

doi: 10.12029/gc20220408

夏日元, 卢海平, 曹建文, 赵良杰, 王喆, 栾崧. 2022. 南方岩溶区地下水资源特征与水资源保障对策[J]. 中国地质, 49(4): 1139–1153.  
Xia Riyuan, Lu Haiping, Cao Jianwen, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Luan Song. 2022. Characteristics of groundwater resources of karst areas in the Southern China and water resources guarantee countermeasures[J]. Geology in China, 49(4): 1139–1153(in Chinese with English abstract).

## 南方岩溶区地下水资源特征与水资源保障对策

夏日元<sup>1</sup>, 卢海平<sup>1,2</sup>, 曹建文<sup>1</sup>, 赵良杰<sup>1</sup>, 王喆<sup>1</sup>, 栾崧<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/联合国教科文组织国际岩溶研究中心/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 河海大学水文水资源学院/河海大学水文水资源与水利工程科学重点实验室, 江苏南京 210098)

**摘要:**【研究目的】中国南方岩溶地区干旱缺水等问题异常突出, 岩溶地下水赋存和分布的复杂, 开发利用率低, 基于多年调查研究工作为基础, 系统总结南方岩溶区地下水资源特征, 研讨水资源保障对策。【研究方法】基于南方岩溶区地下水资源特点、地下水系统类型、地下水系统空间结构的叠置性和时空分布不均性分析, 提出南方岩溶区水资源保障对策。【研究结果】南方岩溶区可从以下三方面充分发挥地下水资源安全保障作用, 一是掌握地下水赋存分布规律, 发挥分散供水和应急供水作用; 二是加强调蓄工程建设, 解决水资源时空分布不均问题; 三是建立与生态重建和经济发展相结合的地下水资源可持续利用模式。【结论】南方岩溶区地下水赋存条件复杂, 具有表层带岩溶水系统、岩溶地下河与管道流系统、岩溶大泉系统以及分散排泄地下水系统多种类型, 规模大小不一, 开发利用形式多样; 在垂向上具有叠置性, 水空分布严重不均; 开发利用潜力较大。在地球科学系统论的指导下, 查明岩溶水资源赋存分布规律, 科学评价地下水资源量, 因地制宜制定水资源开发利用和保护方案, 为脱贫攻坚、生态文明建设和乡村振兴提供技术支撑。

**关键词:**地下水系统; 水资源特征; 可持续利用; 保障对策; 水文地质调查工程; 岩溶区; 中国南方

**创新点:**以系统水文地质环境地质综合调查和地下水开发利用示范工作为基础, 系统总结南方岩溶区地下水资源特点; 针对岩溶区水资源安全保障问题, 分析其主要原因, 提出了水资源保障对策。

中图分类号: P641.8; TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)04-1139-15

## Characteristics of groundwater resources of karst areas in the Southern China and water resources guarantee countermeasures

XIA Riyuan<sup>1</sup>, LU Haiping<sup>1,2</sup>, CAO Jianwen<sup>1</sup>, ZHAO Liangjie<sup>1</sup>,  
WANG Zhe<sup>1</sup>, LUAN Song<sup>1</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS / International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO / Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University / State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

收稿日期: 2021-04-05; 改回日期: 2021-07-22

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160300、DD20190342)、国家自然科学基金青年基金项目(41902261)联合资助。

作者简介: 夏日元, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 长期从事岩溶水文地质、环境地质调查研究; E-mail: xriyuan@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 卢海平, 男, 1987 年生, 博士生, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质、环境地质调查研究; E-mail: karstluhp@163.com。

**Abstract:** This paper is the result of the hydrogeological survey engineering.

**[Objective]** The problems of drought and water shortage in the karst areas of southern China are extremely prominent, the storage and distribution of karst groundwater are complex, and the utilization rate of development is low, based on years of investigation and research work, the characteristics of groundwater resources in the karst area in southern China are systematically summarized, and the countermeasures for water resources protection are studied. **[Methods]** Based on the characteristics of groundwater resources, the types of groundwater systems, the spatial structure of groundwater systems, and the uneven distribution of time and space in the southern karst area, the countermeasures for water resources protection in the southern karst area are proposed. **[Results]** The southern karst area can give full play to the role of groundwater resource security from the following three aspects: One is to grasp the law of groundwater storage and distribution, and play the role of decentralized water supply and emergency water supply. The second is to strengthen the construction of storage projects to solve the problem of unevenly distributed water resources. The third is to establish a sustainable use model of groundwater resources combined with ecological reconstruction and economic development. **[Conclusions]** The groundwater storage conditions in the southern karst area are complex, and there are many types of karst water systems in the surface zone, karst underground rivers and pipeline flow systems, karst large spring systems and scattered discharge groundwater systems, with different scales and different development and utilization. It has superposition in the vertical upward, and the time-space distribution of karst groundwater is seriously uneven; The potential for development and utilization is large. Under the guidance of the earth science system theory, it is necessary to find out the law of the allocation and distribution of karst water resources, scientifically evaluate the amount of groundwater resources, and formulate water resources development, utilization and protection plans according to local conditions, to provide technical support for poverty alleviation, ecological civilization construction and rural revitalization.

**Key words:** groundwater system; characteristics of water resources; sustainable utilization; safeguard countermeasures; hydrogeological survey engineering; karst area; Southern China

**Highlights:** Based on the systematic hydrogeological and environmental geological comprehensive survey and the demonstration work of groundwater development and utilization, systematically summarizes the attributes of groundwater resources in the southern karst zone; In view of the issue of water resource security in karst zones, the major reasons for this are analyzed and proposed, and water resources protection countermeasures are proposed.

**About the first author:** XIA Riyuan, male, born in 1963, doctor, researcher, engaged in the study of karst hydrogeology, environmental geology; E-mail: xriyuan@mail.cgs.gov.cn.

**About the corresponding author:** LU Haiping, male, born in 1987, doctor candidate, associate researcher, engaged in karst hydrogeology, environmental geology; E-mail: karstluhp@163.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20160300, DD20190342), the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China (No.41902261).

## 1 引 言

南方岩溶区是中国最大的连片岩溶分布区,主要分布于云南、贵州、广西、湖南、湖北、重庆、四川和广东等省(区、市),面积 $78 \times 10^4 \text{ km}^2$ (袁道先, 2014)(图1)。受岩溶特殊地质条件、全球气候变化和人类工程活动的影响(陈梦熊, 2003; 张之淦, 2006; 袁道先等, 2008; 张贵等, 2020), 干旱缺水等问题异常突出(张之淦, 2005; 夏日元等, 2017), 区内缺水人口达1700万, 占总人口的12%; 受旱耕地近亿亩, 占总耕地面积的10%; 制约了社会经济的发展(曹建华等, 2005; 王明章等, 2015)。

该区地下水资源丰富, 开发利用潜力巨大, 地下水总资源量 $1695.36 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 可开发利用量为 $621.81 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 现开采量 $90.53 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 开采程度为14.56%, 岩溶地下水开发利用潜力较大, 达 $515.38 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (曹建文等, 2017)。由于岩溶地下水赋存和分布的复杂性(邹凤钗等, 2016; 胡仁发等, 2017; 覃小群等, 2017), 增加了开发利用的难度, 导致岩溶地下水资源开发利用率低, 满足不了当地的缺水需求。

2003—2020年, 在南方岩溶区开展了水文地质环境地质综合调查和地下水开发利用示范, 完成1:25万水文地质调查 $78 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 1:5万水文地质调





图1 中国南方岩溶区区域分布图

Fig.1 Regional distribution map of karst areas in the Southern China

查面积  $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 综合地球物理探测 8 万点, 岩溶洞穴探测  $7 \times 10^4 \text{ m}$ , 水文地质钻探  $9 \times 10^4 \text{ m}$ 。本文以上述调查研究工作为基础, 重点论述南方岩溶区地下水资源特征与水资源保障对策。

## 2 南方岩溶区地下水资源特点

岩溶地下水系统是指有水力联系的岩溶地质体及赋存其中的地下水构成的有机整体, 具有独立且完整的补给、径流、调蓄、排泄条件, 边界条件清楚, 水力联系密切, 为水资源评价、开发利用和生态建设区划的最基本单元(张红波等, 2018; 张贵等, 2020)。受青藏高原强烈抬升的影响, 南方岩溶区碳酸盐岩的空间分布受地层、构造和地形的控制而被分割成许多小块, 岩溶水文地质系统总体上以小型

分散为主(表1)。

### 2.1 岩溶地下水系统类型的多样性

岩溶地下水系统类型多种多样, 影响因素复杂, 从不同角度可以进行不同的划分。如从埋藏深度上划分为表层带岩溶水系统、近地表浅部岩溶水系统、深循环岩溶水系统; 从含水介质上划分为管道-溶洞地下水系统、溶洞-裂隙地下水系统、裂隙-孔隙地下水系统; 从地下水排泄方式划分为岩溶大泉地下水系统、岩溶地下河系统、分散排泄地下水系统; 从岩溶发育垂向上划分为表层岩溶带、垂向渗滤带、径流带和潜流带; 从开发利用角度岩溶地下水系统与供水目标在空间上的关系划分为“高位”和“低位”(潘晓东等, 2015; 陈萍等, 2015; 范威等, 2020)。下面从岩溶地下水开发利用和生态修

表1 南、北方岩溶区地下水系统特征对比表

Table 1 Comparison of groundwater system characteristics in South Karst Areas and North Karst Areas

类别	南方岩溶区	北方岩溶区
气候类型	热带—亚热带	干旱—半湿润
埋藏条件	裸露形、浅覆盖型	埋藏型、覆盖型
地貌形态	峰丛洼地、峰丛谷地、岩溶峡谷、岩溶槽谷、岩溶台地	宏观具常态山轮廓,微观具岩溶山地形态
个体岩溶形态	地表岩溶形态:石芽、孤峰、消水洞、落水洞、天窗、石笋、钟乳石、石柱、石幔等;地下岩溶形态:完整的地下河系统,溶洞规模相对较大,个体洞穴直径可至数千米	地表岩溶形态:溶痕、溶沟石芽、岩溶石柱、海蚀柱、岩溶洼地等;岩溶发育程度较南方低,溶洞发育规模较小,基本无大规模的地下河系统,比较有代表性的地下河为辽宁本溪的水洞
地下水系统类型	岩溶大泉和地下河系统	以岩溶大泉岩溶水系统,基本无大规模地下河分布。
系统面积	规模相对较小的岩溶含水系统,流域面积通常几至几十平方千米,且具有多级排泄和多次循环的特点	由一系列规模不等、相对独立循环、以岩溶大泉为天然排泄的岩溶水系统,系统规模大,最大可达上万平方公里
含水介质	高度管道化与强烈不均一的岩溶管道和地下河	含水介质则相对均一,主要以溶蚀裂隙为主以及局部的岩溶管道
岩溶发育深度	岩溶发育深度相对较浅,一般数十至300 m,局部可达千米	岩溶发育深度较深,一般数百米甚至数千米
岩溶化强度	岩溶化强度强—中等	岩溶化强度弱—较弱
水循环速度	水循环速度快,数小时至数周,反应迅速	水循环速度慢,数月甚至数年
水文地质结构	“土在楼上,水在楼下”	“煤在楼上,水在楼下”或“煤—水共存”
补径排特征	大气降水—快速径流式入渗补给(落水洞、消水洞、竖井、漏斗)—地下河管道和宽大裂隙径流—以地下河出口、岩溶大泉等形式排泄	大气降水—覆盖层面状活塞式补给—溶蚀裂隙、局部岩溶管道径流—岩溶大泉排泄
流量动态	流量对降水响应十分灵敏,流量季节变化很大	汇水范围往往可达数千平方千米,流量达数方每秒,但流量动态相当稳定
流态	紊流与层流并存,地表水、地下水交换频繁	岩溶水以相对独立单元进行循环,构成一系列规模不等的岩溶水系统,岩溶含水介质比较均匀,地下水流态以层流为主
水化学特征	矿化度、硬度低,pH偏中性,地下水类型以HCO <sub>3</sub> -Ca、HCO <sub>3</sub> -Ca·Mg为主,水侵蚀性较弱	矿化度、硬度高,pH偏碱,地下水类型以HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca为主,水侵蚀性较强

复角度论述具有重要意义的地下水地下系统进行说明。

表层岩溶带为包气带表层由不规则带状、犬牙交错的岩溶个体形态和微形态组合形成的能够调蓄水循环的强岩溶化带。表层带岩溶水系统位于生物圈和岩石圈的结合部位,对生态重建具有特殊意义(蒋忠诚等, 1999, 2001; Williams, 2008)。

岩溶地下河是指具有河流主要特征的岩溶地下通道,地下河系统为地下河的干流和支流组成的地下岩溶通道系统(易连兴等, 2018)。管道流为地下岩溶管道中赋存和运动的地下水流。由于碳酸盐岩中溶蚀作用强烈,导致大气降水和地表水快速渗漏到地下(朱学稳, 2010; Yue et al., 2020),地表水系不发育,地下则发育了2763条地下河(杨立铮, 1985; 覃小群等, 2007),总长度12687 km,汇水面积

30×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,枯季径流量达470×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,相当于黄河的径流量。其中,广西、贵州、云南和湖南为岩溶地下河的主要分布区,地下河延伸相对较长,流量相对较大(袁道先, 2014)。

岩溶大泉系统指枯季流量大于10 L/s的泉水系统,具有相对集中的排泄口,系统规模和流量相对较大,具有重要供水意义(裴建国等, 2008)。分散排泄地下水系统主要特征为没有相对集中的排泄口,有时系统内发育有流量较小的泉水点(范威等, 2020)。当系统内发育有较好的地下水径流带和蓄水构造时,可作为重要的供水水源地。

岩溶地下水系统规模差别较大,如贵州平塘大小井地下河系统,汇水面积达1943 km<sup>2</sup>,有30多条支流,地下岩溶通道长度130 km,枯季流量6 m<sup>3</sup>/s,雨季流量30 m<sup>3</sup>/s(洪运胜, 2013; 王明章等, 2018);广



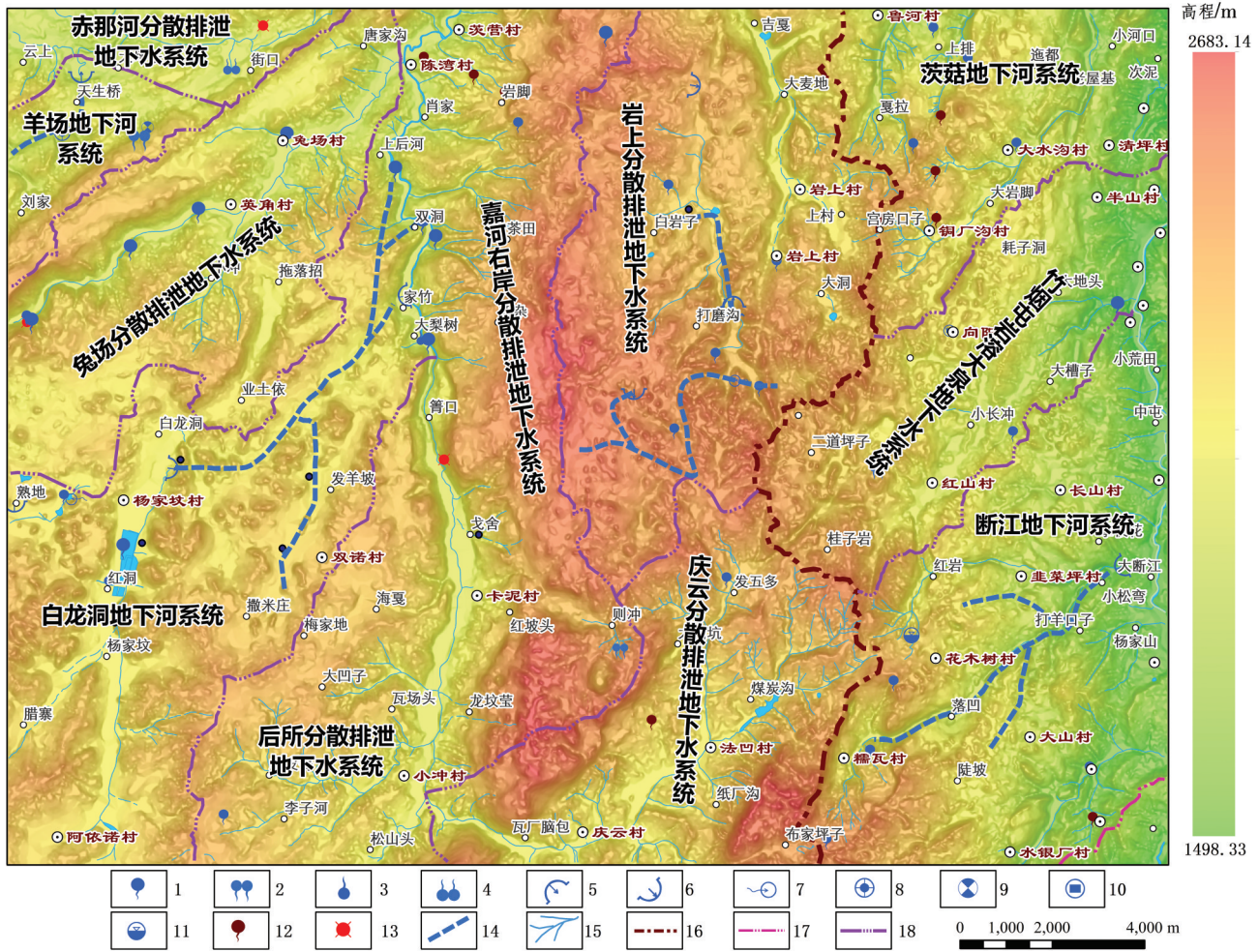


图2 云南省卡泥幅地下水系统类型

1—岩溶下降泉; 2—岩溶下降泉群; 3—岩溶上升泉; 4—岩溶上升泉群; 5—地下河出口; 6—地下河入口; 7—伏流入口; 8—天窗 9—落水洞; 10—溶井; 11—溶潭; 12—裂隙下降泉; 13—机井; 14—地下河; 15—地表河; 16—四级流域界线; 17—五级流域界线; 18—地下水系统界线

Fig.2 Type of groundwater system in Kani map, Yunnan Province

1—Karst spring; 2—Karst springs group; 3—Karst ascending spring; 4—Karst ascending springs group; 5—Underground river outlet; 6—Underground river entrance; 7—Sinking stream entrance; 8—Karst window; 9—Sinkholes; 10—Dissolved wells; 11—Blue hole; 12—Fracture descending spring; 13—Driven well; 14—Groundriver; 14—Stream; 15—Fourth-level boundary of drainage basin; 16—Fifth-level boundary of drainage basin; 18—Boundary of the underground river system

西桂林海洋寨底地下河系统, 汇水面积仅33 km<sup>2</sup>, 发育7条地下河分支, 枯季流量0.08 m<sup>3</sup>/s, 雨季流量18 m<sup>3</sup>/s(Zhao et al., 2018)。对于某一标准图幅, 同样根据划分原则, 划分不同类型的地下水系统, 如云南省卡泥幅(图2)可划分为4个岩溶地下河系统、1个岩溶大泉系统和6个分散排泄地下水系统。据南方岩溶区1:5万图幅水文地质调查结果统计, 每个图幅一般有8~10个地下水系统, 平均流域面积45~55 km<sup>2</sup>。

岩溶地下水系统类型多样、规模大小不一, 其地下水资源的赋存、分布特征不同于北方以大型盆

地为主的地下水资源特点(张茂省等, 2005; Liang et al., 2010; 梁永平等, 2010, 2013; Yang et al., 2020), 决定了其开发利用形式的多样性。应因地制宜, 分类进行水资源评价和开发利用规划(王伟等, 2010; Miklos et al., 2020)。

### 2.2 岩溶地下水系统空间结构的叠置性

岩溶地下水系统在垂向上叠置关系主要有三种类型, 一是表层带岩溶水系统叠置于饱水带地下水系统之上。如湖南洛塔地下水系统(图3), 上部发育2个表层带岩溶水系统, 厚10~30 m, 季节性泉

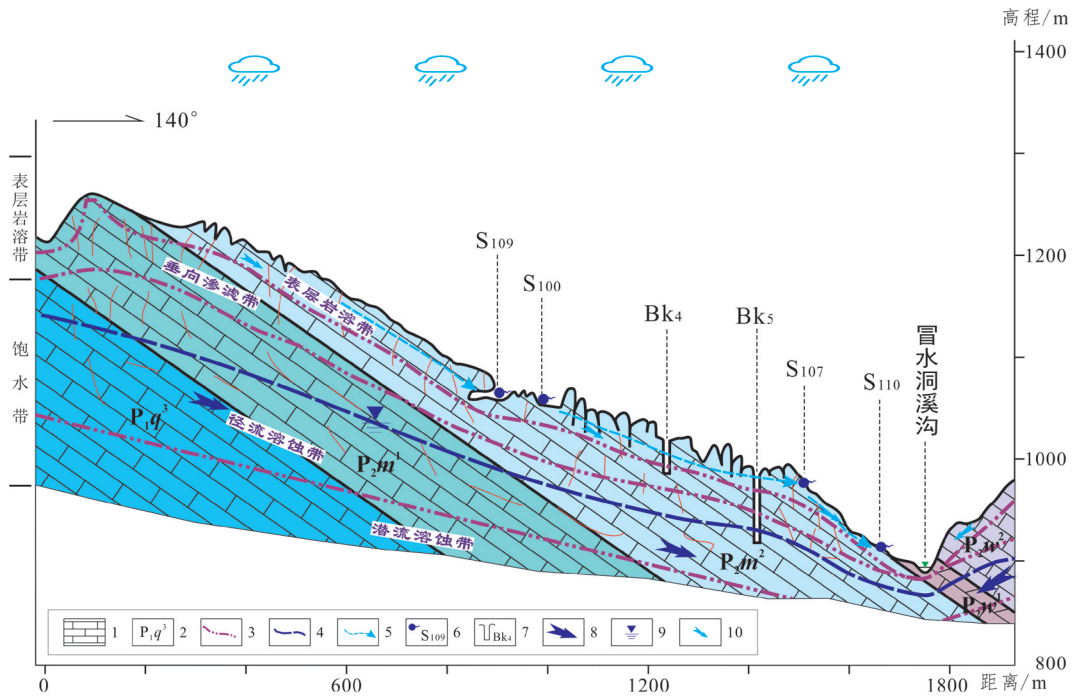


图3 湖南省洛塔表层带岩溶水系统与饱水带地下水系统叠置关系

1—灰岩;2—地层代号;3—垂向岩溶分带界线;4—饱水带等效地下水水位;5—表层岩溶带地下水流线;6—泉水及编号;7—井位及编号;8—饱水带流向;9—地下水水位;10—表层带地下水流向

Fig. 3 Overlapping relationship between epikarst karst water system and groundwater system of saturation zone in Lota, Hunan Province

1—Limestone; 2—Stratigraphic code; 3—Vertical karst zoning boundary; 4—Saturated zone equivalent groundwater level; 5— Groundwater flow line in epikarst zone; 6—Springs & No.; 7—Well & No.; 8—Flow direction of saturated zone; 9—Groundwater level; 10—Flow direction of epikarst zone

水在地表出露后又渗入补给下部饱水带地下水系统(梁彬等, 2008; 邹胜章等, 2008)。二是受层组结构和地质构造控制, 隔水层或阻水构造的存在形成双层或多层地下水系统。如贵阳市汪家大井地下水系统, 向斜蓄水构造形成上下叠置双层地下水系统, 上部为三叠系碳酸盐岩夹碎屑岩分散排泄地下水系统, 发育多个流量较小的泉点, 分散排泄于地表冲沟中; 下部为石炭—二叠系纯碳酸盐岩, 其内发育了以管道流为主的地下河系统, 补给区位于南东部, 地下河向北西方向发育, 在汪家寨集中排泄地表, 成为贵阳市供水水源之一(袁代江, 2019; 魏永等, 2020)。三是岩溶地下水系统覆盖或埋藏于非碳酸盐岩之下, 形成上部风化裂隙水与下部岩溶承压水叠置关系。如云南三丘田地下河系统(图4), 西南部补给区为裸露的二叠系纯碳酸盐岩中, 东北部径流—排泄区上覆盖厚>100 m 峨眉山玄武岩, 受断层和地表河流切割, 地下水以地下河出口的形式出露于地表河流之中; 峨眉山风化裂隙水与岩溶地下

河相互叠置。

上下岩溶地下水系统之间一般不存在直接水力类型, 地下水埋深和补径排条件差别也比较大。对上下双层或多层叠置的岩溶地下水系统应分别进行地下水资源评价和开发利用条件论证(Taheri et al., 2016; Luo et al., 2020)。

### 2.3 岩溶地下水资源时空分布的不均性

南方岩溶区年降水量一般1000 mm以上, 降水资源比较丰沛, 但季节性气候十分明显, 5—9月汛期降水量占全年的60%~80%(图5), 约有三分之二的水资源量成为洪水径流量而未能利用(表2)(Zhang et al., 2020)。天然出露的地下水点, 不少是属于季节性的。雨季才出水, 甚至水量很大, 但此时不需要水, 带来的是涝灾; 干旱缺水季节, 流量则显著减小, 甚至枯竭, 满足不了用水需求。岩溶地下水的水位变幅可达数十至数百米, 流量变幅达数十至数百倍, 属极不稳定型动态变化(Yi et al., 2015; Schuler et al., 2020)。岩溶地下水系统不同部



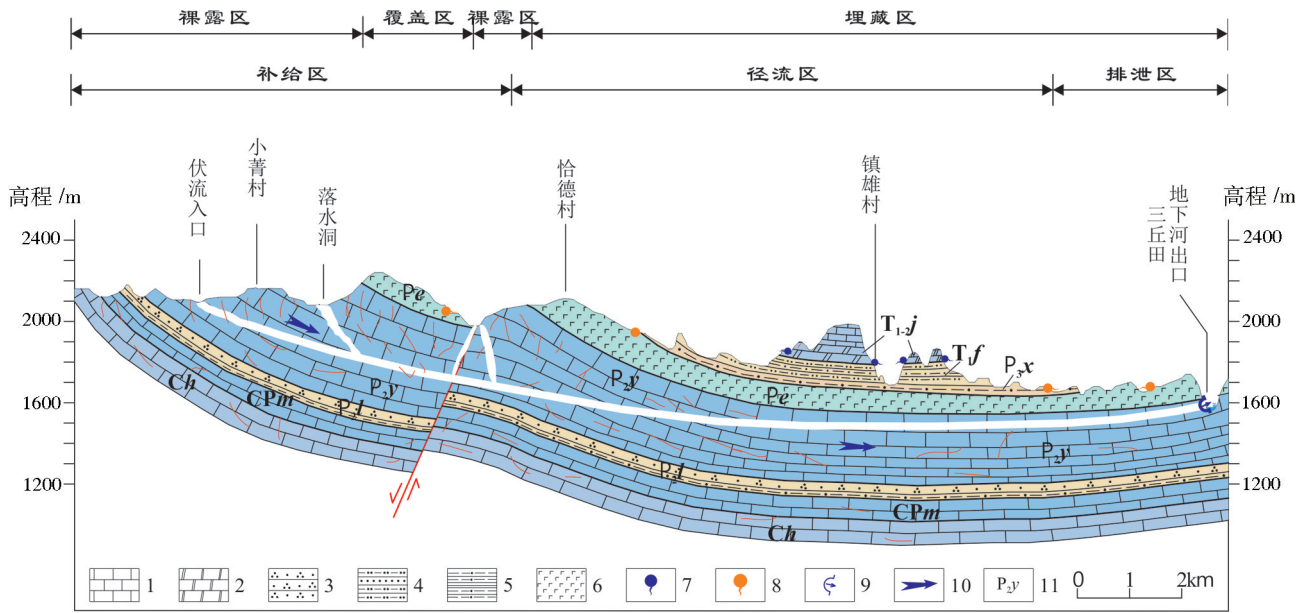


图4 三丘田地下河系统水文地质剖面图

1—灰岩;2—白云岩;3—砂岩;4—粉砂质泥岩;5—泥页岩;6—玄武岩;7—岩溶泉;8—裂隙泉;9—地下河出口;10—地下水流向;11—地层代号

Fig.4 The brief hydrogeological section map of Sanqitian underground river system

1—Limestone; 2—Dolomite; 3—Sandstone; 4—Silty mudstone; 5—Shale; 6—Basalt; 7—Karst spring; 8—Fissure spring; 9—Underground river outlet; 10—Groundwater flow direction; 11—Stratigraphic code

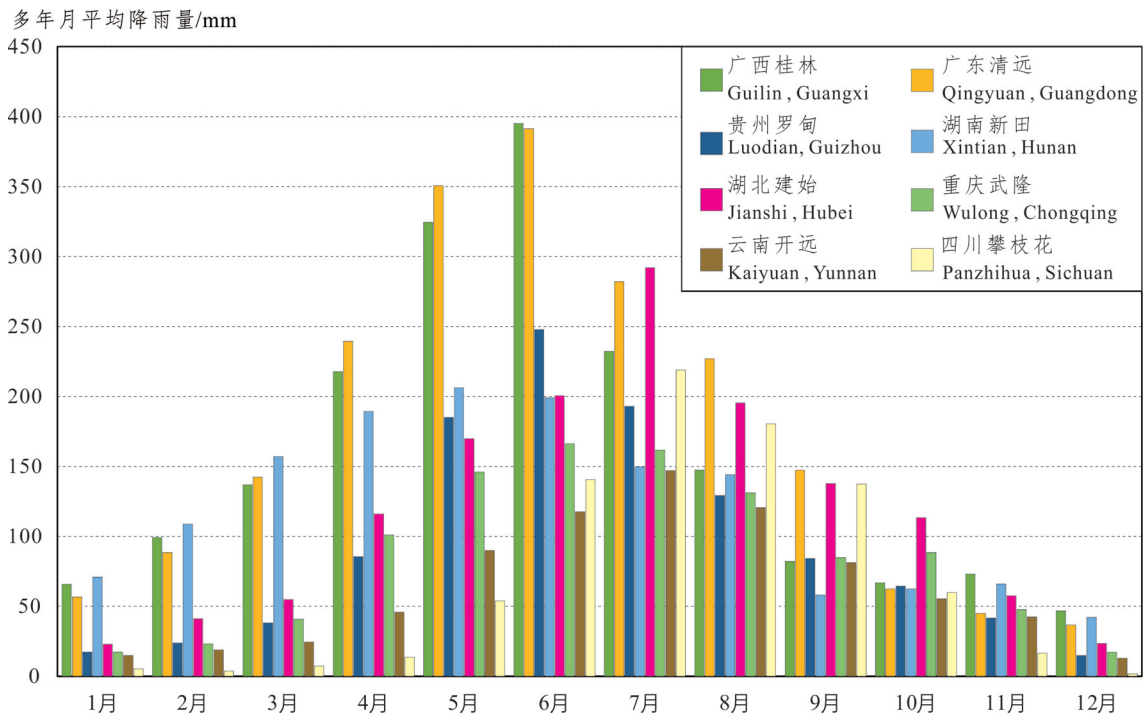


图5 南方岩溶区多年月平均降雨量季节分配图

Fig.5 Seasonal distribution map of monthly average rainfall over Southern Karst Areas



表2 西南岩溶地区地下水资源量

Table 2 Underground water resources in Southwest Karst Area

省(区、市)	总资源量 (/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)	可开采资源量 (/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)	现开发利用 量(/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)	剩余可开发利 用量(/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)
云南	290.61	119.45	36.07	67.48
贵州	206.12	138.10	16.09	122.01
广西	464.80	162.57	13.59	148.98
湖南	269.33	62.83	8.50	54.33
湖北	98.77	46.78	9.36	37.42
重庆	53.31	10.56	1.74	8.82
四川	261.22	63.62	2.15	61.47
广东	51.20	17.90	3.03	14.87
合计	1707.24	621.81	90.53	515.38

位的水资源分布格局差异巨大。

在补给区,地下水主要为垂向渗滤为主,地下水埋藏深,开发利用难度大;在径流区,地下水主要集中于地下河管道或者集中径流带之中,管道及其影响带以外的地方,围岩较完整,几乎不含水;在排泄区,地下水进一步集中,空间非均一性进一步加强。由于岩溶地下水空间分布不均性,即使在同一位置施工钻孔时,如钻遇溶洞、管道,则可获取丰富的地下水资源;相隔数米若岩溶不发育,则可能成为干孔(图6)。由于浅部岩溶通道强烈发育,岩溶漏斗、落水洞、溶洞、暗河管道和溶蚀缝洞等岩溶形态丰富,降水迅速转入地下。加之土层薄、植被少,造成浅部涵水调节能力差,短期无雨即会形成地表干旱。南方岩溶区地表切割深,除峰林平原区外,其他地区地下水埋深一般大于50 m,峰丛山区地下水位埋深达300 m以上(张贵等, 2020)。

解决以上水资源时空分布不均问题的主要措施是加强各种类型调蓄工程的建设,在雨季把雨水和地表径流贮藏起来,供旱季使用;在岩溶地下水系统中位置相对较高的补给区和径流区拦蓄调节地下水流,供下游使用;同时,采取生态工程措施,提高整个系统的浅部涵水调蓄能力。

### 3 南方岩溶区水资源保障对策

区内水资源安全保障问题未能有效解决主要有三方面原因:第一,防灾减灾意识薄弱,“靠天吃饭”的意识根深蒂固;第二,水资源调控能力不足,供水工程建设和维护有待加强;第三,缺乏科学的水资源统筹规划,地下水资源开发利用率低,与生

态重建和经济发展相结合的地表和地下水资源联合利用体系有待建立。

#### 3.1 调查地下水赋存分布规律,将岩溶地下水作为农村分散供水和城镇应急供水的水源

前几年,南方岩溶地区偏重于大江大河水利设施建设,部分大河干流梯级水库电站成群分布,加之汛期泄洪和枯期蓄水,造成汛期洪峰加剧和枯期流量更枯的结果。而广大农村地区小型分散水利设施却投入不足,丰富的岩溶地下水资源利用率则更低,总体开采程度小于15%。

为解决工程性缺水难题,贵州省近年来在大力加强地表水资源开发利用的同时,从2007年开始勘查开发地下水资源,投入资金5.9亿元,在缺水地区勘查查明有开发利用前景的地下河363条、岩溶大泉1142个,钻探地下水成井2047口(表3),总水量1255×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,解决了300多万农村人口饮水问题。

2016—2020年,岩溶地区地下水资源调查为脱贫攻坚提供了水资源保障。通过开展1:5万水文地质调查,采用地面调查、洞穴探测、综合地球物理探测和示踪技术相结合的地下水探测手段,寻找可供开发利用的地下河、泉水和蓄水构造等水源,采取筑坝蓄水、管道引水和钻井提水等合适的工程措施,解决了老百姓日常饮用水保障问题。实施400多处水资源扶贫示范工程,解决了四川省凉山州昭觉县金曲小学等35个中小学2万多名师生、四川凉山州普格县孟甘乡古里村移民安置点等40多处移民安置点5万村民的饮用水问题(图7,图8)。圈出了2000多处可以打井取水的富水块段,为四川省昭觉县、云南省宣威市、贵州省织金县等200多处种植和养殖基地提供了用水保障。

#### 3.2 加强调蓄工程建设,解决水资源时空分布不均问题

调蓄工程主要有以下几种类型:

##### 3.2.1 高部位岩溶洼地堵洞成库

在地下水补给区的高部位岩溶洼地处,选择岩溶管道集中发育的部位,堵洞形成地表—地下联合水库。在湘西北、黔西北、渝东南等地区,由于构造抬升强烈,河谷深切,宏观岩溶地貌主要为岩溶槽谷和岩溶峡谷,局部岩溶地貌为峰丛洼地,地下水埋藏比较深。但此类地区地层中夹有非碳酸盐岩弱透水层,发育有悬挂的上层滞水,从上游补给区

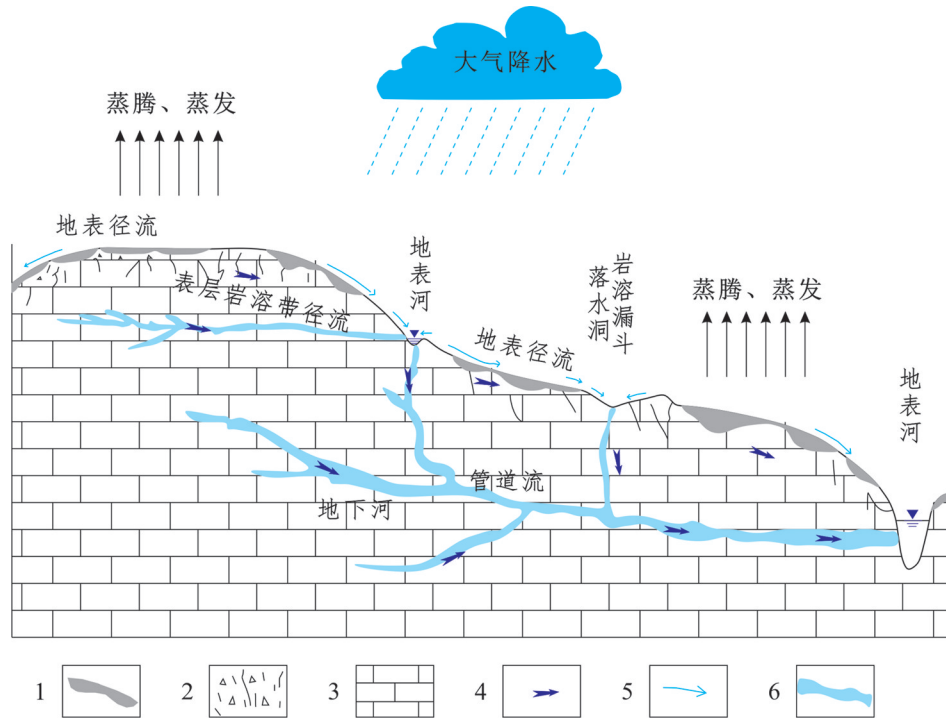


图6 岩溶地下水系统结构模式图

1—土壤层;2—表层岩溶带;3—基岩;4—地下水流向;5—地表水流向;6—地下河管道

Fig.6 Structure pattern of karst groundwater system

1- Soil layer; 2-Epikarst zone; 3-Bedrock; 4-Groundwater flows direction; 5-Surface water flow direction; 6-Underground river

到下游排泄区,地下水以地下河或岩溶泉的形式在不同高程多级发育与出露。当地居民居住在山体上中部,主要靠这些上层滞水解决饮用和灌溉问题。由于上层滞水补给面积较小,水资源量相对不大,需要堵洼成库调蓄岩溶水资源量。

如湖南省龙山县洛塔乡位于湘、鄂、黔、渝交界的武陵山区,原自然条件恶劣、生态环境脆弱、干旱缺水严重。通过开展多项岩溶水资源合理开发利用方面的科技攻关,在白家坳八仙洞岩溶洼地堵地下河管道,以地下河和车大戏谷地、洛塔河谷为储水空间,建成了库容为  $7000 \times 10^4 \text{ m}^3$  的地表、地下联合水库,并在屋檐洞洞口处修建电站,发电量  $5500 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$  (图9)。不仅解决了生活用水和农田灌溉用水问题,还带动了生态重建和庭院经济的发展。

### 3.2.2 碎屑岩补给区兴建调蓄水库

在广西北部和中南部、贵州中部、湖南南部以及云南等地岩溶盆地和谷地的周边地区往往分布有地势相对较高的碎屑岩地层,成库条件较好,适宜修建调蓄水库。此类水库的修建宜选择邻近岩溶地区,规模因地制宜,中小山塘水库也会发挥较大作用。

例如,广西宾阳县黎塘镇为典型的缺水地区,有居民20多万人,人均水资源量不足  $400 \text{ m}^3/\text{a}$ ,过去由于过度抽取地下水,引起了岩溶塌陷等地质灾害和水质污染问题(程亚平等, 2008; 李瑜等, 2009)。从2003年起,通过实施桂中水资源有效开发利用科技攻关项目,采取统一规划,在碎屑岩补给区兴建山塘联合水库,解决城镇供水问题(图10)。在该镇东南部碎屑岩区,将现有山塘水库扩建成联合水库,增大库容和供水能力。同时,寻找岩溶径流带打机井,解决分散村民供水问题。挖大口井开发表层岩溶系统地下水,解决农业灌溉用水问题。水资源利用率得到了提高,建成了高效蔬菜种植基地。蔬菜总产值达到1300多万元,比示范前增收20%~30%。

### 3.2.3 峰丛山区分散兴建水柜

该类型区主要分布于云贵高原和黔贵交界处的斜坡地带,地貌类型以峰丛洼地和深切河谷为主,地形切割深,高差大,是西南岩溶区自然环境最恶劣的地区。该区除洼地、谷地底部外,地下水位埋深一般大于300 m,不适合钻井开采;由于地表崎岖破碎,耕地分布零星,村民居住分散,不适合大规

表3 贵州省地下勘查找水打井成果表

Table 3 Achievement of underground water exploration and well drilling in Guizhou Province

项目	州(市)	完成井数/口	总进尺/m	涌水量/(m <sup>3</sup> /d)	平均涌水量/(m <sup>3</sup> /d·井)	成井/口	干孔/口	V类水孔/口	成井率/%
贵州省农村饮水安全工程勘查找水(2007—2012)	贵阳市	53	8122.80	5959.00	135.43	44	9		83.02
	遵义市	215	33892.80	72651.60	386.44	188	27		87.44
	六盘水市	36	5526.90	7556.89	279.88	27	8	1	75.00
	安顺市	78	12322.70	19510.00	291.19	67	8	3	85.90
	毕节市	228	33999.70	59631.63	408.44	146	76	6	64.04
	铜仁市	229	34366.30	115016.40	572.22	201	28		87.77
	黔东南州	172	25727.60	46771.20	327.07	143	29		83.14
	黔南州	155	23494.30	41466.56	354.42	117	37	1	75.48
	黔西南州	129	19635.00	33695.25	311.99	108	19	2	83.72
	小计	1295	197088.10	402258.53	3067.08	1041	241	13	80.39
贵州省抗旱找水打井工程勘查找水成果统计表(2010—2011)	贵阳市	90	13574.40	42147.91	569.57	74	13	3	82.22
	遵义市	84	13132.50	36137.11	516.24	70	12	2	83.33
	六盘水市	19	2893.10	4232.13	423.21	10	8	1	52.63
	安顺市	81	12488.70	57625.42	823.22	70	9	2	86.42
	毕节市	85	13115.00	23220.23	414.65	56	21	8	65.88
	铜仁市	91	13341.30	28632.60	381.77	75	16		82.42
	黔东南州	88	12782.10	30374.64	433.92	70	18		79.55
	黔南州	112	17047.20	56532.40	576.86	98	14		87.50
	黔西南州	102	15514.30	34291.71	394.16	87	13	2	85.29
	小计	752	113888.60	313194.15	513.43	610	124	18	81.12
累计	2047	310976.7	715452.7	4477.46	1651	365	31	80.65	

模集中供水。

桂西北百色、河池地区和黔东南罗甸县等地为典型的峰丛山区,近年来在水资源开发和生态经济建设中取得了较为成功的经验。如百色地区,修建

地头水柜5.26万个(图11),容量 $665 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,可灌溉面积近10000  $\text{hm}^2$ ;建成山塘7600个,总容量 $114 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,灌溉面积5000  $\text{hm}^2$ ;同时,配套植树造林7500  $\text{hm}^2$ 。形成了“柜下黏土铺盖防渗种水稻,柜里



图7 昭觉县哈甘乡瓦西村地表—地下水联合调蓄示范工程  
Fig.7 Demonstration project of surface-groundwater joint storage in Waxi Village, Hagan Town, Zhaojue County



图8 昭觉县ZK01钻孔抽水试验  
Fig.8 Pumping test of ZK01 drilling in Zhaojue County



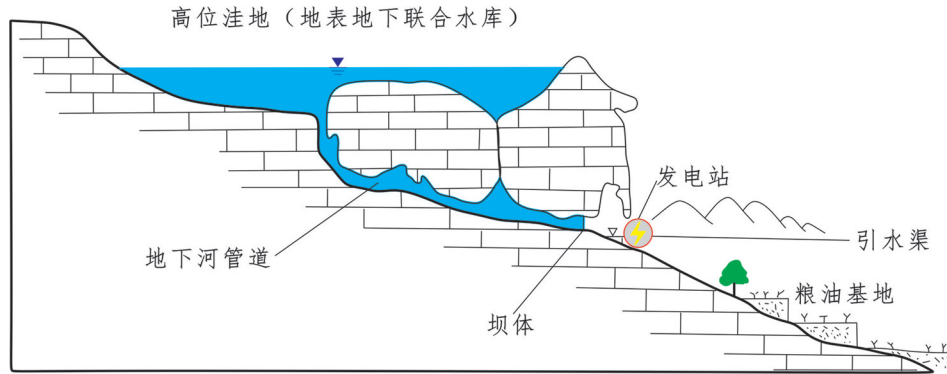


图9 湖南洛塔岩溶洼地堵洞成库工程示意图

Fig.9 Sketch map of a construction of a hole-blocking reservoir in a karst depression in Lota, Hunan Province

养鱼,柜边种果、种菜、种药材,山上退耕还林、恢复生态”的农业产业结构新格局。

### 3.3 建立与生态重建和经济发展相结合的地下水资源可持续利用模式

南方岩溶区成壤能力低,水土流失和石漠化的发展减弱了浅部涵水能力。因为缺水,农业生产基本上靠天吃饭,导致群众生活贫困;由于贫困,当地居民过度垦荒和砍伐,生态环境被破坏,水土流失和石漠化加重,干旱缺水加剧,造成生态环境恶性循环。水资源开发利用必须与生态建设和经济发展相结合,才能真正实现可持续利用。如贵州省平塘县巨木地下河系统,地处高原斜坡地带,地形切割深,集中排泄口位于塘边镇巨木村,出口高程815 m,低于当地村寨和耕地的主要分布区,不能直接引流供水(王伟等, 2015)。该区系统内无其他供水水源,干旱缺水严重,经济发展滞后,石漠化严重,生态环境恶劣,曾经是国家级贫困区。该地下河系统发育于二叠系纯碳酸盐岩和石炭系不纯碳酸盐岩

中,枯水期流量 192.87 L/s,丰水期流量 7.2 m<sup>3</sup>/s。系统内纯碳酸盐岩中岩溶发育强烈,岩溶洞穴直径达数百米,地下河管道长度数千米,地下空间容量大。地下河出口附近和地下河通道的下部,石炭系不纯碳酸盐岩中岩溶发育程度较弱,并存在相对隔水层,具备了拦蓄地下水修建地下水库的条件。通过实施巨木地下河筑坝拦蓄工程(图 12),形成 6.3×10<sup>5</sup>m<sup>3</sup>的地下水库,修建高位蓄水池,实现自流供水。在坝首修建了水电站、水轮泵提水和饮用水供水管道、灌溉输水渠道(陈革平, 2008)。该工程为塘边镇 5000 多人和 10000 头大牲畜提供了饮用水,解决了 400 hm<sup>2</sup>农田灌溉用水问题。促进了粮食产量提高,水稻增收 90.0×10<sup>4</sup>kg/a,油菜增产 8.82×10<sup>4</sup>kg/a,每年产生直接经济收入 145 万元。同时,带动了生态环境良性循环,停止了树木砍伐和毁林垦荒,并进行坡改梯等农田改造,种植生态林和经济作物,减少了水土流失,石漠化得到有效治理,森林覆盖率提高了 30%。

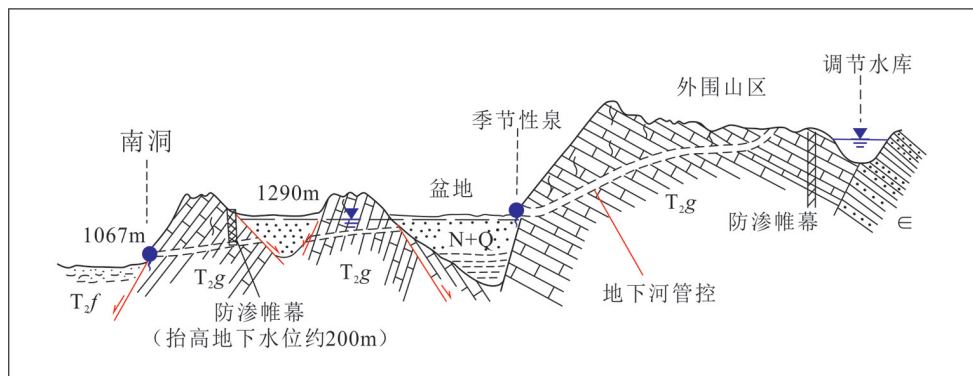


图10 蒙自岩溶断陷盆地山塘联合水库水资源开发和生态建设模式

Fig.10 Water resources development and ecological construction model Shantang combined reservoir in Mengzi karst fault basin

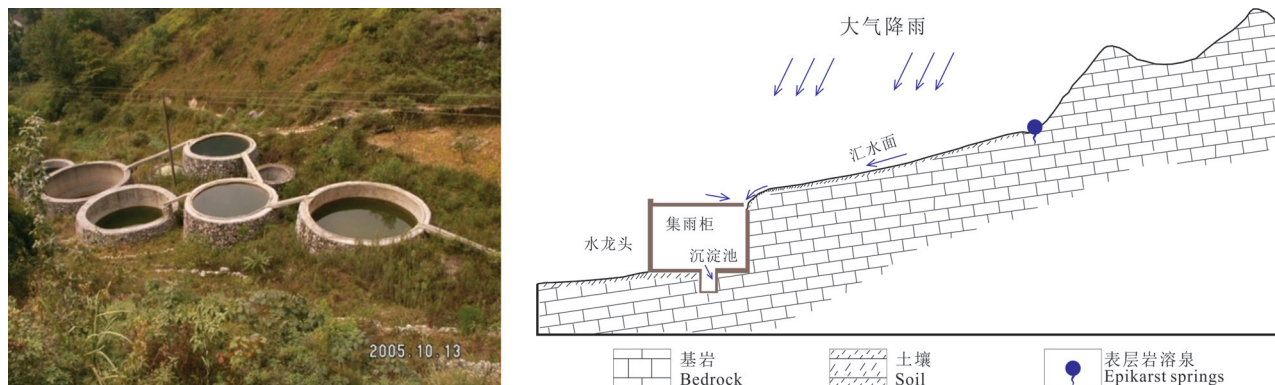


图11 利用表层岩溶泉修建地头水柜  
Fig.11 Construction of water tank with epikarst spring

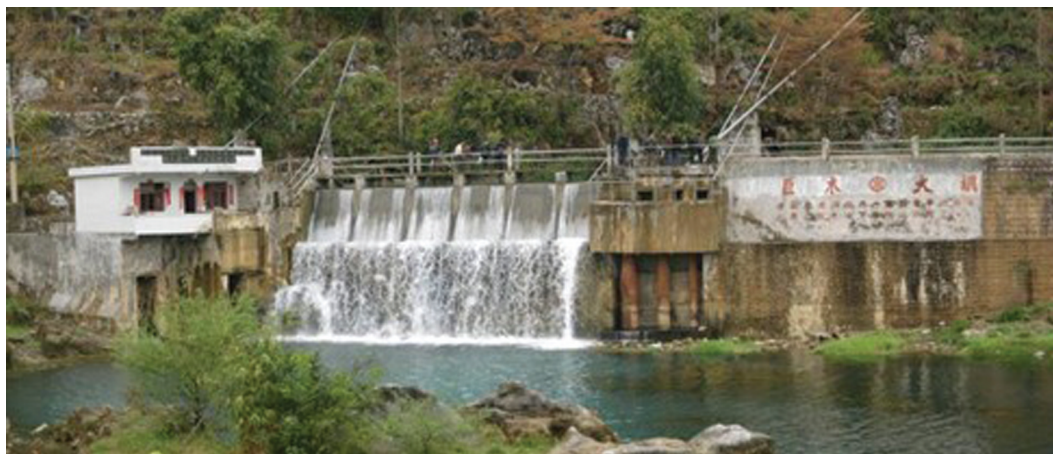


图12 贵州省平塘县巨木地下河筑坝拦蓄工程  
Fig.12 Jumu underground river dam storage engineering in Pingtang County, Guizhou Province

岩溶地下河系统地下水开发利用必须因地制宜,在查明水文地质条件的基础上,结合当地生态环境现状和经济发展现状,走“山水林田湖草沙”一体化保护和修复的可持续发展道路,水资源开发利用助力乡村振兴和产业振兴。

## 4 结 论

(1)南方岩溶地下水系统划分为表层带岩溶水系统、岩溶地下河与管道流系统、岩溶大泉系统以及分散排泄地下水系统4种类型。岩溶地下水系统在垂向上具有叠置性,对上下双层或多层叠置的岩溶地下水系统应分别进行地下水资源评价和开发利用条件论证。岩溶地下水资源时空分布具有不均性,宜在空间和时间上拦蓄和调节地下水流,提

高整个系统的调蓄涵水能力。

(2)南方岩溶区地下水资源具有较大的开发利用潜力,剩余可开采量  $515.38 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。宜充分发挥地下水资源安全保障作用:①掌握地下水赋存分布规律,发挥分散供水和应急供水作用;②加强调蓄工程建设,解决水资源时空分布不均问题;③建立与生态重建和经济发展相结合的地下水资源可持续利用模式。

(3)岩溶干旱缺水、石漠化、岩溶塌陷、地下水污染等环境地质问题是制约西南岩溶区社会经济发展和山水林田湖草沙一体化保护和修复工程的关键因素,必须在地球科学系统论的指导下,查明岩溶水资源赋存分布规律,科学评价地下水资源量,因地制宜地指定岩溶地下水开发利用方案,解

除制约社会经济和生态可持续发展的瓶颈。

## Reference

- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Pei Jianguo. 2005. Karst Ecosystem Constrained by Geological Conditions in Southwest China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Cao Jianwen, Xia Riyuan. 2017. Exploitation models for different types of underground rivers in karst mountain areas of Southwestern China [J]. *Carsologica Sinica*, 36(5): 609–617 (in Chinese with English abstract).
- Chen Geping. 2003. The Development and Achievements of the Hydrogeological and Engineering Geological career in China: Retrospect and Reflection on 60 Years of Geological Work [M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Chen Geping. 2008. The significance of the karst groundwater exploitation in the drinking water security of the country, Guizhou Province [J]. *Guizhou Geology*, 25(1): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ping, Wang Mingzhang. 2015. A classification scheme of karst groundwater systems based on groundwater exploitation [J]. *Carsologica Sinica*, 34(3): 234–237 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yaping, Huang Yuequn. 2008. The situation of the karst hydrogeology and assessment of water resources in the Litang Area [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 14(5): 373–376 (in Chinese with English abstract).
- Fan Wei, Yu Yao, Jiang Yuexiao, Chen Chang, Niu Junqiang, Hu Cheng. 2020. Study on groundwater flow system division in Hubei Province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 34(4): 565–570 (in Chinese with English abstract).
- Hong Yunsheng. 2013. On the relation between the two underground rivers in the Daxiaojing Region, Guizhou [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 33(2): 221–224 (in Chinese with English abstract).
- Hu Renfa, Wang Mingzhang, Xiao Teng. 2017. Occurrence characteristics and utilization of karst groundwater in slope zone of deep valley: Taking the groundwater system of Anjiazhai in Shiqian as an example [J]. *Guizhou Geology*, 34(2): 116–122 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng, Wang Ruijiang, Pei Jianguo, He Shiyi. 2001. Epikarst zone in South China and its regulation function to karst water [J]. *Carsologica Sinica*, 20(2): 24–28 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. 1999. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 302–308 (in Chinese with English abstract).
- Li Yu, Lei Mingtang, Jiang Xiaozhen, Dai Jianling, Meng Yan. 2009. Assessment of the vulnerability to sinkhole and safety of groundwater exploitation in covered karst plain—A case study in Litang Town [J]. *Carsologica Sinica*, 28(1): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Liang Bin, Li Zhaolin. 2008. Reasonable mode in exploitation of karst water resources in karst stone mountainous areas in Southwest China: A case study of Luota, Longshan County, Hunan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 17(1): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y, Wang W. 2010. The division and characteristics of karst water systems in Northern China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6): 860–868.
- Liang Yongping, Wang Weitai, Zhao Chunhong, Wang Wei, Tang Chunlei. 2013. Variations of karst water and environmental problems in North China [J]. *Carsologica Sinica*, 32(1): 34–42 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Wang Weitai. 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).
- Luo Q, Yang Y, Qian J, Wang X, Chang X, Ma L, Li F, Wu J. 2020. Spring protection and sustainable management of groundwater resources in a spring field [J]. *Journal of Hydrology*, 582: 124498.
- Miklos R, Lenart L, Darabos E, Kovacs A, Pelczeder A, Szabo N P, Szucs P. 2020. Karst water resources and their complex utilization in the bukk mountains, northeast hungary: An assessment from a regional hydrogeological perspective [J]. *Hydrogeology Journal*, 28(6): 2159–2172.
- Pan Xiaodong, Liang Xing, Tang Jiansheng, Su Chuntian, Meng Xiaojun. 2015. The patterns and characteristics of four karst groundwater systems in northeast Guizhou slope zone based on the landscape and reservoir structure [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(1): 85–93 (in Chinese with English abstract).
- Pei Jianguo, Liang Maozhen, Chen Zhen. 2008. Classification of karst groundwater system and statistics of the main characteristic values in Southwest China karst mountain [J]. *Carsologica Sinica*, 27(1): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoqun, Jiang Zhongcheng, Li Qingsong, Yi Lianxing. 2007. Distribution and exploitation of underground rivers in karst areas in Guangxi [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 34(6): 10–13, 18 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoqun, Song Kaiben, Huang Qibo, Lan Funing, Huang Chunyang, Huang Hui. 2017. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst peak forest areas, Guangxi, China [J]. *Carsologica Sinica*, 36(5): 618–625 (in Chinese with English abstract).
- Schuler P, Duran L, Johnston P, Gill L. 2020. Quantifying and numerically representing recharge and flow components in a karstified carbonate aquifer [J]. *Water Resources Research*, 56(11), e2020WR027717.
- Taheri K, Taheri M, Parise M. 2016. Impact of intensive groundwater exploitation on an unprotected covered karst aquifer: A case study in Kermanshah Province, Western Iran [J]. *Environmental Earth*



- Sciences, 75(17): 1221.
- Wang Mingzhang, Chen Ping, Wang Zhongmei, Wang Shiyang. 2018. Karst Groundwater System and Groundwater Endowment Rules in Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 259 (in Chinese).
- Wang Mingzhang, Zhang Lin, Wang Wei, Chen Ping, Chen Dengqi, Hong Yunsheng. 2015. Groundwater and Geological Environment in Guizhou Province Karst Areas [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Wei, Song Wanhong. 2015. Reservoir-forming conditions of the Jumu underground river by tracer tests [J]. Journal of Geology, 39(1): 105–110 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Xiang Qun. 2010. Division of karst water system and water prospecting direction in Northwest Guizhou [J]. Guizhou Geology, 27(1): 49–53 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yong, Li Zhonghua, Zheng Mingying. 2020. Study on the feature of karst groundwater migration in Wangjia Large Well [J]. Ground Water, 42(3): 19–20, 130 (in Chinese with English abstract).
- Williams P W. 2008. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review [J]. International Journal of Speleology, 37(1): 1–10.
- Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Tang Jiansheng, Liang Bin, Cao Jianwen, Lu Haiping. 2017. Technical key points of 1: 50,000 hydrogeological and environmental geology surveys in karst areas of South China [J]. Carsologica Sinica, 36(5): 599–608 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizheng. 1985. Distribution of subterranean rivers in South China [J]. Carsologica Sinica, (Z1): 92–100 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y, Mo X, Zhong L, Qiang Z, Kang X, Mao B. 2020. Karstic conduits and watershed identification based on the morphological characteristics of depressions in the Yunnan–Guizhou plateau of China [J]. Environmental Earth Sciences, 79(10): 242.
- Yi L, Xia R, Tang J, Lu D, Wang Z, Lu H, Zhao L. 2015. Karst conduit hydro–gradient nonlinear variation feature study: Case study of Zhaidi Karst underground river [J]. Environmental Earth Sciences, 74(2): 1071–1078.
- Yi Lianxing, Xia Yuan, Wang Zhe. 2018. Karst Underground River Exploration and Evaluation [M]. Beijing: Science Press, 241 (in Chinese).
- Yuan Daijiang. 2019. The geological conditions of the Yudongxia reservoir and the argument of resupply area of Wangjia spring [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 47(9): 78–80 (in Chinese).
- Yuan Daoxian, Zhang Chen. 2008. Karst dynamics theory in China and its practice [J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 355–365 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian. 2014. The Study of Major Environmental Geological Problems and Countermeasures in the Karst Mountain Area of Southwest China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Yue F J, Li S L, Waldron S, Wang Z J, Oliver D M, Chen X, Liu C Q. 2020. Rainfall and conduit drainage combine to accelerate nitrate loss from a karst agroecosystem: Insights from stable isotope tracing and high–frequency nitrate sensing [J]. Water Research, 186: 116388.
- Zhang Gui, He Raosheng, Wang Bo, Zhang Wenjun, Zhou Cuiqiong. 2020. Hydrogeological characteristics of Dalongtan, Panxi, Huang County of Yunnan Province [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 37(5): 40–45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongbo, Yang Sen, Gan Xin, Luo Fuheng. 2018. Study of the spatial distribution pattern and water quality characteristics of karst water resources in a typical anticlinal trough valley: A case study of Yiju River Basin [J]. Carsologica Sinica, 37(1): 27–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maoxing, Zhu Lifeng, Wang Xiaoyong. 2005. Groundwater systems and sustainable development countermeasures of groundwater resources in the Guanzhong Basin [J]. Quaternary Sciences, 25(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Chen X, Cheng Q, Soulsby C. 2020. Characterizing the variability of transit time distributions and young water fractions in karst catchments using flux tracking [J]. Hydrological Processes, 34(15): 3156–3174.
- Zhang Zhigan. 2005. Karst Drought Management: Research and Master Plan of Drought Control Strategy in Laibin [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Zhang Zhigan. 2006. Karst Occurrence: Theoretical Exploration [M]. Nanjing: Guangxi Normal University Press (in Chinese).
- Zhao L, Yang Y, Xia R, Shao J, Cao J, Fan L, Chen H. 2018. Evaluation of a hydrodynamic threshold in the Zhaidi Karst aquifer (Guangxi Province, China) [J]. Environmental Earth Sciences, 77(12): 424.
- Zhu Xuewen. 2010. Karst and Cave Research: Anthology of Zhu Xuesan's [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zou Fengchai, Zou Yinxian. 2016. Changes of karst groundwater resources in Guizhou [J]. Environmental Protection and Technology, 22(4): 28–30 (in Chinese with English abstract).
- Zou Shengzhang, Zhu Yuanfeng, Liang Bin, Chen Honghan, Xia Yuan Yuan, Tang Jiansheng. 2008. Hydrologic features and the eco–environmental classification of epikarst springs in Luota [J]. Earth Science Frontiers, 15(4): 190–197 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹建华, 袁道先, 裴建国. 2005. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统 [M]. 北京: 地质出版社.
- 曹建文, 夏日元. 2017. 西南岩溶石山地区不同类型地下河开发利用模式探讨 [J]. 中国岩溶, 36(5): 609–617.

- 陈革平. 2008. 论岩溶地下水开发在贵州省农村饮水安全工作中的作用[J]. 贵州地质, 25(1): 6-10.
- 陈梦熊. 2003. 中国水文地质工程地质事业的发展与成就:从事地质工作60年的回顾与思考[M]. 北京:地震出版社.
- 陈萍, 王明章. 2015. 基于地下水开发的岩溶地下水系统类型划分方案探讨[J]. 中国岩溶, 34(3): 234-237.
- 程亚平, 黄月群. 2008. 黎塘地区岩溶水文地质及水资源评价[J]. 水利科技与经济, 14(5): 373-376.
- 范威, 于瑶, 江越潇, 陈畅, 牛俊强, 胡成. 2020. 湖北省地下水流系统划分研究[J]. 资源环境与工程, 34(4): 565-570.
- 洪运胜. 2013. 贵州省大小井地下河系统之间关系分析[J]. 四川地质学报, 33(2): 221-224.
- 胡仁发, 王明章, 肖腾. 2017. 深切河谷斜坡地带岩溶地下水的赋存特征及开发利用——以石阡县安家寨地下水系统为例[J]. 贵州地质, 34(2): 116-122.
- 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 何师意. 2001. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. 中国岩溶, 20(2): 24-28.
- 蒋忠诚, 袁道先. 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 20(3): 302-308.
- 李瑜, 雷明堂, 蒋小珍, 戴建玲, 蒙彦. 2009. 覆盖型岩溶平原区岩溶塌陷脆弱性和开发岩溶地下水安全性评价——以广西黎塘镇为例[J]. 中国岩溶, 28(1): 11-16.
- 梁彬, 李兆林. 2008. 西南岩溶石山地区岩溶水资源合理开发利用模式——以湖南龙山洛塔为例[J]. 长江流域资源与环境, 17(1): 62-67.
- 梁永平, 王维泰, 赵春红, 王玮, 唐春雷. 2013. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶, 32(1): 34-42.
- 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.
- 潘晓东, 梁杏, 唐建生, 苏春田, 孟小军. 2015. 黔东北高原斜坡地区4种岩溶地下水系统模式及特点——基于地貌和蓄水构造特征[J]. 地球学报, 36(1): 85-93.
- 裴建国, 梁茂珍, 陈阵. 2008. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. 中国岩溶, 27(1): 6-10.
- 覃小群, 蒋忠诚, 李庆松, 易连兴. 2007. 广西岩溶区地下河分布特征与开发利用[J]. 水文地质工程地质, 34(6): 10-13, 18.
- 覃小群, 宋开本, 黄奇波, 蓝芙宁, 黄春阳, 黄辉. 2017. 广西岩溶峰林区地下水赋存特征及钻探成井模式[J]. 中国岩溶, 36(5): 618-625.
- 王明章, 陈萍, 王中美, 王诗扬. 2018. 贵州省岩溶地下水系统及地下水赋存规律研究[M]. 北京:地质出版社:259.
- 王明章, 张林, 王伟, 陈萍, 陈登齐, 洪运胜. 2015. 贵州省岩溶区地下水与地质环境[M]. 北京:地质出版社.
- 王伟, 宋婉虹. 2015. 利用示踪试验研究巨木地下河成库条件[J]. 地质学刊, 39(1): 105-110.
- 王伟, 向群. 2010. 黔西北地区岩溶水系统划分及找水方向[J]. 贵州地质, 27(1): 49-53.
- 魏永, 李中华, 郑明英. 2020. 汪家大井岩溶地下水运移特征研究[J]. 地下水, 42(3): 19-20, 130.
- 夏日元, 邹胜章, 唐建生, 梁彬, 曹建文, 卢海平. 2017. 南方岩溶地区1:5万水文地质环境地质调查技术要点分析[J]. 中国岩溶, 36(5): 599-608.
- 杨立铮. 1985. 中国南方地下河分布特征[J]. 中国岩溶, (Z1): 92-100.
- 易连兴, 夏日元, 王喆. 2018. 岩溶地下河探测与评价[M]. 北京:科学出版社:241.
- 袁代江. 2019. 鱼洞峡水库工程地质条件与汪家大井补给区论证[J]. 黑龙江水利科技, 47(9): 78-80.
- 袁道先, 章程. 2008. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 29(3): 355-365.
- 袁道先. 2014. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京:科学出版社.
- 张贵, 何绕生, 王波, 张文璠, 周翠琼. 2020. 云南华宁县盘溪大龙潭水文地质特征[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 37(5): 40-45.
- 张红波, 杨森, 甘鑫, 罗富恒. 2018. 典型背斜槽谷区岩溶水资源空间分布格局与水质特征——以宜居河流域为例[J]. 中国岩溶, 37(1): 27-36.
- 张茂省, 朱立峰, 王晓勇. 2005. 关中盆地地下水系统分析与地下水资源可持续开发利用对策[J]. 第四纪研究, 25(1): 15-22.
- 张之淦. 2005. 岩溶干旱治理:来宾治旱战略研究与总体规划[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 张之淦. 2006. 岩溶发生学:理论探索[M]. 南京:广西师范大学出版社.
- 朱学稳. 2010. 喀斯特与洞穴研究:朱学稳论文选集[M]. 北京:地质出版社.
- 邹凤钗, 邹银先. 2016. 贵州省岩溶地下水资源变化特征分析[J]. 环保科技, 22(4): 28-30.
- 邹胜章, 朱远峰, 梁彬, 陈鸿汉, 夏日元, 唐建生. 2008. 湘西洛塔表层岩溶泉的生态环境类型及水文特征[J]. 地学前缘, 15(4): 190-197.