第 42 卷 第 6 期
2023 年 12 月

中 国 岩 溶
CARSOLOGICA SINICA

Vol. 42 No. 6
Dec. 2023

张 涛,左双英,沈春勇,等. 岩溶洼地抽水蓄能建库适宜性评价体系及目标优选[J]. 中国岩溶,2023,42(6):1161-1172.
DOI: 10.11932/karst20230603

岩溶洼地抽水蓄能建库适宜性评价体系及目标优选

张 涛[1],左双英[1,2],沈春勇[3],郑克勋[3],陈世万[1,2],张 清[1],雷 林[2],吴宗琴[2]

(1. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室,贵州 贵阳 550025;2. 贵州大学资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025;3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550081)

摘 要:为解决岩溶洼地修建抽水蓄能电站选址的实际工程问题,利用 DEM 数据和 ArcGIS 平台自动提取岩溶洼地并进行属性分析和计算,开展岩溶洼地建库资源评价及上库库址优选研究。提出洼地坡度、库容、岩组类型、断层、水文地质、上下库竖直距离和距高比 7 个建库决策关键性影响因子,构建模糊综合评判模型和偏最小二乘通径模型,以生态保护红线和自热保护区为限制性因素,对研究区 488 个候选洼地进行初步筛选排序。研究结果表明,竖直距离、库容、距高比三个因素对选址决策起到关键性作用;应用 GIS 地图叠加技术能很好排除因环境因素限制的不可行站点。通过两种模型普选出的前 10 个优选洼地中共有 6 个吻合,一致性较好说明评价模型适用性强、评价结果可靠性高;优选出的洼地与指标体系的量化标准基本一致,在工程实例中得到了很好的验证,其中白水塘 1#洼地最适合建设抽水蓄能电站。

关键词:岩溶洼地;抽水蓄能电站选址;模糊综合评判法;偏最小二乘通径模型

中图分类号:TV743 **文献标识码:**A

文章编号: 1001—4810(2023)06—1161—12 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

0 引 言

上世纪 30 年代抽水蓄能技术便开始在欧洲得到广泛应用,其中抽水蓄能电站是最为成熟的蓄能技术之一,它有力促进了新能源发展,保障了电网安全,具有高效可靠、经济性好和调峰填谷等经济和技术优势[1−3]。从 21 世纪开始,我国开始大力发展抽水蓄能电站,贵州省在"十四五"规划中也明确提出要加快推进抽水蓄能电站建设工作,抽水蓄能规划比选站点达 35 个,计划分别在"十四五"、"十五五"期间实施。

贵州 77% 以上的国土面积为岩溶区,峰丛洼地为主要地貌类型,以近圆形居多,四周环绕低山或峰林,底部呈"锅底状",是大气降雨汇流之地。由于岩溶洼地为天然负地形,开挖量极少,四周封闭较好,具有良好的几何及工程特性,能节约大量开挖支护投资,是修建水库的理想场所[4],如贵州纳桥水库、重庆茨竹湾水库、贵州青岩南街村水库等,世界最大的射电望远镜(FAST)也选址于贵州平塘大型岩溶洼地中[5]。黔西南地势高,处于喀斯特较强发育期,岩溶洼地集中连片出现,容量大、形态好,且水资源丰富,已建成多座大、中、小型水电站或水库,根据"水风光储"多能互补一体化建设规划,黔西南具备利用高位洼地作为抽水蓄能电站上库的区位资源优势,下库利用附近的流域或已开发的水库[6−8]。抽水蓄能

基金项目:贵州省科技支撑计划项目 (黔科合支撑 [2022] 一般 212);国家自然科学基金项目 (42167025);贵州省科学技术基金重点项目 (黔科合基础 [2020]1Z052);贵州省科学技术基金 ([2020]1Y185)

第一作者简介:张涛(1998—),男,硕士生,从事地质工程方面的研究。E-mail:zhangtaogzu@163.com。

通信作者:左双英(1977 —),女,博士,教授,从事岩体结构与地下工程方面的研究。E-mail:syzuo@gzu.edu.cn。

收稿日期:2022—10—21

电站可充分利用岩溶山区重要的地面空间资源，优化能源结构配置，助力“双碳”目标，促进节能减排和环境保护，加快贵州经济社会的发展[9-10]。

抽水蓄能电站选址需要考虑的因素众多，如何合理评价影响因子，并建立指标体系及评价方法是业界最关注的问题之一。目前的研究成果可归纳为以下几个方面：①对国内外已建成的抽水蓄能电站选址进行分析，总结了大量工程实例并进行专题研究，建立了基本选址原则和选址流程[11-12]。但只阐述了各类场地条件建库选址的影响因素，并未提出一套适合岩溶地区建抽水蓄能电站选址的指标体系；②提出了建库选址的决定性因素，以多角度对每个单因素进行定性分析，从经济、地质地形、环境和社会等方面为建库选址提供参考依据[13-15]，缺乏成体系的定量研究，不能保证选址的科学性及严谨性；③建立了层次分析法、主观赋权法、熵权法等决策模型，为抽水蓄能建库选址提供决策方法[16-18]。现有的抽水蓄能建库普查选点工作大多是基于小比例尺地质图并结合野外调查进行人工比选，针对数量较少的候选点进行加权排序，这些方法在候选场址量大时就会暴露出耗时费力、工作效率低、人为主观影响较大等缺陷。利用天然岩溶洼地作为抽水蓄能上库的系统选址评价方法在国内外尚无先例，深入研究岩溶洼地作为抽水蓄能上库适宜性评价指标体系及优化选址决策方法势在必行。

岩溶洼地建库适宜性影响因素是一个庞大的复杂系统[19]，影响因子之间的关系复杂而且难以量化。本文借助 ArcGIS 软件的空间统计和属性分析工具，建立岩溶洼地建库评价指标体系；基于模糊综合评判模型和偏最小二乘通径模型，结合环境限制条件及配套设施场地条件，对贵州兴义市黄泥河流域抽水蓄能电站洼地建库适宜性进行评价和优选排序，推动岩溶洼地的资源化利用。

1 研究区概况

研究区位于贵州省西南部，地处黄泥河与兴义市市区之间，与云南省罗平县接壤，面积约为 779.3 km^2。区内地势东南高、西北低，是黔西高原与滇东高原过渡区域，高程为 1 086~2 173 m，地形落差大，山体雄厚。山脉走向呈 NE 向，多为条形状，地貌类型以峰丛槽谷、岩溶洼地、溶丘谷地为主。在区内共提取出了 488 个发育良好的岩溶洼地（图 1），成片分布在沟谷和山脊圈围地区，高位洼地洼底宽阔、形状平缓，槽谷洼地多深窄。

区内出露地层由老到新有石炭系中统威宁组（C_2w）、二叠系下统茅口组（P_1m）、二叠系上统龙潭组（P_1l）、三叠系下统飞仙关组（T_1f）及永宁镇组（T_1y）、

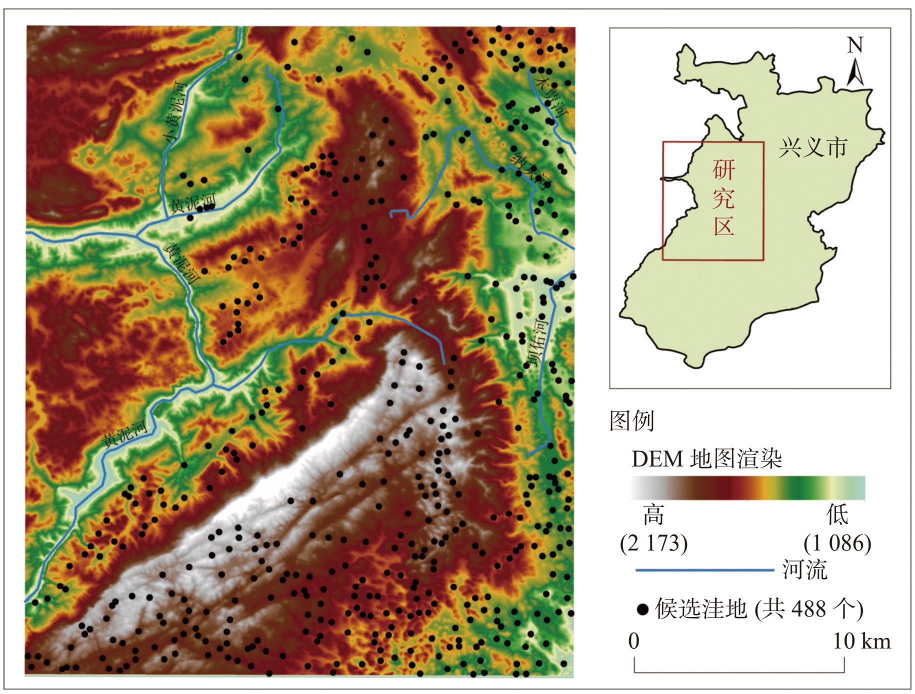
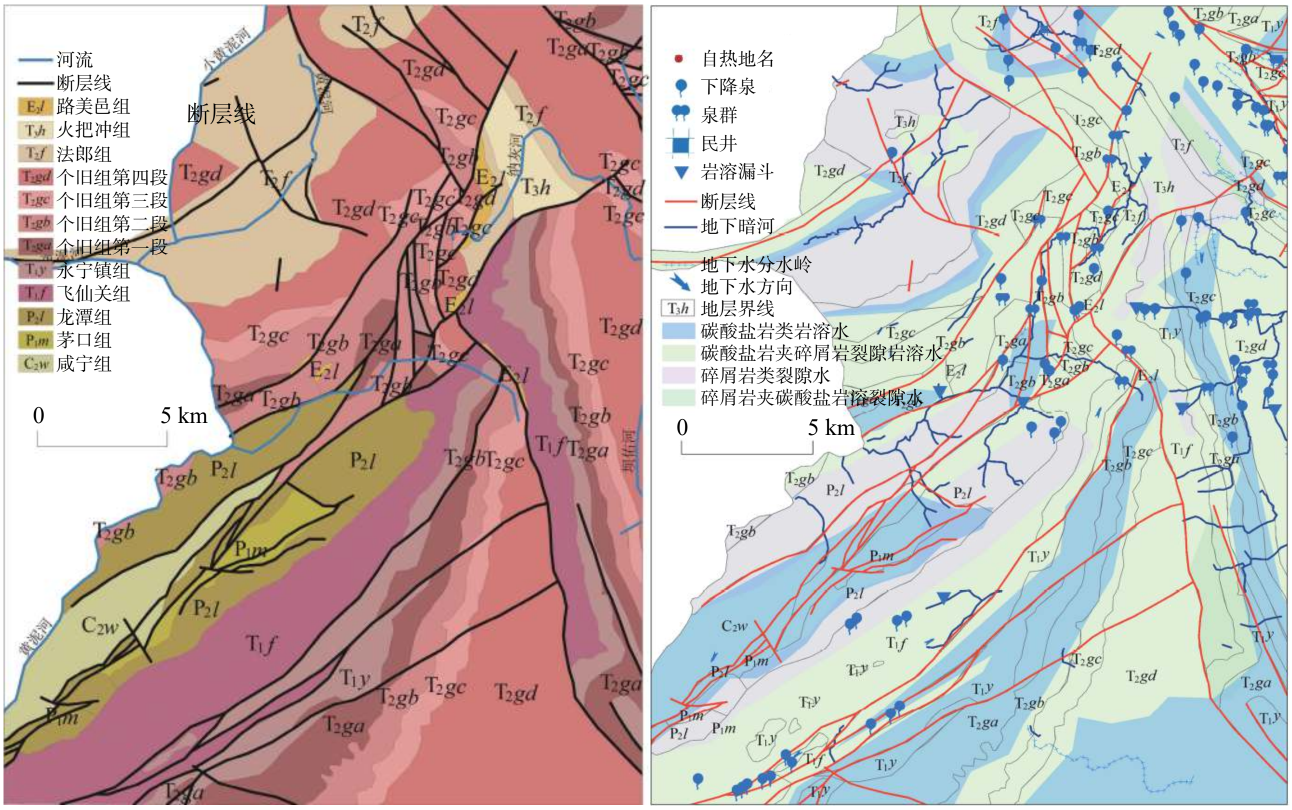


图 1 研究区岩溶洼地分布

Fig. 1 Distribution of karst depressions in the study area

三叠系中统个旧组(T_2g)及法郎组(T_2f)、三叠系上统火把冲组(T_3h)和晚新生代路美邑组(E_2l)等地层，出露基岩多以白云岩、灰岩等海相碳酸盐岩为主，且发育有煤系地层(图 2a)。研究区地处扬子板块西南缘，区域断层、节理等构造较为发育，主要有雄武断裂通过，该断裂倾向 NE，倾角 78°左右，岩体较为破碎，多呈角砾状，宽 15~40 m，并具张性及压扭性多次活动特征。区内地下暗河较为发育，岩溶大泉和岩溶泉群较多，集中分布在地层与断层接触带，未见大规模岩溶现象(图 2b)。



a. 地质略图　　　　b. 水文地质略图

图 2　研究区地质概况

Fig. 2　Geological survey of the study area

黄泥河流域位于研究区西部，为南盘江北岸主要支流之一，是区内抽水蓄能电站的重要水源，流量为 172 $m^3 \cdot s^{-1}$，流域面积 7 416 km^2，河长 220 km，有罗平河、小黄泥河、白碗窑河三条主要支流[20]。流域内岩溶发育，泉井广泛分布，流域地势呈南低北高，属岩溶山区雨源型河流，为 V 型谷。此外，研究区已修建了多座中、小型水库，如老江底水电站、鲁布革水电站、毛栗寨水库等，这些水利工程对当地的防洪灌溉、供水发电等具有重要意义。

2　建立评价指标体系

2.1　评价工作思路

由于不同地区影响洼地建库适宜性的因素及其作用程度明显不同，因而在进行评价时，只能选择其中一些对库区稳定性、渗漏问题、建库效益等有重要影响的典型因子作为评价指标。本文结合工程实践，组织专家研讨及打分确定评价模型的影响因子，以地形条件、地质条件和工程条件作为一级指标，将环境因子作为限制条件；应用模糊综合评判法和偏最小二乘通经模型赋值影响因子，建立岩溶洼地建库资源分级评价方法；在应用分级评价方法的基础上，结合配套场地(包括下库、输水发电系统)的优劣对初选洼地进行最终优选排序。

2.2　数据收集及表达

研究数据包括了图形数据、矢量数据和栅格数据三种类型，主要有研究区地形图、地质图、水文地

质图、生态保护红线、DEM 数据、基础地理数据、自然保护区等(表 1)。

采用 ArcGIS 数据处理功能，将收集到的数据扫描、预处理、地理配准、统一坐标系、拼接和属性录入等矢量化处理，建立数据分层和属性提取，实现图件的数字化。

2.3 适宜性评价因子的筛选与优化

岩溶洼地蓄能水库选址的主要任务是评价指标的确定和量化。水库电站建设条件复杂，涉及学科多样，地质条件要求高。确定各评价指标既要科学客观、综合全面，又要理论结合实际，分清主次，极力排除因建设条件缺陷、环境保护限制等造成的不利风险，同时考虑评价指标量化精度和获取条件。表 2 根据相关文献和公开资料，对抽水蓄能水库选址评价标准体系进行整理，并归纳了部分国内外已建或在建抽水蓄能水库的基本工程条件。本文在此基础上对岩溶洼地与抽水蓄能电站结合可用的指标进行

表 1 数据收集详细信息表

Table 1 Detail information of the data collection

数据类型	名称	时间	空间参考系	比例尺/空间分辨率	数据格式	数据用途
图形数据	地质图	1974年	北京54	1：20万	JPG	地层岩性、地质构造因子分析
	水文地质图	2007年	北京54	1：5万	JPG	获取岩溶大泉、岩溶泉群、地下暗河、分散排泄系统等数据
	生态保护红线	2018年	/	1：140万	JPG	获取生态保护红线分布区域
矢量数据	基础地理数据库	2017年	CGCS2000 Gauss_Kruger	1：25万	SHP	获取水系、交通、居民地及设施等信息
	自然保护区	2018年	CGCS2000 Gauss_Kruger	/	SHP	获取自然保护区核心区、缓冲区、边界
栅格数据	数字高程模型(DEM)	2015年	WGS_1984 UTM_Zone_49N	12.5 m	TIF	提取洼地及其洼地属性分析

表 2 抽水蓄能电站选址的决策指标及工程实例

Table 2 Decision indexes of site selection of the power station for pumped storage and engineering example

指标/实例		内容
决策指标	环境约束	排除居住区、永久耕作区、交通基础设施、保护区、国家公园和遗址遗迹等敏感区域[21] 避让水源保护区、森林公园、自然保护区、风景名胜区、地质公园等环境保护区[22]
	经济效益	上下水库、建筑物、地下厂房、水道、隧道等的修建难易程度[15] 拟建站址到国家电网和公路网的距离、土地的适宜性、静态投资、动态回收[23] 动力部件(涡轮机、发电机、变压器和开关站等)和存储组件(水坝、土方开挖和衬砌)[24] 征地、安置和补偿、土石供应、施工作业空间、外部交通状况[25]
	地形地质	提出七种PHES潜力的场地类型，对站点的水源潜力进行估计[26] 现有水库、发电站和水道所需的土建工程稳定性取决于地层岩性，考虑潜在断层、地震振动时产生的附加影响[3] 研究流域有关的地形、土壤、水文等可用数据，建立一个评分系统确定潜在的位置[27] 以自然水头、径流量、径流补偿区等地形和水文因素作为选址标准，按照优先级选择最终位置[28] 用距离、总水头、库容、深度、海拔等计算抽蓄电站的能量转化效率[21]
工程实例	仙游抽水蓄能电站	上库为山间溪源谷地，库区基岩以凝灰熔岩为主，断层规模小，上下库落差448.5 m，距高比4.52，下库为河流[29]
	洪屏抽水蓄能电站	上库为高山盆地，库区地质条件复杂，断层发育，上下库平均水头552.5 m，库容1 033万m^3，距高比3.88，下库为河流[30]
	泰安抽水蓄能电站	上库为天然库盆，有一条大断层穿过，坡度宽缓，岩性主要为混合花岗岩，上下库最大水头256 m，距高比6.71，库容898万m^3[31]
	遥桥峪抽水蓄能电站	上库为自然谷盆，库容550万m^3，主要出露岩层为凝灰岩，岩石致密坚硬，机组设计水头535 m，距高比6.3，下库利用已建水库[32]
	Crete 抽水蓄能电站	上库为闭合盆地，主要岩性为薄层石灰岩，最大坡度为 45°，库容192万m^3，水头约为520 m，距高比3.85，将海洋作为下库 [33]

了筛选和优化。

(1)地形条件。岩溶洼地是岩溶区因溶蚀作用形成的地表形态，呈椭圆形、漏斗形等圈闭地貌，其特点一般是中间低洼、底部平坦、面积较大，且坡度缓陡不均、地势纵横交错、封闭条件复杂，不同发育阶段的岩溶洼地溶蚀程度差别较大，容积大小不一。不同容积的洼地可直接影响建库级别和调节能力[34]，库容越大对洼地顶板的承载力要求也越高；岩溶区自然斜坡坡度过陡、坡体不稳定等会造成滑坡、崩塌等不良地质现象，威胁水库建设和蓄水安全[23]。

(2)地质条件。在工程建设中可根据岩层的坚硬程度、完整程度、力学条件、水化学溶蚀条件、特殊性质等工程特性，将相同或相似的岩层归纳为同一个工程岩组，不同类型岩组对建库工程的库底坝基稳定性、渗漏大小、地下工程稳定性的影响差异较大，特别是库区透水岩层、富水岩层发育，对成库工程尤其不利。在工程选址实践中发现，玄武岩地层是最理想的建库地层，而煤系地层和泥岩地层是建库选址最不利的地层，应避而远之[35]。其次，断层构造作用使断层核心区岩层破碎、岩体结构面发育、水文地质条件复杂，治理难度大，不利于库区防渗堵漏，上下库区、地下厂房位置穿越断层容易发生地质灾害，对工程区岩体稳定性极为不利。在岩溶发育区修建水库既要查明库区地下水埋深的空间特征，又要查明建库场区水系水量，弄清地下水的类型、水位、补给、赋存、排泄条件，对洼地蓄水条件、泄洪排水都十分重要。因此，地质条件对建库的影响应以地层岩性、断层穿越数量和水文地质条件三个参数加以表征。

(3)工程条件。抽水蓄能电站是充分利用上、下水库的势能差循环用水进行发电，对工程条件有严格的要求，既需要充足水源作引水源，也需要适中的水头(H)，水头越高，库区水势能转换越高，但受建设技术限制，目前抽水蓄能电站的上、下库水头不易过高，以保障抽水蓄能水库的科学性和经济性[21,35]。另外，通常用距高比(L/H)来反映建库引水长度，距高比(L/H)是指抽水蓄能水库上库距引水源(下库)的水平距离与水头差之比[22]，它直接影响水库修建投资和发电效率，距高比值越小，代表引水道越短、越经济有效，因此在国内外的抽水蓄能建库工程中都将电站距高比严格控制在 10 以下[19]，最佳距高比可控制在 2.5 至 3.5 之间。

(4)环境条件。对于岩溶洼地蓄能水库选址的适应性条件，已选择地形条件、地质条件和工程条件等作为决策因素，这三个适宜性条件满足建设电站厂址的基本要求。然而，在工程建设中不可避免的要受到重大生态环境等因素的制约，在选址时要极力避让自然保护区、风景名胜区、遗产地核心区、永久基本农田等国家或地方划定的禁止开发区域，以消除阻碍工程建设的不可行位置。在确定候选洼地的优先排序前，应用 GIS 地图叠加技术，考虑生态保护红线、自然保护区等限制性因素，设置限制性缓冲区对研究区域进行筛选，去除不可行的候选洼地，以确保获得更实用的决策结果。

2.4 评价因子的量化与分级

评价因子分级量化后方可代入相应的模型进行计算，按照指标类型，将评价因素分为决策型因素（即地形条件、地质条件、工程条件）、限制型因素（即环境条件）。通常情况下，评价因子有两类，即定性因子和定量因子，定性因子要分类分级描述，定量因子要量化分级描述。根据 ArcGIS 提供的空间分析模块，对各评价因子进行区段划分及评价，级别与评价评语集级别相对应，根据专家研讨结果将每种决策因子按对建库选址的影响程度分为 4 级，对应评语集为好(Ⅰ)、较好(Ⅱ)、一般(Ⅲ)、差(Ⅳ)。决策因素主要针对上库的筛选，在评价体系中最为重要，因此需要代入评价模型计算；限制性因素目的是去除禁止建设开发区域，设定的适宜性等级为可行和不可行，因此限制因素不代入评判模型计算。综上所述，本文综合专家打分结果、工程实例和实际需要提出如表 3 所示的岩溶洼地抽水蓄能建库选址的评价指标及分级标准。

3 评价及优选方法

3.1 模糊综合评判模型

岩溶洼地地质要素在时空上的变化具有很大的模糊性，单要素的优劣及总体质量的好坏等难以用精确的定量关系来表示，因此，可用多因子模糊综合评判方法(FCE Model)完成建库适宜性评价。根据评价指标体系，从中选出评价因素建立评价因素集 $U=[u_1, u_2, \cdots, u_7]$=[坡度，库容，地层岩性，断层，水文地质条件，距高比，竖直距离]，适宜性评语等级集

表 3 岩溶洼地抽水蓄能建库选址评价指标及分级标准

Table 3 Evaluation indexes and classification standards of site selection of the reservoir for pumped storage in karst depressions

指标类型	评价指标 一级因子	评价指标 二级因子	适宜性等级 好(Ⅰ)	较好(Ⅱ)	一般(Ⅲ)	差(Ⅳ)
决策因素	地形条件	坡度/°	[25, 35)	[15, 25)	[35, 45)	<15, ≥5
		库容/万m^3	[450, 600)	[300, 450)	[150, 300)	<150, ≥600
	地质条件	地层岩性	玄武岩、厚层白云岩	灰岩白云岩互层	厚层灰岩	煤系地层、泥岩
		断层	0条	1条	2条	>2条
		水文地质条件	分散排泄系统	岩溶大泉	岩溶泉群	地下暗河
	工程条件	距高比/$L\cdot H^{-1}$	[2.5, 3.5)	[2.0, 2.5)	[3.5, 5.0)	<2.0, ≥5.0
		竖直距离/m	[600, 800)	[400, 600)	[200, 400)	<200, ≥800
限制因素	环境条件	生态保护红线	可行/不可行			
		自然保护区	可行/不可行			

V=[v_1, v_2, v_3, v_4]= [好,较好,一般,差]。定性因子采用隶属度方法量化,根据专家经验法确定评价因子对稳定性等级的隶属度;定量因子通过模糊隶属函数对不同量刚的指标进行处理,使指标标准化。

采用层次分析法(AHP 法),根据评价因子之间的相对重要性建立判断矩阵来确定权重,对各因素的相对重要性加以定量化,以避免个别因子不合理带来的过大偏差。AHP 方法是通过两两比较来确定两因子的相对重要性[36],计算表明,本研究中一级因子权重由大到小依次为工程条件、地质条件、地形条件,二级因子中竖直距离、库容、距高比三个因素对选址决策影响起到关键性作用,权重分别为 27.0%, 21.2%, 19.6%(表 4)。

表 4 判断矩阵及权重

Table 4 Judgment matrix and weight

评价因子	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	权重a_i	备注
坡度A1	1.00	0.33	0.33	0.50	0.33	0.25	0.20	4.4%	CI=0.0459 RI=1.32 CR=0.0348 (CR≤0.1—致性检验通过)
库容A2	3.00	1.00	3.03	5.00	2.00	0.83	0.77	21.2%	
地层岩性A3	3.00	0.33	1.00	4.00	1.25	0.50	0.33	11.6%	
断层A4	2.00	0.20	0.25	1.00	0.50	0.33	0.25	5.4%	
水文地质条件A5	3.00	0.50	0.80	2.00	1.00	0.43	0.50	10.8%	
距高比A6	4.00	1.20	2.00	3.00	2.30	1.00	0.50	19.6%	
竖直距离A7	5.00	1.30	3.00	4.00	2.00	2.00	1.00	27.0%	

建立评价因素论域与稳定等级论域之间的模糊关系矩阵 R,并考虑各评价因子在综合评判中的权重值 A=(a_1, a_2, …, a_7)^T,由权向量与模糊矩阵进行合成得到综合隶属度 B = AoR=(b_1, b_2, …, b_7),其中 o 表示合成算子,

$$b_j = \sum_{i=1}^{n} a_i r_{ij} \tag{1}$$

求出模糊评判矩阵 B 后,根据最大隶属度原则进行评价,即:

$$b_{i_0} = max\{b_j\}, 1 \leqslant j \leqslant n \tag{2}$$

所对应的分级为适宜性等级 i_0。

3.2 偏最小二乘通径模型

偏最小二乘通径模型(PLS Path Model)是一种通过迭代求解回归方程的线性统计建模方法,常用于分析多组变量之间的关系,其优点是模型假设条件较少,适用性强,已有学者将其用于岩溶地面塌陷危险性评价,并取得良好效果[37]。PLS Path Model 由外部模型(或测量模型)和内部模型(或结构模型)组成,外部模型是可以直接测量的模型,用于计算显变量(x_{jh});内部模型的数据不能直接获取,用于表示隐变量(ξ_j)间的关系,且每组显变量都有对应的隐变量。基于前述的评价指标体系,将一级因子选作隐变量,

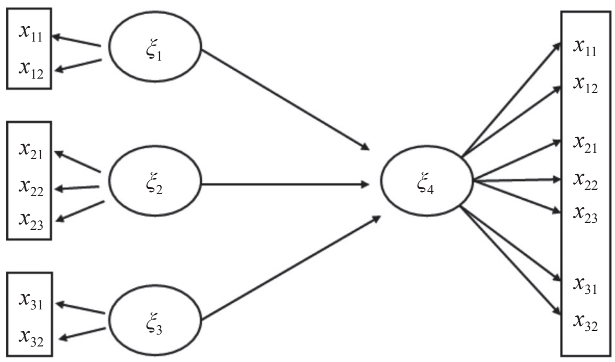


图 3　岩溶洼地建库适宜性评价 PLS 路径设计图

Fig. 3　PLS path design drawing for the suitability evaluation of reservoir construction in karst depressions

将对应的二级因子选作显变量，采用偏最小二乘通径模型对上库库址适宜性进行评价(表 5)。

表 5　PLS Path Model 法岩溶洼地建库适宜性评价显变量与隐变量

Table 5　Manifest variables and latent variables in the suitability evaluation of reservoir construction in karst depressions by PLS Path Model

隐变量	地形条件(ξ_1)	地质条件(ξ_2)	工程条件(ξ_3)
显变量	库容(x_{11}) 坡度(x_{12})	地层岩性(x_{21}) 断层(x_{22}) 水文地质条件(x_{23})	距高比(x_{31}) 竖直距离(x_{32})

建立岩溶洼地建库适宜性评价的 PLS Path Model，首先要构建隐变量与显变量、隐变量与隐变量之间的路径关系(图 3)。模型图左边反映三个隐变量(ξ_1、ξ_2、ξ_3)分别对应的显变量组(x_{11}~x_{12}，x_{21}~x_{23}，x_{31}~x_{32})，右边是由隐变量 ξ_4 和所有显变量构成的大变量组(x_{11}~x_{32})组成。用该模型图表示的隐变量 ξ_4，即为综合评价排序的回归值，它既反映了二级因子间的最强相关性，又可反映一级因子所包含的全部信息。

在进行显变量计算之前需要进行标量化处理，并按反映方式对 3 组显变量做主成分分析和唯一度检验，唯一条件检验通过说明分组合格。唯一度检验通过后进行 PLS Path Model 计算，求出隐变量与对应显变量之间的相关系数。以隐变量作因变量，对应显变量为自变量，构建 PLS 回归方程式(3)；由于隐变量间不存在明显相关性，因此运用多元回归模型构建隐变量回归方程式(4)。

$$\begin{cases} \xi_1 = 0.439x_{11} - 0.913x_{12} \\ \xi_2 = -0.577x_{21} - 0.918x_{22} + 0.8x_{23} \\ \xi_3 = 0.390x_{31} + 0.968x_{32} \end{cases} \tag{3}$$

$$\xi_4 = 0.438\xi_1 + 0.444\xi_2 + 0.574\xi_3 \tag{4}$$

4　结果分析与讨论

4.1　两种模型结果对比分析与筛选

将模型应用于研究区域，对区内 488 个候选洼地进行建库筛选和适宜等级评判，完成初步排序。结果显示两种模型分别获得的前 10 个候选洼地中有 6 个洼地相同(表 6)，分别为白水塘 1#、白水塘 2#、

表 6　两种方法洼地建库适宜性优选排序

Table 6　Sequence of suitability of reservoir construction and optimization of its site selection in karst depressions by two different methods

洼地名称	竖直距离 m	库容 万m^3	距高比	地层岩性	水文地质条件	断层 条	坡度 °	排序	
								FCE法	PLS法
白水塘1#	663	269.19	2.72	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	52.53	1	1
罗家弯子	665	111.00	2.48	厚层白云岩	分散排泄	0	40.34	2	7
鸭坝田	656	318.60	6.63	灰岩白云岩互层	分散排泄	1	62.17	3	8
白水塘2#	462	117.49	2.93	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	43.56	4	4
云南寨	696	250.12	3.94	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	60.93	5	3
石刚井	699	135.96	5.43	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	54.42	6	13
风岩	654	177.82	7.64	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	57.19	7	11
肖家寨	664	146.03	7.90	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	60.17	8	14
后朝子	554	252.01	6.54	厚层白云岩	分散排泄	2	30.59	9	22
冉家窝凼	541	404.02	9.14	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	60.33	10	10
发舍	331	302.92	3.55	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	47.78	16	2
飞龙洞	245	116.38	3.62	灰岩白云岩互层	分散排泄	0	60.52	24	5
高坪子	259	119.37	4.15	厚层白云岩	分散排泄	2	44.66	19	6
小洪地	307	235.72	6.21	厚层灰岩	分散排泄	0	50.61	26	9

云南寨、罗家弯子、鸭坝田和冉家窝凼洼地。结果说明两种模型有较强的相关性，所建模型可行性较强。

抽水蓄能电站作为一个系统工程，由上库、下库和输水发电系统组成，模型优选结果得出了适合选做抽水蓄能电站上库的洼地，这是岩溶区抽水蓄能电站选址筛选的主要内容。本文在筛选上库时已充分考虑附近引水源的优势，因此选下库时可利用上库附近的河流、已有水库或湖泊，而输水发电系统的地下厂房建在两者之间。表 7 结果显示拟建下库和输水发电厂房地质条件基本符合工程建设要求，后朝子、冉家窝凼两个候选洼地的工程地质条件欠佳，下库或输水发电厂房地层中有不利于工程建设的煤系地层、泥岩，且有断层经过，因此后朝子和冉家窝凼两个候选洼地不宜作为优选考虑对象。

表 7　适宜性优选洼地配套场地条件

Table 7　Conditions of support site in karst depressions in terms of suitability of reservoir construction and optimization of its site selection

洼地名称	下库			输水发电厂房	
	水源类型	地层岩性	断层/条	地层岩性	断层/条
白水塘1#	自然径流	厚层灰岩	0	灰岩白云岩互层、厚层灰岩	0
罗家弯子	自然径流	灰岩白云岩互层	0	厚层白云岩、灰岩白云岩互层	0
鸭坝田	自然径流	灰岩白云岩互层	0	灰岩白云岩互层	0
白水塘2#	自然径流	厚层灰岩、泥岩	0	厚层灰岩	0
云南寨	自然径流	灰岩白云岩互层	0	灰岩白云岩互层	0
石刚井	自然径流	厚层白云岩	0	厚层白云岩、灰岩白云岩互层、厚层灰岩	1
风岩	自然径流	灰岩白云岩互层	0	厚层白云岩、灰岩白云岩互层	0
肖家寨	自然径流	厚层白云岩	0	厚层白云岩、厚层灰岩、灰岩白云岩互层	2
后朝子	自然径流	煤系地层	0	厚层白云岩、煤系地层、泥岩	2
冉家窝凼	自然径流	厚层白云岩	0	厚层灰岩、灰岩白云岩互层、泥岩	2
发舍	已建水库	玄武岩	0	厚层白云岩、灰岩白云岩互层	0
飞龙洞	已建水库	灰岩白云岩互层	0	灰岩白云岩互层	0
高坪子	已建水库	玄武岩	0	玄武岩、厚层白云岩	0
小洪地	自然径流	厚层灰岩	0	厚层灰岩	0

4.2　场址优化综合分析与评价

在两种模型优选出的洼地中，已排除生态环境保护区内的候选洼地，剩余优选洼地综合评判级别均为Ⅰ级，适应性评价均为好。其中，最大竖直距离为 696 m，平均值为 528 m，未超过我国最高额定水头（710 m）的长龙山抽水蓄能电站，与已建的洪屏、遥桥峪、Crete 抽水蓄能电站总水头值高度一致；库容在 111~404 万 m^3 之间，Crete 抽水蓄能电站上库的天然库容也在范围内，但考虑此库容数据值为岩溶洼地在天然状态下的容积值，在后期建库时还需进行筑坝挖填扩容，因此最终建库库容要比该值大，对选址结果影响不大；优选洼地距高比均小于 10 m，满足国内外通用标准；地质条件良好，地层岩性以厚层灰岩、灰岩与白云岩互层为主，与岩溶区同类水库研究的结论一致[35]；优选洼地中仅有两个有断层穿过，降低了库盆的先天渗漏条件；地表缓陡均匀，坡体稳定性良好，且具有很好的分散排泄系统，岩溶发育程度较低，满足建库选址的基本要求。综合结果表明优选出的岩溶洼地适应性好，与指标体系的量化标准吻合，在本文列出的工程实例中已得到很好的验证（见表 2）。

利用两模型可以得到研究区候选洼地的优先排序，结合限制条件和辅助筛选条件，确定了最优建库洼地为白水塘 1#。该洼地库盆较缓，四面环山，高程为 1 890~1 970 m，西侧为陡坡，最大坡度 50°左右；出露岩层主要为三叠系下统永宁镇组下段（T_1y^a）灰、灰蓝色泥质细粒灰岩夹蠕虫状灰岩，及飞仙关组上段（T_1f^b）灰、蓝灰色厚层、块状泥质灰岩、泥质细纹灰岩和灰绿色、紫红色泥岩、粉砂岩不等厚互层；具有很好的分散排泄系统，岩溶发育程度低。洼地的最近引水水源为黄泥河支流白瓦窑河，水平距离 1 802 m，竖直距离 663 m，距高比为 2.72，洼地植被覆盖程度高，有道路可达，适宜修建抽水蓄能水库（卫星影像如图 4 所示）。

图 4 白水塘 1#洼地建库卫星影像图

Fig. 4 Satellite image of reservoir construction at No.1 depression of Baishui pond

5 结 论

(1)分析影响岩溶区洼地抽水蓄能建库选址的关键因素,提出从地形条件、地质条件、工程条件、环境条件等开展分项评价,根据专家打分判断结果,选取了洼地库容、坡度、地层岩性、断层、水文地质条件、竖直距离及距高比等 7 个因子作为最终决策评价指标,根据划定的生态保护红线、自然保护区等相关规定从候选洼地中去除位于限制缓冲区中的不可行洼地。借助 ArcGIS 分析工具,使用定量评价方法对指标进行量化分级。

(2)应用模糊综合评判法和偏最小二乘通径模型优选岩溶洼地抽水蓄能电站上库选址方案。通过两种不同模型对候选洼地进行排序及筛选,两种模型相互验证,结合拟建下库、输水发电厂房的地质条件辅助筛选最优候选洼地,避免决策者在决策过程中的主观性和局限性影响。

(3)对研究区提取的 488 个岩溶洼地进行了普选分析,各优选出 10 个地形条件良好、地质条件适宜、工程条件优越的岩溶洼地作为抽水蓄能电站上库备选地址。两模型中共有 6 个洼地吻合,分别为白水塘 1#、白水塘 2#、云南寨、罗家弯子、鸭坝田和冉家窝凼洼地,综合分析后选取白水塘 1#洼地作为研究区抽水蓄能电站最佳候选库址。对优选出的岩溶洼地适宜性分析,结果表明绝大多数优选出的岩溶洼地具有很强的适应性,评价模型可推广到其他地区岩溶洼地的抽水蓄能电站选址工作中,进一步提高岩溶洼地资源开发利用水平。

参考文献

[1] Thang Ngoc Cong. Progress in electrical energy storage system: A critical review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.

[2] 李长健. 抽水蓄能电站减碳效益研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6): 45-48, 80.
LI Changjian. Study on carbon reduction benefit of pumped storage power station[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(6): 45-48, 80.

[3] Nzotcha U, Kenfack J, Blanche Manjia M. Integrated multi-criteria decision making methodology for pumped hydro-energy storage plant site selection from a sustainable development perspective with an application[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 930-947.

[4] 姜光辉, 刘凡, 王奇岗, 郭芳. 基于表层岩溶带调控的峰丛洼地低影响开发构建[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 165-173.
JIANG Guanghui, LIU Fan, WANG Qigang, GUO Fang. Low impact development construction of peak cluster depression based on regulation of epikarst zone[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(2): 165-173.

[5] 苏维词, 潘真真, 郭晓娜, 杨吉, 易武英, 李艳丽, 杨振华, 谢砫军. 黔南FAST周边典型喀斯特峰丛洼地石漠化生态修复模式研究：以平塘县克度镇刘家湾周边为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 503-512.
SU Weici, PAN Zhenzhen, GUO Xiaona, YANG Ji, YI Wuying, LI Yanli, YANG Zhenhua, XIE Zhujun. Study of ecological remediation modes for rocky desertification in typical karst peak-cluster depression surrounding south Guizhou FAST: An example of the periphery of Liujiawan, Kedu town, Pingtang

county[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 503-512.

[6] 李新根, 徐敏, 周清平. 贵州省抽水蓄能电站合理规模分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(8): 69-72.
LI Xingen, XU Min, ZHOU Qingping. Reasonable scale analysis of pumped storage power station in Guizhou Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(8): 69-72.

[7] 蒲楠楠, 顾文钰. 乌江流域抽水蓄能电站开发形势分析[J]. 江苏科技信息, 2018, 35(21): 74-77.
PU Nannan, GU Wenyu. Analysis of the development situation of pumped storage power station in Wujiang river basin[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2018, 35(21): 74-77.

[8] 张娜, 董化宏, 何学铭. 我国抽水蓄能电站建设必要性和前景[J]. 中国三峡, 2010(11): 16-20.

[9] 王兵, 刘朋帅, 邓凯磊. 基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 667-677.
WANG Bing, LIU Pengshuai, DENG Kailei. Site selection of pumped storage power station in abandoned mines: Results from fuzzy-based multi criteria decision model[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(6): 667-677.

[10] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36.
CHENG Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36.

[11] 任岩, 侯尚辰. 基于多能互补的抽水蓄能电站站址选择的研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6): 37-39.
REN Yan, HOU Shangchen. Study on site selection of pumped storage power station based on multiple complementarity[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(6): 37-39.

[12] 赵会林, 鲁新蕊. 抽水蓄能电站的选点原则[J]. 东北水利水电, 2012, 30(4): 1-2, 71.
ZHAO Huilin, LU Xinrui. Selection principle of pumped storage power station[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2012, 30(4): 1-2, 71.

[13] 吕优. 风–光–抽水蓄能联合发电系统优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
LV You. Study on the optimal scheduling of a hybrid wind-solar-pumped storage power generation system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

[14] 卢开放, 侯正猛, 孙伟, 张盛友, 方琰藜, 高通. 云南省矿井抽水蓄能电站潜力评估与建设关键技术[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 136-144.
LU Kaifang, HOU Zhengmeng, SUN Wei, ZHANG Shengyou, FANG Yanli, GAO Tong. Potential evaluation and construction key technologies of pumped-storage power stations in mines of Yunnan Province[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 136-144.

[15] 庞伟, 王帆. 抽水蓄能电站在电网运行中的地位与作用[J]. 水电与抽水蓄能, 2015, 1(6): 1-4.
PANG Wei, WANG Fan. The position and function of the pumped storage power station in power grid operation[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2015, 1(6): 1-4.

[16] 魏乐, 李思莹. 基于加权模糊 TOPSIS 和灰色关联度的风电场选址研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(12): 1869-1874.
WEI Le, LI Siying. Site selection for wind power plants based on weighted fuzzy TOPSIS and grey correlation degree[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(12): 1869-1874.

[17] 娜仁花. 基于模糊综合评价模型的风电场选址研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
NA Renhua. Researching on location of wind power farm based on fuzzy comprehensive evaluation model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[18] Tan Q, Wei T, Peng W, Yu Z, Wu C. Comprehensive evaluation model of wind farm site selection based on ideal matter element and grey clustering[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122658.

[19] Wu Y, Liu L, Gao J, Chu H, Xu C. An extended VIKOR-based approach for pumped hydro energy storage plant site selection with heterogeneous information[J]. Information, 2017, 8(3): 106.

[20] 赵勇. 滇东山原区水库岩溶渗漏系统工程地质研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
ZHAO Yong. Systematic engineering geological research of reservior leakage in karst in mountain plateau of eastern Yunnan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[21] Rogeau A, Girard R, Kariniotakis G. A generic GIS-based method for small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) potential evaluation at large scale[J]. Applied Energy, 2017, 197: 241-253.

[22] 陈宏宇, 陈同法, 秦晓宇, 卢锟明. 混合式抽水蓄能电站选点条件分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(4): 28-31, 44.
CHEN Hongyu, CHEN Tongfa, QIN Xiaoyu, LU Kunming. Analysis of selected conditions of mixed pumped storage power station[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(4): 28-31, 44.

[23] Ahmed H G I, Mohamed M H, Saleh S S. A GIS model for exploring the water pumped storage locations using remote sensing data[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2021, 24(3): 515-523.

[24] Lu B, Stocks M, Blakers A, Anderson K. Geographic information system algorithms to locate prospective sites for pumped hydro energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 222: 300-312.

[25] Ji L, Li C, Li X, Li P, Zhu H, Zhang Z. Multi-method combination site selection of pumped storage power station considering power structure optimization[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49: 101680.

[26] R Lacal, N Fitzgerald, P Leahy. Pumped-hydro energy storage: Potential for transformation from single dams[M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012: 1-55.

[27] Kusre B C, Baruah D C, Bordoloi P K, Patra S C. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili river basin in Assam (India)[J]. Applied Energy,

2010, 87(1): 298-309.

[28] Yi C S, Lee J H, Shim M P. Site location analysis for small hydropower using geo-spatial information system[J]. Renewable Energy, 2010, 35(4): 852-861.

[29] 陈德建. 仙游西苑抽水蓄能电站工程区主要工程地质问题分析[J]. 水利科技, 2008, 121(4): 26-29.
CHEN Dejian. Analysis on the main engineering geology problems at project area of Xianyou Xiyuan pumped storage power station[J]. Hydraulic Science and Technology, 2008, 121(4): 26-29.

[30] 林金洪, 黄运龙. 洪屏抽水蓄能电站工程区主要工程地质问题及处理措施[C]//中国地质学会. 2018年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2018: 572-580.
LIN Jinhong, HUANG Yunlong. Main engineering geological problems and treatment measures in Hongping pumped storage power station project area[C]//Geological Society of China. Proceedings of National Engineering Geology Conference 2018. Beijing: Science Press, 2018: 572-580.

[31] 蔡鹤鸣. 泰安一级抽水蓄能电站工程简介[J]. 山东电力技术, 1995(4): 1-3, 7.
CAI Heming. The project of Taian pumped storage power station[J]. Shandong Electric Power, 1995(4): 1-3, 7.

[32] 唐文华. 高水头调节性能较好的遥桥峪和抚宁抽水蓄能电站[C]//中国水力发电工程学会2003年抽水蓄能学术年会论文集, 2003.

[33] Katsaprakakis D A, Christakis D G, Stefanakis I, Spanos P, Stefanakis N. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems[J]. Energy, 2013, 55: 619-630.

[34] Jiang Z G, Zhang H. Sutherland J W. Development of multi-criteria decision making model for remanufacturing technology portfolio selection[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(17-18): 1939–1945.

[35] 梁海波, 谷兆祺. 抽水蓄能电站站址选择的探讨[J]. 红水河, 1996, 15(1): 10-12.
LIANG Haibo, GU Zhaoqi. Research on selection of project site for pumped storage power plant[J]. Hongshui River, 1996, 15(1): 10-12.

[36] 洪增林, 徐通, 薛旭平. 基于AHP的地质遗迹旅游资源评价: 以汉中天坑群为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(2): 276-280.
HONG Zenglin, XU Tong, XUE Xuping. Evaluation of geological relics tourism resources based on AHP: An example of the Hanzhong Tiankeng group[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(2): 276-280.

[37] 王惠文, 付凌晖. PLS路径模型在建立综合评价指数中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(10): 80-85.
WANG Huiwen, FU Linghui. The application research of partial least square path modeling on establishing synthesis evaluation index[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(10): 80-85.

Evaluation system for the suitability of reservoir construction for pumped storage and optimization of its site selection in karst depressions

ZHANG Tao[1], ZUO Shuangying[1,2], SHEN Chunyong[3], ZHENG Kexun[3], CHEN Shiwan[1,2], ZHANG Qing[1], LEI Lin[2], WU Zongqin[2]

(1. *Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Guizhou University, Ministry of Education, Guiyang, Guizhou* 500025, *China*;
2. *College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*;
3. *Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou* 550081, *China*)

Abstract In the planning policy on modern energy system in China's "14th Five-Year Plan", it is proposed to accelerate the improvement of system for energy production, supply, storage and marketing, and to promote the large-scale and high-proportion development of renewable energy, so as to achieve the goal of "carbon peaking and carbon neutralization". Pumped storage is currently recognized as the most mature, reliable, clean and economical means of energy storage. However, the site selection is imminent in order to construct power stations for pumped storage. Taking Guizhou Province as an example, the current planning of site selection and the construction technology of power stations for pumped storage are seldom studied. Karst is distributed in more than 77% of Guizhou's land area, with the peak-cluster depression as the main geomorphological type. As a kind of natural negative terrain, the peak-cluster depression has hardly been excavated. But its excellent surrounding sealing, and wonderful geometric and engineering characteristics can save much investment in excavation support. Thus, the peak-cluster depression is an ideal place for building a reservoir. Taking the karst depression as a research object, this study focuses on the practical engineering problem of building a power station for pumped storage in the karst depression. The factors and their degrees affecting the suitability of reservoir construction in the depression are obviously different in different regions; therefore, some typical factors can only be selected as the evaluation indicators. These factors involve those having an important impact on the stability of the reservoir area, the leakage problem and the benefit of reservoir construction.

In this study, samples of karst depressions were automatically extracted, and the attribute analysis and calculation were carried out based on DEM data and ArcGIS platform. According to the engineering practice, experts were organized to discuss and score so as to determine the influence factors of the evaluation model. Then the evaluation was conducted respectively in terms of terrain conditions, geological conditions, engineering conditions, environmental conditions, etc. The model of fuzzy comprehensive evaluation and the model of partial least square path have been constructed based on the seven key influencing factors of the decision-making of reservoir construction, including slope, reservoir capacity, petrofabric type, fault, hydrogeology, vertical distance between the upper and lower reservoirs and the ratio of distance to height. Taking the red line of ecological protection and the autothermal protection area as controlling variables, 488 candidate depressions in the study area were preliminarily screened and sorted in combination with the geological conditions of the supporting site.

The results show that vertical distance, storage capacity and distance-height ratio play key roles in site selection. The application of GIS map overlay technology can eliminate the infeasible sites limited by environmental factors and the candidate depressions in the eco-environmental protection area. The geological conditions of the proposed lower reservoir and water conveyance power house were considered in the selection of the optimal candidate depressions, which effectively avoided the subjectivity and limitations of decision makers. A total of 6 of the top 10 selected depressions by the two models are consistent. Their good topographic conditions, suitable geological conditions, superior engineering conditions and good consistency indicate strong applicability and high reliability of the evaluation model. The two models are mutually matched. The depression selected is basically consistent with the quantitative standard of the index system, which has been well verified in engineering practice. No.1 depression of Baishui pond is the most suitable for the construction of power station for pumped storage. The research methods and results can further promote the resource utilization of karst depressions.

Key words karst depression, site selection of power station for pumped storage, the method of fuzzy comprehensive evaluation, the model for partial least squares path

（编辑 杨 杨）