

泾河东庄水库与桃曲坡、羊毛湾水库 岩溶发育差异性分析

万伟锋^{1,2} 李清波² 王泉伟² 苗旺²

(1. 博士后科研工作站; 2. 岩土工程事业部地质工程院)

[摘要] 东庄水库岩溶渗漏问题是制约东庄水库建设的关键技术问题之一,与之临近的桃曲坡水库和羊毛湾水库在建成初期均产生了岩溶渗漏问题。对库区及周边地区的碳酸盐岩沉积建造环境展开了研究,分析认为东庄水库工程区不具备发育大规模古岩溶和近代岩溶的背景条件,东庄水库和羊毛湾水库、桃曲坡水库在沉积环境、古岩溶发育条件和渗流条件方面存在差异,东庄水库工程区岩溶发育以溶隙为主,未形成岩溶管道系统,水库建成后不会发生明显的岩溶渗漏。

[关键词] 渭北 东庄水库 岩溶 桃曲坡水库 羊毛湾水库

东庄水库位于陕西省礼泉县原东庄乡和淳化县车坞镇之间的泾河下游峡谷段,距离西安市约为90.0 km,规划总库容约为30亿 m^3 ,坝高230 m。工程的开发任务是“以防洪、减淤为主,兼顾供水、发电及改善生态环境”^[1]。东庄水库地处渭北地区干旱缺水地区,在新中国成立后,在渭北岩溶地区修建了一些大大小小的水库,其中比较著名的有乾县漆水河上的羊毛湾水库、耀县沮河上的桃曲坡水库

(图1),蓄水初期均产生了不同程度的渗漏问题。东庄水库勘察和论证已历时半个多世纪,先后有许多勘察设计单位与科研单位参与了水库的前期勘测设计和论证工作,由于前述两水库距离东庄水库相对较近,对东庄水库的建设具有一定的借鉴意义,因而也在一定程度使人担心,东庄水库是否会产生类似羊毛湾水库和桃曲坡水库建成初期的渗漏问题^[2]。本文从渭北岩溶发育背景条件出发,对东庄

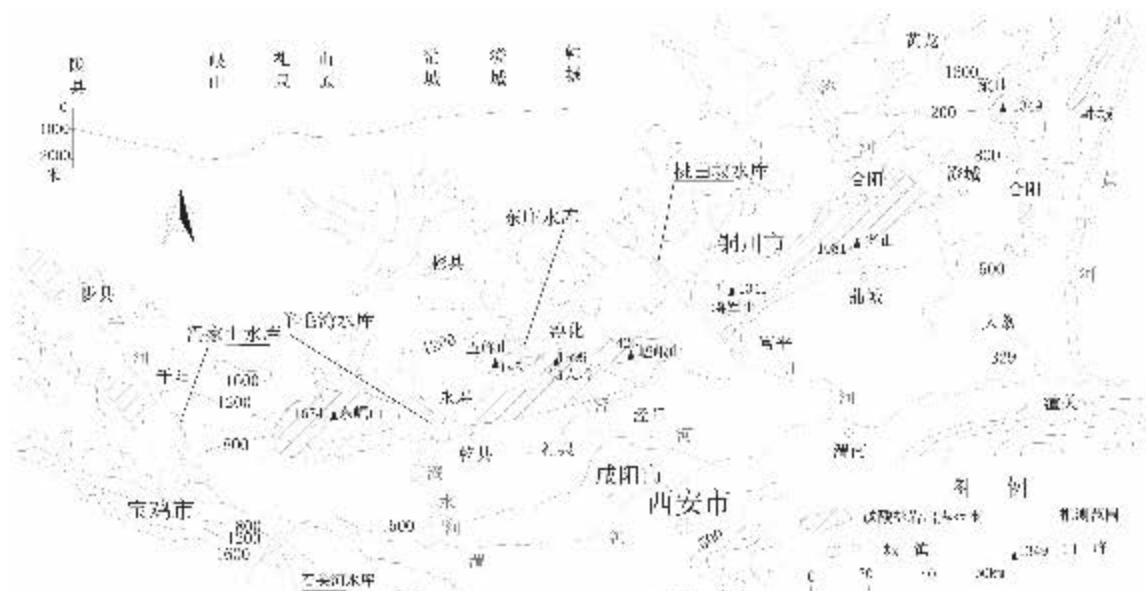


图1 渭北岩溶地层及主要水库分布图

水库和桃曲坡、羊毛湾水库的岩溶发育特征、渗漏条件的差异进行研究分析,以进一步论证东庄灰岩坝址的可行性。

1 区域地质条件概况

东庄、羊毛湾和桃曲坡三水库位于渭北中部,区域地势整体上北高南低,自北向南呈阶梯状排列。本区位于鄂尔多斯台地南缘,南邻渭河断陷带,其构造体系属于祁、吕、贺山字型构造的前弧部位,根据区内构造形迹的展布方向有NW、NE和EW三组,并彼此交错。区域地层分布受到构造的控制作用明显,山前断裂以北地层自南而北由老到新依次为寒武系(ϵ)、奥陶系(O)碳酸盐岩夹碎屑岩、二叠系(P)与三叠系(T)碎屑岩等,岩层产状总体倾向为西北,上覆新近系(N)碎屑岩和第四系(Q)松散岩类。

区内碳酸盐岩分布呈阶梯状向渭河盆地陷落,碳酸盐岩含水岩组总体上呈现“断阶结构”特征,不同断块地下水位呈现阶梯状下降的趋势。受走向NW、NE、EW三组彼此相交形成的“多”字形构造和当地河流排泄基准的控制,形成了多个岩溶地下水系统和次级的子系统,东庄水库工程区位于岐山泾阳岩溶地下水系统的子系统——筛珠洞泉域岩溶地下水子系统内^[3](图2)。

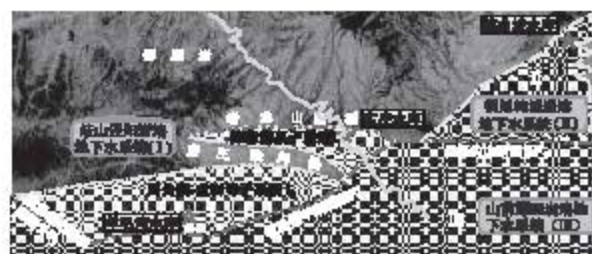


图2 渭北岩溶地下水系统划分示意图

2 桃曲坡、羊毛湾水库概况

桃曲坡水库1969年开工,1974年建成蓄水,为均质土坝,坝高61 m,库容4300万 m^3 。坝址位于奥陶纪灰岩上,坝址上游1 km范围内的库区灰岩出露,岩溶发育多呈漏斗、落水洞型;灰岩上覆砂页岩,两者之间夹有煤层,为不整合接触,地下水位低于河水位约330 m,为悬库。在坝基及下游0.15 km^2 内,发现149个溶洞,90%为古岩溶,以垂直发育为主,沿裂隙呈条状、串珠状发育,漏斗、溶洞等规模较大,洞径几米到几十米不等,长度可达数百米,部分充填铝土页岩、砂页岩,具有层理。水库初建成时未进行

系统的防渗处理,古溶洞和废弃的煤井、巷道、通风井等被库水击穿,造成水库严重漏水。蓄水后库内发现36个溶洞、14处废弃的煤窑,4条宽大裂隙,被迫开挖处理,前后经3次补漏处理后,水库正常蓄水。

羊毛湾水库1958年开工(1960—1966年停工),1969年建成蓄水,为均质土坝,坝高47.5 m,总库容7300万 m^3 。坝址和库盆地层为奥陶系灰岩,上覆红粘土层;受河流冲蚀影响,库区的河床及两岸,红粘土缺失面积达3.5 km^2 。地下水位位于坝基以下约70~80 m,为“悬库”。岩溶和断裂均较发育,岩溶发育多呈溶洞和落水洞,坝址区发现65个溶洞,直径1 m左右,最大6 m,发育深度达坝下80多米。确定的防渗方针为“铺盖为主,结合局部灌浆和留放水底孔”,但由于没有将全部库盆的红土缺失区作为防渗处理对象,而仅限于坝址区,造成蓄水初期渗漏严重,蓄水后库内发现30多个塌坑,还有几十处气泡漩涡、冰面不冻点。后经封堵、回填铺盖处理,加上水库淤积,水库基本上发挥正常效益。需要补充说明的是,位于羊毛湾水库下游10 km处的龙岩寺泉,于明朝万历5年(公元1577年)干涸,水库蓄水3年至1971年底,坝址区地下水位上升近30 m,结果使干涸达400年之久的龙岩寺泉得以复活,1972年夏灌溉用水量大,库水位降至死水位以下,到1973年8月9日,泉水再次断流。

3 岩溶渗漏问题差异性分析

东庄水库工程区相邻的桃曲坡水库和羊毛湾水库虽均位于渭北灰岩地区,但三个水库各自所在工程区的岩溶发育背景和岩溶渗漏条件存在明显差异。

3.1 三水库工程区岩溶发育背景的差异

在地质演化历史中,工程区经历了加里东运动和燕山运动两次强烈的造山运动,对应存在两次大的沉积间断,分别形成了古老岩溶和古岩溶两期岩溶,奠定了本区岩溶发育的背景^[4]。

从寒武纪到晚奥陶纪中期,整个渭北地区处于海水以下接受碳酸盐岩地层沉积,形成了巨厚的岩溶地层。受加里东运动影响,鄂尔多斯地块抬升,至奥陶纪末海水基本从鄂尔多斯地块完全退出,寒武和奥陶纪沉积的碳酸盐岩地层普遍裸露地表,经历志留、泥盆、至晚石炭纪长达1.4亿年的风化、淋滤

和剥蚀,形成古老岩溶风化壳,奠定了本区的古老岩溶基础。到晚石炭纪,受海西运动作用,工程区再次位于水面以下重新接受沉积,在古老岩溶风化壳之上形成了一套石炭、二叠和三叠系泥岩、粉砂岩等碎屑岩地层,使得古老岩溶得以保存,进入埋藏发育阶段。在此之前,三个水库所在的渭北东部和中西部地区的沉积建造环境基本相同,没有明显差异。

三叠纪之后,燕山运动强烈,地壳再次抬升,其中区域性老龙山断层逆冲上千米,在老龙山断层以南,沿五峰山~钻天岭~嵯峨山一带形成渭北高地。在东庄水库工程区及其以西的渭北中西部地区(羊毛湾水库一带)的渭北高地,石炭系、二叠系和三叠系碎屑岩地层沉积相对较薄,遭受风化剥蚀较为强烈,在一些地段,在深部的碳酸盐岩地层受构造作用被逆推上来,再次裸露地表,古老岩溶形迹受风化侵蚀作用多被剥蚀掉,碳酸盐岩地层继续遭受淋滤和溶蚀,形成了古岩溶风化壳;而在渭北东部(桃曲坡水库所在地区),石炭纪、二叠纪和三叠纪形成的碎屑岩较为深厚,遭受风化、剥蚀相对较弱,下伏的古老岩溶形迹仍得以保存,处于埋藏发育阶段。

古近纪始,渭河地堑形成,盆地内开始接受来自于秦岭和渭北山区物源沉积。受断陷和地形影响,羊毛湾水库一带的渭北西部地区普遍沉积了一层三趾马红土,将碳酸盐岩风化壳面埋藏,古岩溶得以保存下来并继续发育。处于渭北山区东部的桃曲坡水库一带继续遭受剥蚀,由于上部存在碎屑岩地层,古老岩溶仍被埋藏而被保存下来。东庄水库一带仍处于高地遭受风化、剥蚀,古岩溶形迹多被剥蚀掉。

进入第四纪,受喜山运动影响,现代地表水系相继形成,强烈的升降运动使泾河快速下切,河谷两岸的碳酸盐岩遭受剥蚀和侵蚀,产生新的岩溶现象,形成了河谷型的近代岩溶。

从上面的地质演化史可以看出,桃曲坡水库的岩溶为古老岩溶、羊毛湾水库的岩溶为古岩溶,平面上分布较广,发育规模较大,存在岩溶管道系统,而东庄水库的古岩溶、古老岩溶多被侵蚀掉,主要为近代岩溶,主要沿河谷及岸坡发育,未形成连通的管道系统^[5],岩溶发育深度受当地河流切割深度和排泄基准面控制,岩溶水动力条件严格受沙坡断层及其以北页岩阻水构造与凤箱道泉群排泄基准面控制,地下水径流的强活动区主要沿河谷分布,且循环深

度有限,因而岩溶发育深度是有限的。

3.2 桃曲坡和羊毛湾水库岩溶和东庄水库岩溶发育的地层层位不同

东庄水库工程区受区域构造作用影响(主要是老龙山断层),原本位于下部的奥陶系下统冶里—亮甲山组(O_{1y}^1)和中统马家沟群(O_{2m})第四段及其以下地层被推覆到地表而盖于二叠系—三叠系($T \sim P$)地层之上,上部古老岩溶、古岩溶形成时期的风化壳面没有石炭—三叠系地层或新近系地层掩盖保护,在后期被剥蚀掉^[6]。且冶里—亮甲山组(O_{1y}^1)地层岩性主要为白云岩夹泥质白云岩,因而其岩溶化程度远弱于位于桃曲坡和羊毛湾水库的奥陶系中统马家沟群(O_{2m})顶部灰岩(被埋藏保留的古风化壳岩溶面)的岩溶发育强度。

3.3 受构造影响程度不同

桃曲坡和羊毛湾水库均处于渭河盆地盆缘地带,受渭河盆地北缘张性断裂影响,地下水径流条件较好,有利于古老岩溶和古岩溶系统的进一步扩容、发展。

东庄水库距离渭河盆地北缘断裂距离相对较远,受断裂影响较小,近代岩溶发育较弱。

3.4 渗漏形式不同

桃曲坡水库是水库蓄水后,废弃的煤井、巷道、通风井等被库水击穿,并且和石炭纪和灰岩之间“不整合接触面间的古老岩溶风化壳”相沟通,造成水库严重漏水,存在着管道型渗漏。

在羊毛湾水库库区,灰岩之上覆盖的新近系(N)三趾马红土层,其透水性差,可作为天然的防渗漏盖,水库蓄水后,在缺失红土层覆盖的灰岩区,库水进入古溶洞、溶孔向深部渗漏。

而东庄水库既不存在桃曲坡水库区石炭系煤层和铝土页岩与灰岩之间的不整合接触面古老岩溶,也不存在羊毛湾水库区三趾马红土层覆盖下的古岩溶。库坝区所发育的近代岩溶多沿河谷岸坡发育,为表层宽浅型溶洞,孤立存在,岩溶没有形成相互连通的岩溶管道(洞穴),水库蓄水后的渗漏形式为溶隙型(详见下文分析),因此,东庄水库的渗漏形式不同于桃曲坡水库和羊毛湾水库(表1)。

4 东庄水库工程区岩溶发育现象及特征

根据地质测绘、地表岩溶发育现象调查、钻孔和平洞勘察资料,东庄水库工程区岩溶发育形迹以溶隙、溶痕为主,溶孔、溶洞次之。

表1 东庄水库、羊毛湾水库和桃曲坡水库渗漏条件差异

水库	桃曲坡水库	羊毛湾水库	东庄水库
岩溶期	古老岩溶	古岩溶	近代岩溶
岩溶发育深度	上部有石炭—二叠砂页岩 地层覆盖,区域深岩溶	上部有新近系三趾马红土 覆盖,区域深岩溶	碳酸盐岩裸露,河谷岩溶
岩溶层位	奥陶系灰岩夹平面	奥陶系灰岩夹平面	奥陶系底部白云岩+泥质白云岩+灰岩
发育程度	发育	发育	发育较弱
地下水低于河床	约300 m	70~80 m	10~50 m
渗流形式	存在管道流	存在管道流	溶隙型

(1) 地表岩溶发育现象

地表岩溶调查中,在库坝区的碳酸盐岩库段两岸,共发现有大小溶洞63个,多在地表浅部沿断层、层面和软弱结构面发育,其中45个集中在老龙山断层破碎带及其影响带内,这些溶洞规模较小,一般长数米,最长37 m,溶洞孤立存在,70%以上的溶洞发育在高出河床100 m以上,洞向与溶洞所处的构造走向基本一致,洞口倾向河床,口大里小,向内渐变为溶隙^[7-8]。

(2) 钻孔岩溶发育

根据对库坝段33个钻孔的孔壁光学成像及岩芯的岩溶发育统计,岩溶形迹多为溶隙和溶洞。对每一钻孔,按照每10 m为一个统计段,按计算了钻孔的线性岩溶率(岩溶累计发育长度m/10 m),结果显示,碳酸盐岩库段不同区段的线性岩溶率在0.08~6.50%不等,线性岩溶率最小的在坝址区,平均1.05%,其次是碳酸盐岩中间库段,平均1.69%,老龙山断层破碎带及其影响带内线性岩溶率最大,平均2.54%,平面分布上,河床钻孔线性岩溶率大于岸坡钻孔,钻孔线性岩溶率随高程降低逐渐减小,且随着远离河床,岩溶发育程度有减弱的趋势。

表2 钻孔揭露岩溶发育形态统计

岩溶形态	岩溶现象统计	
	个数	比例(%)
溶隙	9460	68.6
溶洞	4243	30.8
溶洞	87	0.63

(3) 平洞岩溶发育现象

东庄水库项目建议书和可研阶段勘察阶段共施工勘探平洞26条,累计进尺3685 m,提供了较为丰富和直观的勘察资料,根据对26条平洞岩溶发育情

况统计结果,平洞内岩溶总体上发育程度较弱,岩溶形迹多为溶孔和溶蚀裂隙,溶洞仅发现有9处,从规模上看,溶孔孔径一般从小于1 cm到数厘米不等,多沿裂隙呈串珠状发育,溶蚀裂隙多闭合状,不连续张开状,张开度一般0.5~3 cm不等,充填钙质和方解石晶体。发现的9处溶洞规模较小,分布较分散,孤立存在,洞径0.2~0.8 m不等,最大1.6 m,延伸长度仅数米,多充填钙质和方解石和粘土,溶洞的发育部位多和较为宽大的裂隙相关。

表3 钻孔线性岩溶率统计表

区段	线性岩溶率	
	范围值	平均值
老龙山断层破碎带及其影响带	0.15%~6.50%	2.54%
碳酸盐岩中间库段	0.23%~5.27%	1.69%
坝址区	0.08%~2.65%	1.05%

(4) 示踪试验未发现岩溶管道系统

在项目建议书阶段和可研阶段,黄河设计公司和地质科学院桂林岩溶所在东庄水库工程区分两次开展了大型多元示踪试验及研究工作,共选取了6种示踪剂,投放在库坝区的钻孔和河水中,接收点选择在工程区内其它钻孔、坝址下游的泉点、山前的井点等共20余处,两次试验均持续监测了两年之久,除在工程区内的部分钻孔中接收到示踪剂外,山前的泉点、井点等均未接收到钻孔投放的示踪剂,结论是未发现岩溶管道系统,从钻孔接收到的示踪剂的时间和地下水流场分析,岩溶地下水径流缓慢,含水介质以溶隙型为主。因篇幅原因,本文不再展开阐述。

(下转第42页)

综上所述,碳酸盐岩库段岩溶发育以溶隙为主,分布较分散,岩溶发育程度较微弱,垂直分带规律不显著,由地表向深部有减弱的趋势。区内岩溶多为近代岩溶,岩溶形迹主要沿裂隙、层面、软弱夹层等结构面分布,局部沿构造裂隙发育孤立的浅表型溶洞。

5 结论

虽然东庄水库、羊毛湾水库和桃曲坡水库均为岩溶地区的“悬库”,但岩溶发育背景和渗漏条件不同而导致岩溶发育强度差异较大,东庄水库岩溶发育以溶隙型为主,不会产生与羊毛湾、桃曲坡水库同等程度的渗漏问题。与东庄水库处于同一水文地质单元的文泾水库、泾惠渠首水库蓄水后均未产生明显渗漏问题,也为上述结论提供了佐证。

- [1] 万伟锋,王泉伟,邹剑峰,等. 东庄水库岩溶渗漏几个关键问题的探讨[J]. 人民黄河,2015(2):99-103.
- [2] 李孟来. 论泾河东庄水库灰岩坝址渗漏问题[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(1):49-51.
- [3] 李清波,万伟锋,王泉伟,等. 东庄水库岩溶渗漏与防渗研究进展[J]. 资源环境与工程,2015,29(5):671-677.
- [4] 苗旺,万伟锋,邹剑峰,等. 东庄水库工程区岩溶发育特征研究[J]. 资源环境与工程,2015,29(5):533-537.
- [5] 余光夏,王宇. 论泾河东庄水库的岩溶防渗处理措施[J]. 西北水电,1994,49(3):42-48.
- [6] 濮声荣. 论东庄水库岩溶渗漏问题[J]. 资源环境与工程,2013,27(4):416-421.
- [7] 宋文搏,徐铁铮,濮声荣,等. 再论东庄水库的岩溶渗漏问题[J]. 资源环境与工程,2014,28(4):449-455.
- [8] 侯晨. 泾河东庄水利枢纽工程岩溶地下水同位素水文地球化学特征[D]. 长安大学,2013.