

# 滇东断陷盆地南洞岩溶地下水系统地下河水文动态特征与资源量评价

赵一<sup>1)</sup>, 李衍青<sup>1)</sup>, 李军<sup>1,2)</sup>, 刘鹏<sup>1)</sup>, 蓝芙宁<sup>1)\*</sup>

1)中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;

2)河北建筑工程学院市政与环境工程系, 河北张家口 075000

**摘要:** 本文对滇东断陷盆地南洞岩溶地下水系统各地下河的水文动态特征进行了分析, 推断了南洞岩溶地下水系统的结构特征。根据岩性构造、地下河发育以及补径排关系, 将其划分为四个子系统。分别采用降雨入渗系数法和径流模数法对南洞岩溶地下水系统的天然资源量进行计算, 计算结果分别为 35 610.7 万 m<sup>3</sup>/a 和 33 460.2 万 m<sup>3</sup>/a。用枯季径流模数法对南洞岩溶地下水系统的可采资源量进行了计算, 计算结果为 23 407.3 万 m<sup>3</sup>/a, 其可开采资源量巨大。南洞地下河在没有天然补给量的情况下, 120 天消耗的调蓄量为 4 503.3 万 m<sup>3</sup>, 南洞地下河日允许开采资源量为 49.4 万 m<sup>3</sup>/d。二号暗河建库蓄水条件下库区上游的日允许开采量为 75.9 万 m<sup>3</sup>/d, 蓄水库容来源于工程设计, 资源保证程度高。本次研究可为南洞岩溶地下水资源的开发利用和调配提供科学依据。

**关键词:** 南洞地下河; 岩溶地下水系统; 水文动态特征; 水资源评价; 开发利用

中图分类号: P641.134 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.091601

## Underground River Hydrological Dynamic Characteristics and Resource Evaluation of the Nandong Karst Water System in East Yunnan Faulted Basin

ZHAO Yi<sup>1)</sup>, LI Yan-qing<sup>1)</sup>, LI Jun<sup>1,2)</sup>, LIU Peng<sup>1)</sup>, LAN Fu-ning<sup>1)\*</sup>

1) *Institute of Karst Geology, Department of Natural Resources/Key Laboratory of Karst Dynamics, Guilin, Guangxi 541004;*

2) *Department of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000*

**Abstract:** In this paper, the authors analyzed underground river hydrological dynamic characteristics of the Nandong karst water system in east Yunnan faulted basin and inferred the structure features of the Nandong karst water system. This system can be divided into four subsystems according to the lithological structure, the development of underground rivers, and the relationship between fill paths and rows. The rainfall infiltration coefficient method and the runoff modulus method were used to calculate the natural water resources of the Nandong karst groundwater system. The calculation results were 356 107 000 million m<sup>3</sup>/a and 33 602 200 m<sup>3</sup>/a, respectively. The dry season runoff modulus method was used to calculate the recoverable resources of the Nandong karst groundwater system. The calculation result was 234 073 000 m<sup>3</sup>/a, and the recoverable resources were huge. Under the condition that the natural supply of the Nandong Underground River was cut off, the adjusted storage capacity consumed in 120 days was 45 033 000 m<sup>3</sup>, and the daily allowable mining resources of the Nandong Underground River were 494 000 m<sup>3</sup>/d. Under the condition of impoundment of No. 2 underground river, the daily allowable mining volume in the upper reaches of the reservoir area was 759 000 m<sup>3</sup>/d. The storage capacity comes from engineering design, and the degree of resource assurance was high. This study can provide a

本文由国家重点研发计划课题(编号: 2016YFC0502502; 2017YFC0406104)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190334; DD20190825)联合资助。

收稿日期: 2020-06-08; 改回日期: 2020-09-10; 网络首发日期: 2020-09-17。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 赵一, 男, 1989年生。硕士, 助理研究员。研究方向为水文地质环境地质。E-mail: zhaoyi@karst.ac.cn。

\*通讯作者: 蓝芙宁, 男, 1977年生。博士, 副研究员。研究方向为水文地质环境地质。E-mail: lanfuning@karst.ac.cn。

scientific basis for the development, utilization and deployment of Nandong karst groundwater resources.

**Key words:** Nandong underground river; karst water system; hydrological dynamic characteristics; water resources evaluation; development and utilization

我国滇东断陷盆地具有特殊的地质结构和水文地质条件, 水土资源空间分布极不均匀又不配套, 土壤资源集中分布在盆地平坝区, 而盆地平坝区地下水大都埋深较深, 形成“土在楼上, 水在楼下”的格局, 该地区主要的供水来源为岩溶地下水, 定量评价岩溶地下水资源, 对于滇东断陷盆地地区水资源的开发利用和调配有着重要的意义(邹胜章等, 2005; 郭琳等, 2006; 臧红飞等, 2010; 吕文凯等, 2021)。滇东断陷盆地岩溶大泉较少, 地下河高度发育, 地下河的分布特征控制着该地区岩溶地下水资源分配(Torbarov, 1976; 乔小娟等, 2014)。而岩溶地下河的水文过程能反映岩溶地下水的响应和衰减过程, 不仅可提取岩溶地下水系统内部结构信息(郭小娟等, 2014), 还可为岩溶地下水资源评价提供一些水力参数(Wetzel, 2003; Winston and Criss, 2004; Liu et al., 2007; 罗明明, 2017)。

南洞地下河是滇东断陷盆地典型的超大型地下河, 由多条地下河组成, 是一径流途径复杂、水量较大的地下河系统。到目前为止南洞地下河的开发利用程度很低, 开采量不到 10%, 其开发潜力非常巨大。而其上游的蒙自坝区, 地势平整, 气候温和, 但干旱严重。近年来, 经过一些学者的研究, 南洞地下河主管道的空间展布逐渐明晰(赵一等, 2017)。在草坝与大庄坝间, 南洞二号地下暗河过水断面较为狭窄, 可构筑地下堤坝, 形成地下水库。为解决蒙自坝区工农业用水, 改变缺水干旱面貌, 具有决定性作用。本文在前人研究的基础上, 首先对南洞各条地下暗河出口的水文动态进行分析, 然后对南洞岩溶地下水系统资源量进行了定量评价, 最后对南洞地下水资源以及建库条件下二号暗河的允许开采量进行了计算, 以期对南洞岩溶地下水资源的开发利用和调配提供科学依据。

## 1 研究区概况与资料来源

### 1.1 研究区水文地质概况

南洞岩溶地下水系统主要含水地层依次为中下三叠系灰岩及泥质灰岩、中泥盆系灰岩、第四系砂黏土层和第三系泥灰岩。东北部边界以东山顶、大黑山—马吊坎地表分水岭为界。北西边界由砂岩地表分水岭和阻水断层组成的混合边界。南部边界以蒙自盆地内地下阻水带为界, 其是第三系泥灰岩构成的阻水深槽, 是系统岩溶地下水难以逾越的屏障(张贵等, 2008; 胡伟等, 2019), 平面分布呈北西

向长条形状, 面积 1 081.9 km<sup>2</sup>。研究区岩溶大泉较少, 岩溶地下水主要通过地下暗河排泄。南洞口附近可见有两个明显的地下暗河出口, 分别为“通灵洞”和“桃源洞”。除从南洞口出流的南洞地下河, 尚有置迭于其上的平石板暗河、小黑水洞暗河、大黑水洞暗河和黑龙潭暗河等次级管道, 或由于相对隔水层的阻挡而出露, 或由于相对排泄基准面的控制而出露, 出流后均归于盆地中之岩溶湖, 最终仍向南洞地下河深部径流转化(图 1)。

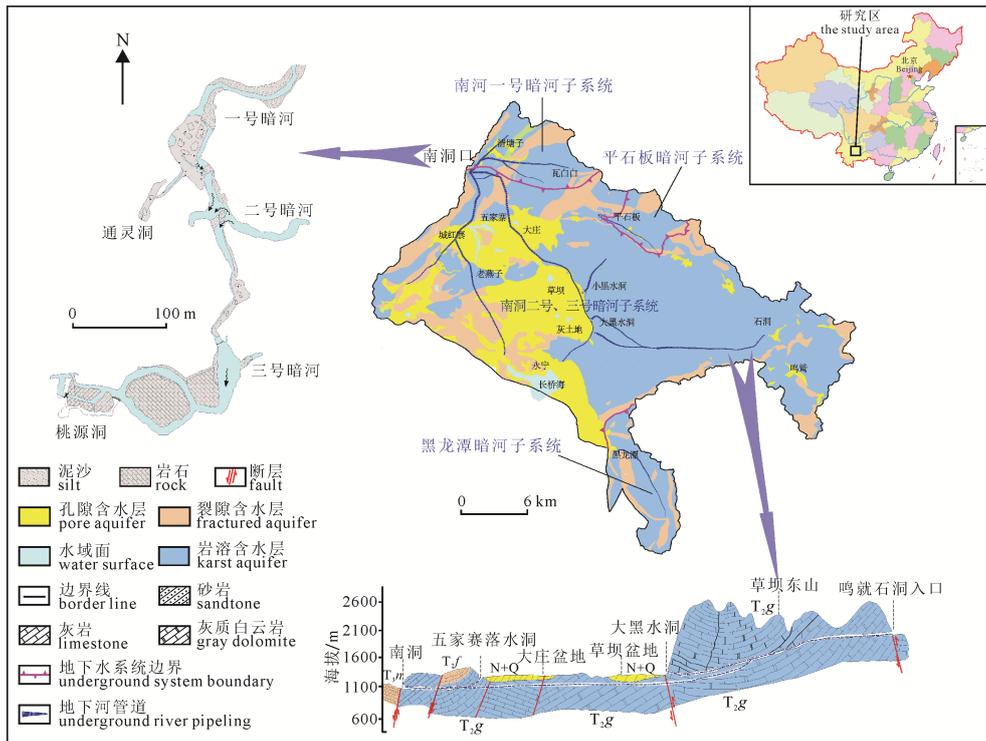
### 1.2 资料来源

本次水资源研究, 除利用已收集的水文气象站降雨流量资料外, 还有本次野外实测的一些数据资料, 本次研究用到的主要的降雨、流量资料详见表 1。纵观本次水资源评价基础资料, 主要由正规水文气象站长时间系列资料、不定期的水文气象短系列资料以及本次野外实测资料三部分组成。其中降雨站点资料基本控制了区内不同系统单元降雨差异, 雨量观测资料(蒙自站、开远站)和南洞水文站资料时间系列长达 25 年。区内地下河主要排泄口均有测站控制。上述基础资料基本满足本区水资源中短期评价及预报的精度要求。

## 2 岩溶地下水水文动态特征

地下河和泉流量是岩溶地下水系统在接受多种输入激励后产生的响应, 其变化是各种输入信息在经系统内部的滞后、延迟与叠加等过程的“滤波”加工的综合表现, 其变化特征不仅取决于输入信息的变化特征, 同时也蕴含了系统结构特征的有效信息(陈植华, 1991; 卢耀如, 2006; 覃星铭等, 2015)。

本文对南洞地下河总出口(1990—2014 年)径流和降水的月(年)均值观测数据分析(图 2, 3), 可以看出, 南洞地下河多年平均年径流总量为  $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 最大年径流总量为  $3.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2008 年), 最小年径流总量为  $1.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2011 年)。月(年)均径流量均与月(年)降水量正相关, 月均径流量与月降水量相关性较差( $R^2=0.476 1$ ), 说明南洞地下河径流主要受当地降雨控制, 但径流相对降雨有一定的滞后。南洞地下河每年月流量和蒙自站每年月降雨变化曲线如图 4 所示, 可以看出南洞地下河月流量变化曲线基本呈单峰型, 个别年份呈双峰型, 一般每年径流量汛期为 6—11 月, 月最大流量出现在 1998 年的 7 月, 最小流量出现在 1999 年的 6 月。个别年份像 1999 年和 2006 年径流量最大的月份为 10 月, 11 月。



T<sub>3n</sub>—三叠系上统乌格组; T<sub>2f</sub>—三叠系中统法郎组; T<sub>2g</sub>—三叠系中统个旧组; N+Q—上第三系+第四系。  
T<sub>3n</sub>—Upper Triassic Niage Formation; T<sub>2f</sub>—Middle Triassic Falang Formation; T<sub>2g</sub>—Middle Triassic Gejiu Formation; N+Q—Upper Tertiary +Quaternary.

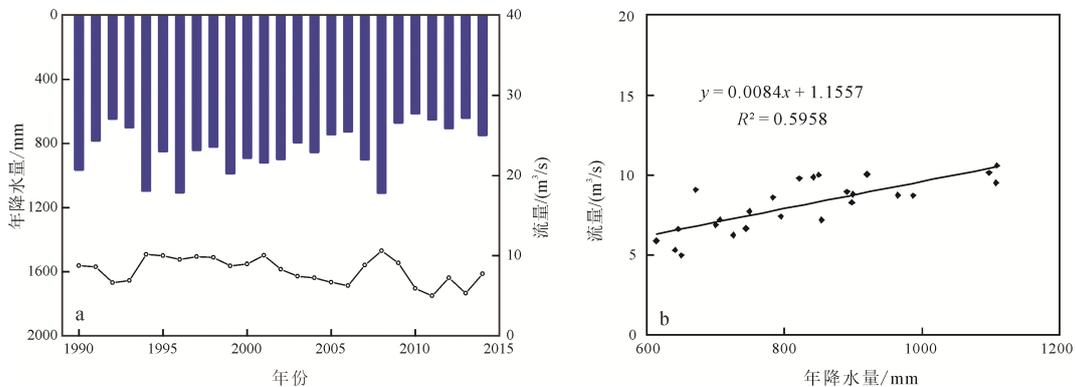
图1 南洞岩溶地下水系统地下河分布与二号暗河管道剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the distribution of underground rivers in the Nandong karst groundwater system and No. 2 underground river pipeline section

表1 研究区主要降雨、流量资料一览表

Table 1 List of main rainfall and flow data in the study area

项目	站名	资料年限	资料备注
雨量资料	蒙自气象站	1990—2014	1990—2013月值、2014日值
	开远气象站	1990—2014	1990—2013月值、2014日值
	黑龙潭气象站	2012—2015	2012—2014月值、2015日值
	平石板气象站	2012—2015	2012—2014月值、2015日值
	南洞水文站	1990—2014	1990—2013月值、2014日值
流量资料	南洞一号暗河监测站	2014	日值
	平石板暗河监测站	2015	日值
	黑龙潭暗河监测站	2015	日值
	大小黑水洞、灰土地溢流口监测站	2014	日值



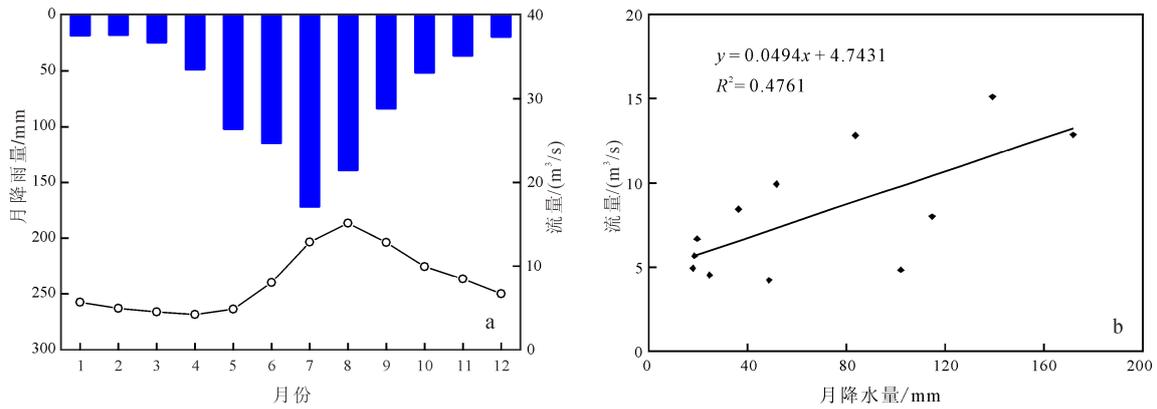
a—年降水量和年均流量的动态关系; b—年降水量与年均流量相关性分析。

a—dynamic relationship between annual precipitation and annual average flow;

b—correlation analysis of annual precipitation and annual average flow.

图2 南洞地下河年均流量与蒙自站年降水量的关系

Fig. 2 The relationship between the annual average discharge of Nandong underground river and the annual precipitation of Mengzi station



a—月降水量和月均流量的动态关系; b—月降水量与月均流量相关性分析。  
 a—dynamic relationship between monthly precipitation and average monthly flow;  
 b—correlation analysis of monthly precipitation and average monthly flow.

图3 南洞地下河月均流量与蒙自站月降水量的关系

Fig. 3 The relationship between monthly average discharge of Nandong underground river and monthly precipitation of Mengzi station

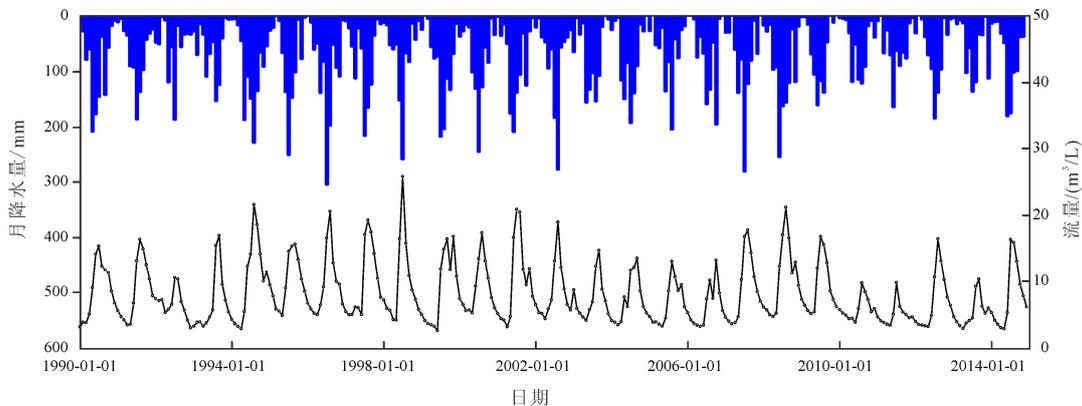


图4 南洞地下河每年月流量与蒙自站每年月降水量的关系(1990—2014年)

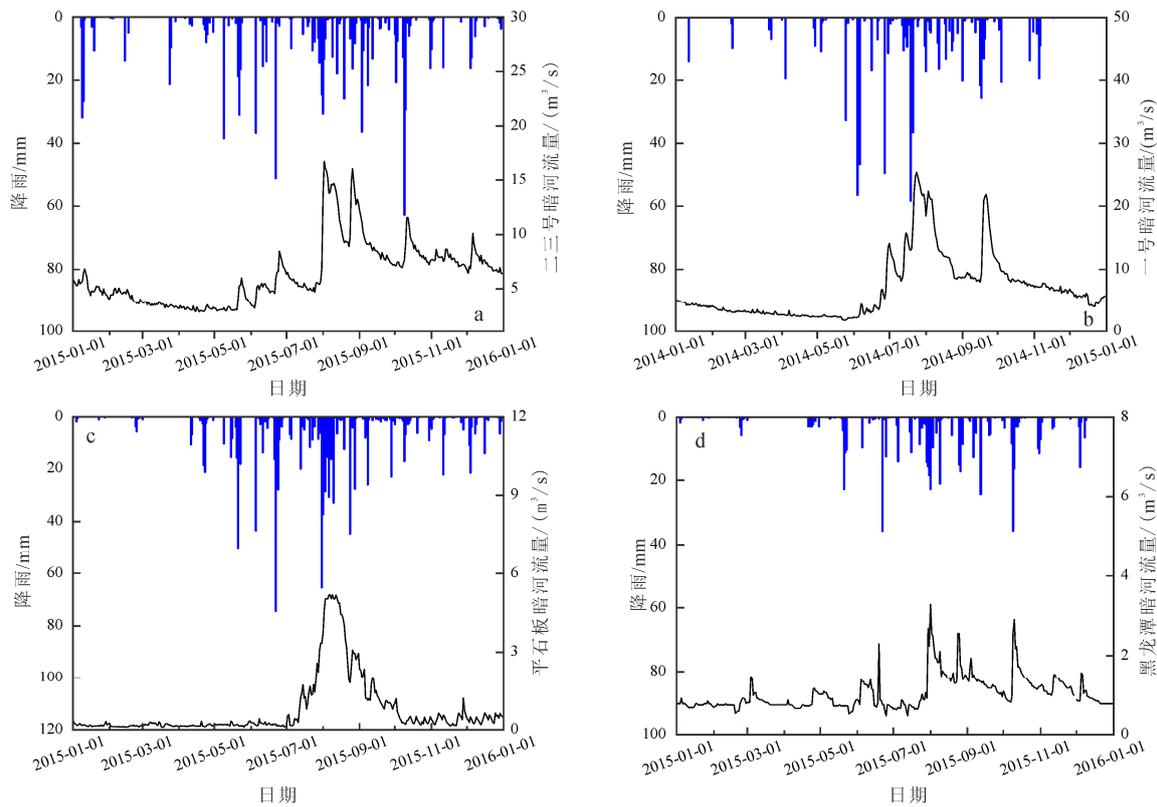
Fig. 4 The relationship between the annual monthly flow of Nandong underground river and the monthly precipitation of Mengzi Station (1990—2014)

受西南季风的影响, 蒙自降水量相对较少, 降水量一般集中在4—10月。径流相对降雨存在滞后现象, 滞后原因在于岩溶含水层有较大的调蓄空间存在。总体上, 南洞地下河具有排泄量大, 动态变化大, 周期性强, 排泄滞后于降雨, 调蓄量大等特征。

一般来说, 如果降雨入渗条件较好, 循环路径较短, 集中补给的大气降水或坡面流, 在岩溶管道中会形成快速流, 可导致极为迅速的水文响应过程出现, 较复杂的运移管道和裂隙介质在岩溶地下水响应过程中具有较强的调蓄作用, 则会导致响应滞后时间较长, 水文过程曲线拖尾现象明显(Atkinson, 1977; 贺可强等, 2002; 刘仙等, 2009)。因此, 在不同的岩溶地下水系统中, 由于岩溶发育程度和径流途径的结构差异, 会导致其在岩溶地下水系统中呈现不同的响应行为(罗明明等, 2016)。本次调查对流域内四条主要地下河(南洞一号暗河、南洞二、三号暗河、平石板暗河和黑龙潭暗河)的水文过程进行了监测。从它们的偶测年降雨流量历时曲线可以看出(图5), 南洞二、三号暗河的流量最大, 黑龙潭暗河

最小, 其峰值的大小与补给面积, 降水量和降雨入渗条件有直接关系。四条地下河出口的降水流量历时曲线在枯水期相对比较稳定, 较大降水或者集中降水补给时段, 起伏的峰值较高, 出现多次峰值, 说明这几条暗河的含水介质具有不均匀性, 以管道流和裂隙流为主。其中二、三号暗河系统的水文过程曲线延迟时间和响应时间都是最长的, 间接反映出其径流路径最长, 结构最为复杂; 一号暗河和平石板暗河次之; 黑龙潭暗河系统岩溶较为发育, 径流排泄条件最好, 对降水分配大小反应最为敏感。

一般来说, 如果降雨入渗条件较好, 循环路径较短, 集中补给的大气降水或坡面流, 在岩溶管道中会形成快速流, 可导致极为迅速的水文响应过程出现, 较复杂的运移管道和裂隙介质在岩溶地下水响应过程中具有较强的调蓄作用, 则会导致响应滞后时间较长, 水文过程曲线拖尾现象明显(Atkinson, 1977; 贺可强等, 2002; 刘仙等, 2009)。因此, 在不同的岩溶地下水系统中, 由于岩溶发育程度和



a—南洞二、三号地下暗河; b—南洞一号地下暗河; c—平石板地下暗河; d—黑龙潭地下暗河。  
a—Nandong No. 2 and No. 3 underground river; b—Nandong No. 1 underground river; c—Pingshiban underground river;  
d—Heilongtan underground river.

图5 南洞岩溶地下水系统各地下河的降水流量历时曲线

Fig. 5 The duration curve of precipitation flow in various rivers in Nandong karst water system

径流途径的结构差异,会导致其在岩溶地下水系统中呈现不同的响应行为(罗明明等, 2016)。本次调查对流域内四条主要地下河(南洞一号暗河、南洞二、三号暗河、平石板暗河和黑龙潭暗河)的水文过程进行了监测。从它们的偶测年降雨流量历时曲线可以看出(图 5),南洞二、三号暗河的流量最大,黑龙潭暗河最小,其峰值的大小与补给面积,降水量和降雨入渗条件有直接关系。四条地下河出口的降水流量历时曲线在枯水期相对比较稳定,较大降水或者集中降水补给时段,起伏的峰值较高,出现多次峰值,说明这几条暗河的含水介质具有不均匀性,以管道流和裂隙流为主。其中二、三号暗河系统的水文过程曲线延迟时间和响应时间都是最长的,间接反映出其径流路径最长,结构最为复杂;一号暗河和平石板暗河次之;黑龙潭暗河系统岩溶较为发育,径流排泄条件最好,对降水分配大小反应最为敏感。

### 3 岩溶地下水资源量评价

#### 3.1 岩溶地下水系统区划

按岩性构造、每条地下河组合情况和补径排关系,将其划分为四个子系统(梁永平和王维泰, 2010; 莫美仙等, 2019),即南洞一号暗河子系统,南洞二、

三号暗河子系统、平石板暗河子系统及黑龙潭暗河子系统(图 1)。

南洞一号暗河子系统东北端以东山顶地形分水岭为界,南部以地表分水岭为界,为一相对独立的水文地质单元。区内降水除去蒸发外,大部份汇集于灰岩区,形成岩溶地下水,地下迳流自东往西流,于南洞口排出地表。

南洞二、三号暗河子系统是南洞岩溶地下水系统的主体,该子区岩溶地下水主要补给途径为东山高原区灰岩和盆间浅丘灰岩区大气降水的直接入渗,其次为盆地边缘几个主要落水洞的地表水注入补给。由于小黑水洞暗河、大黑水洞暗河及灰土地暗河为南洞二、三号暗河子系统的季节性溢洪口,将其并入南洞二、三号暗河子系统,不再单独划分子系统。

平石板暗河子系统东、北以地表分水岭为边界;南以透水层地表分水岭为边界;西以透水层地表分水岭及新华村一带地表分水岭为边界。区内降水除蒸发外,几乎全部形成地下迳流,地下水以管道流为主,裂隙流次之,向北西方向径流,由于地形的切割,在平石板以暗河的形式股状流出地表。

黑龙潭暗河子系统在平面上呈南北向展布,大气降雨入渗为该岩溶地下水系统主要补给来源,南

东部为暗河系统的补给区, 接受大气降雨, 通过地表、管道以渗入和灌入的方式补给地下水, 以东北—南西向导水断层为运移的管道, 由东北向南西方向径流, 部分地下水由于地形切割在黑龙潭呈股状涌出后流入蒙自盆地, 另一部分可通过地下径流向南洞口汇集。

### 3.2 天然资源量评价

本文计算单元划分根据上述区划, 采用降雨入渗系数法和径流模数两种方法分别对南洞岩溶地下水系统天然资源量进行计算。

#### 3.2.1 天然补给量

采用降水入渗系数法计算天然补给量:

$$Q=0.1 \cdot \alpha \cdot F \cdot H \quad \text{式 1}$$

式中:  $Q$ —降水渗入补给量(万  $\text{m}^3 / \text{a}$ );  $\alpha$ —降水渗入系数(无量纲);  $F$ —地下水系统面积( $\text{km}^2$ );  $H$ —多年平均降水量( $\text{mm/a}$ )。

各子系统面积根据数字化的水文地质图上实际圈定结果,  $\alpha$  的选取根据实际地层岩性、岩溶发育程度, 并结合以往 1/20 万水文地质普查资料进行类比选用, 然后对选取值进行加权平均, 各子系统的主要参数见表 2。

本次调查收集了南洞岩溶地下水系统内气象站(蒙自、开远、西北勒、石洞气象站)长系列的降水资料, 根据就近选取的原则, 利用经验频率计算降水量的保证率:

$$P=\frac{m}{n+1} \times 100\% \quad \text{式 2}$$

式中:  $P$ —降水量的保证率(%);  $m$ —降水量值从大到小排序后的序号;  $n$ —统计的实测降水量值个数。

根据上述经验频率公式(式 2)可统计得出各子系统降水量保证率(50%、75%和 95%)下的降水量, 进而利用降雨入渗系数法(式 1)计算得出各降雨保证率下的入渗补给量和多年平均降雨补给量, 计算

成果见表 3。

#### 3.2.2 天然径流量

采用径流模数法计算天然径流量:

$$Q_{\text{径}}=3.1536 M_{\text{多平}} \cdot F \quad \text{式 3}$$

$$M_{\text{平偶}}=\frac{Q_{\text{平偶}}}{F} \quad \text{式 4}$$

$$M_{\text{多平}}=\frac{H_{\text{多}}}{H_{\text{偶}}} \cdot M_{\text{平偶}} \quad \text{式 5}$$

式中,  $Q_{\text{径}}$ —地下水系统多年平均径流量( $10^4 \text{m}^3/\text{a}$ );  $M_{\text{多平}}$ —多年平均径流模数( $\text{L/s} \cdot \text{km}^2$ );  $F$ —地下水系统面积( $\text{km}^2$ );  $Q_{\text{平偶}}$ —偶测年年平均流量( $\text{L/s}$ );  $M_{\text{平偶}}$ 、 $M_{\text{多平}}$ —偶测年、多年平均降水量下年平均径流模数( $\text{L/s} \cdot \text{km}^2$ );  $H_{\text{偶}}$ 、 $H_{\text{多}}$ —偶测年、多年平均降水量( $\text{mm/a}$ )。

南洞口的偶测年(2014年)平均流量为  $7.78 \text{m}^3/\text{s}$ , 南洞一号暗河子系统的南洞口排泄量约占总出流量的 12.2%, 南洞二、三号暗河子系统的南洞口排泄量约占总出流量的 87.8%。除了由南洞口排出的年均排泄量外, 南洞二、三号暗河子系统排泄量的计算还考虑了该区由大小黑水洞和灰土地出流的年均排泄量, 大小黑水洞和灰土地偶测年(2014年)平均出流量为  $0.50 \text{m}^3/\text{s}$ ; 平石板暗河子系统和黑龙潭暗河子系统的径流模数主要依据平石板暗河口和黑龙潭暗河口偶测年(2015年)的流量和降雨资料通过上述公式(式 3, 4, 5)计算得到。由于研究区岩溶泉较少, 并且岩溶地下水开采量不大, 本次计算选择忽略。具体计算参数及成果见表 4。

#### 3.3 可采水资源量评价

各评价区的可开采量用枯季径流模数法计算:

$$Q_{\text{允}}=3.1536 M_{\text{枯}} \cdot F \quad \text{式 6}$$

式中,  $Q_{\text{允}}$ —地下水允许开采量( $10^4 \text{m}^3/\text{a}$ );  $M_{\text{枯}}$ —枯季径流模数( $\text{L/s} \cdot \text{km}^2$ );  $F$ —地下水系统面积( $\text{km}^2$ )。

枯季径流模数  $M_{\text{枯}}$  的确定:

表 2 各子系统主要参数表  
Table 2 Main parameters of each subsystem

名称	系统面积 / $\text{km}^2$	碳酸盐岩面积 / $\text{km}^2$	碎屑岩面积 / $\text{km}^2$	第四系面积 / $\text{km}^2$	降水入渗系数	多年平均降雨量 / $(\text{mm/a})$
南洞一号暗河子系统	78.09	49.88	24.65	3.56	0.542	734.0
南洞二、三号暗河子系统	892.02	563.61	33.74	294.67	0.368	826.9
平石板暗河子系统	35.76	25.65	9.67	0.44	0.543	1 100.0
黑龙潭暗河子系统	76.02	55.61	9.03	11.38	0.461	920.0

表 3 天然资源量计算成果表(降雨入渗法)  
Table 3 Calculation results of natural resources (rainfall infiltration method)

名称	大气降水渗入补给量/( $\text{万m}^3/\text{a}$ )			多年平均降雨补给量/ ( $\text{万m}^3/\text{a}$ )
	平水年( $P=50\%$ )	枯水年( $P=75\%$ )	特枯水年( $P=95\%$ )	
南洞一号暗河子系统	3 142.2	2 659.3	2 343.5	3 106.6
南洞二、三号暗河子系统	26 973.4	23 096.6	20 473.8	27 144.1
平石板暗河子系统	2 167.7	1 882.5	1 629.3	2 135.9
黑龙潭暗河子系统	3 244.3	2 864.2	2 503.9	3 224.1
合计	35 527.6	30 502.6	26 950.5	35 610.7

表 4 天然资源量计算参数及成果表(径流模数法)  
Table 4 Calculation parameters and results of natural resources (runoff modulus method)

名称	系统面积/(km <sup>2</sup> )	偶测年平均流量/(L/s)	偶测年径流量模数/(L/s·km <sup>2</sup> )	偶测年降水量/(mm/a)	多年平均降水量/(mm/a)	多年平均径流模数/(L/s·km <sup>2</sup> )	多年平均径流量/(万 m <sup>3</sup> /a)
南洞一号暗河子系统	78.09	949.16	12.15	698.36	734.0	12.77	3 147.6
南洞二、三号暗河子系统	892.02	7 330.84	8.21	730.77	826.9	9.29	26 142.4
平石板暗河子系统	35.76	661.09	18.49	1 117.35	1 100.0	18.20	2 052.0
黑龙潭暗河子系统	76.02	706.99	9.30	968.22	920.0	8.84	2 118.2
合计	1 081.90						33 460.2

表 5 岩溶地下水可采资源计算一览表  
Table 5 Calculation list of karst groundwater recoverable resources

名称	面积/km <sup>2</sup>	多年平均径流模数/(L/s·km <sup>2</sup> )	多年平均枯季径流模数/(L/s·km <sup>2</sup> )	多年平均枯季径流量/(万 m <sup>3</sup> /a)
南洞一号暗河子系统	78.09	12.77	8.94	2 201.6
南洞二、三号暗河子系统	892.02	9.29	6.50	18 285.0
平石板暗河子系统	35.76	18.20	12.74	1 436.7
黑龙潭暗河子系统	76.02	8.84	6.19	1 484.0
合计	1 081.90			23 407.3

$$M_{枯偶} = \frac{Q_{枯偶}}{F} \quad \text{式 7}$$

$$M_{枯多} = \frac{H_{多}}{H_{偶}} \cdot M_{枯偶} \quad \text{式 8}$$

式中:  $M_{枯偶}$ 、 $H_{偶}$ —分别为偶测年枯季径模和偶测年降水量;  $M_{枯多}$ 、 $H_{多}$ —分别为多年平均枯季径模和多年平均降水量。

根据上述公式(式 6, 7, 8)计算可得到的各区多年枯季可采资源量, 见表 5。可见南洞地下河岩溶地下水系统的水资源可开采资源量巨大。

### 3.4 南洞地下河水资源评价

#### 3.4.1 南洞地下河的储存量

对天然出露的南洞地下暗河, 可采用大河动态衰减系数法计算其出口以上的储存量(何师意等, 2007):

$$W = \frac{Q_{枯}}{\alpha} \quad \text{式 9}$$

式中:  $W$ —枯季某天含水系统出口以上剩余体积储存量(万 m<sup>3</sup>);  $Q_{枯}$ —枯季某天暗河的流量(万 m<sup>3</sup>/d);  $\alpha$ —衰减参数(1/d)。

衰减系数  $\alpha$  的计算:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad \text{式 10}$$

$$\alpha = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_t}{t} \quad \text{式 11}$$

式中,  $Q_t$ —衰减开始后第  $t$  天的流量(万 m<sup>3</sup>/d);  $Q_0$ —衰减开始时刻( $t=0$ )的初始流量(万 m<sup>3</sup>/d)。

本次选取基本无雨的 2014 年 1 月 1 日至 4 月 30 日共 120 天的南洞水文站观测资料来求取衰减系数, 1 月 1 日流量 6.30 m<sup>3</sup>/s 为初始流量, 4 月 30 日流量 2.86 m<sup>3</sup>/s 为最末流量, 根据公式(式 10, 11)可计算得到  $\alpha$  为 0.006 6, 从而根据公式(式 9)得到 1 月 1 日枯季开始时南洞地下河的剩余储存量为 8 247.3

万 m<sup>3</sup>, 4 月 30 日达到最枯时的剩余储存量尚有 3744 万 m<sup>3</sup>, 南洞地下河在断绝天然补给量的情况下, 120 天消耗的调蓄量为 4 503.3 万 m<sup>3</sup>, 由此可见南洞地下河的可调蓄量是可观的。

#### 3.4.2 南洞地下河的允许开采量

根据南洞口多年的月径流资料, 可取其枯水期(当年 11 月一次年 4 月)平均日流量来计算南洞地下河的日允许开采资源量, 得到其日允许开采资源量为 49.4 万 m<sup>3</sup>/d。

#### 3.4.3 建库蓄水条件下二号暗河的允许开采量

南洞地下河建库主要是在草坝和大庄之间拦蓄南洞二号暗河, 使上游盆地地下水水位抬高, 为盆地就地浅层开采创造有利条件。

根据公式:

$$Q_{允} = Q_{枯} + \frac{Q_{蓄}}{T_{枯}} \quad \text{式 12}$$

式中:  $Q_{允}$ —建库调蓄利用地下水的地下河允许开采量(m<sup>3</sup>/d);  $Q_{枯}$ —地下河枯季平均流量(m<sup>3</sup>/d);  $Q_{蓄}$ —调蓄水库库容(取 7425 万 m<sup>3</sup>);  $T_{枯}$ —枯季时间(180 天)。

二号暗河管道流量约占南洞口出流量的 70.1%, 即 34.6 万 m<sup>3</sup>/d, 设计调蓄水库库容为 7425 万 m<sup>3</sup>。本次通过上式(式 12)计算得到建库条件下库区上游允许开采资源量为 75.9 万 m<sup>3</sup>/d。

### 3.5 可靠性分析

一个系统内的地下水在某一个时期可能出现短暂的正均衡或负均衡。尤其在人为影响下, 地下水的均衡状态总会被打破, 但从长远来看, 地下水的补给与排泄应该是保持平衡的。

根据南洞岩溶地下水系统划分, 南洞岩溶地下水系统包括南洞一号暗河子系统、南洞二、三号暗

河子系统、平石板暗河子系统和黑龙潭暗河子系统。本次采用降雨入渗系数法和径流模数法对南洞岩溶地下水系统的天然资源量分别进行了计算, 计算结果分别为 35 610.7 万  $\text{m}^3/\text{a}$  和 33 460.2 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 两种算法计算结果相差不大, 较为可靠。用枯季径流模数法对可采资源量进行了计算, 得到南洞岩溶地下水系统的可开采量为 23 407.3 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 小于南洞岩溶地下水系统的天然补给量, 开采具有保证。

天然补给量断绝 120 天后, 南洞地下河流量衰减至 2.86  $\text{m}^3/\text{s}$ , 利用大河动态衰减系数法计算得到南洞地下河 120 天内消耗的调蓄量为 4 503.3 万  $\text{m}^3$ , 剩余储存量尚有 3744 万  $\text{m}^3$ 。经分析计算南洞地下河枯季多年平均储蓄量为 7 484.8 万  $\text{m}^3$ , 由此可见南洞地下河的调蓄量是可观的。

南洞地下河的枯水期日均流量作为日可开采资源量, 考虑到南洞地下河巨大的调蓄量, 开采仍有保证。最后, 计算了南洞二号暗河建库蓄水条件下库区上游的允许开采量, 结果为 75.9 万  $\text{m}^3/\text{d}$ , 蓄水库容来源于工程设计, 资源保证程度高。

#### 4 结论及建议

(1)南洞地下河具有排泄量大, 动态变化大, 周期性, 排泄滞后于降雨, 调蓄量大等特征。其中, 二、三号暗河径流路径最长, 结构最为复杂; 一号暗河和平石板暗河次之; 黑龙潭暗河径流条件最好, 对降水分配大小反应最为敏感。

(2)按岩性构造、每条地下河组合情况和补径排关系, 将其划分为四个子系统, 即南洞一号暗河子系统, 南洞二、三号暗河子系统、平石板暗河子系统及黑龙潭暗河子系统。

(3)采用降雨入渗系数法和径流模数法对南洞岩溶地下水系统的天然资源量分别进行了评价, 计算结果分别为 35 610.7 万  $\text{m}^3/\text{a}$  和 33 460.2 万  $\text{m}^3/\text{a}$ 。用枯季径流模数法对可采资源量进行了计算, 得到南洞岩溶地下水系统的可开采量为 23 407.3 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 其可开采资源量巨大。

(4)对南洞地下河主管道的水资源量进行了评价, 南洞地下河在断绝天然补给量的情况下, 120 天消耗的调蓄量为 4503.3 万  $\text{m}^3$ , 南洞地下河的可调蓄量是可观的。用南洞地下河的枯水期日均流量计算得到南洞地下河日允许开采资源量为 49.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

(5)在草坝与大庄坝间, 南洞二号地下暗河过水断面较为狭窄, 可构筑地下堤坝, 形成地下水库。对解决蒙自坝区工农业用水, 改变缺水干旱面貌, 具有决定性作用。二号暗河建库蓄水条件下库区上游的日允许开采量为 75.9 万  $\text{m}^3/\text{d}$ , 蓄水库容来源于

工程设计, 资源保证程度高。计算结果可为南洞地下河的开发利用提供科学依据。

#### Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (Nos. 2016YFC0502502 and 2017YFC0406104) and China Geological Survey (Nos. DD20190334 and DD20190825).

#### 参考文献:

- 陈植华. 1991. 岩溶水系统泉流量系统分析——以山西郭庄泉为例[J]. 地球科学, 16(1): 51-60.
- 郭琳, 陈植华. 2006. 岩溶地区地下河系统水资源定量评价的问题与出路[J]. 中国岩溶, 25(1): 1-5.
- 郭小娇, 姜光辉, 汤庆佳, 黄思宇, 刘绍华. 2014. 典型岩溶山包气带洞穴水流的水文过程浅析[J]. 中国岩溶, 33(2): 176-183.
- 何师意, 周锦忠, 曾飞跃. 2007. 岩溶地下河流域地下水资源评价——以湖南湘西大龙洞为例[J]. 水文地质工程地质, 34(5): 33-36.
- 贺可强, 刘炜金, 邵长飞. 2002. 鲁中南岩溶水资源综合类型及合理调蓄研究[J]. 地球学报, 23(4): 369-374.
- 胡伟, 吕玉香, 郭传道, 邓飞, 王克峰. 2019. 关于南洞地下河系统南边界问题的讨论[J]. 水文, 39(3): 58-62, 91.
- 梁永平, 王维泰. 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 31(6): 860-868.
- 刘仙, 蒋勇军, 叶明阳, 杨平恒, 扈志勇, 李元庆. 2009. 典型岩溶槽谷区地下水水文动态响应研究——以重庆青木关地下河为例[J]. 中国岩溶, 28(2): 149-154.
- 卢耀如, 张凤娥, 刘长礼, 童国榜, 张云. 2006. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报, 27(5): 393-402.
- 罗明明, 陈植华, 周宏, 尹德超, 史婷婷. 2016. 岩溶流域地下水调蓄资源量评价[J]. 水文地质工程地质, 43(6): 14-20.
- 罗明明. 2017. 南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研究——以香溪河岩溶流域为例[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 吕文凯, 周金星, 万龙, 关颖慧, 刘玉国, 肖桂英, 丁玉雄, 刘发万. 2021. 滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J]. 地球学报, 42(3): 341-351.
- 莫美仙, 王宇, 李峰, 虞慧. 2019. 云南南洞地下河系统边界及性质研究[J]. 中国岩溶, 38(2): 173-185.
- 乔小娟, 侯泉林, 琚宜文, 刘凯, 张玉修, 郭高轩. 2014. 北京张坊地区岩溶地下水运移富集的构造控制分析[J]. 中国岩溶, 33(2): 184-191.
- 覃星铭, 蒋忠诚, 蓝芙宁, 罗书文, 劳文科, 吴华英. 2015. 南洞地下河最枯径流的周期变化及趋势分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 33(2): 120-126.
- 臧红飞, 宁显林, 陈军锋, 金芳义. 2010. 交口县岩溶地下水资源量估算[J]. 地下水, 32(4): 66-67, 93.
- 张贵, 周翠琼, 康晓波. 2008. 云南开远南洞地下河水质演变特征[J]. 中国岩溶, 27(4): 366-370.
- 赵一, 李衍青, 覃星铭, 洪涛, 程瑞端, 蓝芙宁. 2017. 南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J]. 中国岩溶, 36(2): 226-233.
- 邹胜章, 张文慧, 梁小平, 罗伟权, 梁彬. 2005. 表层岩溶带调

蓄系数定量计算——以湘西洛塔赵家湾为例[J]. 水文地质工程地质, 42(4): 37-42.

## References:

- ATKINSON T C. 1977. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the mendiphills, Somerset(Great Britain)[J]. Journal of Hydrology, 35(1-2): 93-110.
- CHEN Zhi-hua. 1991. The systematic analysis of spring discharge of karst groundwater system——City Guozhuang spring in Shanxi province for example[J]. Earth Science, 16(1): 51-60(in Chinese with English abstract).
- GUO Lin, CHEN Zhi-hua. 2006. The puzzles and solutions for quantitative assessment of water resource in karst underground river system[J]. Carsologica Sinica, 25(1): 1-5(in Chinese with English abstract).
- GUO Xiao-jiao, JIANG Guang-hui, TANG Qing-jia, HUANG Si-yu, LIU Shao-hua. 2014. Analysis of hydrological process of drip water in the aeration zone of a typical karst stone hill[J]. Carsologica Sinica, 33(2): 176-183(in Chinese with English abstract).
- HE Ke-qiang, LIU Wei-jin, SHAO Chang-fei. 2002. The Comprehensive Type Classification and Proper Adjustment of Karst Water Resources in the Central-South Region of Shandong Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(4): 369-374(in Chinese with English abstract).
- HE Shi-yi, ZHOU Jin-zhong, ZENG Fei-yue. 2007. Assessment on the karst water resources of Dalongdong underground river catchment of Xiangxi[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 34(5): 33-36(in Chinese with English abstract).
- HU Wei, LÜ Yu-xiang, GUO Chuan-dao, DENG Fei, WANG Ke-feng. 2019. Discussion on southern boundary of Nandong underground river system[J]. Journal of China Hydrology, 39(3): 58-62, 91(in Chinese with English abstract).
- LIANG Yong-ping, WANG Wei-tai. 2010. The Division and Characteristics of Karst Water Systems in Northern China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 31(6): 860-868(in Chinese with English abstract).
- LIU Xian, JIANG Yong-jun, YE Ming-yang, YANG Ping-heng, HU Zhi-yong, LI Yuan-qing. 2009. Study on hydrologic regime of underground river in typical karst valley——A case study on the Qingmuguan subterranean stream in Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 28(2): 149-154(in Chinese with English abstract).
- LIU Z H, LI Q, SUN H L, WANG J L. 2007. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO<sub>2</sub> and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 337(1): 207-223.
- LÜ Wen-kai, ZHOU Jin-xing, WAN Long, GUAN Ying-hui, LIU Yu-guo, XIAO Gui-ying, DING Yu-xiong, LIU Fa-wan. 2021. Evaluation of Water Resources Vulnerability in Karst Faulted Basin of Eastern Yunnan Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 42(3): 341-351(in Chinese with English abstract).
- LU Yao-ru, ZHANG Feng-e, LIU Chang-li, TONG Guo-bang, ZHANG Yun. 2006. Karst Water Resources in Typical Areas of China and Their Eco-hydrological Characteristics[J]. Acta Geoscientia Sinica, 27(5): 393-402(in Chinese with English abstract).
- LUO Ming-ming, CHEN Zhi-hua, ZHOU Hong, YIN De-chao, SHI Ting-ting. 2016. Assessment of regulating groundwater resources in karst watershed[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 43(6): 14-20(in Chinese with English abstract).
- LUO Ming-ming. 2017. The physical mechanism and mathematical model of karst water circulation: A case study of the Xiangxi river karst basin, south china[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- MO Mei-xian, WANG Yu, LI Feng, YU Hui. 2019. Study on underground river system boundaries and properties of Nandong in Yunnan province[J]. Carsologica Sinica, 38(2): 173-185(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiao-juan, HOU Quan-lin, JU Yi-wen, LIU Kai, ZHANG Yu-xiu, GUO Gao-xuan. 2014. Research about the control of geological structure on karst groundwater system in Zhangfang, Beijing[J]. Carsologica Sinica, 33(2): 184-191(in Chinese with English abstract).
- QIN Xing-ming, JIANG Zhong-cheng, LAN Fu-ning, LUO Shu-wen, LAO Wen-ke, WU Hua-ying. 2015. Analysis of Trend and Annual Lowest Runoff Periodic Variation in the Nandong Subterranean River System[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 33(2): 120-126(in Chinese with English abstract).
- TORBAROV K. 1976. Estimation of permeability and effective porosity in karst on the basis of recession curve analysis.in:Yevjevich V(ed) Karst hydrology and water resources,vol 1:Karst Hydrology[M]. Littleton: Water Resources Publication.
- WETZEL K F. 2003. Runoff production processes in small alpine catchments within the unconsolidated Pleistocene sediments of the Lainbach area (upper Bavaria)[J]. Hydrological Processes, 17: 2463-2483.
- WINSTON W E, CRISS R E. 2004. Dynamic hydrologic and geochemical response in a perennial karst spring[J]. Water Resources Research, 40: W05106.
- ZANG Hong-fei, NING Xian-lin, CHEN Jun-feng, JIN Fang-yi. 2010. Estimated Value of Karst Groundwater Amount in Jiaokou County[J]. Ground Water, 32(4): 66-67, 93(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Gui, ZHOU Cui-qiong, KANG Xiao-bo. 2008. Changing features of water quality in the Nandong underground river, Kaiyuan, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 27(4): 366-370(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yi, LI Yan-qing, QIN Xing-ming, HONG Tao, CHENG Rui-rui, LAN Fu-ning. 2017. Tracer tests on distribution and structural characteristics of karst channels in Nandong underground river drainage[J]. Carsologica Sinica, 36(2): 226-233(in Chinese with English abstract).
- ZOU Sheng-zhang, ZHANG Wen-hui, LIANG Xiao-ping, LUO Wei-quan, LIANG Bin. 2005. Quantitative calculation of regulating coefficient for epikarst zone——case study of Zhaojiawan, Luota, West of Hunan[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 42(4): 37-42(in Chinese with English abstract).