

乌江上游深切峡谷区平寨水库伴生的 岩溶地下水库库容计算

何春^{1,2}, 曾永军³, 曾成^{1*}, 龚效宇^{1,2}, 陈旺光^{1,2}, 邓俊祖⁴

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 贵州省水利投资(集团)有限责任公司 贵州 贵阳 550081; 4. 东华理工大学 水资源与环境工程学院 江西 南昌 330013)

摘要: 选取贵州乌江南源上的平寨水库作为研究对象, 对其伴生的岩溶地下水库的库容进行计算。平寨水库是贵州省黔中水利枢纽工程的控制性水源工程, 总库容达 10.89 亿 m³。该地表水库位于云南高原向黔中高原过渡斜坡带上的深切峡谷区, 峡谷两侧碳酸盐岩地层广泛分布, 其中的三叠系下统永宁镇组碳酸盐岩地层岩溶化程度较高, 为平寨水库伴生的岩溶地下水库的形成提供了重要条件。采用水库运营期水量反算法, 对平寨水库大坝竣工后初始蓄水阶段(2015—2016年)进行水均衡计算, 结果表明, 与平寨水库相伴生的岩溶地下水库的总库容达 3.11 亿 m³, 约占平寨水库地表总库容的 29%。

关键词: 乌江南源; 岩溶; 峡谷; 地下水库; 水均衡; 平寨水库

中图分类号: P641.134; P641.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-1211(2021)04-0478-06

DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2021.04.011

以岩石空隙作为蓄水空间, 在人工干预作用下形成的具有一定调蓄能力的地下水库是水资源有效开发利用的一种重要工程形式^[1-2]。目前, 国内外的地下水库主要分布于半湿润、半干旱和干旱气候下的松散堆积物区^[3-6], 多以松散的孔隙介质实现其储水功能。基于中国岩溶区分布面积广大的现实情况, 以岩溶介质为主的岩溶地下水库是目前中国地下水库建设中的主要类型, 相应的工程在中国南方和北方岩溶区均有分布。其中位于南方岩溶区的主要有贵州普定马官^[7]、仁怀长岗^[8-9]、独山黄后地下水库^[10], 广西来宾小平阳地下水库^[11-12]等, 位于北方岩溶区的有北京房山张坊地下水库^[13]、山东莱芜钢铁总厂傅家桥地下水库^[14]、山东日照两城河地下水库等, 随着这些工程的成功实践, 逐渐深化了业界对岩溶地下水库相关水文地质理论及工程建设要点的认识。

岩溶地下水库的库容计算一直以来是岩溶水文地质勘察中的一个难点。已有文献报道显示, 中国南方岩溶地下水库的库容计算方法主要有几何形态概化法、水箱模拟法、集中参数估算法、分层计算法、岩溶率法和地下河系统分析法等。然而, 由于中国南方岩溶系统发育的复杂性和水文地质调查精度的限制, 因此

岩溶地下水库的库容计算结果常常精度不高, 以至于在修建岩溶地下水库之前甚至难以确定其库容^[9, 15-16]。在水库蓄水以后, 地下水库放水试验和运营期水库水量反算是准确测定岩溶地下水库实际库容的有效方法, 也是进一步认识岩溶地下水库区水文地质条件和岩溶发育规律的工作基础。为此, 选择中国南方具有代表性的岩溶地下水库开展库容研究, 对于丰富岩溶水文地质勘察的相关认识、服务于西南岩溶区的水资源有效开发利用具有重要意义。

贵州省(面积 17.6 万 km²)地处中国西南云贵高原东部, 地势为西部最高、中部稍低, 自中部的黔中高原面向北、东、南三面倾斜, 形成自西向东三级阶梯、南北两面斜坡的整体地势格局^[17]。该省同时又处于中国西南裸露型岩溶连片分布区的中心^[18-19], 境内碳酸盐岩出露面积达 12.8 万 km², 在湿润亚热带季风气候条件下形成了耸立于广西丘陵与四川盆地之间的一个强岩溶化的贵州高原^[20]。贵州省岩溶地貌类型多样^[21], 由乌江和北盘江等大江大河深切所形成的岩溶峡谷众多, 蕴藏着丰富的水力资源, 从而为大型水利水电工程的开发提供了基础。其中以乌江渡、普定和平寨等大型水库为代表的乌江流域水电梯级开发工程项

收稿日期: 2021-05-26; 改回日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“喀斯特筑坝河流水安全与调控对策”(U1612441)。

作者简介: 何春(1993-), 男, 硕士研究生, 水工环地质专业, 主要研究方向为岩溶水文地质。E-mail: 1911733565@qq.com

* 通讯作者: 曾成(1979-), 男, 副研究员, 水工环地质专业, 从事与岩溶水文地质相关的工作。E-mail: zechampion@qq.com

目,为地表深切河谷筑坝所致的岩溶地下水库库容研究提供了重要的现实样本。

平寨水库位于乌江南源(即三岔河)的深切峡谷中,峡谷两侧岩溶化的巨厚碳酸盐岩地层广泛分布,加之在水库运营初期的水文资料较为完备,使得相关研究得以开展。为此,本文拟以该水库作为研究对象,开展岩溶地下水库的库容研究。

1 研究区概况

1.1 平寨水库概况

平寨水库是黔中水利枢纽工程的控制性水源工程,主要承担向黔中地区进行跨流域长距离调水的任务。黔中地区是以贵阳和安顺两市为中心的一个高原面(图1)地形平坦,耕地面积广阔,人口集中,城市密集,是贵州省经济社会发展的核心区域^[22]。然而,由于黔中高原面处于长江与珠江两大流域的宽缓分水岭地带(图1),加之岩溶强烈发育,水资源漏失严重,因此本区水资源量总体上较为短缺^[23]。为了优化配置黔中地区的水资源量,保障农业灌溉和城市供水的安全^[24],2009年11月启动了黔中水利枢纽工程建设项目。黔中水利枢纽工程由水源工程和输配水工程两部分组成,其中,水源工程(即平寨水库)是在乌江南源—三岔河上游的峡谷区适当位置修建高坝,蓄水成库,然后再将蓄积的库水通过输配水干渠调往黔中地区。

平寨水库的坝址位于贵州省六盘水市六枝特区牛场乡黔中村与毕节市织金县鸡场乡平寨村交界处三岔河的峡谷中。采用混凝土面板堆石坝,坝高162.7 m,水库正常蓄水位1331.0 m,总库容达10.89亿 m^3 ,兴利库容为4.48亿 m^3 ,属大(1)型水库。坝址以上集雨面积为3492 km^2 ,溯三岔河主河道回水长度约38 km,水库经常淹没区的水面面积为21 km^2 。本区属湿润亚热带季风气候区,气候温和湿润,多年平均气温为15 $^{\circ}C$,多年平均降雨量为1111 mm^[23]。

1.2 库区地质及水文地质概况

总体上,贵州高原在纬向上可分为三级阶梯。三岔河的源头区域位于一级阶梯,而水源工程——平寨水库地处一级和二级阶梯的过渡地带(图1)。平寨水库库区以岩溶地貌为主,受乌江南源溯源侵蚀的影响,呈现乌江期峡谷深切于山盆期残丘波地、峰丛洼地的贵州型岩溶地貌景观。

平寨水库溯三岔河干流回水至纳雍县阳长镇,阳长断面以下至平寨水库坝址之间的区间流域面积为815 km^2 ,水文地质条件见图2。该区间流域内出露的地层主要有二叠系下统栖霞组(P_1q)含燧石结核灰岩和茅口组(P_1m)微晶灰岩、峨眉山玄武岩和凝灰岩($P\beta$),二叠系上统(P_2)砂页岩、泥岩夹煤层;三叠系下统夜郎组(T_1y)泥岩、砂岩、页岩夹泥灰岩,永宁镇组(T_1yn)中厚层致密灰岩、含白云质灰岩,及上部中薄层白云岩,三叠系中统关岭组(T_2g)下部泥岩及上部中

厚层石灰岩。本区地质构造属于燕山运动的产物,以百兴向斜、纳雍河背斜、水公河向斜和三塘向斜4个褶皱构造为主,其中NW向的百兴和NEE向的三塘褶皱及三叠系下统石灰岩和含白云质灰岩构成了本区最主要的向斜储水构造。

平寨水库的封闭条件较好^[25]。在区间流域内三岔河干流的右岸(图2),缓倾的二叠系峨眉山玄武岩与凝灰岩、二叠系上统泥页岩夹煤系地层、三叠系下统夜郎组泥页岩夹泥灰岩三套相对隔水地层的延伸方向大体与三岔河平行,并且这些地层总体倾向库盆;库盆南东侧由于三叠系下统夜郎组泥页岩隔水层的阻隔,基本不产生远谷渗漏问题。平寨水库的库首部位虽然有三叠系下统永宁镇组石灰岩中的岩溶强烈发育,但经高强度的帷幕灌浆防渗处理后,基本上不存在水库渗漏问题。为此,可将三叠



图1 黔中水利枢纽工程在贵州省的地理位置(底图据参考文献[17])

Fig.1 Geographical location of the Hydro-junction Project in Central Guizhou Province

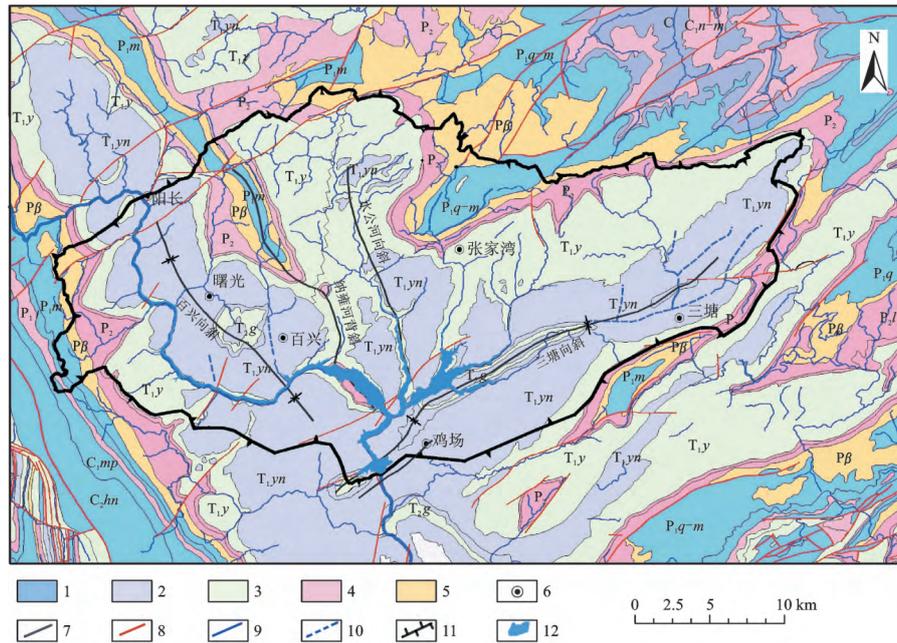


图2 平寨水库坝址—干流回水末端之间的区间流域水文地质略图

Fig. 2 Hydrogeological sketch map of the interval catchment between the dam site of Pingzhai Reservoir and the backwater end of the main stream

1. 碳酸盐岩裂隙溶洞水; 2. 碳酸盐岩溶洞裂隙水; 3. 碎屑岩夹碳酸盐岩溶洞裂隙水; 4. 碎屑岩裂隙水; 5. 玄武岩裂隙水; 6. 乡镇; 7. 褶皱; 8. 断层; 9. 地表河; 10. 地下河; 11. 区间流域边界; 12. 平寨水库; C_{2hn} . 石炭系中统黄龙群石灰岩; C_{3mp} . 石炭系上统马平群石灰岩夹白云岩; P_{1l} . 二叠系下统梁山组粉砂岩夹页岩; P_{1q} . 二叠系下统栖霞组石灰岩; P_{1m} . 二叠系下统茅口组石灰岩; P_{β} . 二叠系峨嵋山玄武岩组; P_2 . 二叠系上统砂岩、泥岩、页岩; T_{1y} . 三叠系下统夜郎组泥灰岩、泥岩夹石灰岩; T_{1yn} . 三叠系下统永宁镇组石灰岩; T_{2g} . 三叠系中统关岭组泥质白云岩夹灰岩。

系下统夜郎组的泥质岩作为平寨水库库盆的隔水基底,将该层上部的三叠系下统永宁镇组概化为碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组。本区以三岔河干流作为岩溶侵蚀基准面,平寨水库坝址处的河床海拔为 1 189 m。

2 伴生的岩溶地下水库库容计算

在岩溶峡谷区修建大型地表水库,通常会形成地表和地下两个水库子系统。其中,地表水库子系统即是被水库蓄水淹没的地表河道与峡谷,它的存在形式较为直观,其库容可通过水库特性曲线中的水位容积关系由水库蓄水位直接求得;而与之相伴生的地下水库子系统的存在形式则较为复杂,由于其中的地下水主要赋存于河道两侧岩溶化岩体内的溶孔、溶隙和溶洞中,因此常不易被直接观察到,它仅在水库初始蓄水阶段以及正式运营过程中调洪演算时以水量不均衡的问题体现出来,并常被视为水文计算中的误差而被忽视掉。

总的来说,岩溶地下水库的库容计算方法可归纳为传统水文地质学方法和水库运营期水量反算法。后一种方法实际上就是对水库运营期的水量不均衡问题进行研究,该方法依据的是水均衡原理,计算时概念清晰、过程简洁,可通过水库初始蓄水期的均衡要素准确

快速地反算岩溶地下水库的库容,并且可对通过传统水文地质学方法获得的相关认识进行深化。本文拟采用水均衡法计算与平寨水库相伴生的岩溶地下水库的库容量。

2.1 计算方法简介

本文以平寨水库库区作为均衡区,总面积为 21 km²。输入水量主要有平寨水库沿三岔河干流回水末端阳长断面的入流量、区间流域的侧向入流量、水库水面直接接纳的降水量,输出水量主要有水库发电和泄洪的出库水量、水库水面蒸发量。在上述输入和输出要素中,除了区间流域的侧向入流量为降雨—径流模型计算值以外,其余各项要素主要由水库运营单位与水文水资源局通过水文测验获得。

由于本研究区主要为深切峡谷区域,地形切割剧烈,水系密度大,因此绝大部分区间陆面上的大气降水转化为地表径流,并经由三岔河的支流水系快速汇流至平寨水库中。此外,本区已有岩溶地下水数值模型初步显示,由三叠系下统永宁镇组碳酸盐岩地层形成的百兴和三塘两大向斜储水构造的水平渗透系数比垂直渗透系数要高出一个数量级^[26]。有鉴于此,笔者提出平寨水库及其伴生的侧向岩溶地下水库库容计算的水均衡模型(图3)。该模型将平寨水库在初始蓄水阶

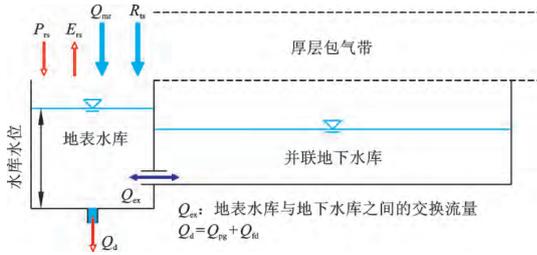


图 3 平寨水库及其伴生岩溶地下水库的水均衡模型

Fig. 3 Water budget model of Pingzhai reservoir and its associated karst underground reservoir

段的水量分配过程分为两个密切联系的阶段: 一是阳长断面与区间流域的入流量快速进入地表水库; 二是地表水库在蓄水的同时, 部分水量往侧向并联的岩溶地下水库渗入, 从而造成地表水库与岩溶地下水库的联合蓄水。模型所采用的水均衡方程如下:

$$\Delta S = \Delta S_s + \Delta S_g \quad (1)$$

$$\Delta S = \int_{t_1}^{t_2} (Q_{in} - Q_{out}) dt \quad (2)$$

$$Q_{in} = Q_{mr} + R_{rs} + P_{rs} \quad (3)$$

$$Q_{out} = Q_{pg} + Q_{fd} + E_{rs} \quad (4)$$

式中: ΔS 为水库库区的水资源变化总量; ΔS_s 为地表水库储存量变化值; ΔS_g 为地下水库储存量变化值; Q_{in} 为整个库区的输入水量; Q_{out} 为整个库区的输出水量; t_1 和 t_2 分别为均衡期的时间起点和终点; Q_{mr} 为水库沿干流河道回水末端的入库水量; R_{rs} 为水库区间流域的补给流量; P_{rs} 为水库水面直接承纳的降水量; Q_{pg} 为水库发电流量; Q_{fd} 为水库泄洪流量; E_{rs} 为水库水面蒸发量。

2.2 水均衡要素值及地下水库库容计算

均衡期选择为平寨水库的初始蓄水期, 该期从 2015 年 4 月开始, 至 2016 年 12 月结束, 水库水位从 1 189.4 m 抬升至 1 320.1 m。该水库库区水资源的输入要素有水库干流回水末端阳长断面的入库流量 (Q_{mr})、水库区间陆面的补给流量 (R_{rs})、水库水面直接承纳的降水量 (P_{rs}); 输出要素有水库发电流量 (Q_{pg})、水库泄洪流量 (Q_{fd})、水库水面蒸发量 (E_{rs})。这些均衡要素均为月值数据 (图 4)。库区水资源存储要素有地表水库储存量 (ΔS_s , 可由实测水库水位通过水库特性曲线 (图 5) 换算得出) 和地下水库储存量 (ΔS_g , 此为未知量, 可通过其它均衡要素的反算求得)。

在平寨水库初始蓄水的均衡期内, 三岔河干流回水末端的阳长断面入库量为 22.86 亿 m^3 , 区间入库总量为 5.55 亿 m^3 , 水库水面直接承纳的降水量为 0.21 亿 m^3 , 库区的输入水量为 28.62 亿 m^3 ; 水库水面蒸发量为 0.17 亿 m^3 , 水库发电和泄洪出库量为 17.10 亿 m^3 ,

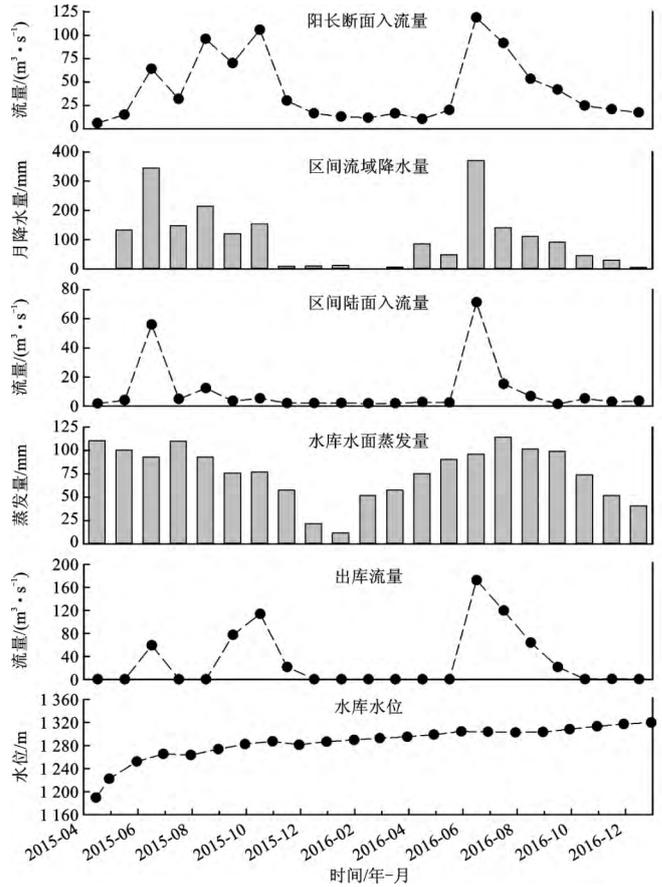


图 4 平寨水库初始蓄水阶段水均衡要素的月值变化

Fig. 4 Monthly variation of water balance factors in initial impoundment stage of Pingzhai Reservoir

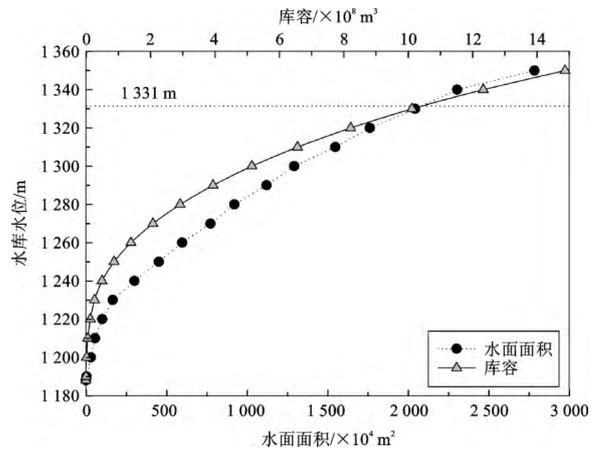


图 5 平寨水库特性曲线

Fig. 5 Characteristics curve of Pingzhai Reservoir

整个库区的输出水量为 17.27 亿 m^3 ; 2016 年 12 月末平寨水库实测水位为 1 320.1 m, 由水库特性曲线得地表水库的储存量变化值为 8.24 亿 m^3 。根据上述水均衡要素值, 由式 (1) 和式 (2) 可计算出地下水库的储存量变化值为 3.11 亿 m^3 , 其计算方式如下:

$$\begin{aligned}\Delta S_g &= \sum (Q_{nr} + R_{is} + P_{rs} - (E_{rs} + Q_{pg} + Q_{li})) - \Delta S_s \\ &= \sum Q_{nr} + \sum R_{is} + \sum P_{rs} - \sum E_{rs} - \sum Q_{pg} - \sum Q_{li} - \Delta S_s \\ &= 22.86 + 5.55 + 0.21 - (0.17 + 17.10) - 8.24 (\text{亿 m}^3) \\ &= 3.11 (\text{亿 m}^3)\end{aligned}$$

此即为平寨水库伴生的岩溶地下水库的总库容(对应的蓄水位为1 320.1 m)。

3 讨论

如上所述,在利用水均衡模型反算平寨水库伴生的岩溶地下水库总库容时,所用的输入与输出要素中除了区间陆面的侧向入流量外,其余要素值主要通过可靠性较高的水文测验方法获得,因此区间陆面入库量(R_{is})的计算值关系到岩溶地下水库库容量的准确性。

平寨水库坝址与三岔河干流回水末端阳长断面之间的区间流域面积为815 km²,扣除水库库面面积21 km²后的区间陆面面积为794 km²。阳长断面以上流域面积为2 677 km²,多年平均降水量为1 105 mm,断面多年平均流量为41.97 m³/s(统计时段为1958—2016年)。采用面积比拟法,可估算出平寨水库在初始蓄水阶段的区间陆面入库量为6.77亿 m³,该值与水均衡模型中所用5.55亿 m³区间陆面入库量值的相对误差为22%。根据平寨水库区间陆面的植被覆盖度要远好于阳长断面上游流域的实际情况,按照中小流域(集水面积为10¹~10³ km²量级)尺度上森林蒸散发量随植被覆盖度升高而增大、年径流量随植被覆盖度升高而减小的普遍规律^[27-30],水均衡模型中选用的区间陆面入库量值(5.55亿 m³)具有一定的合理性,因此计算出的与平寨水库伴生的岩溶地下水库的库容量3.11亿 m³可信度较高。

4 结论与建议

位于乌江南源岩溶峡谷段的平寨水库,库区内分布有巨厚碳酸盐岩地层,其中,由三叠系下统永宁镇组(T_{1yn})中厚层石灰岩形成的百兴和三塘两大向斜储水构造与水库回水河段有着紧密的水力联系,形成由该地表水库激发的地下水库的岩溶含水介质。平寨水库的库盆封闭条件较好,在未发生库首渗漏的条件下,采用水库运营期水量反算法计算伴生的岩溶地下水库的库容量可靠性较高。平寨水库蓄水后,当蓄水位抬升至1 320.1 m时,伴生的岩溶地下水库的总库容达3.11亿 m³,占平寨水库地表总库容的29%,属于大(2)型地下水库。

平寨水库现已正式运营,担负着向黔中地区供水的重要任务。然而在该地表水库的径流调节中,还未考虑到与其伴生的岩溶地下水库的蓄水量。鉴于该地下水库的总库容较大,建议相关部门在库区范围内合理布设一定的地下水动态监测网点,以期对这一地下水库开展进一步的动态评估,进而为黔中水利枢纽水源区的地表地下水联合管理提供参考依据。

致谢:在项目研究与论文写作过程中,得到了中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室刘再华研究员、王世杰研究员,以及贵州师范大学地理与环境科学学院周德全教授的启发与指导,贵州省水利投资(集团)有限责任公司黔中分公司李作孝高级工程师和贵州省地质矿产勘查开发局一〇五地质大队胡德勇高级工程师提供了大力支持与帮助,在此向他们表示诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 李砚阁. 地下水库建设研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 1-27.
- [2] 杜新强, 李砚阁, 冶雪艳. 地下水库的概念、分类和分级问题研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 209-214.
- [3] Kharazi P., Yazdani M. R., Khazelpour P. Suitable identification of underground dam locations using decision-making methods in a semi-arid region of Iranian Semnan Plain[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 9: 1-10.
- [4] Gomes J. L. S., Vieira F. P., Hamza V. M. Use of electrical resistivity tomography in selection of sites for underground dams in a semiarid region in southeastern Brazil[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2018, 7: 232-238.
- [5] 范尧, 黄旭, 陆海玉, 等. 松散介质型地下水库地下水系统特征与库容计算分析探讨[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 489-496.
- [6] 李涛, 郭琳, 李辉, 等. 台兰河山前水文地质特征及地下水库可行性分析[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(5): 404-408.
- [7] 汪文富. 贵州普定马官岩溶地下水库成库条件及效益研究[J]. 中国岩溶, 1999, 18(1): 47-55.
- [8] 卫迦, 杨立铮. 岩溶峰丛山区地下河系发育特征及综合开发利用典型研究[J]. 工程勘察, 1997(3): 37-41.
- [9] 陈定容, 韩行瑞, 罗伟权, 等. 岩溶区地下水库库容评价的初步探讨: 以贵州仁怀长岗出水洞地下河为例[J]. 中国岩溶, 1996, 15(1/2): 150-156.
- [10] 李景阳, 左双英, 樊廷章, 等. 独山南部山区喀斯特地下水资源开发及其优化调配[J]. 贵州水力发电, 2004, 18(2): 35-39.
- [11] 陈伟海, 张之淦. 峰林平原区岩溶含水层特征与调蓄功能[J]. 中国岩溶, 1999, 18(1): 19-26.
- [12] 陈伟海, 张之淦, 黄敬熙. 抽水型岩溶地下水库的设想: 以广西来宾县小平阳乡为例[J]. 中国岩溶, 1996, 15(1/2): 141-149.
- [13] 李世君. 北京张坊岩溶地下水库特征及调蓄能力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [14] 邓继昌. 傅家桥地下岩溶水库的可行性研究[D]. 青岛: 中国海

- 洋大学 2004.
- [15] 顾尚义, 鄢贵权. 贵州岩溶地下水库的研究现状与展望[J]. 贵州科学 2006, 24(1): 28-31.
- [16] 钱少甫. 岩溶地下水库现状及保护分析[J]. 中国新技术新产品, 2010(11): 109-110.
- [17] 中国地图出版社. 中国地图册[M]. 北京: 中国地图出版社, 2018: 92-95.
- [18] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 等. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报 2012, 33(2): 129-134.
- [19] 蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 等. 中国岩溶作用产生的大气 CO₂ 碳汇的分区计算[J]. 中国岩溶 2011, 30(4): 363-367.
- [20] 贵州省第三测绘院, 广东省地图出版社. 贵州省地图册[M]. 广州: 广东省地图出版社 2002: 1-8.
- [21] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要[J]. 山地学报 2015, 33(6): 641-648.
- [22] 杨立疆. 基于周期序贯决策的水库群多目标优化调度研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院 2015.
- [23] 孟碟. 黔中水利枢纽工程水资源调配与经济核算研究[D]. 天津: 天津大学 2013.
- [24] 袁媛. 黔中地区水资源优化配置及水权分配方式研究[D]. 上海: 东华大学 2015.
- [25] 贵州省水利水电勘测设计研究院. 黔中水利枢纽一期工程平寨水库左岸帷幕渗漏分析与处理方案报告[R]. 贵阳: 贵州省水利水电勘测设计研究院 2018.
- [26] 高恒. 贵州平寨水库库区岩溶地下水数值模拟及地下水库库容分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京) 2021.
- [27] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究 1998(6): 14-23.
- [28] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 等. 森林对水文过程影响研究进展[J]. 应用生态学报 2003, 14(1): 113-116.
- [29] Bosch J. M., Hewlett J. D.. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology 1982, 55: 3-23.
- [30] Zhang L., Dawes W. R., Walker G. R.. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance [R]. Canberra: Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, Technical Report, 1999.

(责任编辑: 于继红)

Reservoir Capacity Calculation of Karst Underground Reservoir Associated with Pingzhai Reservoir in Deep Canyon Area of Upper Reaches of Wujiang River

He Chun^{1,2}, Zeng Yongjun³, Zeng Cheng¹, Gong Xiaoyu^{1,2}, Chen Wangguang^{1,2}, Deng Junzu⁴

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry Institute of Geochemistry CAS Guiyang Guizhou 550081; 2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049;

3. Guizhou Water Resources Investment (Group) Limited Company Guiyang Guizhou 550081;

4. School of Water Resources & Environmental Engineering East China University of Technology Nanchang Jiangxi 330013)

Abstract: Taking Pingzhai reservoir on the southern main stream of Wujiang River in Guizhou Province as a case study, storage capacity of its associated karst underground reservoir is calculated. Pingzhai reservoir is a key water source of Hydro-junction project in Central Guizhou Province, with a total storage capacity of 1.089 billion m³. The reservoir is located in the deep canyon area on the slope of Yunnan Plateau to Central Guizhou Plateau. The carbonate strata are widely distributed on both sides of the canyon. The carbonate strata of Lower Triassic Yongningzhen Formation have experienced intensive karstification, which is an important foundation for the formation of karst groundwater reservoir in this area. The water balance calculation of the impoundment stage is conducted during the initial operation period of the reservoir (2015-2016). The results show that the storage capacity of the karst underground reservoir accompanying the Pingzhai surface reservoir is 311 million m³, accounting for 29% of the total surface capacity of the Pingzhai reservoir.

Key words: South tributary of Wujiang River; karst; deep gorge; groundwater reservoir; water budget; Pingzhai Reservoir