

# 抽水蓄能电站岩溶发育特征及渗漏风险勘察研究

周 通 黄洪照 王 锦 罗崇宏

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 湖南 长沙 410000

**摘 要:**抽水蓄能电站作为高水头、大流量循环运行的水电工程,其库盆与输水系统对防渗要求极为严苛。岩溶地层的存在显著加剧了渗漏不确定性,成为制约工程安全与经济效益的核心地质因素。本文系统论述了碳酸盐岩地区抽水蓄能电站岩溶发育的控制因素与空间分异特征,重点剖析了表层岩溶带、深部溶蚀裂隙及管道型岩溶对库水渗漏的差异化影响机制。在此基础上,提出“地质初判—物探扫描—钻探验证—动态监测”四位一体的综合勘察技术体系,并围绕渗漏风险识别、评价与防控策略展开理论探讨。研究强调,岩溶渗漏风险勘察需贯穿工程全生命周期,将地质结构精细刻画与水文动态响应分析紧密结合,以期为复杂岩溶区抽水蓄能电站的选址与设计提供科学依据。

**关键词:**抽水蓄能电站;岩溶发育;渗漏风险;勘察技术;防渗体系

## 引言

抽水蓄能电站凭借其调峰填谷、紧急备用及促进新能源消纳等多重功能,在全球能源转型进程中占据日益重要的战略地位。我国在建与规划抽水蓄能电站数量激增,其中相当比例工程不可避免地选址于西南、华南等碳酸盐岩广泛分布区域。碳酸盐岩的可溶性决定了其在长期水-岩作用下形成独特的岩溶空隙系统,这一系统既可能成为地下水的天然通道,也可能演变为电站运行期不可控的渗漏路径。与常规水电工程不同,抽水蓄能电站具有“上、下双库”格局,且水头高、水位变幅大、水流交替频繁,这些运行特征对岩溶介质的渗透稳定性提出了极为苛刻的要求。

一旦库盆或输水隧洞穿越强岩溶发育带,轻则加剧水量损失、降低循环效率,重则引发库岸塌陷、隧洞涌水甚至结构失稳等重大灾害。然而,岩溶发育的非均质性、隐蔽性和尺度效应使得传统勘察手段往往难以全面揭示其空间展布规律,渗漏风险评价因而而长期面临“看不透、判不准”的困境。近年来,随着高精度地球物理勘探、钻孔电视成像及示踪试验等技术进步,岩溶勘察已从单一地质测绘向多源信息融合方向演进。但现有研究多聚焦于单一工程个案的经验总结,缺乏对岩溶发育与渗漏风险之间内在关联机制的系统性理论归纳。本文试图从岩溶动力系统角度出发,梳理抽水蓄能电站环境下岩溶发育的特征规律,剖析不同岩溶形态对渗漏风险的贡献差异,进而构建适应于工程勘察实践的风险识别与评价框架,以期为同类工程提供参照。

## 1 岩溶发育的地质基础与动力条件

### 1.1 岩性组合与可溶性差异

岩溶发育的物质基础取决于碳酸盐岩的纯度、结构及层间组合。质纯厚层石灰岩( $\text{CaCO}_3$ 含量 $>90\%$ )溶蚀速率最高,而白云岩及泥质灰岩因溶解度降低或非可溶组分阻隔,岩溶强度显著减弱。抽水蓄能电站库区往往跨越多个地层单元,岩性非均质性导致岩溶发育呈现强烈的层控特征——厚层纯灰岩段易形成大规模溶洞和管道,而薄层泥灰岩或页岩夹层则构成相对隔水层,既限制垂向溶蚀深度,又为地下水径流提供侧向分流界面。

### 1.2 构造作用与裂隙网络

构造断裂与节理系统是岩溶发育的首要控制性通道。区域褶皱轴部、断层破碎带及共轭剪节理密集区,因岩石破裂程度高、水岩接触面积大,往往成为岩溶优先发育带。尤其张性断层和层间错动带,其开度大、连通性好,为地下水循环提供了高效路径,促使溶蚀作用沿断裂带呈线状快速推进,形成串珠状溶洞或暗河系统<sup>[1]</sup>。需指出的是,并非所有构造带均等价于高渗漏风险带——若断裂带后期被方解石或粘土充填,其导水性可能大幅降低,因此须结合充填物性质与胶结程度综合判别。

### 1.3 水动力循环与溶蚀时效

岩溶发育是水-岩相互作用的时间累积结果。区域侵蚀基准面控制着垂向溶蚀的下限,而地下水水力梯度则决定溶蚀速率。抽水蓄能电站选址区通常地形起伏较大,高差带来的强水力梯度加速了地下水深循环,促使溶蚀作用向深部延伸,形成埋深达数百米的深部岩溶系统。此外,气候演变导致的古水文条件变化(如更新世湿润期与干旱期交替)使得岩溶发育具有多期次叠加特

征,浅表古老溶蚀面与深部年轻溶洞共存,极大增加了勘察识别的复杂性。

## 2 抽水蓄能电站岩溶发育的空间分异特征

### 2.1 表层岩溶带及其扰动效应

表层岩溶带是指地表以下数米至数十米范围内、受大气降水和土壤  $\text{CO}_2$  强烈影响的溶蚀活跃层,以溶沟、溶槽、溶蚀洼地及小型溶穴为主要形态。该带在抽水蓄能电站中的特殊意义在于:上水库库盆多位于山脊或台地,地表覆盖层薄,表层岩溶带直接暴露于库水浸润区。在频繁的水位涨落条件下,表层溶隙内的充填物易被冲刷掏空,诱发库底不均匀沉降或局部塌陷,形成集中渗漏点。更关键的是,表层岩溶带与下部深部岩溶系统之间往往通过垂直溶蚀通道(落水洞、竖井)相连,使其成为深部渗漏的“入口”。

### 2.2 深部隐伏岩溶的非规则展布

深部岩溶(埋深大于 50m)以溶蚀裂隙、层间溶洞及管道型暗河为主,其发育具有极强的随机性。在抽水蓄能电站中,输水系统(包括引水隧洞、调压井及高压管道)常需穿越深部岩溶发育层位。隐伏溶洞的规模可从厘米级溶孔到数十米级洞厅不等,且其空间形态极不规则,常规钻探的“一孔之见”难以覆盖其真实边界<sup>[2]</sup>。尤其值得注意的是,深部岩溶往往与区域主含水层连通,若输水隧洞意外揭穿高压含水溶洞,可能引发灾难性涌水,且排水降压过程又可能诱发地面沉降链式反应。

### 2.3 水位波动带内的岩溶动态演化

抽水蓄能电站运行导致库水位在死水位与正常蓄水位之间周期性变动,由此形成的“消落带”内水力梯度方向频繁转换。这一动态水环境对岩溶发育具有双重效应:一方面,水位升降加速了溶隙内水-岩化学作用与机械冲刷,使原有溶蚀通道进一步拓宽;另一方面,水压力周期性变化可能松动裂隙填充物,改变局部渗透系数。这种动态演化使得渗漏风险不再是静态地质属性,而呈现出时变特征,对勘察数据的时效性和监测频率提出了更高要求。

## 3 岩溶渗漏风险的成因机制与类型划分

### 3.1 渗漏通道的三种基本模式

基于岩溶空隙形态与连通方式,可将渗漏通道归纳为三种基本模式:①裂隙型渗漏——以构造节理、层理及非溶蚀裂隙为路径,渗透性相对均匀,但裂隙网络发育时亦能形成区域性渗流;②管道型渗漏——以溶洞、

暗河为集中通道,水流速度快、流量大,属于高危害性渗漏,往往导致库水直接外泄至邻谷或下游;③孔隙-裂隙复合型渗漏——岩溶角砾岩或溶蚀破碎带内细孔与微裂隙并存,渗透性呈双峰分布,其渗漏行为兼具达西流与非达西流特征,数值模拟难度较大。

### 3.2 渗漏风险的三级评价框架

本文提出从“可能性—连通性—危害性”三个维度构建渗漏风险分级体系。可能性评价侧重于岩溶发育强度,通过单位钻孔见洞率、物探波速异常区分布等指标,判断岩溶发育程度等级。连通性评价则关注岩溶系统与库盆、输水线路的空间交切关系,需结合水文地质试验(压水试验、示踪试验)确定渗透系数与优势流向。危害性评价需综合考量渗漏量对电站经济性影响、库岸稳定敏感性 & 下游生态基流保障要求<sup>[3]</sup>。三级叠加后可将风险划为低、中、高、极高四个等级,对应不同勘察深度与防渗设计标准。

### 3.3 时间维度上的风险演化

值得强调的是,岩溶渗漏风险在电站运行期并非恒定不变。长期水力循环可能导致:(a)溶隙内充填物的渐进式迁移,使渗透路径逐渐“自净化”或“自堵塞”;(b)水化学侵蚀降低岩体力学强度,诱发生成裂隙,形成“水力劈裂—溶蚀加剧”正反馈;(c)地震或水压波动触发古溶洞顶板塌陷,突然贯通新的渗漏通道。因此,风险评价必须嵌入时间变量,建立基于长期监测数据的动态预警机制,而非仅依赖施工前的静态勘察结论。

## 4 面向渗漏风险的综合勘察技术体系

### 4.1 地质初判与遥感解译

勘察首要环节在于区域地质背景的系统梳理。利用高分辨率遥感影像与数字高程模型(DEM),可快速识别线性构造、环形洼地、暗河天窗等地貌标志,初步圈定岩溶敏感区。配合区域水文地质图件分析,推断地下水系统边界与排泄基准面,为后续精细勘察提供靶区聚焦依据。该阶段虽精度有限,但对控制勘察成本、避免盲目布孔具有重要战略意义。

### 4.2 地球物理探测的多尺度组合

鉴于岩溶目标体的尺度跨度极大,单一物探方法难以全面覆盖。本文推荐“面—线—点”多尺度组合策略:首先采用大地电磁法(MT)或可控源音频大地电磁法(CSAMT)进行大面积扫面,识别深部电性差异带;在此基础上,沿重点剖面布设高密度电阻率法或地震反射法,对可疑异常进行二维定位;最后在关键点位采用

跨孔地震 CT 或孔内雷达, 实现溶洞边界的精细刻画。需注意, 物探解译的多解性必须通过地质约束予以削弱, 即将已知钻孔岩性信息作为反演初始模型。

#### 4.3 钻探验证与原位测试

钻探仍是确认岩溶存在性的最直接手段, 但其有效性依赖合理布孔原则。建议遵循“先外围后中心、先疏后密、异常加密”的动态设计理念, 并在钻进过程中全程开展孔内电视成像和声波测井, 以获取裂隙产状、溶洞充填率及岩体完整性指数 (RQD) 等定量参数<sup>[4]</sup>。原位压水试验和示踪试验至关重要——前者提供岩体透水率的空间分布, 后者通过投放荧光或盐类示踪剂, 追踪地下水实际流向与流速, 对判断库区与邻谷之间的水力联系具有不可替代的价值。

#### 4.4 动态监测与反馈分析

勘察不应止于施工前, 而应延伸至运行期。建议建立包含孔隙水压力计、渗压计、流量计及多通道自动采集系统的长期监测网络, 实时捕捉库水位变化下的渗流场响应。通过定期分析监测数据与初始勘察参数的差异, 反演修正岩溶介质渗透参数, 形成“勘察—设计—施工—运行”闭环反馈。这种动态勘察理念不仅能及时发现潜在风险, 还可为后期补强灌浆或帷幕加深提供精确位置指导。

### 5 防渗策略与勘察成果的工程衔接

#### 5.1 避让与改造的优先级权衡

岩溶区电站选址的首选原则应是“避重就轻”——尽可能将库盆和输水线路布置于岩溶发育相对微弱或隔水层连续的地段。当无法避让时, 则需对岩溶通道进行工程改造, 包括开挖回填、混凝土塞封堵、高压灌浆帷幕等。勘察成果必须明确提供可灌性评价 (即裂隙开度、充填物粒度与灌浆材料匹配性), 否则防渗设计将失去靶向性。

#### 5.2 分层防渗体系的构建逻辑

针对岩溶垂向分带性, 建议采用“表层铺盖—中层帷幕—深部排水”的立体防渗模式。表层以土工膜或混凝土面板阻断大气降水入渗及表层溶隙吸水; 中层以水泥-化学复合灌浆形成连续帷幕, 切断深部岩溶与库水之间的水力联系; 深部则设置排水廊道以释放承压水头, 降低作用在帷幕上的渗透压力。勘察工作需为每一层位

提供准确的渗透性分区图和临界水力梯度值, 这是确保防渗体系经济合理与安全可靠的关键衔接点。

#### 5.3 勘察不确定性的工程容差设计

即便采用最先进的勘察技术, 岩溶系统的固有随机性仍导致一定程度的剩余不确定性。工程设计中应引入容差概念, 即在预测渗漏量的基础上乘以适当的安全系数 (建议 1.5~3.0, 视岩溶复杂程度而定), 并预留补灌孔位和应急排水能力。勘察报告最终应给出定量的不确定性区间, 而非单一数值, 以供设计人员采用分位数法进行风险决策。

### 6 结语

岩溶发育是地质历史与水动力条件耦合作用的产物, 其在抽水蓄能电站中的渗漏风险源于空隙介质的强非均质性、隐蔽性及水力动态响应复杂性。本文通过系统解析岩溶发育的控制因素与空间分异规律, 明确了表层溶蚀带、深部隐伏洞穴及管道系统对库盆和输水系统的差异化致灾机制, 指出渗漏风险评价必须兼顾“结构连通性”与“水力响应时变”两大核心要素。所提出的综合勘察技术体系强调多方法递进融合与全过程动态反馈, 能够有效提升岩溶空间刻画精度和风险判识可靠性。展望未来, 随着物联网与人工智能技术的渗透, 岩溶渗漏风险勘察将逐步向智能监测与数字孪生方向演进——通过构建高精度地质模型并实时注入监测数据, 实现渗漏风险的虚拟预报和预案优化。然而, 无论技术如何进步, 对岩溶发育基本规律的地质认知始终是风险防控的基石, 只有在深刻理解岩溶动力系统内在逻辑的基础上, 勘察工作才能真正做到有的放矢、防患于未然。

### 参考文献

- [1] 张世殊, 吴章雷, 王仁坤. 复杂岩溶区水电工程渗漏勘察与评价方法研究进展 [J]. 水利学报, 2022, 53(4): 411-423.
- [2] 李华, 陈志宇, 刘建军. 碳酸盐岩深部溶蚀裂隙的地球物理响应特征及识别标志 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(2): 756-767.
- [3] 王浩, 杨天明, 郑克勋. 抽水蓄能电站库盆岩溶渗漏风险评价指标体系构建 [J]. 水力发电学报, 2024, 43(1): 89-98.
- [4] 陈德基, 周洪波, 黄振伟. 岩溶管道型渗漏的示踪试验解析与数值反演 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 45-54.