

# 重庆市地下河的空间分布及水资源

蒲俊兵<sup>1,2</sup>,袁道先<sup>1,2,3</sup>,蒋勇军<sup>1,2</sup>

(1. 西南大学地理科学学院,重庆 400715; 2. 西南大学岩溶环境与石漠化治理研究所,重庆 400715;  
3. 国土资源部岩溶动力学重点实验室,桂林 541004)

**摘要:** 文章利用 ArcGIS 软件提取重庆市 1:20 万水文地质图信息,统计出重庆市地下河约 380 条,总长度约为 1 898.43 km,多年平均流量约 144.20 m<sup>3</sup>/s,水资源量约 45.47 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a。总的来说,重庆市地下河主要分布在渝东北、东南地区,其分布范围和重庆市碳酸盐岩分布范围一致。同时利用地下河发育密度和多年平均径流模数,结合各地区多年平均降水量,对重庆市地下河水资源的分布规律进行了分析,得出地下河发育密集地区并不一定是水资源量大的地区;降水量高的地区也不一定是地下河水资源量大的地区,二者在重庆市存在较大差异。这主要是和各地地下河的地质背景、构造条件、岩性、汇水面积、降雨特征等因素的相匹配情况有关。

**关键词:** 岩溶地下河;发育密度;多年平均径流模数;水资源

**中图分类号:** P641.134

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2009)02-0034-06

地下河是岩溶地区重要的岩溶现象之一,也是岩溶地区重要的水资源赋存场所<sup>[1]</sup>。重庆市地下水天然资源量为 160.66 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a<sup>[2]</sup>,其中岩溶地下河水资源量为 45.47 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,是主要的地下水资源。然而由于岩溶水分布的不均匀性<sup>[3]</sup>以及地下河水文系统的复杂性,导致很难了解一个区域的地下河分布及水资源。另一方面随着人类活动的加剧,土地利用方式在变化,不可避免地影响到地下河的水质、水量<sup>[4-5]</sup>。2006 年重庆市遭受百年不遇的旱灾,为做好抗旱准备,保障用水需求,有必要对重庆市地下河的分布及水资源做一个较全面的研究。

## 1 研究区概况

重庆市位于长江上游三峡库区,四川盆地东沿。其地理坐标为:105°17′ ~ 110°11′ E, 28°10′ ~ 32°13′ N,属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 14℃ 左右,多年平均降水量约 1 200 mm,但时空分布不均,多集中在 6~8 月<sup>[6]</sup>并有周边高、中部低的特点<sup>[7]</sup>。

重庆市土地面积约 8.24 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,其中碳酸盐岩

分布面积约 3.0 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占全市总面积的 36.49%,主要分布在渝东北大巴山褶皱山地和渝东南巫山-大娄山褶皱山地一带<sup>[2]</sup>,其次分布在中西部平行岭谷区的背斜轴部(图 1)。重庆范围内碳酸盐岩主要出露在寒武系、奥陶系、二叠系及三叠系地层中,岩性致密坚硬。重庆市分布的岩溶形态多为裸露型。

## 2 分布特征

从 1:20 万区域水文地质图上提取重庆市碳酸盐岩分布和地下河分布的相关信息,并制作成重庆市地下河分布图(图 1)。由于 1:20 万水文地质调查工作开展于 20 世纪 70 年代并且所测地下河的流量均为当时野外工作的偶测值,不能真实反应一条地下河水资源量的平均水平或者枯季水平。但如果不能对地下河的洪枯季节流量进行区分,则探讨地下河的水资源量就没有任何意义。由于实际工作中不可能对每条地下河都建立长观站进行观测,故缺少地下河的多年平均流量数据。但降水量变化是地下河流量变化的主要影响因素<sup>[8]</sup>,因此根据袁丙华等在研究西南岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质问题时采用的修正公式<sup>[9]</sup>,用多年变化的降水量对报告中的偶测流量进行校正,可以将水文地质报告中记载有流量数据的地下河的流量统一修正为多年平均流量(表 1)。计算公式为:

$$Q_{\text{多平}} = Q_{\text{实偶}} \times \frac{H_{\text{多且}}}{H_{\text{实多}}} \times \frac{H_{\text{多}}}{H_{\text{偶}}} \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{多平}}$  ——多年平均流量(m<sup>3</sup>/s);

$Q_{\text{实偶}}$  ——偶测年的实测流量(m<sup>3</sup>/s);

收稿日期: 2008-01-08; 修订日期: 2008-10-24

基金项目: 重庆市科技攻关项目(CSTC2007BC7001); 国家自然科学基金资助项目(40672165); 重庆市科技项目(CSTC2005AB7006); 中美合作项目“中国环境健康工程(CHP)”

作者简介: 蒲俊兵(1982-),男,博士研究生,主要从事岩溶水文地质学研究。

E-mail: pujunbl@163.com

$H_{多月}$  ——多年平均月降水量(mm) ;

$H_{多}$  ——多年平均降水量(mm) ;

$H_{实多}$  ——对应于实测月的多年平均月降水量  
(mm) ;

$H_{偶}$  ——偶测年平均降水量(mm) 。

表1 重庆市各区地下河基本情况表

Table 1 Basic information on the underground streams in different regions of Chongqing

名称	土地面积 (km <sup>2</sup> )	碳酸盐岩面积 (km <sup>2</sup> )	碳酸盐岩面积比例 (%)	地下河数量 (条)	比例 (%)	多年平均流量 (m <sup>3</sup> /s)	长度 (km)
渝西地区	10 283.00	233.44	2.27	2	0.53	0.34	9.9
渝中地区	16 306.00	2 645.98	16.23	28	7.37	6.26	99.45
主城周边地区	8 667.00	696.98	8.04	17	4.47	3.87	113.10
渝东北地区	21 954.00	13 410.97	61.08	110	28.95	>43.02	>858.38
渝东南地区	25 158.00	13 065.73	51.90	223	58.68	>90.71	>817.60
总计	82 368.00	30 053.09	36.49	380	100	>144.20	>1 898.43

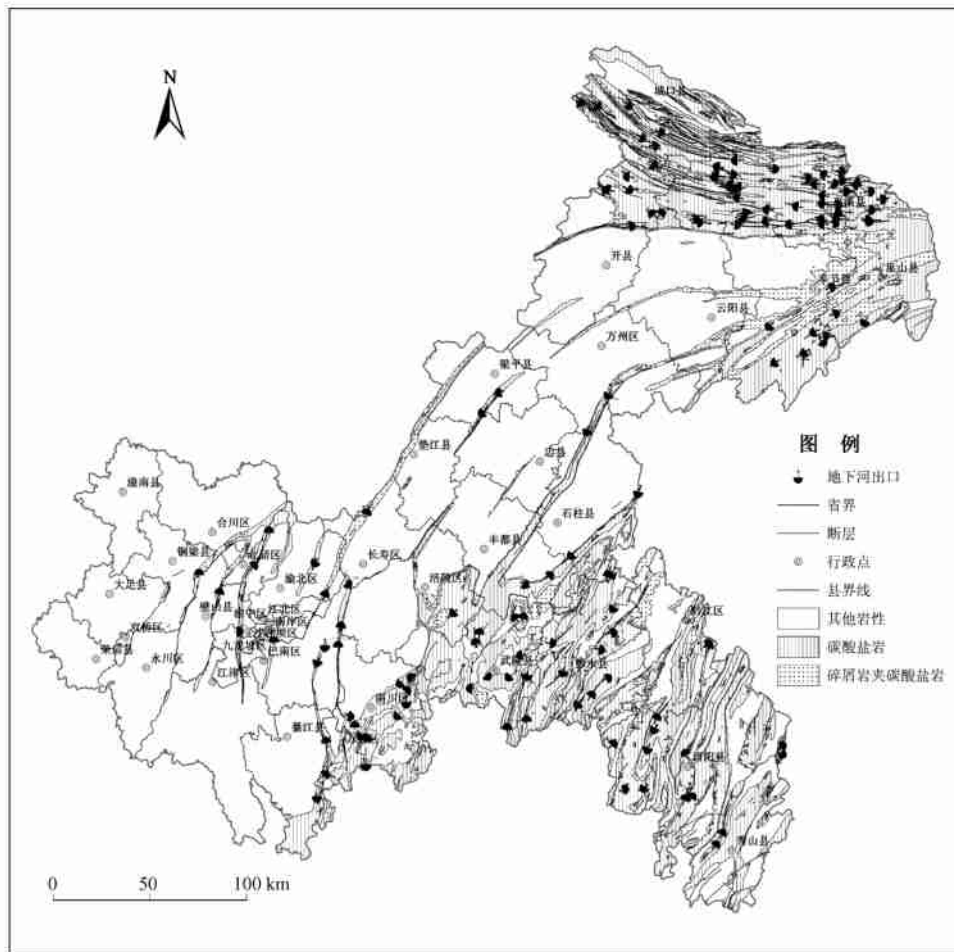


图1 重庆市碳酸盐岩及地下河分布图

Fig.1 Occurrence of carbonate rocks and karst underground streams in Chongqing

通过对流量统一进行修正后,结合1:20万水文地质普查报告和重庆市地下河分布图分析得知重庆市地下河主要分布在重庆市三个主要的构造带:川东褶皱带,川东南陷褶皱带和大巴山弧形断褶皱带。

川东褶皱带包括重庆市主城区、江津、永川、璧山、渝北、垫江、丰都、涪陵等区县全部,开县、云阳、奉节的南部,巫山、万州、石柱、武隆、南川、万盛的西部和西北部<sup>[6]</sup>。该带背斜紧密,向斜宽缓,断裂发育。碳酸盐岩

主要分布于背斜轴部,年代以二叠纪和三叠纪为主。地下河多分布于背斜轴部岩溶槽谷地区。据统计,该区的地下河有47条,占地下河总量的12.37%,多年平均流量约 $12.27\text{ m}^3/\text{s}$ ,地下河以短小、流量稳定为主要特征。

川东南陷褶带包括万盛、南川、武隆、石柱、巫山的部分地区,以及彭水、酉阳、黔江、秀山的全境。该带构造线多北东向伸展,背斜形成宽缓的箱状褶皱,轴部常伴纵向压性断裂<sup>[6]</sup>。碳酸盐岩分布面积广,占全区面积的50%以上,主要以寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系石灰岩和白云质灰岩为主。据统计,该区地下河有223条,占地下河总量的58.68%,多年平均流量约 $90.71\text{ m}^3/\text{s}$ ,多有长度大于10km地下河,有的地下河甚至达23km长,流量动态变化大。

大巴山弧形断褶带包括城口、巫山、巫溪、奉节、开县等区县,由北大巴山断褶带及南大巴山弧形褶皱带组成。碳酸盐岩在北部多以寒武系和奥陶系为主,南部多以二叠系、三叠系为主。据统计,该区地下河有110条,占地下河总量的28.95%,多年平均流量逾 $43.02\text{ m}^3/\text{s}$ ,地下河以长、流量大、支流多等为主要特征。

从图1和表1可以看出,地下河的分布亦和碳酸盐岩的分布一致。碳酸盐岩分布面积大的地区,其地下河分布多。渝东北和渝东南地区碳酸盐岩面积占重庆市碳酸盐岩总面积的88%,其分布的地下河占重庆市地下河总量的82.17%。渝东北地区的巫溪、奉节两县,其碳酸盐岩分布面积分别占该县土地总面积的93.34%和60.69%,地下河分别有57条和22条,占重庆市地下河总数的14.88%和5.74%。渝东南地区的酉阳、黔江两县,其碳酸盐岩分布面积分别占该县土地总面积的68.2%,48.29%,地下河分别有76条和49条,占重庆市地下河总数的19.84%和12.79%。

### 3 地下河发育密度

由于受到区域环境条件如岩性、构造、气温及降雨等因素<sup>[4]</sup>的影响,重庆市地下河发育的程度不一,长可达数十公里,短则几百米。通过对市域内380条地下河中可得知长度的332条地下河的统计分析得出,超过20km长的地下河只占2.41%,小于5km的达50%,总体看来重庆市岩溶地下河以短小型为主要特征(表2)。

表2 重庆市岩溶地下河长度分类表

地下河长度 (km)	> 20	20 ~ 10	10 ~ 5	< 5
数量(条)	8	44	114	166
比例(%)	2.41	13.25	34.34	50.00

关于一个地区地下河发育的程度问题,涉及条数和长度两个方面,但条数在概念上不包括长度,长度又不涉及面积,因而都难以反映地下河发育程度。为了便于各区相互对比,考虑长度、面积两因素,杨立铮<sup>[11]</sup>采用地下河发育强度指标 $I$ 作为衡量标准。它定义为:碳酸盐岩单位面积上地下河的发育长度。对某一地区,设地下河总长度为 $L$ (m),碳酸盐岩出露面积为 $A$ ( $\text{km}^2$ ),就有如下公式:

$$I = L/A \quad (\text{m}/\text{km}^2) \quad (2)$$

该公式也可以说明地下河发育的密度问题<sup>[10]</sup>。经计算得出重庆市地下河发育密度(表3、图2)。根据重庆市实际情况,其分类应为:高密度区 $I > 100\text{ m}/\text{km}^2$ ,中等密度区 $I = 100 \sim 40\text{ m}/\text{km}^2$ ;低密度区 $I < 40\text{ m}/\text{km}^2$ 。

表3 重庆市地下河发育密度表(单位: $\text{m}/\text{km}^2$ )

Table 3 Development density of the underground streams in different districts of Chongqing ( $\text{m}/\text{km}^2$ )

名称	发育密度	名称	发育密度	名称	发育密度
璧山县	-	九龙坡区	213.70	城口县	52.05
大渡口区	-	渝北区	157.89	开县	51.82
大足县	-	巫溪县	128.59	彭水县	49.02
江北区	-	梁平县	111.55	奉节县	45.03
江津区	-	北碚区	111.41	武隆县	39.52
南岸区	-	万盛区	100.52	南川区	37.83
忠县	-	黔江区	100.04	合川区	33.01
荣昌县	-	石柱县	99.88	云阳县	29.53
双桥区	-	铜梁县	94.00	涪陵区	28.54
潼南县	-	酉阳县	71.07	垫江县	24.76
永川区	-	万州区	69.35	巫山县	19.07
渝中区	-	秀山县	65.80	丰都县	15.25
沙坪坝区	263.37	綦江县	64.59		
巴南区	246.24	长寿区	59.85		

从表3可以看出:地下河高密度区主要分布在以沙坪坝区、巴南区、北碚区为核心的主城周边地区;渝中地区的梁平县周边地区;渝东北地区的巫溪周边地区;渝东南的黔江区周边地区。中等密度区主要分布于上述高密度区周边地区及渝东南的彭水、酉阳、秀山等地区。其余地区地下河弱发育或不发育。

从地质构造分区(图2)看重庆市地下河高密度区

主要分布在渝西川东褶皱带和渝东北大巴山弧形断褶皱带东南部与川东褶皱带相接触部位,形成两个较大的区域中心。渝西川东褶皱带内,虽然碳酸盐岩分布不广泛,但多沿紧密隔挡式背斜核部分布,其构造裂隙十分发育。背斜两翼多为砂页岩隔水层,地下河流域相对封闭。且背斜核部多被长江、嘉陵江切开,地下水以长江河谷和嘉陵江河谷作为排泄基准面,水动力作用强,较易发育岩溶管道。如观音峡背斜在其被嘉陵江切开的南北两段均有地下河发育,且河口直接位于嘉陵江江面以下。又如沥鼻峡背斜被嘉陵江切开的南段发育有长约15km的地下河,地下河水直接流入嘉陵江。在渝东北大巴山弧形断褶皱带与川东褶皱带相接触部位内,大面积的碳酸盐岩分布以及和强构造活动形成的大量断裂相配套给地下河发育创造了良好的条件,形成高密度区。如在巫溪县就发育有近57条地下河,多年平均流量近 $20.25\text{m}^3/\text{s}$ 。两区域内岩性与构造的配套形成了地下河发育密度相对集中的分布格局。渝东南陷褶皱带地区广布的碳酸盐岩及构造活动形成的大量断裂,也为地下河的发育提供了良好的条件,地下河发育密度也较高。

可得知流量的372条的统计分析得知:多年平均流量大于 $2000\text{L}/\text{s}$ 的地下河占总量的3.76%,小于 $200\text{L}/\text{s}$ 的地下河占总量的58.87%,总的来看重庆市地下河以小流量型为主(表4)。

表4 重庆市地下河流量分类表

Table 4 Classification of discharge of the underground streams in Chongqing

地下河流量 (L/s)	> 2 000	2 000 ~ 1 000	1 000 ~ 500	500 ~ 200	< 200
数量(条)	14	26	29	84	219
比例(%)	3.76	6.99	7.8	22.58	58.87

地下河水资源是否丰富表现为地下河的排泄量,但受到碳酸盐岩出露面积的制约,考虑到这两个因素,杨立铮<sup>[1]</sup>采用富水性指标 $F$ 作为衡量地下河水资源量的标准。它定义为:碳酸盐岩单位面积上所流出的水量。设碳酸盐岩面积为 $A(\text{km}^2)$ ,地下河出口流量为 $Q(\text{L}/\text{s})$ ,则有如下公式:

$$F = Q/A (\text{L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)) \quad (3)$$

地下水径流模数可以表示地下水的天然资源量,有利于进行区域富水程度的对比<sup>[11]</sup>,公式(3)计算的结果即为地下河的径流模数。根据重庆市碳酸盐岩分布面积和地下河分布实际情况(图1),以地下河出口所在地区划分碳酸盐岩块段,计算重庆市地下河多年平均径流模数(表5、图3)。根据重庆市地下河流量级差情况,按三级划分:高径流模数区 $F > 5 \text{L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ;

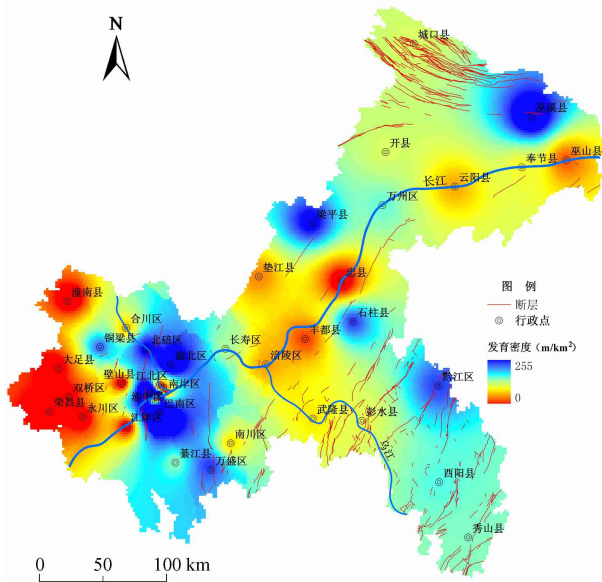


图2 重庆市地下河发育密度分布图  
Fig.2 Division of development density of the underground stream in Chongqing

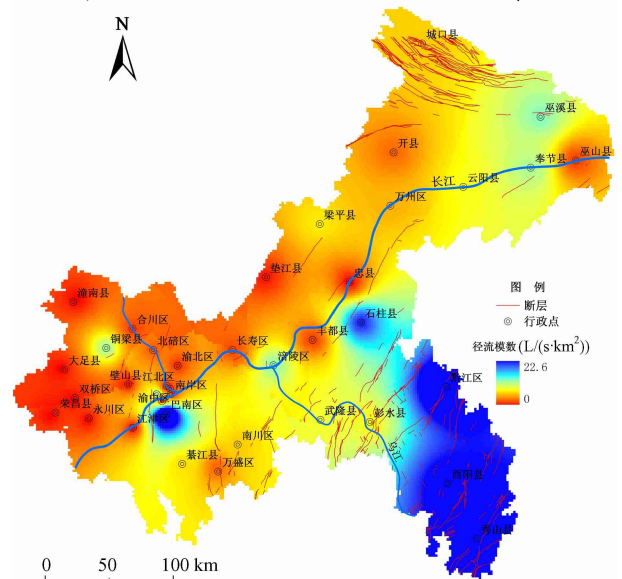


图3 重庆市地下河径流模数分区图  
Fig.3 Division of runoff modulus of the underground streams in Chongqing

#### 4 区域地下河多年平均径流模数

地下河由于其发育背景不一样,流量差异大,大者超过 $5000\text{L}/\text{s}$ ,小者为 $2\text{L}/\text{s}$ ,且时空分布不均匀,造成对地下河的开发利用困难。对重庆市380条地下河中

中等径流模数区  $F = 5 \sim 1 L/(s \cdot km^2)$ ; 弱径流模数区  $F < 1 L/(s \cdot km^2)$ 。从表 5、图 3 可见: 地下河高径流模数区主要分布在巴南区周边地区; 渝东南石柱县东南部, 黔江区东南部, 彭水县东部, 秀山县、酉阳县全境以及渝东北巫溪县周边等地区。中等径流模数区主要分布在渝东北城口县、云阳县、奉节县全境, 开县东北部地区; 渝中万州区东部、东南部, 梁平县东北部; 渝东南武隆县全境, 南川区东南部, 綦江县东部、东南部, 彭水县中、西部; 主城九龙坡区西部, 沙坪坝区东部等地区。其余县(区)为弱径流模数区和无地下河区。

表 5 重庆市地下河径流模数表(单位:  $L/(s \cdot km^2)$ )

Table 5 Runoff modulus of the underground streams of Chongqing ( $L/(s \cdot km^2)$ )

名称	径流模数	名称	径流模数	名称	径流模数
璧山县	-	秀山县	12.72	南川区	2.45
大渡口区	-	酉阳县	10.35	城口县	2.43
大足县	-	石柱县	9.21	万州区	2.00
江北区	-	巫溪县	5.38	开县	1.01
江津区	-	涪陵区	5.27	万盛区	0.94
南岸区	-	沙坪坝区	5.07	北碚区	0.78
忠县	-	铜梁县	5.00	长寿区	0.62
荣昌县	-	奉节县	4.88	巫山县	0.52
双桥区	-	武隆县	3.42	合川区	0.51
潼南县	-	云阳县	3.25	丰都县	0.47
永川区	-	彭水县	3.17	渝北区	0.22
渝中区	-	梁平县	2.91	垫江县	0.10
巴南区	22.89	綦江县	2.70		
黔江区	13.02	九龙坡区	2.70		

从图 3、图 4 对比分析中可以得出: 重庆市各地区地下水水资源丰欠程度(用径流模数表示)与地下河发育密度差异较大, 但从整体上看地下水水资源空间分布趋势和重庆市降雨的空间分布相吻合(图 4)。渝东南地区, 由于碳酸盐岩大面积连片分布, 地下河发育程度高, 汇水面积大, 且该区域降水量大(多年平均 1 308mm), 地下河补给充沛, 形成地下水水资源集中分布区, 多年平均流量逾  $28.53 \times 10^8 m^3/a$ 。渝东北地区虽然碳酸盐岩分布广泛, 地下河发育密度也较高, 但由于降水量(多年平均 1 172mm)较渝东南地区低, 且在其西北部大部分地区以寒武系—奥陶系白云岩、泥质白云岩为主, 岩溶发育程度较低, 因而地下河发育程度较渝东南地区差, 故地下水水资源量较渝东南地区低, 为  $13.57 \times 10^8 m^3/a$ 。渝中地区, 虽然地下河发育密度较高, 降水量也较大(多年平均 1 157mm), 但是由于其碳酸盐岩分布面积小, 汇水面积小, 地下河流量小, 故水资源量并不大, 为  $1.97 \times 10^8 m^3/a$ 。主城以巴南为核心的周边地区, 地下河分布于背斜核部岩溶槽谷内且受

到背斜两翼砂页岩阻隔, 地下河流域较为封闭。虽然在该区域内降水量(多年平均 1 103mm)较其他地区小, 碳酸盐岩面积也不大, 但是在地貌形态上该区域岩溶槽谷有利于水流汇集, 且接纳背斜两翼砂页岩区的大量外源水, 同时背斜核部多被长江河谷切断, 地下河以长江河谷作为排泄基准面, 水动力作用强, 排泄快, 成为了区域地下水的主要汇、排通道, 地下水水资源量相对较大, 为  $1.02 \times 10^8 m^3/a$ 。

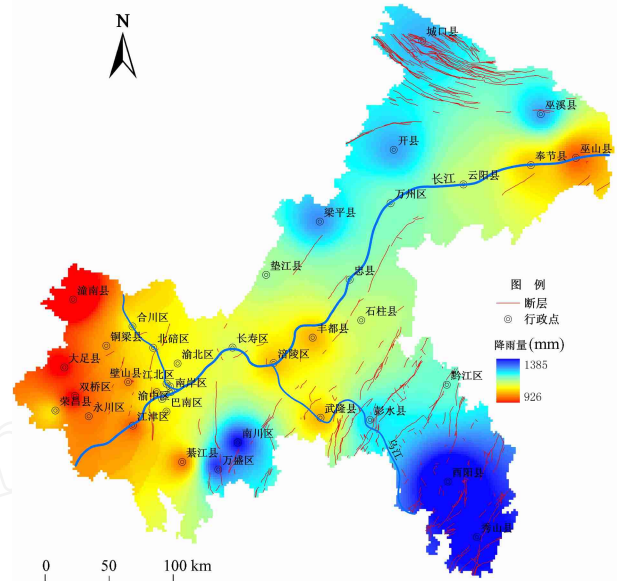


图 4 重庆市多年平均降雨量分布图(1951~1980)

Fig. 4 Distribution of annual average precipitation in Chongqing from 1951 to 1980

综合上述两个指标, 可以得出: 地下河发育密集地区并不一定是地下水水资源量大的地区; 降水量高的地区也不一定是地下水水资源量大的地区。两者在重庆市存在明显差异。最明显就是体现在渝东南地区和主城周边地区。这主要是和各地地下河发育的地质背景、构造条件、岩性、汇水面积、降雨条件、水动力条件等因素的相匹配情况有关。

### 5 结论

重庆市地下河主要集中分布在渝东北和渝东南地区, 和区域碳酸盐岩分布相一致。各时代碳酸盐岩中都有地下河发育, 但以二叠纪和三叠纪为主, 地下河数量最多。受区域构造的严格控制, 地下河多沿构造线发育, 断裂带密集的地方, 地下河发育程度高。

文章采用了发育密度和径流模数两个指标对重庆市地下河的空间分布和水资源量进行了探讨, 分别得出了发育密度和径流模数。分析表明重庆市地下河发

育较为集中,形成渝东北和主城周边两个区域中心。地下水水资源量富集地区也很集中,形成渝东北、渝东南和以巴南区为中心的主城周边地区三个中心。同时地下河发育密集地区并不一定就是地下水水资源量大的地区,降水量高的地区也不一定是地下水水资源量大的地区。这主要是和各地下河的地质背景、构造条件、岩性、汇水面积、降雨特征、水动力条件等因素的相匹配情况有关。

#### 参考文献:

- [1] 杨立铮. 中国南方地下河分布特征[J]. 中国岩溶, 1985, 1(1): 92 - 100.
- [2] 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.
- [3] 袁道先. 论岩溶水的不均匀性[C]//岩溶地区水文地质及工程地质工作经验汇编. 北京:地质出版社, 1978: 1 - 19.
- [4] 蒋勇军, 袁道先, 章程, 等. 岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响——以云南小江流域为例[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 754 - 760.
- [5] 王明章. 贵州省岩溶地下水资源及其开发利用[C]//中国西南地区岩溶地下水资源开发利用. 北京:地质出版社, 2006.
- [6] 陈升琪. 重庆地理[M]. 重庆:西南师范大学出版社, 2003: 1 - 3.
- [7] 陈忠, 任雪梅, 周心琴, 等. 重庆市降水量的时空分布[J]. 四川师范学院学报, 2003, 24(2): 171 - 176.
- [8] 陈喜, 刘传杰, 胡忠明, 等. 泉域地下水数值模拟及泉流量动态变化预测[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(2): 36 - 40.
- [9] 袁丙华. 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:电子科技大学出版社, 2007: 75 - 79.
- [10] 吉汝安. 云贵高原岩溶地下河研究[J]. 贵州地质, 1990, 7(2): 105 - 113.
- [11] 沈照理. 水文地质学[M]. 北京:科学出版社, 1985: 417 - 418.

## Spatial distribution of underground river streams and water resource in the Chongqing Municipality

PU Jun-bing<sup>1,2</sup>, YUAN Dao-xian<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yong-jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Institute of Karst Environment and Rock Desertification Control, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Karst Dynamics Laboratory, MRL, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Karst rocks in the Chongqing Municipality in southwestern China covers about  $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for approximately 36.49% of the total area of Chongqing. The 1/200 000 hydrogeological map of Chongqing and the relevant reports show that there are approximately 380 underground streams with a total length of about 1 898.43 km, with a total mean discharge of more than  $144.20 \text{ m}^3/\text{s}$  and water resources of more than  $4.547 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ . The underground streams, in general, exist mostly in the southeast and northeast of Chongqing. The distribution of the underground rivers is consistent with the occurrence of the carbonate rocks in Chongqing. Three indicators, i. e., the development density, runoff modulus and multi-year average precipitation, are used to judge distribution of the underground streams in Chongqing. The coefficient of development density of the underground streams varies between  $12.25 \text{ m}/\text{km}^2$  and  $263.37 \text{ m}/\text{km}^2$ , and the coefficient of runoff modulus of the underground streams, between  $0.10 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$  and  $22.89 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ . It appears that variation exists from region to region. The high development zones occur in the west and southeast of Chongqing. The high runoff modulus zones concentrate in the northeast, southeast and west of Chongqing. In Chongqing, it is also found that the high-density zone of underground streams is not necessarily the high runoff modulus zone, and the high rainfall zone is not necessarily the high runoff modulus zone.

**Key words:** karst underground streams; development density; runoff modulus; water resource

责任编辑:汪美华