陵大耳山背斜倾没端水文地质图  
(修改自 1:20 万涪陵幅水文地质普查报告,p77)  
Fig. 10 Hydrogeologic map on the pitching tip of  
Daershan anticline in Fuling County

2.2.2 构造复合部位对岩溶地下河的影响

构造复合部位往往构造应力集中,裂隙发育,碳酸盐岩分布区岩溶发育,易形成地下河集中发育地区。渝东北地区处于大巴山弧与华夏系、新华夏系构造体系复合部位中的地下河有约 20 条。在一些次级构造复合部位也形成岩溶地下河的发育地区。如武隆县火炉镇境内东西向的沧沟向斜与南北向的甘田湾向斜在该地区反接复合,而接龙场背斜又和江口背斜在该区呈鞍状相接。出露嘉陵江组碳酸盐岩,地形低洼,岩溶率达 35 %,溶洞、落水洞等顺东西向及南北向排列,岩溶地下河管道沿东西向展布(WL-3),流量达 184 L/s,并有大量泉点分布(图 11)。

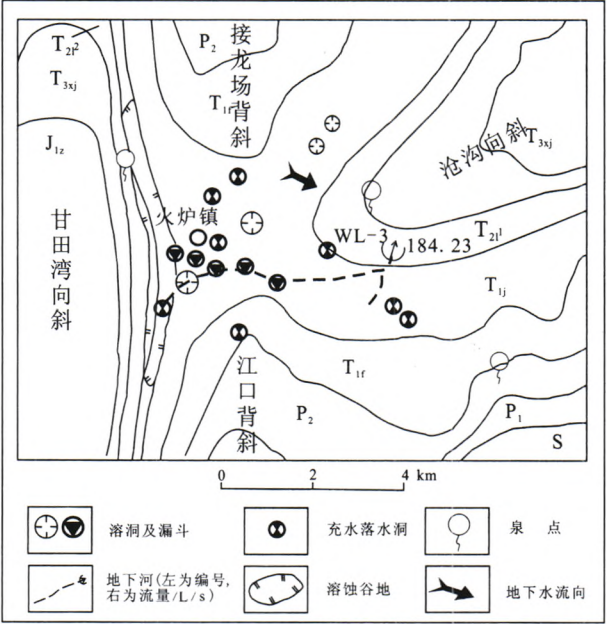


图 11 武隆县沧沟向斜西段构造复合部位岩溶地下河分布  
(修改自 1:20 万涪陵幅水文地质普查报告,p78)  
Fig. 11 Subterranean stream in compound tectonic part  
of western section of Changgou syncline, Wulong County

2.2.3 断裂构造对岩溶地下河的影响

在碳酸盐岩分布地区,断裂造成岩石破碎,利于岩溶发育和地下水的运动,可产生较多的地下河和泉点。它对地下水的控制体现在两个方面:一是断裂起到阻水作用,促使地下水在断裂附近排泄,这种情况以压性断裂居多;二是断裂起到导水和富水作用,使地下水在断裂带富集或运动,这种情况以张性断裂居多。

2.2.3.1 阻水断裂

若断裂两盘均为含水岩层,而在断裂面上多呈现压碎结构,多胶结较好的糜棱岩或角砾岩,则断裂处不利于岩溶水的运动,为阻水断裂,在断裂面分布区多地下河出口和泉点。如彭水保家镇附近郁山断裂,

北西盘为志留系沙页岩隔水层,南东盘为奥陶系、寒武系碳酸盐岩构成的含水层,区域地下水由南东向北西运动,在断裂带附近出露地下河 3 条(PS-9、PS-12、PS-13)。还有一种情况是沿阻水断层发育成地下河管道。涪陵焦石-罗云乡境内焦石坝断层,东盘上升为三叠系飞仙关组,西盘下降为嘉陵江组,断裂带挤压破碎,胶结紧密,形成阻水断层。沿下盘断层影响带低序次发育了 5 条地下河(图 12)。

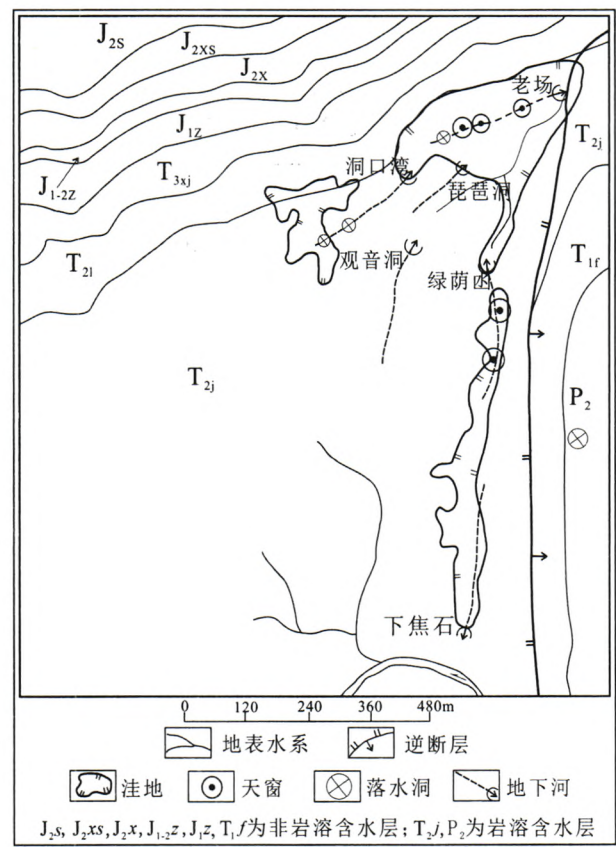


图 12 涪陵焦石镇地区水文地质图

(修改自 1:20 万涪陵水文地质普查报告,p76)

Fig. 12 Hydrogeologic map in Jiaoshi town, Fuling District

2.2.3.2 导水断裂

断裂两侧岩石破碎,胶结性差,形成良好的地下水运动通道,多发育有溶洞、地下河等岩溶形态,地下河水量较大,管道沿断层延伸方向展布,一些还具有穿断层性质。石柱黄鹤乡附近马武断裂,破坏了寒武系、奥陶系的碳酸盐岩含水层,断层附近岩层空隙裂隙发育,构成良好的导水条件。由于断裂作用,在地表也形成一断陷谷地,十分有利于地下水的补给。鱼泉口地下河(SZ-8)沿断裂发育,在中部还横穿断层,最后地下河分成两个出口,直接排泄于马武河(马盘溪)中,总流量约 800 L/s(图 13)。断裂交汇密集地带由于断裂作用,岩石破碎,有利于岩溶发育和岩溶水的汇集,地下河也较为发育,且管道展布多沿构造线分布。如酉阳县丁市镇附近为断裂交汇地带,发育有两条较大地下河(YY-21,YY-22)(图 14)。

造线分布。如酉阳县丁市镇附近为断裂交汇地带,发育有两条较大地下河(YY-21,YY-22)(图 14)。

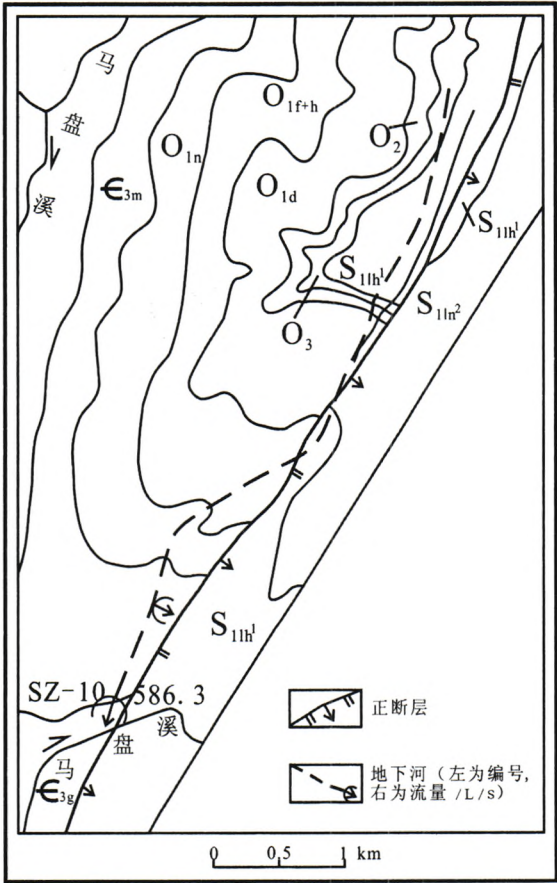


图 13 石柱黄鹤乡马武断裂附近水文地质图

(修改自 1:20 万黔江水文地质普查报告,p107)

Fig. 13 Hydrogeologic map nearby the Mawu fault in Huanghe town, Shizhu County

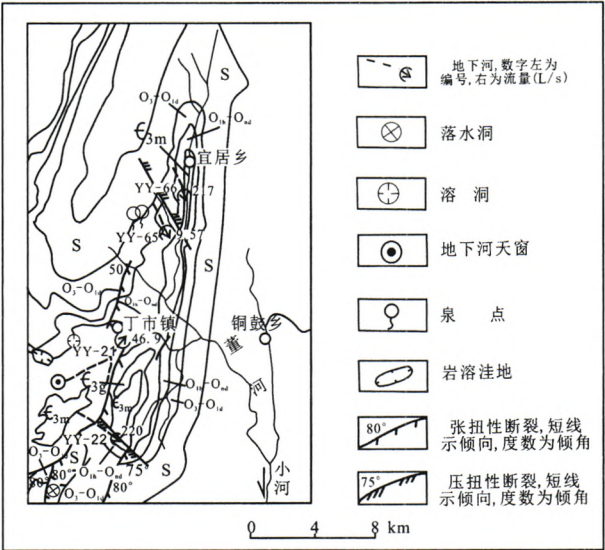


图 14 酉阳丁市镇附近水文地质图

(修改自 1:20 万酉阳水文地质普查报告,p83)

Fig. 14 Hydrogeologic map in Dingshi town, Youyang County

2.3 地貌条件对地下河发育、分布的控制

地貌形态是控制岩溶发育和岩溶地下河分布的一个重要因素。重庆地区最突出的一个地貌特点就是地貌的成层性。地貌的发展演变过程影响了区域岩溶的发育过程及岩溶水的补给、径流和排泄过程。高一级夷平面碳酸盐岩分布区多成为低一级夷平面地下水的补给区,区内地下水埋藏较深,出水点较少;在向低一级夷平面的过渡地带(斜坡地带),多出现成层的溶洞;地下河多在低一级夷平面的河谷、沟谷中出露。如长江三峡以北的巫溪、巫山等地区,地貌成层状向长江河谷和大宁河河谷降低。在大宁河河谷以西,受大巴山弧形构造的影响,地下河管道主要为东西向展布,同时因受地貌控制而在不同高程上排泄。最长的地下河可跨越 2 级以上的夷平面。当地下河跨越 3 级夷平面时,Ⅰ—Ⅱ级为补给径流区,在Ⅲ级排泄,位于中间一级的夷平面既是上一级的排泄区也是下一级的补给区。图 15 和图 16 展示了巫溪地区各级夷平面与地下河发育关系。正溪地下河出口标高为 800 m,相当于Ⅲ级夷平面的高度,而径流区在 1 700~2 000 m 高程上,相当于Ⅱ级平面,补给区在Ⅰ级平面上,地下河总长度达 36 km 左右,多年

平均流量 1 398 L/s。白洋河地下河,出口高程 625 m,相当于Ⅳ<sub>1</sub>级夷平面上,径流区在 700~800 m 高程上,相当于Ⅲ<sub>2</sub>级夷平面高程,而补给区在 900~1 500 m 高程上,相当于Ⅲ<sub>1</sub>级夷平面。该条地下河发源于核桃坝,全长约 17 km,多年平均流量 590 L/s。白龙过江地下河,补给面积达到 51 km<sup>2</sup>,有两个排泄口,枯水期出口在河底,丰水期上、下两个洞口同时排泄,补给区分布高程为 1 200~1 400 m 左右,径流区分布在约 700 m 高程的上磺坝地区。

| 夷平面<br>高程<br>(米)   | Ⅰ大官山期<br>(2100-2400) |                | Ⅱ鄂西期<br>(1700-2000) |                 | Ⅲ山原期<br>(700-1500) |                  | Ⅳ三峡期<br>(200-700) |                 |
|--------------------|----------------------|----------------|---------------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------|-----------------|
|                    | I <sub>1</sub>       | I <sub>2</sub> | II <sub>1</sub>     | II <sub>2</sub> | III <sub>1</sub>   | III <sub>2</sub> | IV <sub>1</sub>   | IV <sub>2</sub> |
|                    | 2300-<br>2400        | 2100-<br>2200  | 1900-<br>2000       | 1700-<br>1800   | 1200-<br>1500      | 700-<br>800      | 500-<br>700       | 200-<br>300     |
| 地下河<br>展布规律        |                      |                |                     |                 |                    |                  |                   |                 |
| 正溪地下河<br>(WX-33)   | ---                  | ---            | ---                 | ---             | ---                | ---              | ---               | ---             |
| 白洋河地下河<br>(WX-37)  |                      |                |                     |                 | ---                | ---              | ---               | ---             |
| 白龙过江地下河<br>(WX-40) |                      |                |                     |                 | ---                | ---              | ---               | ---             |

图 15 巫溪地区各级夷平面与地下河发育关系

(修改自 1:20 万巫溪幅水文地质普查报告,p52)

Fig. 15 Relationship between the planation surface at all levels and the formation of subterranean streams in Wuxi County

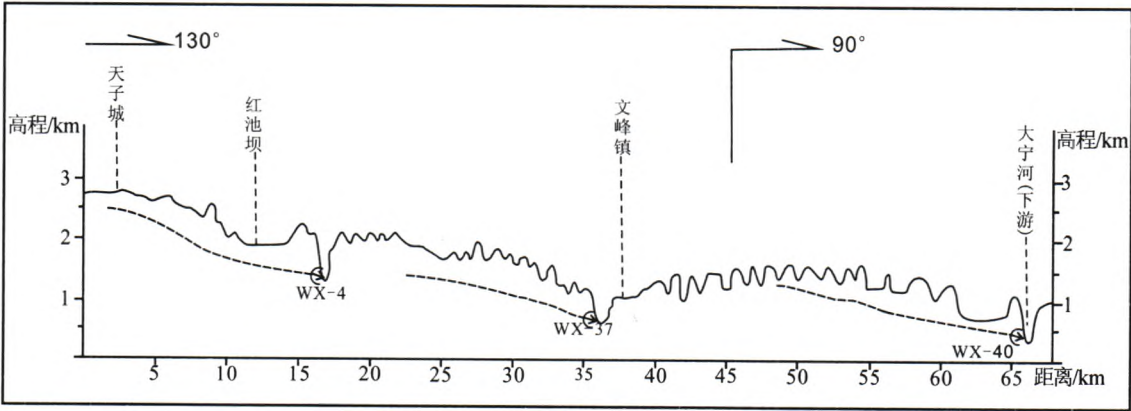


图 16 巫溪地区不同高程地下河展布(修改自 1:20 万巫溪幅水文地质普查报告,p55)

Fig. 16 Distribution of subterranean streams at different altitudes in Wuxi County

壅脊槽谷地区,由于地下水补给面积较少,虽然其洼地、谷地等可汇集大量地表水,岩溶地下管道规模也较大,地下河发育密度和径流模数往往较其它地貌区高,但流量往往不稳定,旱季可出现断流现象。在重庆地区,壅脊槽谷往往被地表河流切割形成横向谷,在河谷两侧形成对称性的岩溶地下水的集中排泄带,地下河出口多位于集中排泄带,且海拔越低的河

谷,地下河出口越多。如彭水地区的乌江沿岸(图 17),乌江横切一系列紧密褶皱,在乌江两侧发育大量的地下河,大量地下河口直接位于乌江边。然而若河流与壅脊槽谷方向相同即构成顺向河谷,使得地下水横向运动时,则近河谷段岩溶发育较弱,地下河发育程度低。

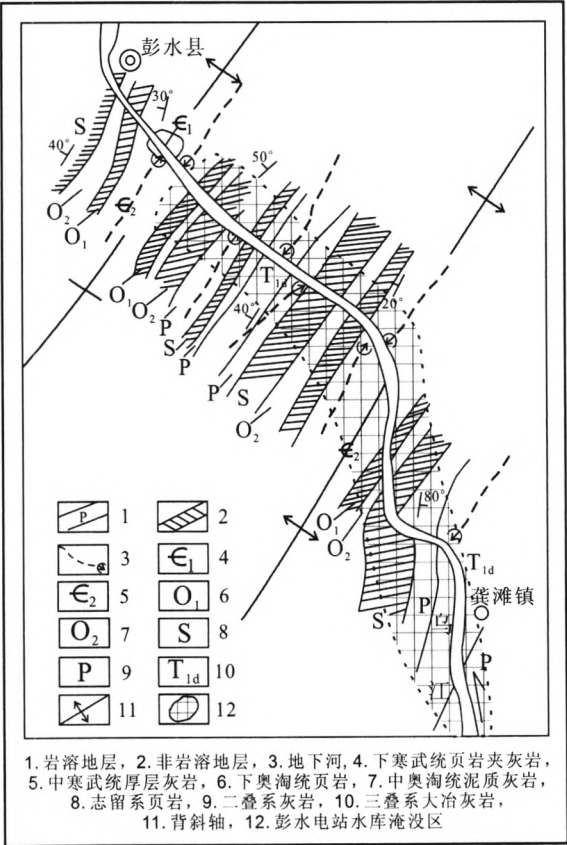


图 17 乌江沿岸部分地区水文地质图(修改自广西壮族自治区水文队编《岩溶地区供水水文地质工作方法》,地质出版社,1979,p22)

Fig. 17 Gongtan town-Pengshui County hydrogeologic map along the Wujiang River gorge

3 岩溶地下河类型划分<sup>①</sup>

根据重庆地区岩溶地下河所处的地貌、构造条件和岩组结构、岩溶发育程度的差异,以及岩溶地下河水的循环条件与水动力特征的不同,可将重庆地区的地下河水分为汇流型、分流型、平行流型 3 大类。

3.1 汇流型

该类型在构造上多位于向斜地区及宽缓背斜地区。地下水向轴部汇聚,多在轴部顺构造线发育大型地下河,而在两翼多有地下河支管道分布。其特点为区域地下河数量多,规模大,流量稳定,地下河调蓄功能强,如前述 PS-7 地下河(图 3)。渝东南地区的彭水县桑柘坪向斜、靛水向斜,黔江区的马槽坝向斜、箐箕滩背斜,渝东北奉节地区的茅草坝向斜、八阵图背斜,巫溪的上磺坝向斜等均属于此类。在一些穹窿构造中,两翼为非可溶岩环绕,而核部碳酸盐岩被溶蚀形成低地,也可发育此类型地下河。如前述接龙场背斜(图 6)。若在一些紧密背斜和向斜分布地区,发育有纵向河谷,地下水为适应区域性的排泄基准面,而向河谷运动也可发育地下河,但地下河管道多横向展布。如巫山县大昌镇境内大宁河支流麻渡河在石板泉背斜和马鹿溪向斜之间发育成纵向河谷,WSHAN-5、WSHAN-12 两条地下河横向排泄于麻渡河(图 18)。

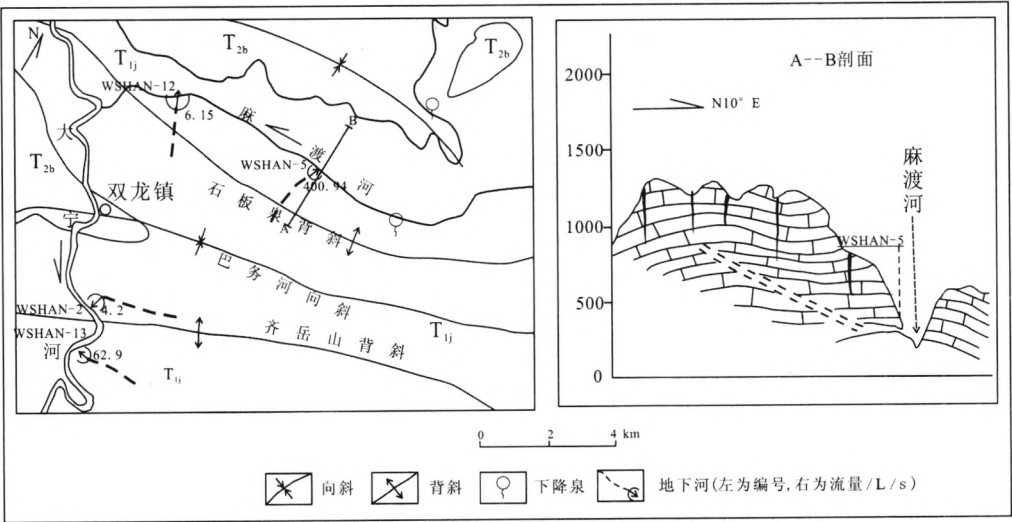


图 18 巫山县石板泉背斜附近水文地质图(修改自 1:20 万奉节幅水文地质普查报告,p124)

Fig. 18 Hydrogeologic map nearby the Shibanshan anticline in Wushan County

①本节部分资料和图参考重庆市范围内 1:20 万区域水文地质普查报告。

另一种汇流型地下河主要分布在背斜构造控制的垄脊槽谷地区,其背斜核部碳酸盐岩被溶蚀以后形成槽谷,而槽谷内部地表水系缺乏,区域性的地表水、降水等大都通过地表洼地、落水洞等向地下汇集,通过地下管道,纵向排泄,形成地下河。地下河水的水量主要取决于补给面积,但流量不稳定,调蓄功能较前述向斜地区差。重庆地区川东褶皱带内的地下河大多属于此类。如前述青木关地区(图 5)。

3.2 分流型

该类型在构造上多位于背斜地区。降水渗入地下后,受构造和地貌控制,由核部向两翼运动,排泄于背斜边缘的河谷、沟谷中,也可在背斜的一翼排泄。在这样的水文地质条件下,地下河管道既可以横向展布也可以纵向展布,管道既可以位于核部也可以在翼部,十分复杂。如前述石柱—彭水县交界的老厂坪背斜(图 7)其核部为非可溶岩,地下水从核部向两翼运

动,集中于背斜两端和南东翼,形成 3 个地下水溢出带,南东翼发育有 4 条地下河。

在一些向斜台原地区,其地形上为一中山波峰台原,岩性为二叠系灰岩,地表水通过落水洞、漏斗等渗入地下,在灰岩内部由于下伏志留系页岩的顶托作用,地下水向四周运动,以地下河或泉的形式在四周崖壁排泄,地下水的循环条件较好。该种类型在渝东南地区分布相当普遍,为重庆地区的另一大特色。如南川的金佛山(图 19),秀山境内平阳盖、川河盖,酉阳境内木桶盖、毛坝盖、炭山盖、广沿盖等。由于溯源侵蚀的影响,使得二叠系灰岩高高地隆起于周边地区,而下伏志留系页岩起到很好的隔水作用,使得地下河多分布于较高的海拔上。如金佛山水房泉(NC-13,图 19),秀山平阳盖的长岗地下河(XS-3)、羊桥湾地下河(XS-2)等。

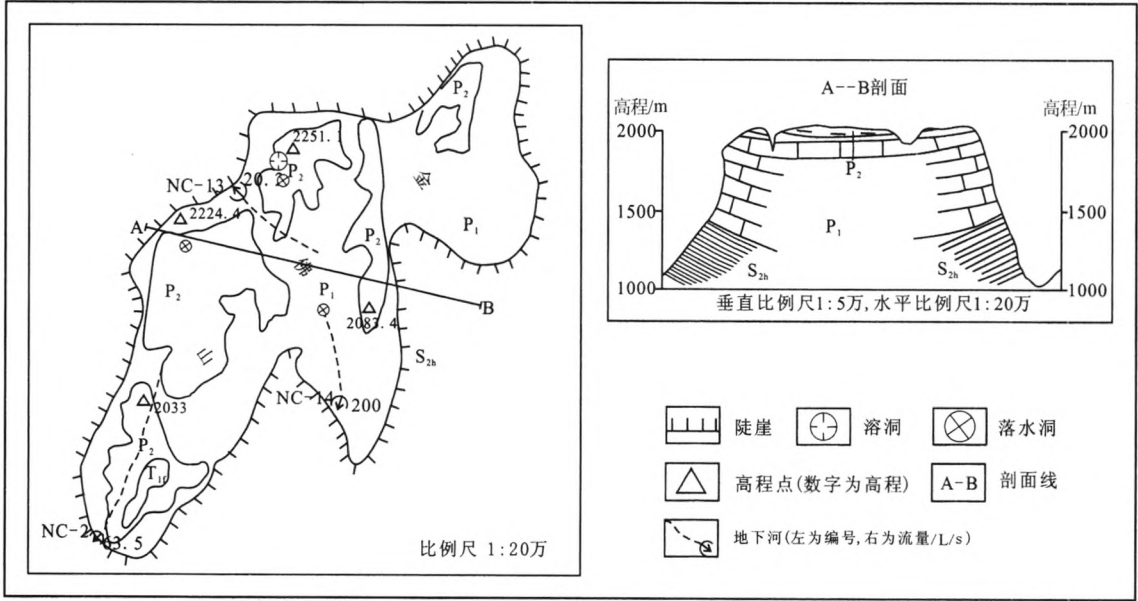


图 19 金佛山地区水文地质图(修改自 1:20 万南川幅水文地质普查报告,p68)  
Fig. 19 Hydrogeologic map in Jinfoshan Mountain, Nanchuan District

3.3 平行流型

受可溶岩与非可溶岩相间分布的影响,在紧密褶皱中,两翼岩层倾角较陡,地貌上多见峰丛排列形成的垄岗,垄岗之间为一些小型条带状洼地形成谷地地形,多见落水洞、漏斗等分布,垂直岩溶形态发育。部分降雨通过落水洞等渗入地下,先是顺岩层倾向运动,到达一定深度以后,由于岩溶不发育或受到隔水层顶托,而折向纵向运动。此处,因含水岩组夹非可溶岩,在相邻的多个含水层中发育了数条彼此平行的地下河。如濯坝向斜重庆黔江境内(图 20),可以

见到彼此平行的地下河 21 条,合计流量可达 2 400 多 L/s。如前述彭水地区乌江沿岸亦是如此(图 17)。对于一些受到断裂带控制的水文地质单元,若断裂本身阻水或一盘为非可溶岩、另一盘为可溶岩,则可在可溶岩一盘沿断裂带发育地下河。如前述涪陵焦石坝地区的几条地下河(图 12),彭水郁山背斜南段焦家滩地下河(PS-15)等均是如此。

几种类型的地下河比较起来看:汇流型地下河源远流长,规模大,流量较稳定,在重庆地下河中数量多;分流型地下河流程短,比降大,但长度和流量较汇

流型小,流量不稳定,数量较汇流型少;平行流型地下河受到重庆地区线状特殊地质构造条件的控制,其分布也较广泛,流量大于分流型地下河。

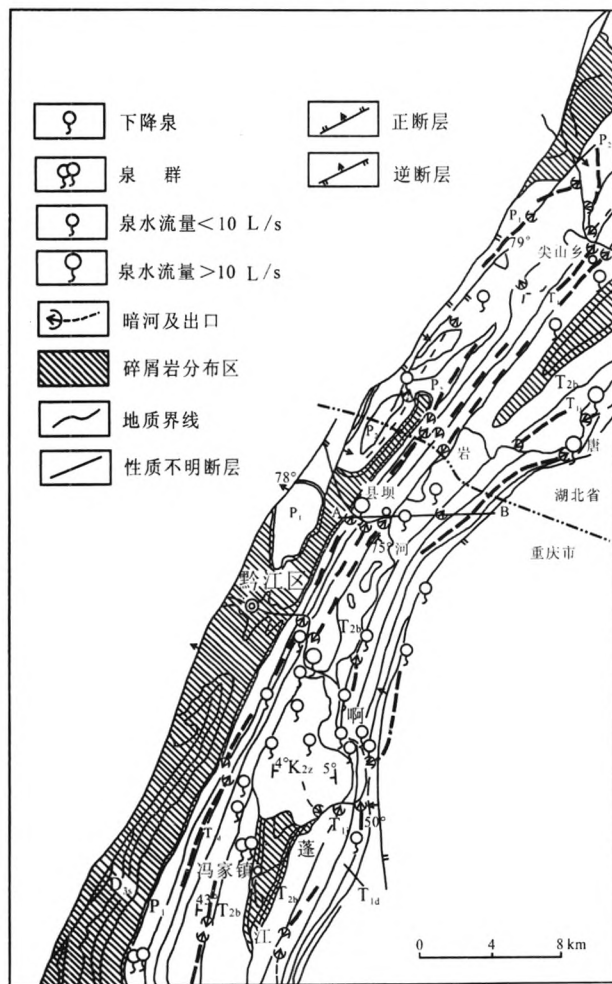


图 20 濯河坝向斜北部地区水文地质图

(修改自 1:20 万黔江幅水文地质普查报告, p96)

Fig. 20 Hydrogeologic map in the northern region of the Zhuoheba syncline

## 4 结 论

(1)岩性、构造、地貌条件及其组合控制了岩溶地下河的发育、分布。受到碳酸盐岩成分和厚度的影响,在质纯层厚的石灰岩中地下河最为发育,而在其它碳酸盐岩岩层组合中,由于碳酸钙含量下降,岩溶率下降,地下河弱发育或不发育。

(2)受到区域构造条件的影响,重庆地区岩溶地下河管道多沿构造线展布。在渝东北地区由于受到北西向构造的控制,地下河管道主要呈 NW—SE 展布;而在渝东南地区由于受到北东、北北东构造的控制,地下河管道主要呈 NE—SW 展布;在川东褶皱带内由于地下河多位于背斜核部的碳酸盐岩中,因此地

下河管道主要沿背斜呈纵向展布(主要为北东向)。

(3)受新构造运动影响,重庆地区地貌呈层状分布,岩溶分布和岩溶水分布具有明显的成层性。碳酸盐岩分布区高一级夷平面多成为地下水的补给区,地下水埋藏也比较深,出水点比较少。在向低一级夷平面的过渡地带(斜坡地带),多出现成层的溶洞,地下河多在低一级夷平面形成的河谷、沟谷中出露。低一级的夷平面也可形成再下一级夷平面的补给区。

(4)根据重庆地区岩溶水的水动力特征和循环条件,将地下河分为汇流型、分流型和平行流型 3 种类型。汇流型地下河多分布向斜地区和宽缓背斜地区以及垄脊槽谷地区;分流型地下河多分布于背斜地区和一些向斜台原地区;平行流型地下河多位于可溶岩与非可溶岩相间分布的紧密褶皱地区。

**致 谢:**感谢在上世纪 70—80 年代进行重庆市域范围内 15 幅 1:20 万水文地质填图工作的前辈们,没有他们勤奋踏实、细致严谨的工作,我们也不可能掌握这么多资料进行分析。审稿专家和编辑对本文提出了宝贵的修改意见,于此表示衷心的感谢!

## 参考文献

- [1] 袁丙华著.中国西南岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质研究[M].成都:电子科技大学出版,2007.
- [2] 刘裕国,孙海涛,庞革平,等.多策促春耕,抗旱保民生[N].人民日报,2010—3—19(1).
- [3] 温家宝.坚决打好抗旱救灾这场硬仗[N].人民日报,2010—3—26(2).
- [4] 蒲俊兵,袁道先,蒋勇军,等.重庆市地下河的空间分布及水资源[J].水文地质工程地质,2009,36(2):34—39.
- [5] 杨群兴.广东黎水地下河开发利用研究[J].水文地质工程地质,2006,33(3):45—52.
- [6] 刘仙,蒋勇军,叶明阳,等.典型岩溶槽谷区地下河水文动态响应研究——以重庆青木关地下河为例[J].中国岩溶,2009,28(2):149—155.
- [7] 束龙仓,董贵明,陶玉飞,等.地下河天窗水位变化分析及预测[J].水利学报,2009,40(5):529—534.
- [8] Wu Y, Jiang Y, Yuan D, et al. Modeling hydrological responses of karst spring to storm events: example of the Shuifang spring (Jinfo Mt., Chongqing, China)[J]. Environmental Geology, 2008, 55(7):1545—1553.
- [9] 章程,蒋勇军,Lettingues M,等.岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用[J].中国岩溶,2007,26(4):334—340.
- [10] 杨平恒,罗鉴银,彭稳,等.在线技术在岩溶地下水示踪试验中的应用——以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J].中国岩溶,2008,27(3):215—220.

- [11] 郭芳,姜光辉,裴建国,等. 广西主要地下河水质评价及其变化趋势[J]. 中国岩溶,2002,21(3):195-201.
- [12] 何师意,裴建国,谢运球,等. 湖南保靖县白岩洞地下河流域水文地球化学特征研究[J]. 中国岩溶,2006,25(3):187-194.
- [13] Guo F, Jiang G, Yuan D. Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China [J]. Environmental Geology,2007,53:533-541.
- [14] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶,2000,19(2):103-108.
- [15] 朱永琴,彭先孚. 重庆市岩溶地下水的开发与利用[J]. 中国岩溶,2000,19(2):147-151.
- [16] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京:科学出版社,1979:22-31.
- [17] 刘再华,Dreybrodt W,李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2006,31(3):411-416.
- [18] 杨平恒,罗鉴银,袁道先,等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报,2009,40(1):67-74.

## Development and distribution of karst subterranean streams in Chongqing, China

PU Jun-bing

(Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR / International  
Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Karst groundwater is an important strategic resources and life-support system for sustainable development in southwest China. There is  $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$  karst area and 380 karst subterranean streams (SS) in Chongqing municipality as important groundwater resources. This study summarizes the controlling factors of development and distribution of SS from the opinion of lithologic characters, geological structure and land-form in Chongqing according to the historical 1 : 200,000 hydrogeological reports with abundant field works from 2007 to 2009. Results show that the number of SS is the most abundant in pure and thick carbonate strata and the developing degree of SS is well. While, the number of SS is little and the developing degree is weak in other impure carbonate rock, due to the lower calcite content and karst processes rate. A new founding is that the formation and distribution of SS is controlled by the lineament structure in Chongqing. As a whole, the SS distributes mostly in the Eastern Sichuan fold belt, Southeastern Sichuan fall-fold belt and Mt. Daba arc-shaped fault-fold belt of Chongqing. The bearing of trend of SS in Mt. Daba arc-shaped fault-fold belt in northeastern Chongqing is NW-SE direction because of the control of the NW trend lineament structure. Due to the influence of the NE and NNW trend lineament structure, the bearing of trend of SS in Southeastern Sichuan fall-fold belt in southeastern Chongqing is NE-SW direction. The SS mainly locates in the core part of a series of anticlines in Eastern Sichuan fold belt in the main districts of Chongqing City and central area of Chongqing municipality, which is the carbonate rock area, and its trends is along the anticline extension direction (NE direction). According to the structure features and groundwater movement features of SS, it is divided into the following three types: afflux-flow type, distributary-flow type and parallel conduit-flow type. The afflux-flow type SS largely distributes in the syncline areas, wide-spaced shallow-dip anticline areas and ridge-trough valley areas. The distributary-flow type SS mainly locates in the anticline areas and syncline chapada areas, and the parallel conduit-flow type SS in the appressed fold areas which is the areas of soluble rock alternating with non-soluble rock.

**Key words:** karst subterranean stream; development; distribution; control factors; Chongqing municipality

(编辑 吴华英 韦复才)