

# 三泉水库库区渗漏模式及渗漏强度问题研究

李扭串

(山西省水利水电勘测设计研究院, 山西 太原 030024)

**【摘要】** 三泉水库既是禹门口提水、供水工程的调蓄库,又是古堆泉生态修复工程的主要补给源。本文通过对库区地质勘查、渗漏点调查、水库水文监测资料分析、环境同位素测试、渗水试验以及采用 MODFLOW 数值反演等手段,研究了三泉水库的渗漏区分布、渗漏模式和渗漏强度,建立了渗漏量预测模型,为古堆泉生态修复项目设计与修复效果的数值评估提供了关键技术支撑。

**【关键词】** 古堆泉生态修复;三泉水库;渗漏模式;渗漏强度;预测模型

中图分类号: TV221

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)08-0059-05

## Research on seepage pattern and seepage strength in Sanquan Reservoir area

LI Niuchuan

(Shanxi Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Sanquan Reservoir is a regulation and storage reservoir in Yumenkou water withdrawal and water supply project. It is also an important supply source for Guduiquan Ecological Restoration Project. In the paper, the seepage area distribution, leakage mode and leakage strength of Sanquan Reservoir are studied through reservoir area geological survey, leakage point survey, reservoir hydrological monitoring data analysis, environmental isotope test, water seepage test, MODFLOW numerical inversion and other means. The leakage prediction model was set up, thereby providing key technical support for designing Guduiquan ecological restoration project and numerical evaluation of restoration effect.

**Keywords:** Guduiquan ecological restoration; Sanquan Reservoir; seepage mode; seepage strength; prediction model

### 1 研究背景

三泉水库建成于1957年7月,是一座以防洪、灌溉为主的小(1)型水库,控制流域面积105.2km<sup>2</sup>。大坝为均质土坝,坝高13.2m,坝顶高程449.00m,正常蓄水位447.50m,总库容697万m<sup>3</sup>。2009年建设禹门口提水东扩工程,三泉水库为该工程的调蓄库。古堆泉位于三泉水库的库尾,是山西岩溶大泉中唯一的

低温泉,流量为1.3m<sup>3</sup>/s<sup>[1]</sup>,1999年断流<sup>[2]</sup>,2016年泉口处地下水埋深63.3m,降落漏斗面积近500km<sup>2</sup>。2014年山西省政府启动古堆泉生态复流研究项目,三泉水库既作为禹门口提水东扩工程的调蓄水库,又是古堆泉生态修复的主要人工供水补给源,因此,查清水库的渗漏分区、渗漏模式和渗漏强度是古堆泉生态修复工程设计与修复效果数值评估的关键。

## 2 库区地质条件

据勘察,库区出露的地层主要有:

a. 奥陶系中统上马家沟组( $O_2s$ ):岩性为浅灰、深灰色中厚层状灰岩,局部夹泥质灰岩。灰岩岩性坚硬,厚度大于100m,主要出露于库尾及左岸泉群出露处。

b. 中更新统洪积物( $Q_2^{pl}$ ):为褐黄色、淡红色低液限黏土,厚度大于25.0m,稍湿,中密,局部夹含砂低液限粉土和低液限粉土透镜体,渗透系数 $6.60 \times 10^{-7} \sim 5.07 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ,为弱透水层,主要分布于库区两岸。

c. 上更新统洪冲积物( $Q_3^{pl}$ ):岩性组成为浅黄、棕黄色低液限黏土,厚0.0~4.0m,渗透系数为 $3.50 \times 10^{-6} \sim 4.95 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ,为弱透水层,广泛分布于库区两岸。

d. 全新统洪积物( $Q_4^{pl}$ ):为低液限黏土,厚30.0m左右,局部夹含砂低液限粉土、低液限粉土透镜体,稍密状态,渗透系数为 $4.83 \times 10^{-7} \sim 3.98 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,为微~中等透水层,分布于库区。

## 3 库区渗漏模式分析

### 3.1 库区渗透特征分析

a. 向外水平渗漏。库区及两岸地形高程均高于水库正常蓄水位高程,库岸均为低液限黏土、低液限粉土,为弱透水层,库区两岸没有较低邻谷存在,不存在向外水平渗漏问题。

b. 库区垂直渗漏。库区主要分布第四系全新统冲洪积物低液限黏土,厚0.5~28.0m,局部夹粉土、含砂粉土透镜体,属微~中等透水层,渗透性小。近岸边及基岩部位分布有碎石土层,为坡积或风积层,渗透性大。

三泉水库正常蓄水位447.50m,古堆泉群位于库尾低洼处,由莲花泉、葫芦泉、乱泉组成,出露高程440.00~443.60m,低于正常蓄水位。2012年9月禹门口提水东扩工程(一期)试通水,调蓄水库低水位运行,当初期蓄水位到达443.50~444.00m时,监测发现库水位呈逐渐下降趋势,且渗漏量较大。调查发现库

尾左岸泽掌村古堆泉部分泉眼出现回灌现象,在库水位下降至441.50m时,库尾出露多处泉眼和渗漏点。

据水库渗漏观测:库水位在444.00~443.53m时渗漏量为5.9万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,在443.53~442.85m时渗漏量为4.66万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,在441.85~441.52m时渗漏量为0.78万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,在441.53~441.46m时渗漏量为0.39万 $\text{m}^3/\text{d}$ 。三泉水库库尾地面高程440.00~447.30m,库尾塌陷坑和主要泉眼出露高程442.00~443.60m,只有乱泉高程低于441.00m,据分析观测数据,当库水位下降到441.50m,低于主要泉口高程时渗漏量明显减少。

据调查,调蓄水库试蓄水后,库区出现18处大小不等的渗水塌陷坑(见图1)。一般坑径0.8~2.0m,深1.0~1.5m,最大塌陷坑为14号坑,口径3.0×3.5m,深达3.5m,呈漏斗状。

为使调蓄库正常运行,2015年年初在库区渗漏调查基础上,库尾设计并修建了防护堤。

### 3.2 地下水同位素特征分析

地下水的环境同位素特征能够有效反映地下水补给来源和循环路径。为查清三泉水库是否渗漏补给古堆泉岩溶水,对库水和岩溶地下水进行环境同位素采样分析。分析结果表明:古堆泉口水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-9.8\text{‰}$ ,周边补给区北东向汾阳岭岩溶水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-10.4\text{‰} \sim -11.0\text{‰}$ 、九原山东侧赵康岩溶水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-10.5\text{‰}$ 、东南侯马方向岩溶水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-11.4\text{‰}$ ,都明显低于古堆泉中 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量,而三泉水库水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-7.7\text{‰}$ ,远高于古堆泉以及周边各补给方向上的岩溶水样。

锶是稳定元素,地下水中 $\text{Sr}^{2+}$ 的浓度通常不受人因素为影响,不同地层中锶含量有明显差异,且随地下水径流途径增长、水-岩相互作用时间增加, $\text{Sr}^{2+}$ 浓度逐渐增高,从补给区到径流区、排泄区, $\text{Sr}^{2+}$ 浓度总体上是增加的。对同一地下水流动系统,化学元素的浓度同时还与地下水径流强弱相关。因此,地下水中 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度的变化反映着不同地质环境特征<sup>[3]</sup>。古堆泉口岩溶水 $\text{Sr}^{2+}$ 含量1.62mg/L,而周边岩溶水样中 $\text{Sr}^{2+}$ 含量



图1 三泉水库库区主渗漏区、渗漏点分布

一般在  $1.74 \sim 1.96 \text{ mg/L}$ , 局部高达  $3.14 \text{ mg/L}$ , 均高于古堆泉水样中  $\text{Sr}^{2+}$  的含量。三泉水库库水中  $\text{Sr}^{2+}$  含量为  $0.496 \text{ mg/L}$ , 远低于古堆泉。

由同位素的监测和分析结果表明, 古堆泉岩溶地下水接受三泉水库渗漏补给的可能性较大。

### 3.3 渗漏模式及分区

由上分析可知, 三泉水库渗漏区分布于库尾古堆泉出露区。按照渗漏区地层岩性、渗漏通道和渗漏方式, 将其划分为三个区(见图2)。

**a.** 岩溶灌入式强渗漏区, 位于隔离堤外侧或北侧, 区内分布葫芦泉、莲花泉等主泉口, 库水主要通过泉口岩溶通道的灌入式入渗。由于受隔离堤阻隔, 只有在库水漫堤或开闸放水时, 该区才有库水淹没, 因此, 该区也可称为非常态渗漏区。

**b.** 孔隙-岩溶双重介质慢渗区, 位于隔离堤内侧或南侧, 为库水常态淹没渗漏区, 因此, 也可称为常态渗漏区。作为调蓄库, 首次试蓄水时产生的中小渗坑和古堆泉的散泉群就分布于该区。库水穿越孔隙-岩溶双重介质入渗补给孔隙水和岩溶水。根据2016年8月双环渗水试验, 该区垂向渗透系数为  $3.6 \times 10^{-4} \sim 6.21 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

**c.** 根据库区渗坑侧向径流实验, 孔隙-岩溶双重介质慢渗区外围区淤积层孔隙水可通过侧向径流补给渗漏区, 暂且称之为水库渗漏贡献区。

根据GIS量测, 三泉水库主渗漏区的分布特征和地形特点, 将引黄输水渠以北的库尾区划为渗漏补给区。



图2 三泉水库渗漏分区

## 4 水库渗漏强度分析

### 4.1 预测模型建立

三泉水库的水均衡要素有河流与输水渠补水量 ( $Q_{si}$ )、水面直接接受的降水量补给量 ( $p$ )、水库提放水量 ( $Q_{so}$ )、蒸发量 ( $e$ ) 和渗漏量 ( $Sp$ )。

水量平衡方程为

$$\Delta Q = (Q_{si} + p) - (Q_{so} + e + Sp)$$

在无降水时段,如果水库无来水量,也无提放水量,则水库的水量均衡方程即可简化为

$$\Delta Q = - (e + Sp) \quad (1)$$

该情况下库水位的下降或水库蓄水量的减少量即是由于水库水面蒸发和渗漏引起的。此时,水库的渗漏量就等于水库蓄水的减少量与水面蒸发量之差。

据库区地形图及渗漏调查可知,在库水位高程低

于 440.00m 时,水库强渗漏区已基本无水,在库水位高于 440.00m 时,库区存在渗漏条件。2015 年 3 月 18 日至 2016 年 8 月 2 日期间,水库既无补水,又无提放水,水库水位水量均衡要素只有蒸发与渗漏两个要素,计算其平均水位和水位日降幅,并根据 2013 年实测蒸发量和新绛县多年月平均蒸发量资料,获取日均蒸发量,然后计算出渗漏强度。据此得到水库渗漏强度与库水位关系预测模型:

$$Sp = 5 \times (H - 440) + 5 \quad (2)$$

式中  $Sp$ ——日渗漏强度,mm;

$H$ ——库水位高程,m;

440——渗漏区库底高程,m。

### 4.2 水库动态监测信息对模型的验证

取 2015 年 3 月 18 日~2016 年 8 月 2 日这一时段库水位观测记录代入模型进行计算。

2015年4月25日库水位440.93m,2015年5月9日库水位440.70m,共15日,水位下降230mm,日均降幅15.3mm。4月和5月多年平均月均蒸发量分别为188mm和240mm(见图3),日均蒸发量7.1mm,则水库日渗漏强度约8.2mm。如果取该段平均库水位440.80m,模型计算值的日渗漏强度为9.0mm。两者相对误差9.7%。

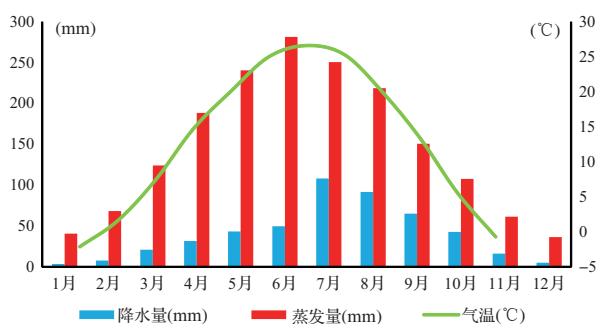


图3 新绛县多年月平均气温、降雨量和蒸发量对比

2016年7月21日库水位443.61m,2016年8月2日库水位443.27m,共12日,水位下降340mm,日均降幅28.3mm。多年平均7月和8月月均蒸发量分别为250mm和218.8mm,日均蒸发量7.6mm,则水库日渗漏强度为20.7mm。如果取该时段平均库水位443.44m,模型计算值的日渗漏强度为22.2mm。两者相对误差7.2%。

通过上述模型验证结果表明,模型预测值误差小于1mm。

据式(2)预测,当水库蓄水量达到正常蓄水水位447.50m时,其日渗漏强度为42.5mm,则水库渗漏量为2.8万 $\text{m}^3/\text{d}$ 。

#### 4.3 水流数值模拟对渗漏强度的反演验证

本文运用MODFLOW水流模拟软件,建立古堆泉三维数值模型,其中设有RES模块。以2014年和

2016年水井调查资料为依据进行模型识别,模拟结果表明,在三泉水位443.00m时水库日渗漏量分别为1.5万 $\text{m}^3$ ,按8月多年平均蒸发量7.06mm,折合0.47万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,两项合计1.97万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,与无输入输出水量的2016年8月8日443.02m,9日443.05m两日平均监测值2.0万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,相对误差为1.5%。

如果按式(2)计算,库水位为443.0m时,其日渗漏强度分别为20.0mm,即日渗漏量分别为1.32万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,与数值模拟反演的渗漏量1.5万 $\text{m}^3/\text{d}$ 的相对误差为12.0%。

综上所述,水库渗漏强度与库水位关系可用式(2)来描述。

## 5 结论

a. 水库渗漏模式分为岩溶灌入式强渗区、孔隙-岩溶双重介质慢渗区,以及孔隙水径流补给贡献区。其中,孔隙-岩溶双重介质慢渗区和孔隙水径流补给贡献区为常态渗漏区,岩溶灌入式强渗区为非常态渗漏区。

b. 建立渗漏强度模型: $S_p = 5(H - 440) + 5$ 。

c. 采用MODFLOW数值模拟反演结果表明,水库渗漏强度与库水位关系可用式(2)来描述。◆

#### 参考文献

- [1] 韩行瑞,鲁荣安,李青松. 岩溶水系统——山西岩溶大全[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [2] 张江汀. 山西省岩溶大泉变迁与保护[M]. 太原:山西经济出版社,2011.
- [3] 叶萍金,勤胜,周爱国,等. 河北平原地下水铀同位素形成机理[J]. 地球科学中国地质大学学报,2008,33(1): 38-42.