

丁瑜,甘伟琪,冯磊,等. 秦岭某抽蓄电站水库区岩溶发育特征及透水性研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 70-78.

DOI: 10.11932/karst20250105

# 秦岭某抽蓄电站水库区岩溶发育特征及透水性研究

丁瑜<sup>1</sup>,甘伟琪<sup>1</sup>,冯磊<sup>2</sup>,颜英军<sup>2</sup>,马飞鹏<sup>2</sup>

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北宜昌 443002;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西西安 710065)

**摘要:** 秦岭是我国南北分界线,地形地貌、地质构造复杂,可溶岩分布广泛,岩溶是各项工程建设中无法回避的问题。岩溶发育可能造成水库渗漏,对抽蓄电站水库修建具有制约性影响。文章以陕南秦岭某抽水蓄能水库区灰岩为研究对象,采用钻探、钻孔电视成像及压水试验,对灰岩岩溶发育特征进行分析,结合岩溶发育特征,评价岩体透水性能。结果表明:研究区岩溶发育等级为强烈发育,岩溶裂隙普遍发育。溶洞呈串珠状分布,灰色鲕粒灰岩溶洞最发育,棕红色细晶灰岩次之,泥质灰岩溶洞不发育。研究区岩体透水性能为中等—极强,岩体透水性能与岩溶发育密切相关,平均透水率对数与线岩溶率呈线性关系,中等透水岩体岩溶以弱发育为主,强和极强透水岩体岩溶为中等—强烈发育为主。

**关键词:** 抽水蓄能水库; 溶洞; 岩溶裂隙; 透水性能; 秦岭

**创新点:** (1)通过具体工程场地精细化勘探揭示岩溶发育分布特征;(2)综合岩体完整程度、岩溶发育特征评价岩体透水性,为抽蓄水库设计、渗漏防治及风险评估提供可靠依据。

**中图分类号:** TV697.32; P642.25 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001—4810 (2025) 01—0070—09

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

秦岭山脉起于甘肃,横穿陕西,延伸至河南,是我国南北地理、地质、气候和水文的重要分界线<sup>[1]</sup>。秦岭地区碳酸盐岩广泛分布<sup>[2-3]</sup>,据统计,陕西省碳酸盐岩总面积 5.1 万 km<sup>2</sup>,约占全省国土面积的 10%。秦岭地区山谷落差较大、河网分布密集、降雨充沛,抽水蓄能电站建设条件优越,“十四五”规划拟建多个抽水蓄能电站。工程实例表明,岩溶地区水电工程建设极易产生岩溶渗漏,最终导致水库渗漏<sup>[4-5]</sup>。水库建成后因岩溶渗漏严重无法正常蓄水,不得不追加投资进行治理<sup>[6-8]</sup>。岩溶发育情况对水电工程建设具有制约影响,因此,开展岩溶发育分布与渗透特

性研究十分必要。

岩溶发育受岩性、地质构造、地下水、气候、植被等因素共同影响。由于内外营力条件不同,岩溶发育存在明显的地域差异。总体上,我国南方地区岩溶以裸露型和浅覆盖型为主,发育形态复杂多样且规模普遍较大;北方地区岩溶以埋藏型和覆盖型为主,发育形态相对单一且发育强度低于南方<sup>[9]</sup>。陕南秦岭地处南北分界地带,由于经历多期次隆升构造运动,地质条件复杂<sup>[1-3]</sup>,加之北上暖流、南下寒流以及秦岭山地效应气候特征影响<sup>[10-11]</sup>,岩溶发育复杂、多样。目前,秦岭地区岩溶作用研究仍较为薄弱,有关具体工程场地岩溶特征及其影响的研究报道不多。

由于岩溶发育特征对工程建设具有制约性影响,

第一作者简介:丁瑜(1980—),男,副教授,博士,主要从事地质灾害、生物岩土方面的研究。E-mail: thirdding@163.com。

通信作者:冯磊(1980—),男,高级工程师,主要从事水利水电项目工程地质、水文地质研究与管理工。E-mail: 175530900@qq.com。

收稿日期: 2023—07—18

岩溶精细化勘探是当前岩溶研究的热点和难点<sup>[12]</sup>。除钻探外<sup>[13]</sup>，钻孔电视成像<sup>[14]</sup>、高密度电法<sup>[15]</sup>、探地雷达<sup>[16]</sup>等技术广泛应用于岩溶勘探，多种方法综合应用为岩溶精细化勘探、评价提供了有效途径。鉴于秦岭地区岩溶发育分布的复杂性及其工程建设重要性，本文以某抽水蓄能水库区灰岩为研究对象，利用钻探、钻孔电视成像技术及钻孔压水原位试验，探明研究区岩溶的空间分布特征，基于岩溶空间分布综合评价研究区岩体透水性能，以期为后续水库设计、渗漏防治及风险评估提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

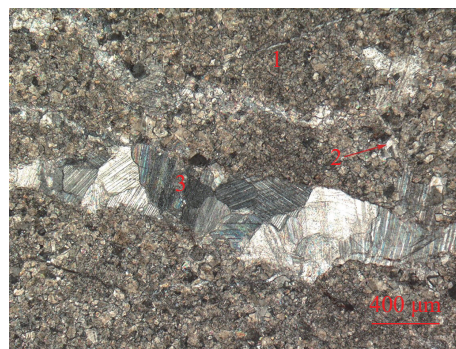
### 1.1 研究区概况

研究区地处华北板块与扬子板块之间的秦岭复合造山带(简称秦岭造山带)之南部。构造运动受秦岭造山带活动制约，断裂构造间断块呈差异性升降运动、并具有继承性的多次活动。岩层内发育宁陕—南宽坪左旋走滑逆断层的分支断层，断层破碎带宽度小于1.5 m，充填泥质物、岩块及岩屑，断面产状NE71°NW∠78°。海拔800~900 m与1 150~1 300 m有两级夷平面。

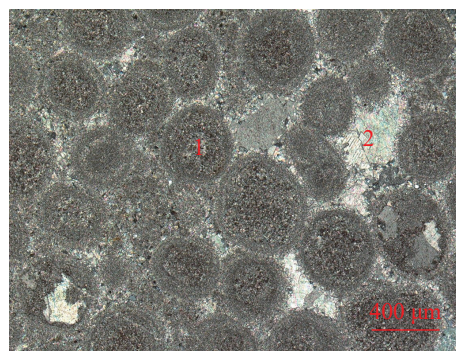
研究区位于某抽蓄电站上水库，三面由低山环绕，总体呈两沟夹一梁的地貌特征。受地质构造及岩性控制，区内山脉、峡谷多沿主体构造线方向展布，形成沟壑纵横、群峰屹立、山势雄伟的中低山地貌形态，海拔600~1 600 m。一般谷坡角度40°~60°，局部为陡崖，坡面土层薄，多生长乔木或灌木林。研究区无地表水系发育，地下水为松散岩孔隙水、基岩岩溶水和裂隙水，受降水补给。勘探结果表明研究区稳定地下水水位超过100 m。

### 1.2 岩性特征

研究区基岩为三叠系下统金鸡岭组上段( $T_2j^2$ )棕红色、灰色中—厚层状鲕粒灰岩、泥晶灰岩。经薄片鉴定(图1)，棕红色灰岩为褐铁矿化粉屑细晶灰岩，粉屑泥晶结构、层理构造，粉屑不均匀分布，岩石内部裂隙发育。棕红色泥晶灰岩主要由方解石、粉屑、褐铁矿等组成，滴稀盐酸强烈反应。灰色灰岩为鲕粒灰岩，鲕粒结构、块状构造，鲕粒基本上呈圆粒状，充填方解石，鲕粒含量65%~70%，滴稀盐酸强烈反应。灰白色泥质灰岩为泥晶颗粒结构、块状构造，主要由



细晶灰岩 (1-方解石, 2-白云石, 3-方解石脉)



鲕粒灰岩 (1-方解石鲕粒, 2-方解石亮晶)

图1 典型试样薄片鉴定

Fig. 1 Thin section identification of typical specimens

方解石、白云石、砂屑等组成，滴稀盐酸强烈反应；泥岩为泥质结构，块状构造，主要由黏土矿物、文石组成，滴稀盐酸反应微弱—不反应。

### 1.3 研究方法

岩溶发育具有隐蔽性和复杂性，现场研究需综合多种方法<sup>[17]</sup>。结合场地实际，采用钻探、钻孔电视成像、原位压水试验等方法，分析评价岩溶发育特征及其透水性能。

(1)钻探：在“两横四纵”6个勘探剖面布设钻孔共计17个(图2)。钻孔深度40.20 m(ZK115)至102.90 m(ZK114)，实际钻进进尺共1 294 m。通过双管回转钻探岩芯编录统计，分析灰岩岩溶的发育形态及发育程度，确定岩溶裂隙长度及分布。对于溶洞发育区，在掉钻涌水初判基础上，进一步借助钻孔电视成像准确确定岩溶发育特征。

(2)钻孔电视成像：17个钻孔清孔后，进行钻孔电视成像测试。所用JDS-1钻孔电视成像仪主要由内置LED灯的高清探头、录像机、电脑、控制器等组成。采用高清探头全孔摄像，通过提取孔壁图像，准确判断孔内溶洞(隙)尺寸、分布情况。

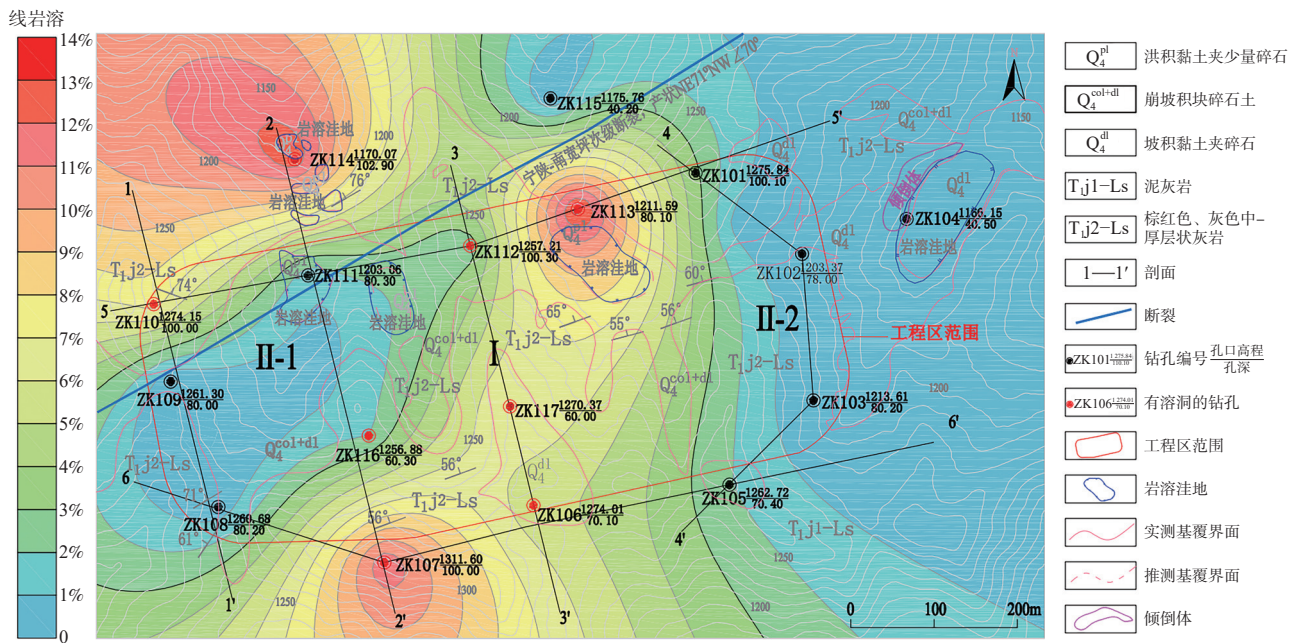


图 2 研究区钻孔、剖面示意图

Fig. 2 Diagram of the boreholes and the profiles of the study area

(3) 钻孔压水试验: 按三级压力 ( $P_1=0.3$  MPa,  $P_2=0.6$  MPa,  $P_3=1$  MPa) 五个阶段 ( $P_1$ - $P_2$ - $P_3$ - $P_2$ - $P_1$ ) 进行压水试验。压水试验每段测试长度 5 m, 共计 205 段。根据压水试验, 测得各钻孔岩体分段透水率。结合钻孔岩溶分布, 综合评价研究区岩体透水性能。对于最大试验压力无法达到, 测试无法正常进行的部分测段, 视为极强透水段。

## 2 岩溶发育分布特征

### 2.1 地表岩溶特征

研究区地表可见溶隙、溶蚀宽缝、峰丛、洼地等岩溶地貌。峰丛裸露的岩石发育溶沟石芽, 继承构造裂隙的溶蚀裂缝发育, 通常充填黄色黏土。此外, 工程区内发育 3 个岩溶洼地(图 3)。

### 2.2 地下岩溶发育特征

研究区地下岩溶形态主要为岩溶裂隙、溶孔、溶坑、溶洞(隙)。其中, 溶孔、溶坑直径多在 0.1~2.0 cm, 发育较弱且分布不广, 对岩体透水性及渗漏影响微弱。

#### 2.2.1 岩溶裂隙

钻孔揭露, 研究区岩溶裂隙普遍发育, 可分为节理溶蚀裂隙和溶蚀裂隙带两种类型。节理溶蚀裂隙



图 3 研究区地表岩溶洼地

Fig. 3 Surface karst depressions in the study area

由分散的构造节理溶蚀扩大、发展而成, 宽约数毫米。节理溶蚀裂隙流水侵蚀痕迹明显, 多有充填, 充填物主要以黏土、钙质或碎屑。区内发育 3 组优势节理溶蚀裂隙: 最发育一组, 产状  $NE75^{\circ}\sim 87^{\circ}NW \angle 55^{\circ}\sim 66^{\circ}$ , 裂隙平直—粗糙, 宽度 0.1~0.5 cm, 延伸长 5~15 m, 间距 0.2~0.4 m; 次发育一组, 产状  $NE35^{\circ}\sim 50^{\circ}NW \angle 50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ , 裂隙平直或略起伏, 裂隙宽度 0.1~0.5 cm, 黏土、钙质或碎屑充填, 延伸长 5~20 m, 间距 0.3~0.5 m; 中等发育一组, 产状  $NW291^{\circ}\sim 356^{\circ}SW \angle 15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ , 宽度 0.1~0.2 cm, 充填岩屑、黏土和泥钙质薄膜, 延伸长 10~15 m, 间距  $>0.3$  m。

溶蚀裂隙带沿岩体断层带或裂隙密集带发育, 为原有裂隙随溶蚀扩大而成。溶蚀裂隙带延伸长数十厘米至数米不等, 多见泥质、钙质和方解石充填。

## 2.2.2 溶洞

勘探表明 ZK106、ZK107、ZK110、ZK112、ZK113、ZK114、ZK116、ZK117 等 8 个钻孔发育溶洞, 数量分别为 4 个、7 个、3 个、1 个、7 个、5 个、2 个、3 个, 共计 32 个。钻孔揭露溶洞高 0.2~6.8 m 不等, 约三分之二溶洞无填充, 其余半充填或全充填岩块、岩屑及泥质(图 4)。

(1) 水平分布: 以线岩溶率 3% 等值线为界, 研究

区可分为 I、II (II-1、II-2 区) 两个岩溶区。I 区岩溶强烈—中等发育, 该区钻孔揭露溶洞相对集中; II 区岩溶弱发育, 该区钻孔少见溶洞。溶洞发育集中在 2-2'、3-3'、5-5' 三个剖面, 各有 3 个钻孔揭露溶洞, 数量分别为 14 个、8 个和 11 个。

(2) 垂直分布: 溶洞埋深主要分布在地下 10~60 m 之间。在此区间溶洞达 21 个, 占总溶洞数的 65.6%, 为典型的浅埋藏型溶洞。此外, 钻孔溶洞分

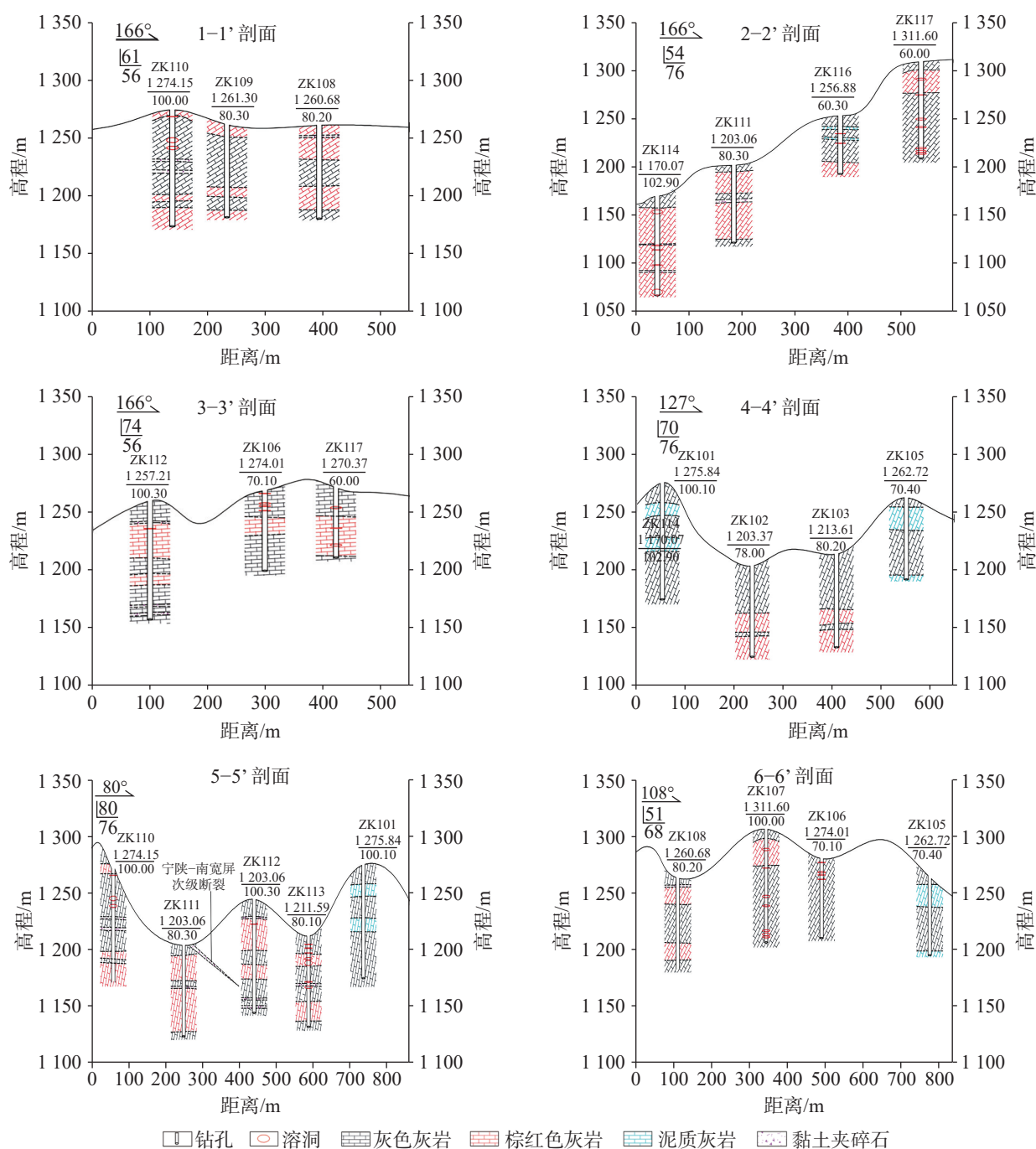


图4 钻探剖面溶洞分布

Fig. 4 Distribution of karst caves for each drilling profile

布多呈串珠状,以 ZK107 和 ZK113 最为突出,单孔垂直揭露 7 个溶洞。分析可知,细晶灰岩、鲕粒灰岩可溶性较强,而泥质、泥质灰岩夹层可溶性极弱,串珠状溶洞主要受岩性控制。

(3)岩层分布特征:不同灰岩岩层中溶洞发育差异明显(图 4)。灰色鲕粒灰岩中溶洞最发育,溶洞数达 21 个,占总溶洞数的 65.6%;棕红色泥晶灰岩中发育溶洞 11 个,泥质灰岩中无溶洞发育。研究表明,溶洞发育分布与灰岩可溶性规律一致。

### 2.3 岩溶发育等级

表征地下岩溶特征的线岩溶率、遇洞隙率是评价工程场地岩溶发育等级的两个主要指标<sup>[18]</sup>。线岩溶率为钻孔所遇洞隙长度与可溶岩钻孔进尺之比,而遇洞隙率为遇岩溶洞隙的钻孔与钻孔总数之比。本文中,根据洞隙长度(溶洞长度和直径大于 10 mm 的溶蚀孔隙长度)计算得到线岩溶率(图 1)。

计算表明研究区线岩溶率 $>10\%$ 的钻孔数为 3 个,遇洞隙率为 47.1%。根据《水电工程岩溶工程地质勘察规程》<sup>[18]</sup>,综合线岩溶率、遇洞隙率,研究区场地岩溶发育等级整体为强烈发育。研究区 I 区岩溶强烈—中等发育,II 区岩溶为弱发育,岩溶发育呈中部强、两侧弱发育的特征。

## 3 岩体透水性评价

### 3.1 钻孔岩体透水性分类

根据钻探和压水试验,得到钻孔每 5 m 孔段的岩溶裂隙率和透水率。参考线岩溶率定义,岩溶裂隙率按岩溶裂隙发育长度与岩芯长度之比计算,得到每 5 m 测段及钻孔的平均岩溶裂隙率(图 5)。

压水试验测试显示,钻孔岩体透水率  $q$  在 14~9 830 Lu 之间变化,差异极大。参照文献<sup>[19]</sup>,岩体透水性能可划分为弱透水( $0 < q \leq 10$  Lu)、中等透水( $10 < q \leq 100$  Lu)、强透水( $100 < q \leq 1\,000$  Lu)、极强透水( $q > 1\,000$  Lu)。为便于对比,将透水率以对数表示,则各钻孔岩体透水性能分级如图 5。测试结果表明,研究区无弱透水岩体,岩体透水性为中等—极强透水,具体如下:

ZK101、ZK108、ZK110、ZK111、ZK112、ZK114、ZK116 等 7 个钻孔岩体透水率在 19.3~99.2 Lu,岩体透水性中等。其中,ZK101、ZK108、ZK111、ZK112、

ZK116 岩溶弱发育,仅 ZK112 和 ZK116 发育溶洞,线岩溶率分别为 2.38% 和 1.93%,岩溶裂隙率分别为 61.12% 和 3.32%,不发育溶洞的钻孔岩溶裂隙率均在 20% 以上;其余两个钻孔岩溶发育皆较强,以 ZK114 为最,达到强烈发育等级,线岩溶率为 12.76%,岩溶裂隙率为 45.19%,其次为 ZK110,属岩溶中等发育,线岩溶率为 7.42%,岩溶裂隙率为 15.60%。在透水性中等的钻孔中,岩溶发育程度总体较低,以弱发育为主。

ZK107 岩体透水率在 100.7~211.2 Lu 之间,岩体透水性强,岩溶强烈发育,线岩溶率为 11.47%,岩溶裂隙率为 22.60%。

ZK102、ZK103、ZK106、ZK113、ZK117 等 5 个钻孔透水率在 2 430~9 830 Lu 之间,钻孔各测段渗漏量极大;ZK105 透水率在 66~4 070 Lu 之间,在多段发生突变。这 6 个钻孔岩体透水性极强,其中,ZK102、ZK103、ZK105 岩溶弱发育,溶洞不发育,岩溶裂隙率分别为 20.90%、9.32% 和 11.88%。另外 3 个钻孔中,ZK113 溶洞发育最强烈,线岩溶率为 13.58%,其次是 ZK117 和 ZK106,分别为 7.17% 和 5.18%。在强和极强透水的钻孔中,岩溶发育程度总体较高,以中等—强发育为主。

### 3.2 岩体透水性能与岩溶发育特征相互关系

分析研究区岩体透水性能与岩溶发育相互关系发现,平均透水率对数( $\lg(q)$ )与线岩溶率呈线性趋势(图 6),即

$$\lg(q) = A \cdot R_k + B \quad (1)$$

式中: $R_k$  为线岩溶率; $A$  为岩溶发育对透水性能的影响系数;常数  $B$  取决于岩体完整程度。图中数据点偏离拟合线,表明除完整程度、岩溶发育特征外,充填特征也是影响岩体透水性能的重要原因。总体上,研究区岩体透水性能受岩溶发育特征、岩体完整程度、充填特征共同影响。

#### 3.2.1 岩溶发育强度的影响

研究区岩溶发育强度是影响岩体透水性能的关键因素。随着线岩溶率的增大,岩体透水率随之增大的线性趋势明显。对比发现,岩溶弱发育的 8 个钻孔中,5 个为透水性能中等;岩溶中等和强烈发育的 6 个钻孔中,4 个为强或极强透水。整体呈岩溶越发育,岩体透水性越强规律。图 6 中,比例系数  $A$  反

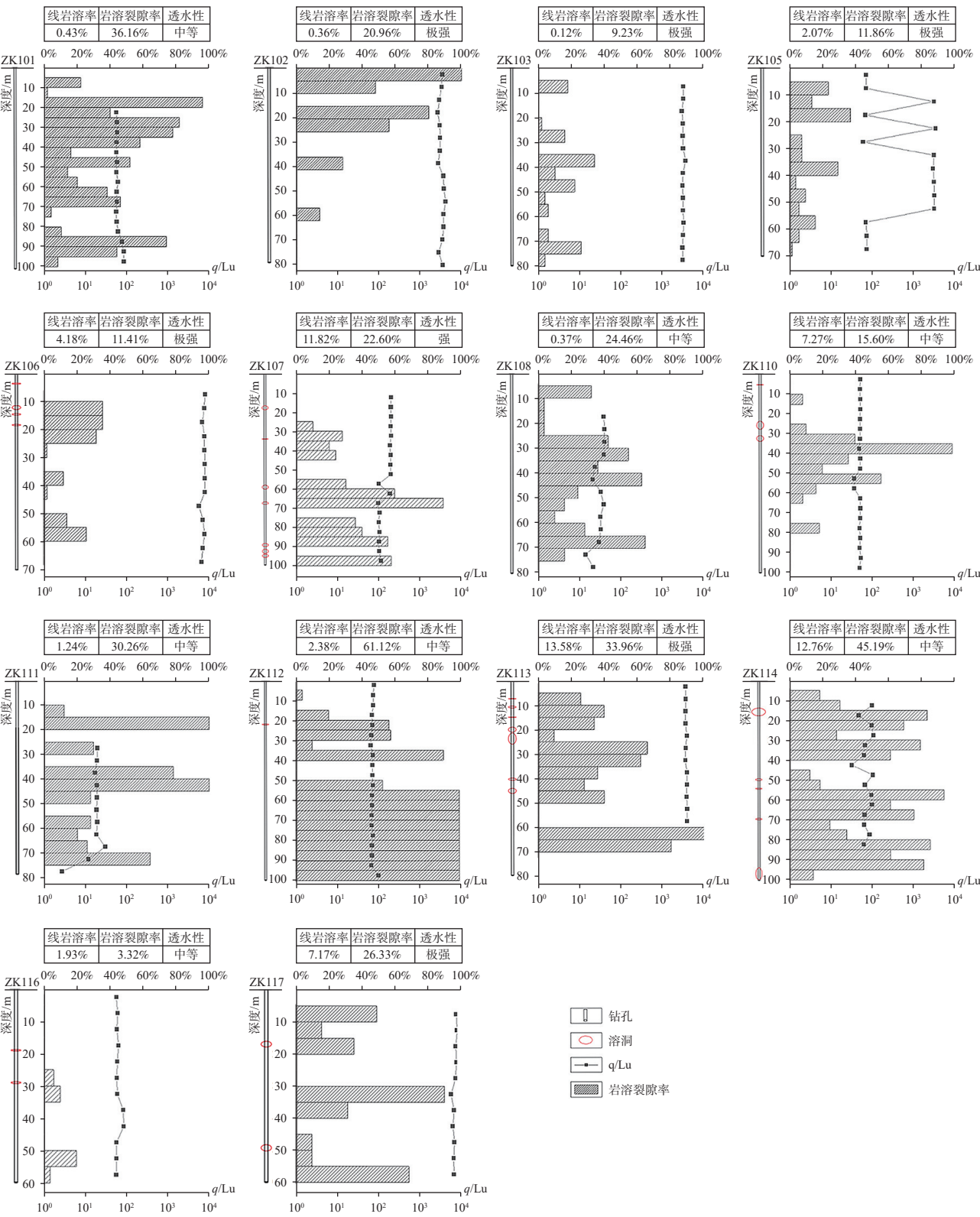


图 5 钻孔岩溶裂隙及吕荣值

Fig. 5 Karst fissures of boreholes and their Lugeon values

映了岩溶发育对岩体透水性性能的影响。经计算, A 取值为 3.39。

3.2.2 岩体完整程度的影响

研究区岩体完整具体可划分为较完整、较破碎、

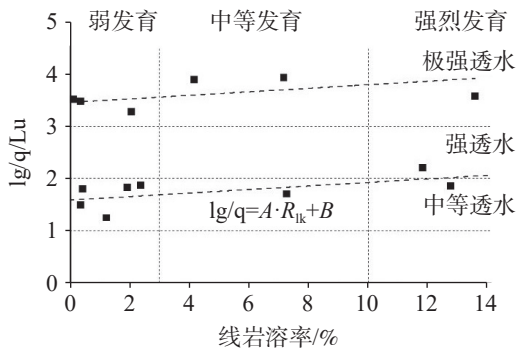


图6 线岩溶率与对数平均透水率相关关系

Fig. 6 Correlation between linear karstification rate and log-mean permeability

破碎三类。结合图6, 岩体完整程度对透水性能的影响总体可分为两种情况: 较完整岩体, 呈中等~强透水, 常数B为1.58; 较破碎、破碎岩体, 呈极强透水, 常数B为3.46。在较破碎(ZK105、ZK106、ZK117)、破碎(ZK102、ZK103)岩体中, 孔壁张开型裂缝密集发育, 长达数十厘米, 缝宽10~100 mm不等。岩体破碎及张开型裂缝发育是导致其整孔极大透水的主要原因。

### 3.2.3 充填特征的影响

分析认为, 透水率偏离拟合线起伏波动, 主要与原生裂隙、岩溶洞隙的充填特征有关。总体上, 原生裂隙及岩溶洞隙无充填时, 透水率偏高; 溶洞隙密实充填(如ZK111), 透水率则有明显降低。

## 4 结论与建议

(1) 研究区岩溶发育等级为强烈发育, 钻探揭露岩溶裂隙普遍发育, 8个钻孔揭露溶洞, 呈串珠状分布, 灰色鲕粒灰岩岩溶最强, 棕红色细晶灰岩次之, 泥质灰岩岩溶不发育。

(2) 研究区岩体透水性能受岩溶发育特征、岩体完整程度、充填特征共同影响, 平均透水率对数( $\text{Log}_{10}q$ )与线岩溶率呈线性趋势, 中等透水岩体, 岩溶以弱发育为主; 强和极强透水岩体, 岩溶以中等—强烈发育为主。

(3) 研究区存在极强透水岩体, 垂直防渗条件较差, 建议采取铺盖防渗。

## 参考文献

[1] 孟庆任. 秦岭的由来[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(4):

412-420.

MENG Qingren. Origin of the Qinling mountains[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(4): 412-420.

[2] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. 中国岩溶, 1983, 2(2): 147-150.

LI Datong, LUO Yan. Measurement of carbonate rocks distribution area in China[J]. *Carsologica Sinica*, 1983, 2(2): 147-150.

[3] 马守林. 陕南岩溶的初步探讨[J]. 水利水电技术, 1981(8): 19-25.

[4] 杜朋召, 雷春荣, 高平. 东庄水库碳酸盐岩库段岩溶控制因素与发育规律研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 88-92.

DU Pengzhao, LEI Chunrong, GAO Ping. Research on controlling factors and development rules of karst in carbonate rocks of Dongzhuang reservoir[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(3): 88-92.

[5] 段乔文, 俞富有, 张天柏, 何伟, 段春林. 滇东高原罗平湾子水库岩溶渗漏机理及库外补漏设想[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 287-297.

DUAN Qiaowen, YU Fuyu, ZHANG Tianbai, HE Wei, DUAN Chunlin. Karst leakage and its sealing at Wanzi reservoir in Luoping county on the plateau of eastern Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 287-297.

[6] 代志宏, 朱银红, 卢鹏, 李正顺, 赵锡荣. 非典型隐伏岩溶发育特征及渗漏研究: 以大雪山水库为例[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(3): 518-524.

DAI Zhihong, ZHU Yinhong, LU Peng, LI Zhengshun, ZHAO Xirong. Development characteristics and leakage of atypical concealed karst: Taking Daxueshan reservoir as an example[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2021, 41(3): 518-524.

[7] 刘天云, 罗锐恒, 胡顺强, 赵永宾, 潘晓东, 刘伟. 文山小河尾水库岩溶渗漏水文地质条件与管道位置识别[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 88-99.

LIU Tianyun, LU Ruiheng, HU Shunqiang, ZHAO Yongbin, PAN Xiaodong, LIU Wei. Hydrogeological conditions of karst leakage and identification of pipeline location in Xiaohewei reservoir, Wenshan[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 88-99.

[8] 杜毓超, 李兆林, 唐健生. 湖南新田水浸窝水库渗漏分析及其治理[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 22-26.

DU Yuchao, LI Zhaolin, TANG Jiansheng. Analysis on the leakage mechanism and the treatment method for Shuijinwo reservoir in Xintian county, Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(4): 22-26.

[9] 卢海平, 张发旺, 赵春红, 夏日元, 梁永平, 陈宏峰. 我国南北方岩溶差异[J]. 中国矿业, 2018, 27(Suppl.2): 317-319.

LU Haiping, ZHANG Fawang, ZHAO Chunhong, XIA Riyuan, LIANG Yongping, CHEN Hongfeng. Difference between southern karst and northern karst besides scientific issues that need attention[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(Suppl.2): 317-319.

[10] 董云鹏, 杨钊, 孙圣思, 史小辉, 何登峰, 惠博, 龙晓平, 郭安林. 秦岭隆升过程及其如何控制气候环境[J]. 地球科学, 2022,

- 47(10): 3834-3836.
- [11] 孟清, 白红英, 赵婷, 郭少壮, 齐贵增. 秦岭山地气候变化的地形效应[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 180-189.
- MENG Qing, BAI Hongying, ZHAO Ting, GUO Shaozhuang, QI Guizeng. Topographic characteristic of climate change in the Qinling mountains, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(2): 180-189.
- [12] 何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波. 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究: 以武汉市为例[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 47-56.
- HE Jun, LIU Lei, LI Qinghua, LIU Daohan, CHEN Biaodian, ZHANG Ao, ZHAO Yongbo. Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 47-56.
- [13] 刘动, 林沛元, 陈贤颖, 黄胜, 马保松. 深圳岩溶空间发育规律统计分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1899-1912.
- LIU Dong, LIN Peiyuan, CHEN Xianying, HUANG Sheng, MA Baosong. Statistical analysis of karst spatial distribution in Shenzhen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1899-1912.
- [14] 彭耀, 樊永生, 徐联泽, 刘基强, 董艳平. 钻孔电视成像在武汉地铁岩溶勘察中的应用[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 134-136.
- PENG Yao, FAN Yongsheng, XU Lianze, LIU Jiqiang, DONG Yanping. Application of borehole TV imaging in the karst survey of Wuhan metro[J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(1): 134-136.
- [15] 王喜迁, 孙明国, 张皓, 江玉乐. 高密度电法在岩溶探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 72-75.
- WANG Xiqian, SUN Mingguo, ZHANG Hao, JIANG Yule. Application of high-density electrical technique in karst detection[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 72-75.
- [16] 王亮, 李正文, 王绪本. 地质雷达探测岩溶洞穴物理模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 87(1): 280-283.
- WANG Liang, LI Zhengwen, WANG Xuben. A study of geological radar to cavern detection and physical analogue[J]. Progress in Geophysics, 2008, 87(1): 280-283.
- [17] 冯涛, 蒋良文, 曹化平, 王栋. 高铁复杂岩溶“空天地”一体化综合勘察技术[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(6): 1-6.
- FENG Tao, JIANG Liangwen, CAO Huaping, WANG Dong. Research on the integrated survey technical system of "space-air-ground" in complex karst area of high speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(6): 1-6.
- [18] 国家能源局. NB/T 10075-2018 水电工程岩溶工程地质勘察规程[S].
- National Energy Administration. NB/T 10075-2018 Specification for karst engineering geological investigation of hydropower projects[S].
- [19] 杨志斌, 董书宁. 压水试验定量评价单孔注浆效果影响因素分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(6): 187-194.
- YANG Zhibin, DONG Shuning. Influence factors analysis of quantitative evaluation of single borehole grouting effect by water pressure test[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(6): 187-194.

## Study on karst development characteristics and water permeability of a pumped-storage upper reservoir in the Qinling Mountains, Southern Shaanxi

DING Yu<sup>1</sup>, GAN Weiqi<sup>1</sup>, FENG Lei<sup>2</sup>, YAN Yingjun<sup>2</sup>, MA Feipeng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract** China has a vast territory, with significant differences of internal and external forces such as lithology, geological structure, and climate in different regions, resulting in distinct regional characteristics in karst development. The Qinling Mountains is the north-south demarcation line in China, with complex topography, geological structure, and widespread distribution of soluble rocks. Consequently, karst in this region is an unavoidable problem in the construction of various projects. The development of karst may lead to reservoir leakage, posing a constraining influence on the construction of pumped-storage power station reservoirs. However, the current research on the characteristics of karst development at specific engineering sites in the Qinling area is relatively limited, and there is not much research on the impact of karst development characteristics on the permeability of the rock body in the reservoir areas. To provide a valuable supplement and reference for the study of karst development in the Qinling area, and to establish a reliable foundation for the design of pumped-storage reservoirs, leakage prevention and control, and risk assessment, this study takes limestone of a pumped-storage reservoir located in the Qinling Mountains of southern Shaanxi Province as the research object. Utilizing drilling, borehole TV imaging and in-situ pressure water tests, this study comprehensively evaluates the water permeability performance of the rock body. By integrating the characteristics of karst development, the research summarizes and analyzes the distribution patterns of limestone karst

development in the study area. The permeability of the rock body is evaluated in conjunction with karst development characteristics, leading to the following conclusions:

The linear karstification rate of three boreholes in the study area is greater than 10%, with an encounter rate of 47.1%. This indicates a strong degree of karst development. Using the contour line of 3% karstification rate as the boundary, the study area is divided into two karst zones: Zone I and Zone II which includes Zone II-1 and Zone II-2. The karst in Zone I is strongly to moderately developed, with a relatively high concentration of caves in the borehole area. In contrast, the karst in Zone II is weakly developed, and caves are seldom found in the borehole area. The depth of the karst caves is predominantly distributed between 10 m and 60 m underground, representing a typically shallow-buried karst system. The karst caves are distributed in a moniliform shape, with ZK107 and ZK113 being the most prominent, where seven caves are vertically distributed in a single borehole area. The gray oolitic limestone caves are the most developed, followed by brownish-red fine-crystalline limestone caves, while argillaceous limestone caves are not developed. The development of karst caves is consistent with the solubility pattern of limestone. In addition, the karst fissures are generally developed in all borehole areas, and can be categorized into two types: joint-solution fissures and solution fissure zones. These fissures are commonly filled with mud, calcium and calcite.

Comprehensive analysis shows that the permeability performance of the rock body in the study area is jointly influenced by the karst development characteristics, the integrity of the rock body, and the filling characteristics. The logarithm of the average permeability ( $\lg 10q$ ) exhibits a linear relationship with the linear karstification rate, which is expressed by the equation:  $\lg(q)=A \cdot R_{lk}+B$ , where  $R_{lk}$  denotes the linear karstification rate, and  $A$  and  $B$  are constants. The ratio coefficient  $A$  indicates the influence of karst development on the permeability of the rock body, with a calculated value equal to 3.39. Overall, the rock bodies in the study area demonstrate a pattern whereby the increase of karst development correlates with greater permeability of the rock body. A comparison shows that in moderately permeable rock bodies, karst development is primarily weak. In contrast, in strongly and very strongly permeable rock bodies, karst development is predominantly strong to moderate. The permeability of the rock body exhibits a clear linear trend, correlating with an increase in the linear karstification rate. Constant  $B$  reflects the effect of the integrity degree of the rock body on the permeability performance. Specifically, relatively intact rock bodies exhibit moderate to strong permeability (Constant  $B=1.58$ ), while fractured and broken rock bodies indicate extremely strong permeability (Constant  $B=3.46$ ). In addition, the filling characteristics of protogenesis fissures and karst caves can cause fluctuations in permeability. When the protogenesis fissures and karst caves are not filled, permeability tends to be high; however, when they are densely filled, the permeability will significantly decrease.

**Key words** pumped-storage upper reservoir, karst cave, karst fissure, water permeability, the Qinling Mountains

(编辑 张玲)