文章编号：1006－544X（2006）03－0341－06

广西龙州金龙水库岩溶渗漏分析与治理

李兆林，邹胜章，陈宏峰

（中国地质科学院 岩溶地质研究所，广西 桂林 541004）

摘 要：渗漏是金龙水库多年来未能解决的主要问题，由于渗漏，水库蓄水量远远达不到设计库容并导致坝体产生坍塌，直接威胁到水库大坝及下游居民的安全. 通过对区内岩体结构、构造断裂与岩溶发育的形态特征等进行分析，结合钻探和跨孔无线电波透视综合研究，该库渗漏主要受区域构造和岩溶发育所控制. 渗漏主要分布在主、副坝及东南段的库尾端，以集中管道渗漏为主，其中主坝右肩最为严重，占渗漏总量的62.6%. 根据产生渗漏的条件与分布特征，应采用回填、帷幕灌浆和铺盖相结合的综合治理方法进行防渗处理.

关键词：水库；地下溶洞；管道；岩溶渗漏

中图分类号：P642.254；TV697.32 **文献标志码**：A

岩溶渗漏，是在岩溶区修建水库普遍关注的问题，它是影响到水库能否正常运行的关键. 广西在岩溶区修建水库共1 200多座，其中约有50%由于渗漏而不能正常蓄水，金龙水库是其中之一. 水库位于广西西南部龙州县的北部，修建于峰丛谷地中，集雨面积50.8 km^2，有效库容1970×10^4 m^3，蓄水高程325.5 m. 水库筑主、副坝各一座（图1），自上世纪60年代建成以来至今不能正常蓄水. 在副坝左端与山体衔接处，曾出现过沉陷，坝下产生管涌，威胁大坝的安全. 对该库的渗漏研究是要查明影响水库渗漏的主要因素、渗漏条件、渗漏途径与方式，为该库的防渗处理提供依据.

1 影响水库渗漏的主要因素

产生渗漏的因素是多方面的，也是较复杂的，但与所在地的地质背景和环境条件密切相关，主要有以下几个方面.

1.1 岩性结构组合

库区出露地层为泥盆系中、上统碳酸盐岩. 泥盆系中统东岗岭组（D_2d）：主要为浅灰、灰色厚层状中细晶灰岩及白云质灰岩，分布于库区西北部；泥盆系上统下段（D_3r）：底部为浅灰色厚层状灰岩及巨厚层状白云质灰岩，上部为白云岩

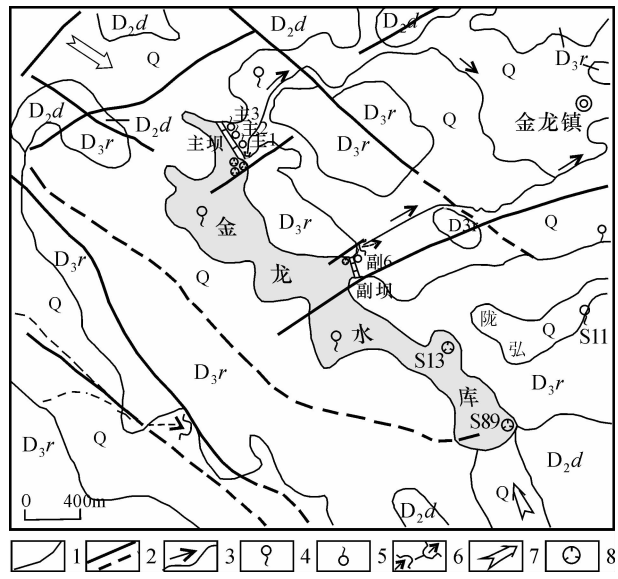


图1 金庞水库水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of Jinlong Reservoir

1—地质分界线；2—实测、推测断层；3—河流；4—下降泉水；5—上升泉；6—地下河进出口；7—地下水流向；8—落水洞；D_2d—中泥盆统东岗岭组；D_3r—上泥盆统容县组

收稿日期：2006－03－09

基金项目：国土资源大调查项目(200310400043)；国土资源部科技攻关项目(20010303)；国家科技攻关项目(2002BA901A13)

作者简介：李兆林（1955－），男，副研究员，水文与工程地质专业. E-mail：zhaolin276@126.com

及灰岩，分布于库区中部及库坝两侧山体，溶蚀程度较高，属强岩溶化岩层.

1.2 区域地质构造

库区构造发育，以断裂为主，按展布方向、性质规模及成生关系，可划分为北西、北东、北北东向断裂破碎带，其中北西、北东两组发育规模较大. 北西向主要分布于库区北西部，而北东方向主要分布于水库中部，破碎带主体延伸方向 60° ~ 70°，横穿库外，在主、副坝区均可见到. 部分岩体由构造切割成许多菱形方块，呈分支状的复合组合特征. 副坝左肩结构面多为泥、铁、钙质物胶结，沿断裂带见溶洞、溶蚀裂隙发育.

1.3 地下水迳流与动态特征

本区地表水系不发育[1]，仅有季节性小河一条，大气降水为主要补给源. 在雨季，由于库坝的拦截，地表河流及库区内的岩溶泉水均汇聚水库. 受地形、地貌、地质构造及岩溶发育等因素的影响，形成了以水库为枢纽的主、副坝和南部岩溶管道的地下排泄带，以主坝区为最低排泄基准面. 地下水运动具有水位、流量季节性变化大；地下暗流发育、迳流畅通，流程短、降雨迅速入渗、地下河及泉水流量消退快等岩溶山区地下水动态变化普遍存在的特征.

根据对水库水位与下游岩溶泉水的观测，两者之间关系密切. 当库水位上升时，泉水流量相应增大，水库干枯时大部分泉水断流. 地下水总体运移方向是由南西和北西向库区汇集之后，转向北东，排泄于区外.

1.4 岩溶发育特征

碳酸盐岩是造成岩溶环境的基本条件，岩溶发育，是造成岩溶特殊环境的主要原因. 本区碳酸盐岩分布较广，岩溶发育较强. 由于岩溶发育不均，形态特征各不相同，各含水层间的含水条件也受到较大的影响，对岩溶渗漏控制起到重要的作用. 因此，水库的渗漏和坝体稳定性与岩溶发育密切相关[2]，区内岩溶发育的基本特征如下.

1.4.1 *岩溶形态特征* 库区岩溶发育较为典型，类型众多，形态秀美壮丽，组合类型为峰丛谷地、洼地，常见的有溶洞、暗河、落水洞、坚井、漏斗、溶隙、石芽等，主要的形态特征为：

（1）地貌形态. 本区多为北西方向平行排列展布的槽型岩溶谷地，构成了库区岩溶地貌的基本轮廓，此外，还发育有稀疏较小的北东向谷地. 前者延伸约 10 km，宽 100 ~ 500 m，在两谷地交汇地带较为宽阔，可达数平方公里以上，并伴有孤峰. 谷地两侧山峰陡峭，峰脚下常见岩溶泉、落水洞、竖井等.

（2）地表岩溶形态. 地表除溶沟、溶槽、石芽等普遍发育外，溶潭、落水洞是最主要的岩溶现象，也是渗漏的直接通道，多发育在谷地中间及坡脚与谷地接壤处. 区内主坝右侧和副坝左侧均有分布，前者可见 3 个连续分布的落水洞与下部岩溶管道直接相连通. 后者仅见落水洞一处，发育于石峰脚下，可见库水沿落水洞流入地下.

（3）溶洞、地下河. 溶洞、地下河的发育，是区内地下岩溶的主要现象之一，它的发育受岩性、构造及水文地质条件的控制. 大部分地下河沿构造带呈线状分布，其中规模较大的有主坝区右侧溶洞. 可见洞口宽 15.5 m，往里见有沿层面发育的厅堂式大溶洞，宽 26 m，高 1.5 ~ 2.8 m. 溶洞发育为上、下两层. 下层为沿北东向裂隙发育的廊道式溶洞，洞宽一般 0.8 ~ 2.3 m，高 0.6 ~ 1.8 m，贯通整座山体，洞体常被地下水充满，与库内落水洞直接相连通.

1.4.2 *岩溶发育的空间分布* 岩溶发育受多种因素影响，在不同的环境条件下，不但形态特征各不相同，而且在平面和垂向分布也极不均匀.

（1）平面分布. 库区汇水范围内，形成以北西向岩溶谷地为主，而又被少量北东向谷地切割的网状格局. 大多数溶洞、溶潭、落水洞、竖井、岩溶泉等均发育于谷地周边山脚. 而谷地延绵的山体，除沿断裂发育的明显岩溶通道外，强烈的溶蚀作用多见于山体周边斜坡地带. 由于受岩性及其组合条件影响，本区岩溶发育在库区最为强烈，西北地区次之，南部较弱.

（2）垂向分布. 本区岩溶发育在垂向上具有分带性，总的趋势是从浅到深，由强变弱. 据钻探及压水成果试验分析，溶蚀强度在垂向上可分为 3 个高程段：即 305 ~ 330 m 为强岩溶发育带，有溶洞 25 个，占 69.44%；295 ~ 305 m 为中等岩溶发育带，有溶洞 7 个，占 19.44%；279 ~ 295 m 为弱岩溶发育带，有溶洞 4 个，占 11.11%. 随深度的增大，溶洞规模减小，压水试验 ω 值亦由 0.015 ~ 0.937 L/（min · m^2）减小到 0.004 ~

0.199 L/（min·m^2）. 由地面以下 50 m 深度内岩溶发育较强烈，其中 295 m 高程以上的岩溶部位是水库的主要渗漏部位.

2　岩溶渗漏分析

水库的渗漏与岩性、构造和地下水动力条件密切相关[3]，据监测及地球物理探测和渗漏出露点分析，渗漏主要集中在主、副坝区和水库南东段，渗漏类型包括集中管道渗漏、岩溶裂隙和坝下渗漏.

2.1　主坝区渗漏

主坝渗漏区处在构造破碎带中，按渗漏途径可分为右肩集中管道渗漏和主坝坝下渗漏.

2.1.1　*主坝右肩集中管道渗漏*　集中管道渗漏是沿地下河及岩溶管道渗漏[4]，主要受构造和岩溶发育强度所控制. 在右肩山体裂隙发育，沿裂隙及层面岩溶发育强烈，形成了大小不同的溶洞横穿山体，向库外延伸，成为主要的渗漏通道.

在库底与山体交汇处，见岩体破碎，裂隙发育密集，地表见溶蚀小孔洞和落水洞等发育. 沿破碎体使落水洞与山体内泄水通道相联通，并形成渗漏带. 渗漏范围以主坝右肩与山体衔接处向右约 150 m，此范围内有多处落水洞. 在落水洞口，增多次做过堵填处理，但堵后不久，在旁边又重新出现，屡堵屡漏，效果不佳. 现可见明显的漏水洞 3 处，水沿洞内直接入渗地下. 在主坝下游约 95 m 处的水塘中，见有一处泉水出露，当水库蓄水时，随水位的抬高，泉水涌水量增大，库水位下降时，水量减小，无水干枯，二者之间具有直接的水力联系.

此外，据钻探及跨孔无线电波透视分析，在该段地下岩溶最为发育，地下溶洞个大数多、洞内充填物少、水流畅通. 通过对 6 个钻孔及相应的试验成果分析，有 6 个溶洞及 13 处溶隙分布在不同的高程内（表 1），渗漏下限高程为 275 m，即库底以下 39 m.

2.1.2　*主坝坝下渗漏*　主坝坝体为均质土坝，防渗较好. 坝下为构造破碎带，岩溶发育，基岩面起伏不平. 通过地质雷达探测，发现下部溶蚀沟槽发育，并向库外延伸，深 2.0 m 左右，破碎带为灰岩角砾，角砾间被方解石脉充填，局部有小溶洞发育. 溶蚀沟槽中有软土存在，是影响渗漏的主要因素. 当库水位达到 320.0 m 高程以上时，后坝脚见 3 处渗漏点. 可见明显的水流涌出，水质清澈，微含细砂. 库水位在此以下，基本断流. 在库水位为 320 ~ 326 m 高程时，对 3 个漏水点实测流量分别为 0.08 ~ 16.86 L/s、0 ~ 6.3 L/s、0 ~ 3.95 L/s.

2.2　副坝区渗漏

副坝区的渗漏，主要分布在左侧山体及左肩

表 1　电波 CT 透视成果统计

Table 1　Statistics of CT perspective results by electric wave

透视剖面	孔间距/ m	孔号	异常中心与孔间水平距/m	异常起止深度/m		异常起止高程/m		异常宽度/m	单剖面异常总数/个
				顶	底	顶	底		
Pk1 – Pk2	66	Pk1	20	26.5	33	292.6	286.1	20	3
			52	26.5	37	292.6	282.1	26	
			19	14.0	22	305.1	297.1	16	
Pk2 – Pk3	62.21	Pk2	10	28	38	319.3	281.3	21	6
			25	18	30	301.3	289.3	32	
			58	20	24	299.3	295.3	12	
			5	36	37	283.3	282.3	4	
			61	26	27	293.3	292.3	3.2	
			58	34	35	285.3	284.3	5	
Pk3 – Pk4	62.44	Pk3	58	28	30	294.6	292.6	4	6
			7	10	40	312.6	282.6	14	
			37	35	50	287.6	272.6	50	
			55	20	40	302.6	282.6	13	
			20	8	15	314.6	307.6	40	
			2	25	26	297.6	296.6	3	
Pk4 – Pk5	54	Pk4	2	9.5	11.5	313.1	311.1	4	4
			21	22	50	300.6	272.6	43	
			50	3	6.3	319.6	316.3	9	
			52	36.5	41	286.1	281.1	5	

山体与坝体衔接处. 为集中管道渗漏和地表溶蚀沟槽渗漏[5].

2.2.1 坝肩左侧山体集中管道渗漏 左侧山体由厚层状纯灰岩组成，见构造裂隙发育，坝体附近见沿北东 40°方向裂隙横穿山体. 沿裂隙带岩溶发育强烈，在库内侧见溶洞一处，洞宽 9.0 m，高 7.0 m，往山体延伸 25.0 m 后，成为裂隙状管道向水库外侧山体延伸. 库水排入溶洞后，在距副坝下游约 50.0 m 处的谷地边缘以泉水形式溢出地表.

通过 3 个钻孔揭露及跨孔无线电波透视结果，区内地下岩溶发育. 见溶洞 4 个，溶隙 5 处，洞内均为粘土充填. 分布高程在 279.2 ~ 317.2. 溶洞、溶隙发育均与山体内溶洞及岩溶管道同在一层位上，洞体之间可能会存在相互联系，特别是溶隙延伸较远，直通库底，造成渗漏.

2.2.2 地表溶蚀沟槽渗漏 该类型的渗漏产生于坝底或者是与坝体接壤的坝肩处. 由于在建库时没有清基彻底，水库在蓄水后，受水压的作用下，库水在溶蚀沟槽中的土层逐渐渗透、掏空导致渗漏，甚至形成管涌，直接威胁坝体的安全. 该坝为粘土坝，坝底基岩面起伏不平，溶蚀沟槽发育，大部分沟槽垂直于坝体向库外延伸，沟槽中见砂质粘土充填，局部有堆石块、砾石和粗砂，渗透性较好. 在左坝肩山体坡面，沿裂隙发育的溶沟、溶槽深度较大，一般在 2 ~ 3 m，石芽较多. 坝体曾因渗漏导致管涌，至使坝体坍塌. 库外坝脚处，见渗漏点一处，当蓄水位高程达 320.0 m 时，有水溢出. 在该高程以下，则渗漏不存在.

2.3 水库南端渗漏

水库南端地处北东向破碎带，裂隙分布密集，沿裂隙带见溶蚀孔洞发育，它们之间以落水洞、岩溶泉等与下部溶蚀管道相互连通[6]. 其中以 S11 岩溶泉为排泄点与 S13 和 S89 两落水洞相通，成为主要的渗漏通道. 当库水位达 325.0 m 时，泉水涌水量为 97.71 L/s，库水干枯时泉水断流.

2.3.1 S13 落水洞渗漏 以库内 S13 落水洞为渗漏点，地下水向库外的陇弘洼地运移. 落水洞口近圆状，直径 1.5 m，可见洞深 0.5 m，均为砾石充填. 洞口高程 321 m，蓄水达该高程时，可见库水注入洞中. 据连通试验，它与 S11 直接相通. 落水洞经多次的回填堵塞，但均受库水压力击穿，未能起到防渗作用. 而陇弘洼地高程与库内相差不大，洼地常年积水. 在瀑雨时节，洼地积水迅速上涨，有时会倒流向库内.

2.3.2 S89 落水洞渗漏 由于区内构造断裂发育，裂隙纵横交错，沿裂隙带岩溶发育强烈. S89 发育于库内山坡脚下，为一消水溶洞，洞口高程 323.0 m. 洞宽 2.5 m，高 1.6 m，洞深 6.5 m. 雨季接受南部沟、槽汇集的雨水，在库水蓄至洞口时，则直接排入洞中向陇弘洼地运移，排向 S11 泉溢出地表.

3 渗漏量及渗漏评价

综上所述，水库渗漏主要有主坝右侧、副坝左侧山体和水库南端溶蚀管道的集中渗漏，以及坝体与地表衔接处的溶蚀沟槽渗透. 根据各渗漏点不同蓄水高程涌水量的实测资料. 按下式计算渗漏量

$$Q = WKI^{1/2} \Rightarrow Q = 10K\sqrt{\Delta H/L}.$$

式中：Q— 渗漏量(m^3/s)；W— 流量过水断面(m^2)；K— 渗透系数(m/s)；I— 水力坡度；ΔH— 水头差(m)；L— 流程长度(m).

经计算，当水库蓄水达到设计蓄水位（325.5 m）时，最大渗流量为 1.372 5 m^3/s.

由表 2 可知，水库渗漏是以集中的管道渗漏为主，占总渗漏量的 94.5%，其中主坝右侧山体内地下河管道为主要渗漏通道. 而坝下渗漏占总渗漏量较少，仅为 5.5%.

表 2 各漏水点最大渗漏量计算成果

Table 2 Calculation of maximum of each leakage point L/s

蓄水位/m	集中管道渗漏量			坝下渗漏量 Q				总渗漏量
	主坝	副坝	库南端	主 1	主 2	主 3	副 6	
325.5	860	340	97.7	36.8	12.0	6.6	20.1	
合计		1297			75.5			1372.5
占总量/%		94.5			5.5			

渗漏导致了水库多年来不能正常蓄水，效益较差，对环境也造成了较大的影响. 管道渗漏直接导致了库内形成多处塌陷，而坝下渗漏产生在坝体内部，则对大坝的安全构成了隐患. 此外，由于渗漏坝下游部分洼地常年积水，在瀑雨时，库水位迅速上涨，渗漏量加大，形成洪涝灾害.

4 渗漏治理

渗漏是岩溶区水利工程中遇到的主要问题，

它直接影响到工程的效益和安全. 如何对渗漏进行治理，是一个重要的问题，治理方法也多种多样. 云南的五里冲[7]、广西的大龙洞等水库对渗漏的治理主要采用高压帷幕灌浆方法，均取得良好的效果. 根据金龙水库的渗漏特征，治理应采用回填、帷幕灌浆和局部铺盖的综合治理方法.

4.1　回填

回填，主要是堵塞主要渗漏通道，局限在库内直接与集中渗漏管道相连通的漏斗和落水洞. 目的是堵塞库水流入地下岩溶管道，同时增强库底的防渗能力. 过去也做过同样的处理，但效果不佳. 其主要原因是在处理时，开挖清基不彻底. 致使水库蓄水时，在水压的作用下，旁侧产生新的渗漏. 所以在回填时，应直接开挖至完整基岩处，用混凝土回灌.

4.2　帷幕灌浆

主要是在渗漏段利用钻孔灌注水泥浆，在地下形成帷幕墙，起到防渗作用. 根据渗漏分布特征，帷幕采用高压灌浆技术，主要布设在库内侧的主坝右肩、副坝左肩和南端库尾段. 长度分别为 180、95 和 35 m；考虑到区内岩溶发育深度，帷幕墙下限设定在 275 ~ 295 m 高程内，相应深度在地表以下 40 ~ 50 m；厚度应控制在 2.5 ~ 3.0 m，但需根据实际情况，可增加或减少. 如渗漏严重的主坝区段，厚度不能小于 3.0 m，而南端库尾段可控制在 2.0 m 左右.

4.3　局部铺盖

局部铺盖目的是增强库底的防渗能力. 该库主、副坝均为粘土无芯墙坝，坝底为强岩溶发育区，上覆土层厚度不大. 在长期受水压及浸泡作用下极易产生液化. 在上部增加覆盖厚度，有利于提高防渗能力. 铺盖材料以粘土为主，范围在主、副坝前 30.0 m，厚度控制在 0.8 ~ 1.0 m.

5　结论与建议

渗漏是金龙水库存在的历史问题，通过多年反复的防渗处理，均未取得良好的效果. 本次通过对影响渗漏的岩溶环境条件进行分析，认为在不同的岩溶环境条件下，产生的渗漏方式和渗漏途径各不相同. 影响渗漏的因素也是多方面的，主要有以下方面：

（1）岩体结构特征：库区主要出露的地层有泥盆系上统下段（D_3r），为浅灰色厚层状灰岩及灰白色厚、巨厚层状白云质灰岩，溶蚀程度较高，属区内强岩溶化岩层.

（2）构造裂隙发育：本区构造裂隙发育，主要有北东和北西两组. 岩溶沿断裂带发育强烈，构成了地下岩溶通道. 北东向断裂带在坝区及两侧横穿山体，向库外延伸，是导致库水渗漏的主要原因.

（3）岩溶发育强烈溶洞较多：由于区内为纯碳酸盐岩分布区，构造裂隙发育，除沿断裂带形成了管道状岩溶通道外，岩溶也多沿层面发育形成了较大的溶洞. 它们之间相互交叉，横越山体，使库内外溶洞直接相连通，形成集中渗漏.

根据渗漏出露条件及影响渗漏因素分析，结合钻探和跨孔无线电波透视的综合研究结果表明，水库渗漏主要为集中管道渗漏和坝下基岩面溶蚀沟槽渗透两种方式. 集中管道渗漏主要分布在主坝右肩、副坝左肩山体内的岩溶管道及库南端的落水洞，渗漏量占总量的 94.5%，其中以主坝右肩渗漏为主，占总渗漏量的 62.6%. 坝下渗漏主要分布在主坝区及副坝左肩与山体衔接处. 其中以主坝区为主，见 3 处渗漏点，渗漏量为 55.4 L/s，占总渗漏量的 4.0%.

按渗漏分布特征及渗漏途径，治理应采用回填、高压帷幕灌浆和局部铺盖的综合治理方法：帷幕墙布设于主坝右肩、副坝左肩和南端库尾段，回填主要针对与集中渗漏管道相连通的漏水洞，而铺盖仅局限于主、副坝址区.

参考文献：

[1] 李兆林，刘志云，范爽秋，等. 峰丛（林）谷地型岩溶水有效开发利用示范——以广西龙州金龙镇为例［R］. 桂林：中国地质科学院岩溶地质研究所，1997.

[2] 张之淦，苏综明，吴其祥，等. 岩溶干旱治理——来宾治旱战略研究与总体规划［M］. 武汉：中国地质大学出版社，2005.

[3] 李兆林，罗伟权，劳文科，等. 洛塔大瓜拉洞地下河系水资源开发利用与保护［J］. 中国岩溶，2001，20（2）：149 - 154.

[4] 洛塔岩溶地质研究组. 中华人民共和国地质矿产部地质专报（六）（水文地质工程地质第一号）：洛塔岩溶及其水资源评价与利用研究［M］. 北京：地质出版社，1984.

[5] 李兆林，劳文科，罗伟权. 湘西洛塔岩溶水的综合开发与

持续利用［J］. 中国岩溶，2002，21（4）：276－282.
［6］张之淦，陈伟海. 岩溶蓄水构造与找水——以广西来宾小平阳为例［J］. 水文地质工程地质，2000，27（6）：1－5.
［7］王珽，梁彬，闫志为，等. 云南省蒙自五里冲水库枢纽区岩溶发育规律与水库运营关系研究［R］. 桂林：中国地质科学院岩溶地质研究所，1997.

Analysis and control of karst leakage of Jinlong Reservoir in Longzhou, Guangxi

LI Zhao-lin, ZOU Sheng-zhang, CHEN Hong-feng
(*Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin* 541004, *China*)

Abstract: The key problem of leakage in Jinlong Reservoir has yet to be resolved. . Impoundment is far under its designed storage capacity because of leakage leading to collapse of dam body and threatening the safety of the dam and residents in backward position. Leakage control is important in the reservoir's well function. It is put forward that the feature of regional tectonics and karst development control the leakage of the reservoir based on the analysis of rock structure, tectonic fractures and configuration characteristics of karst with combination of drilling and radio wave prospective of striding boreholes. Leakage mostly distributes in the main body, subsidiary dam and southeastern part of the reservoir. Mass conduit leakage happens as the primary mode. The leakage in the right part of the main dam body is most serious, accounting to 62.6 percent of the gross leakage. Comprehensive measures of leakage resistance should be adopted such as backfilling, grouting heavy curtain and covering bedrock according to the condition and distribution characteristics of leakage.

Key words: reservoir; underground karst caves; conduit; karst leakage