

万家寨水库右岸岩溶渗漏试验研究

贾秀梅¹⁾ 刘满杰²⁾ 孙继朝¹⁾ 齐继祥¹⁾ 臧逸中¹⁾ 鲁静¹⁾

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;

2) 水利部天津水利水电勘测设计研究院勘察院, 天津 300222

摘要 水库岩溶渗漏是水资源持续利用与安全运行的不利因素。由于岩溶发育的空间不均匀性, 渗漏调查难度大。通过微量元素多元示踪试验、地下水环境同位素及水化学分析和数值模拟相结合, 对万家寨水利枢纽右岸岩溶渗漏进行综合研究, 查明渗漏途径和渗漏强度, 为水库渗漏治理提供依据, 探索北方水库岩溶渗漏调查的有效途径。

关键词 岩溶渗漏 万家寨水利枢纽 示踪试验

A Tracing Test of Karst Leakage on the Right Bank of Wanjiashai Reservoir

JIA Xiumei¹⁾ LIU Manjie²⁾ SUN Jichao¹⁾ QI Jixiang¹⁾ ZANG Yizhong¹⁾ LU Jing¹⁾

1) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhang, Hebei, 050061; 2) Tianjin Survey and Designing Institute of Water Conservancy and Water Power, Ministry of Water Conservancy, Tianjin, 300222

Abstract The karst leakage on the right bank of the Wanjiashai water conservancy facilities is a hidden trouble in the safe operation of the reservoir, and hence much attention was paid to it during the exploration and designing of the reservoir. In the course of water storage for the reservoir, the authors conducted researches on the key leakage segments with the tracing test and some other methods. The leakage ways and intensity were detected and the feasible method for the investigation of the karst leakage of the reservoirs in the northern part of China was thus suggested.

Key words karst leakage Wanjiashai water conservancy facilities tracing test

修建在碳酸盐岩分布区的水库渗漏问题较普遍, 渗漏不仅影响水库的正常运行, 降低工程效益, 而且成为水资源持续利用与生态环境安全的不稳定因素。对岩溶库区的渗漏特征、渗漏机理研究和渗漏防治十分必要(袁道先, 1988, 1996; 卢耀如, 1982) 梅正星等(1988)对西南地区岩溶地下水与库区渗漏进行了示踪试验。而针对北方岩溶渗漏问题采用微量元素多元示踪技术和多种方法的综合定量研究还未见报道。

万家寨水利枢纽位于黄河北干流上游段。左岸山区碳酸盐岩广泛出露, 为岩溶含水岩组的补给区, 且地下水补给河水; 右岸库岸出露碳酸盐岩地层, 随远离岸边逐渐倾没地下, 河水补给地下水。水库蓄水后与右岸岩溶地下水形成近百米的水头差。笔者在水库蓄水期间, 选择微量元素三元示踪试验、地下水环境同位素及水化学分析方法和地下水数值模拟

技术相结合, 对右岸主渗段的渗漏途径和强度进行分析, 结合工程实例, 对北方库区岩溶渗漏调查方法进行探讨。

1 岩溶发育特征与渗漏分析

岩溶发育特征分析是岩溶渗漏研究、示踪试验布置和结果解释的基础。地质勘探证实, 万家寨库区右岸龙王沟-黑岱沟一带碳酸盐岩平均厚度达380余米, 发育着不同规模的褶皱、挠曲和断裂。地表岩溶形态主要有溶洞、溶蚀裂隙。碳酸盐岩见洞率马家沟组为57.39个/km², 亮甲山组17.29个/km²。在研究区钻孔钻进过程中普遍见有溶洞, 近岸钻孔见洞率高, 主要分布在奥陶系中、下统地层中, 洞高多在1~6 m之间, 多数溶洞已被砂质土充填, 其钻孔地层剖面见图1。

1998年10月底水库开始蓄水, 当水位达到

965 m时,在库区中段阳壕沟内发现 SK1、SK2 两个溶洞先后出现渗漏现象。水库不同蓄水期地下水水位变化较大(图 1)特别是靠近水库岸边的钻孔,地下水水位变幅在 30~60 m 之间,该区水动力场的改变破坏了地下溶洞的稳定条件,水流冲刷带走溶洞上覆 10 余米土层,引发了岩溶地面塌陷、地裂缝等。

对比不同时间的地下水化学分析资料,各种组份浓度的变化逐渐接近黄河水,并随黄河水而变化;地下水的环境同位素与水化学组成变化特征基本相同,其丰度逐渐接近黄河水的丰度。研究区地下水动力场与同位素水化学分析显示,库水已向右岸岩溶含水层渗漏。

2 追踪渗漏的示踪试验

示踪试验是研究岩溶连通性的直接方法,以往多采用食盐或染料作为示踪剂,对于大型渗漏或复杂渗漏问题研究受到限制。目前,国内外探索用微量元素及环境同位素进行示踪研究(庄琦华,1983;孙继朝,1998)。成功的示踪试验依赖于对条件的认识、示踪剂的选择、工程布署、采样及测试等工作。

2.1 示踪剂的选择

示踪剂的选择一般遵循以下原则:①示踪元素的地下水环境背景值足够低且波动小;②围岩对示踪剂无吸附或吸附损失很小;③对环境无不良影响或影响期极短;④对多元示踪,一种示踪剂在最大接收浓度范围内对其他示踪剂的检测不产生干扰,或虽有干扰,但能找到消除干扰的方法;⑤性质稳定,不与其他示踪剂和环境物质发生化学反应等限定条件。此次在环境背景值调查采样(2000年10月20日)分析、示踪剂围岩(灰岩、砂岩)吸附性能及相互干扰情况研究基础上,兼顾示踪剂选择要求,选定了钼酸铵、碘化钾、亚硝酸钠 3 种示踪剂。结合工程需要确定了各示踪剂的投放量(表 1)。

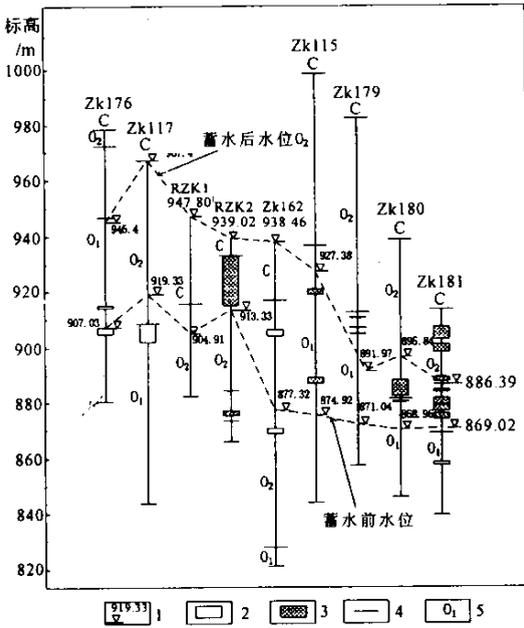


图 1 示踪区钻孔地质剖面图

Fig. 1 The geological section of drilling hole tracing area
1-水位标高 2-未充填溶洞 3-充填溶洞 4-地层界线 5-地层时代
1-water level; 2-not filled karst cavern 3-filled karst cavern;
4-stratigraphic boundary; 5-stratigraphic age

表 1 各样点示踪元素环境背景值

Table 1 The background values of tracer elements of samoling points

示踪元素	RZK1	RZK2	ZK162	ZK178	ZK179	ZK180	ZK182	宽滩	库水
Mo(VI)	4.72	8.01	4.98	5.21	5.12	4.10	5.13	2.33	2.10
I ⁻	38.3	9.2	9.1	8.6	8.3	8.9	8.5	1.2	2.8
NO ₂ ⁻ -N	25.5	1.5	1.2	1.8	2.7	1.8	1.9	<0.06	2.4

2.2 示踪剂的投放、接收、检测

选择 2001 年 3 月水库蓄水地下水水位逐步抬升时进行示踪试验。选定 SK1 溶洞、ZK162 孔和 ZK176 孔为示踪剂投放点(图 2)。SK1 溶洞投放钼酸铵 150 kg, ZK176 孔投放亚硝酸钠 20 kg, ZK162 孔投放碘化钾 50 kg。

选取 RZK1、RZK2、ZK162、ZK115、移民井、ZK179、ZK180、ZK181、SK34 和大塔水文孔等 10 个接收点。初期每小时取样一次,然后视检测结果改为每 2 天 1 次,最后至每天取样一次,为及时获得示

踪剂接收信息,在水库管局建立实验室,取得实验数据共计 11 911 个。各元素检测方法和精度见表 2。

2.3 示踪剂的异常识别

识别示踪剂异常是否出现的指标是示踪元素的异常检出限 $L_{检}$ 。如果在一个接收点检测到的示踪元素浓度超过了该接收点的 $L_{检}$,就是检出了异常。 $L_{检}$ 因点而异,一般按下式计算:

$$L_{检} = \bar{x}_B + 2s$$

式中 \bar{x}_B 为该点环境背景值的平均值; s 为该点环境背景值和检测方法的联合标准偏差。

如果环境背景值低于检测方法的检出限 $l_{检}$ 则 $L_{检}$ 等于 $l_{检}$ 。

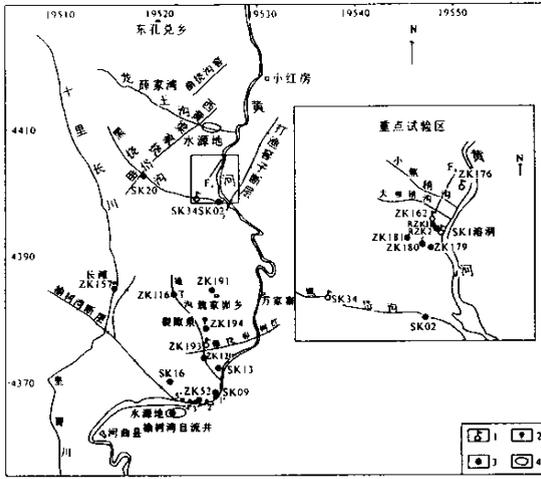


图 2 示踪试验工程布置图

Fig. 2 The engineering disposal map of tracing test
1-投放点; 2-泉水检测点 3-井孔检测点 4-水源地
1-the point poured tracer 2-survey in spring 3-survey in drill hole 4-water source site

2.4 示踪历时曲线分析与视速度计算

将检测结果绘制成示踪元素含量历时曲线,典型曲线见图 3。曲线变化随投放点距离和岩溶发育程度有差异,其形态反映地下水流速及地下岩溶发育程度,地下溶洞发育、连通性强,接受示踪元素迅速且很快降到背景值,反之则接受示踪信息缓慢。从取样孔示踪曲线形态分析和特征值统计得出,从 SK1 溶洞到 RZK1、RZK2 孔、从 ZK176 和 ZK162 孔到 ZK179、ZK180、ZK181 孔连通性较好,地下岩溶较发育。

示踪剂从投放点到各取样点的视速度,是指投放点至取样点的距离除以示踪剂从投放点到取样点所耗的时间,根据在图上量测的距离除以示踪剂从投源点到达接收点的时间,分初现视速度和峰现视速度。对视速度计算结果综合分析表明,水库蓄水到 975 m 时,在主研究区,水流速度介于 5~25 m/h,随水库蓄水,研究区的渗透性呈明显增大特征。试验验证在阳壕沟(SK1、SK2 溶洞位置)附近沿裂隙和岩溶发育带发生了较集中渗漏。在主径

表 2 检测方法 with 检测精度

Table 2 The measuring method with precision

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

检测项	检测方法	采用标准	最小检出浓度	不确定度 U
钼	催化极谱法	GB/T8538-1995	0.05	0.03
碘	催化分光光度法	GB/T8538-1995	0.5	0.3
亚硝酸根	分光光度法	DZ/T0064.60-93	4	2

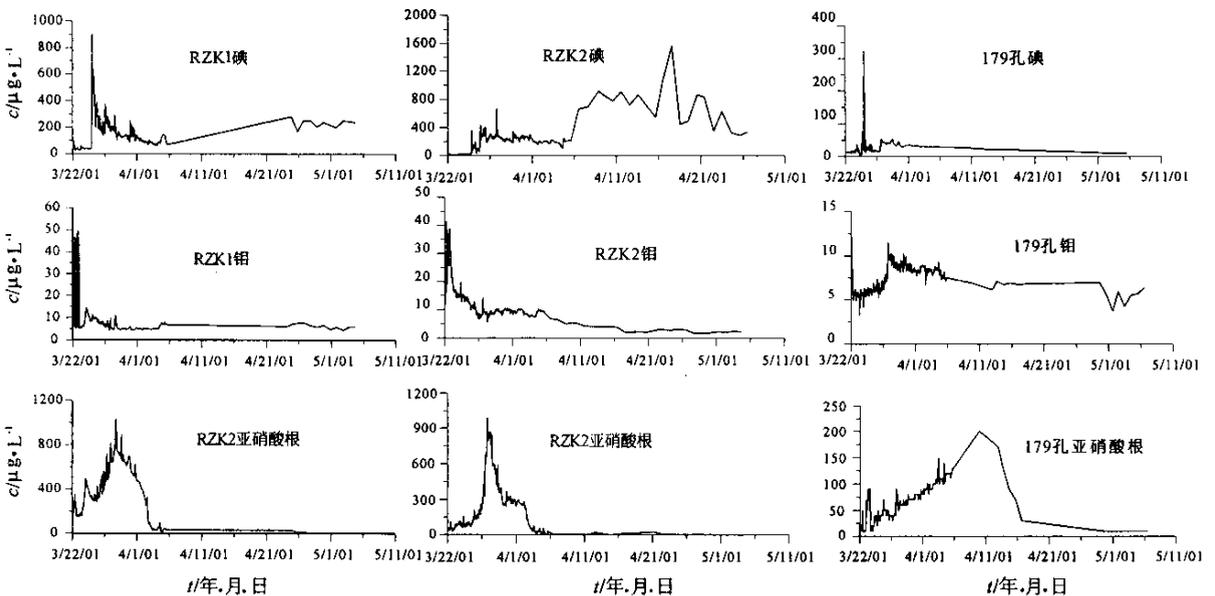


图 3 典型钻孔示踪试验历时曲线

Fig. 3 The last a period of time curves of typical drill holes in the tracing test

流带上水流速度达到 20~100 m/h。主径流带上的平均水流速度比补给区约大 4 倍。

3 地下水数值模拟

配合示踪试验,对研究区地下水动力场进行数值模拟研究。该区含水层主要是寒武-奥陶系碳酸盐类地层,其间夹有一定厚度的泥灰岩、页岩,形成相对隔水层。据隔水层分布范围及其稳定性可划分为 3 个含水岩组。各含水层展布、厚度及渗透性变化等区域水文地质特征相似,建模时视为统一的多层结构的含水、透水岩体。忽略其间的垂向运动。其水平运动渗透性由 3 个含水层及各强岩溶渗透层饱水厚度与饱水与否共同决定,实现渗透性能的分层和跨层突变的转换。

模拟计算区面积 2 758 km²,采用不规则有限差方法,建立起多重介质、多重水位和多重释水的岩溶水快速流模型,模拟研究区地下水实际流速。用钻孔揭露的地层剖面及抽水试验、监测等实际资料给出所需的基础数据和参数。模型反演期为 1997 年 9 月 16 日至 2000 年 3 月 30 日,计 927 d,分为 76 个时段,模拟结果与观测资料拟合较好。利用数值模拟对现状条件下水库不同运行水位时的渗漏量进行了计算分析和预测,结果见表 3。

表 3 库水漏失量分析及预测

Table 3 The analyse and forecast of leakage quantity of water in reservoir /m³·s⁻¹

地点	水库运行水位			
	967m	970m	975 m	980 m
大焦稍沟口段	0.24	0.24	0.27	0.31
阳壕沟口段	2.93	3.17	3.58	4.00
大焦稍沟至阳壕沟	3.32	3.56	4.01	4.48

4 结论

采用三元微量元素进行的示踪试验,试验规模大,时机选择有利,所投示踪剂在主要检测点大都接收到了清晰的可辩识信号,并未对环境造成不良影响,试验效果良好;利用多种方法互相印证,揭示岩溶渗漏发展过程,为北方水库岩溶渗漏调查探索了有效途径。

示踪结果表明,水库蓄水到 975 m 时,在主示踪区,地下水水流速度介于 5~25 m/h;在主径流带上水流速度达到 20~100 m/h。水库水沿 NNE 和

NW 两组裂隙及岩溶发育带发生渗漏,沿断层破碎带方向经溶洞发育层向岩溶主径流带(低缓带)径流。

模拟分析蓄水高程为 970 m 时,阳壕沟至大焦稍沟漏失量为 3.56 m³/s。其中阳壕沟口段漏失量为 3.17 m³/s,大焦稍沟口段漏失量为 0.24 m³/s。经预测,当蓄水高程为 980.0 m 时,阳壕沟至大焦稍沟漏失量为 4.48 m³/s。其中阳壕沟口段漏失量为 4.00 m³/s,大焦稍沟口段漏失量为 0.31 m³/s。实际流速达 8.412 m/h,与示踪试验结果基本吻合。其结果为水库右岸岩溶渗漏的监测与治理提供了依据。

参考文献

- 卢耀如. 1982. 岩溶地区主要水利工程地质问题与水库类型及其防渗处理途径. 水文地质工程地质, 6(4):15~21.
- 梅正星. 1988. 我国喀斯特地下水示踪概况. 中国岩溶, 7(4):371~376.
- 孙继朝, 贾秀梅. 1998. 地下水年代学研究. 地球学报, 19(4):383~386.
- 袁道先, 李彬, 刘再华. 1996. 中国岩溶. 岩溶与人类生存、环境、资源和灾害. 桂林: 广西师范大学出版社, 1~11.
- 袁道先, 蔡桂鸿. 1988. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 62~27.
- 庄琦华译. 1983. 地下水示踪剂. 水文地质工程地质译丛, (2):84~92.

References

- Lu Yaoru. 1982. The important problem of water conservancy and engineering geology with reservoirs types with prevent leakart in karst area. Hydrological Geology and Engineering Geology, 66(4):15~21(in Chinese).
- Mei Zhengxing. 1988. An outline of the groundwater tracing in karst regions of China. Karst of China, 7(4):371~376(in Chinese).
- Sun Jichao, Jia Xiumei. 1998. Chronologic study of groundwater. Acta Geoscientica Sinica, 19(4):383~386(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian, Li Bing, Liu Zaihua. 1996. Karst of China. Karst and human survival, environment, resources, and hazards. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1~11(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian, Cai Guihong. 1988. Karst environment science. Chongqing: Chongqing Press, 62~27(in Chinese).
- Zhuang Qihua translated. 1983. Groundwater tracer. The Translated Texts of Hydrological Geology and Engineering Geology, (2):84~92(in Chinese).