

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0095

程林, 霍吉祥, 马福恒, 等. 石漫滩水库坝基廊道析出物组成特征与成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 149-155.  
CHENG L, HUO J X, MA F H, et al. Composition characteristics and genesis analysis of precipitates in dam foundation corridor of Shimantan reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 149-155. (in Chinese)

# 石漫滩水库坝基廊道析出物组成特征与成因分析

程林<sup>1</sup>, 霍吉祥<sup>2</sup>, 马福恒<sup>2</sup>, 王凯<sup>2</sup>

(1. 河南省石漫滩水库管理局, 河南 平顶山 462500;

2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 南京 210029)

**摘要:**大坝廊道析出物是坝基水对基岩及混凝土等侵蚀作用的产物,其形成与演变可能对大坝运行安全产生不利影响。石漫滩水库除险加固前其廊道内广泛分布各类析出物,为探明其物质组成并分析来源,对析出物及其附近渗漏水进行了采样分析,对析出物分别采用X射线衍射和荧光光谱分析方法确定其矿物和化学组成,并通过水化学图示和模型计算等方法研究渗漏水的化学组成及演变。结果表明,分布最广泛的白色析出物主要化学组分为CaO和烧失量,矿物组分为方解石,其来自于坝体混凝土中水泥结石的溶解与再沉淀,而部分黑色析出物主要化学组分为MnO,来源于坝基水对基岩中锰质胶结物的化学侵蚀。分析结果结合扬压力等观测资料,可为除险加固工程中坝体及坝基对应补强提供科学依据。

**关键词:**石漫滩水库;坝基廊道;析出物;水化学组成

中图分类号:TV64 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Composition characteristics and genesis analysis of precipitates in dam foundation corridor of Shimantan reservoir

CHENG Lin<sup>1</sup>, HUO Jixiang<sup>2</sup>, MA Fuheng<sup>2</sup>, WANG Kai<sup>2</sup>

(1. Management Bureau of Shimantan Reservoir, Pingdingshan 462500, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The precipitates in the dam corridor were mostly products of the interaction of groundwater with solid-phase media such as bedrock and concrete. The formation and evolution of the precipitates may have adverse effects on the safe operation of the dam. Before the reinforcement of Shimantan Reservoir, there were varieties of precipitates distributed in the corridor. In order to find out their material composition and analyze their source, we sampled and analyzed the precipitates and their nearby leakage water. X-ray diffraction and fluorescence spectroscopy were used to determine the mineral and chemical composition of the precipitates. Hydrochemical diagram and model calculation were used to study the chemical composition evolution of the leakage water. The results showed that the most widely distributed white precipitate had CaO and loss on ignition as its main chemical components, and calcite as its mineral component. It came from the dissolution and reprecipitation of cement stones in the dam body. Some black precipitates were mainly composed of MnO, and they originated from manganese cement in bedrock.

收稿日期:2018-12-14 修回日期:2019-05-07 网络出版时间:2019-06-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190606.1614.010.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(51779155;51609150;51879169);国家重点研发计划(2018YFC0407103);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y718002;Y717006;Y717012)

作者简介:程林(1981—),男,河南新蔡人,工程师,主要从事水库大坝工程管理及维修养护等工作。E-mail:503962153@qq.com

通信作者:马福恒(1969—),男,河南项城人,教授级高级工程师,博士,主要从事水利工程安全评价与安全监控研究工作。E-mail:fhma@nhri.cn

The analysis results together with observation data such as uplift pressure can provide a scientific basis for the seepage reinforcement of the dam.

**Key words:** Shimantan reservoir; dam foundation corridor; precipitates; hydrochemical composition

大坝基础廊道内的渗水析出物多与坝基水和混凝土等人工材料及基岩等固相介质间的相互作用有关,其形成与演变对于判别坝基渗流性态等具有指示意义<sup>[1-2]</sup>。其分析方法多包括对比分析、量化分析和粒度分析等,同时结合渗流监测资料以及坝基工程地质、水文地质条件等,可判断析出物是否与坝基软弱夹层、断层等性状恶化有关,是否危及到坝基防渗帷幕的耐久性,以及坝基是否已出现机械管涌等<sup>[3-5]</sup>。如邵晓妹等<sup>[6]</sup>对某水电站坝基析出物、絮凝物和淡蓝色胶状析出物进行检测分析,明晰其来源分别为基岩和防渗帷幕、有机微生物、丙烯酸盐;张志敏等<sup>[7]</sup>对某 RCC 坝廊道及坝体下游坡面白色析出物进行分析,其成分主要为碳酸钙,来源于库水对混凝土坝体分缝和裂缝面的溶蚀;何鹏、吕全伟等<sup>[8-9]</sup>针对宝珠寺水电站坝基析出物较多的现象,在对析出物化学分析的基础上,运用聚类分析等方法对析出物成因进行了探讨。此外,还可通过 PHREEQC 等水文地球化学软件对析出物的析出量进行定量预测<sup>[10-11]</sup>。同时,结合渗流宏观动态要素(扬压力、渗流量等)和渗流微观动态要素(水质、析出物等)可构建综合评价体系,从而对坝基渗流性态进行更加全面的分析评价<sup>[12-13]</sup>。

综合以上可以看出,目前对大坝析出物研究仍相对较少,且单项工程中涉及到的析出物类型也较为单一。实际上,由于部分水库或水电站大坝基础地质条件较为复杂,基岩岩性较为多样,其大坝基础廊道不同部位处析出物也有所不同。为查明不同析出物的物质组成及其来源有何不同,首先依据表观特征对析出物进行分类,在此基础上,对代表性的析出物样和水样进行采样分析,旨在了解不同类型析出物的形成机理及其对大坝防渗系统的影响。

## 1 工程概况

石漫滩水库位于河南省舞钢市境内的淮河上游洪河支流滚河上,控制流域面积 230 km<sup>2</sup>,总库容 1.2 亿 m<sup>3</sup>,是一座以防洪、工业供水为主,结合灌溉、旅游、养殖等任务的大(2)型工程。工程等级为 II 等,枢纽主要建筑物为 2 级。大坝坝型为全断面碾压混凝土重力坝,由右岸非溢流坝段、溢流坝段、左岸非溢流坝段组成,取水建筑物布置在左岸非溢流坝段内。

水库经过多年运行,部分坝段坝基扬压力监测值偏高,同时,在对应部位有析出物析出和渗水现象<sup>[14-16]</sup>。为探明析出物物质组成并分析来源,对析出物及其附近渗漏水进行了采样分析。

## 2 析出物特征分析

### 2.1 析出物表观特征及取样

石漫滩水库坝基廊道内析出物分布较为广泛,在不同坝段上下游墙壁及廊道顶部皆有析出。为开展坝址区渗水析出物特征分析研究,首先对坝基廊道内渗水析出物的表观特征进行了现场调查。根据其颜色特征,可分为以下 3 类。

(1)析出物呈现出黑色或暗褐色,此类析出物分布相对较少。

(2)析出物呈现以白色为主,局部部位夹米黄色,此类析出物分布最为广泛。

(3)析出物以白色为主,但局部呈现粉色,且粉色部位多为蓬松、疏散状。

对以上各分类特征下的析出物进行取样,取样位置及照片见表 1 和图 1。

表 1 廊道内析出物取样分析基本情况

Tab. 1 Basic facts of sampling analysis of precipitates in corridors

样品编号	取样位置	析出物颜色	现场照片
X1	4 号、5 号坝段分缝处	黑色	图 1(a)
X2	5 号坝段 S <sub>11</sub> <sup>5</sup> 标号处	白色夹黄色	图 1(b)
X3	6 号坝段廊道下游侧 S <sub>10</sub> <sup>6</sup> 标号处	白色夹粉色	图 1(c)

### 2.2 析出物矿物组分分析

通过对析出物试样进行 X 射线衍射(X-Ray Diffraction,简称 XRD)分析,可揭示析出物的微观形态和矿物组成<sup>[17]</sup>。对所取的 3 个析出物样进行 XRD 分析(分析仪器采用日本理学公司生产的 D max/RB 型 X-射线衍射仪),测试图谱见图 2。

由图 2 可以看出:

(1)析出物试样 X1 的微观形态均为呈无定形的非晶形物质,为典型的地下水化学潜蚀作用所形成的析出物。

(2)析出物试样 X2 和试样 X3 的测试图谱存在明显的衍射峰,与数据库中典型矿物衍射峰相比较可以看出,试样 X2 和 X3 中含有呈晶形的方解石矿

物。反映出此类析出物所处位置,坝基水对混凝土侵蚀较为严重,即坝基水把混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶出带走,在渗出位置与空气中的  $\text{CO}_2$  反应生成的

结晶物质;同时,试样测试图谱中无明显的石英衍射峰,说明侵蚀仍以化学侵蚀为主,而不存在侵蚀破坏引起的物理搬运。



图1 廊道析出物取样照片

Fig. 1 Photos of corridor precipitate samples

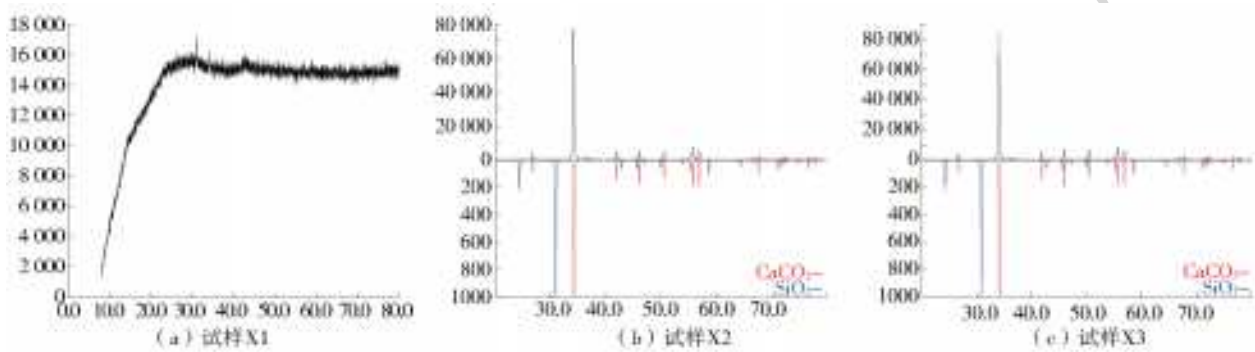


图2 析出物试样 X 射线衍射图谱

Fig. 2 XRD pattern of precipitate samples

### 2.3 析出物化学组分分析

通过 X-射线荧光光谱分析技术可对析出物进行化学组分分析,可了解析出物的化学组成及其含量<sup>[18]</sup>。分析结果可以元素的氧化物表示,其含量以相对含量表示,即百分比含量。表 2 为此次 3 个析出物样品的化学组分测试结果(分析仪器采用美国热电集团瑞士 ARL 公司生产的 ADVANT'XP 型 X 射线荧光光谱仪)。

由表 2 可以看出:

(1)析出物试样 X1 中质量分数大于 1%的组分

共 7 项,依次为: $\text{MnO}(45.21\%)>\text{LOI}(23.68\%)>\text{SiO}_2(10.04\%)>\text{CaO}(7.11\%)>\text{Fe}_2\text{O}_3(4.85\%)>\text{Al}_2\text{O}_3(4.46\%)>\text{MgO}(1.30\%)$ ;

(2)析出物试样 X2 中质量分数大于 1%的组分共 4 项,依次为: $\text{CaO}(50.09\%)>\text{LOI}(43.61\%)>\text{MgO}(3.28\%)>\text{SiO}_2(1.37\%)$ ;

(3)析出物试样 X3 中质量分数大于 1%的组分共 2 项,依次为: $\text{CaO}(53.32\%)>\text{LOI}(45.26\%)$ 。

根据已有研究<sup>[19]</sup>,对析出物来源具有指示作用的化学组分主要包括以下 3 组。

表 2 廊道析出物样的化学组分测试结果

Tab. 2 Inorganic component test results of precipitates in corridors

化学组分	X1	X2	X3	化学组分	X1	X2	X3
LOI	23.680	43.610	45.260	TiO <sub>2</sub>	0.131	0.007	0.004
SiO <sub>2</sub>	10.040	1.370	0.750	MnO	45.210	0.026	0.003
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.460	0.999	0.170	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.722	0.058	0.080
CaO	7.110	50.090	53.320	BaO	0.664	0.015	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.850	0.110	0.010	ZnO	0.388	0.006	
K <sub>2</sub> O	0.622	0.023	0.011	SrO		0.137	0.129
SO <sub>3</sub>	0.372	0.177	0.119	Cl		0.015	0.022
Na <sub>2</sub> O	0.097	0.046	0.035	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.013
MgO	1.300	3.280	0.072	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			0.003

注:表中 LOI 表示烧失量。

(1)SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。作为自然界中的主要造岩矿物,其含量常达 70%以上。硅、铝类矿物的溶解度与溶液的酸碱程度密切相关,在酸性水中溶解度很小,而在碱性水中,其溶解度才有所增大。若出现析出物的水溶液呈酸性,但析出物中的硅、铝组分含量比较高(如大于 25%),则可认为此类析出物已不具有典型的化学潜蚀作用的特征,而具有物理-化学双重潜蚀作用的标志。

(2)Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MnO。主要来源于岩体结构面中的铁、锰质的析出。在还原条件下,此类物质或以低价的离子态,或以低价的氧化物进入坝基水溶液中并随之迁移;在排水孔出口处由于环境趋于氧化条件,由胶体变成凝胶并最终析出。一般呈棕红色的析出物中,以 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主,而在黑色者中,MnO 则为主成分。此类物质一般为化学潜蚀作用的产物,其长期析出可能导致结构面“空化扩容”,进而影响到岩体的渗透稳定性。

(3)CaO 和烧失量。钙及其氧化物是可溶性物质。除碳酸盐岩层外,此类物质在多数岩石中的质量浓度很低。另一方面,大坝基础混凝土以及坝基帷幕体中,水泥是其主要的成分,水化后形成Ca(OH)<sub>2</sub>等产物,在具有软水(Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> < 3.0 meq/L)、溶出型侵蚀作用(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> < 1.07 mmol/L)的环境水作用下,可导致上述工程结构中钙质析出。

对检测结果中以上 3 类 6 项指标的质量浓度进行统计,并分别计算各类所占的比例,结果见表 3。同时,为更直观地显示各类指标的相对关系,可作三角图见图 3。

表 3 代表性化学组分所占百分比含量

Tab. 3 Percentages of representative chemical constituents

样品编号	单位: %		
	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO	CaO + LOI
X1	15.21	52.50	32.29
X2	2.46	0.14	97.40
X3	0.92	0.01	99.06

结合表 3 和图 3 可以看出,石漫滩水库坝基廊道析出物可分为以下两种:

(1)一种为黑色析出物,其化学组分主要为

表 4 石漫滩水库水样检测结果

Tab. 4 Water sample test results of Shimantan reservoir

序号	名称	pH	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1	上游	7.78	23.05	21.41	20.88	3.39	64.54	0	22.25	16.89	42.78
2	下游	7.44	18.56	23.36	32.40	7.46	114.01	0	27.39	10.37	43.11
3	S1	7.65	4.46	18.75	34.93	12.71	96.87	0	32.55	0	59.02
4	S2	9.87	11.92	18.48	51.19	10.43	0	73.20	29.12	4.13	58.44
5	S3	9.65	4.10	16.50	55.80	12.27	0	77.22	30.21	1.61	56.83

注:表中除 pH 值外,其余指标单位皆为 mg/L。

MnO,来源于岩体结构面中的锰质胶结物质受坝基水化学侵蚀作用后的析出;

(2)另一种为白色析出物,其内夹杂有黄色或粉色,其烧失量相对较大,均达到了 40%以上,且化学组分主要为 CaO,含量超过 50%,且在其矿物相中出现方解石,这表明此类析出物主要是坝基水对坝体混凝土的化学侵蚀作用形成。

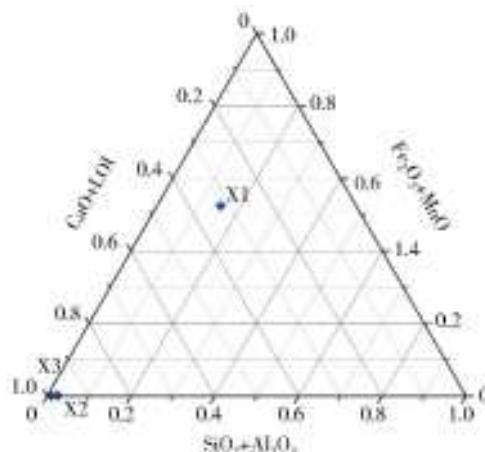


图 3 析出物化学组分三角图

Fig. 3 Triangulation of chemical composition of precipitates

### 3 廊道渗漏水水质分析

#### 3.1 水样采集与检测

由于析出物主要是坝基水与混凝土材料、基岩中可溶组分化学反应后的产物,因此廊道渗漏水的化学组成也在另一方面反映了坝基水对固相的溶蚀程度。为开展坝址水质分析研究,对析出物附近水样及上下游水样进行采集,共采集水样 5 例。包括:(1)上游库水。(2)下游库水。(3)S1 位于廊道内 4 号、5 号坝段分缝处。(4)S2 位于廊道内 5 号坝段 S<sub>11</sub><sup>5</sup> 标号处。(5)S3 位于廊道内 6 号坝段下游侧 S<sub>10</sub><sup>6</sup> 标号处。

采得水样经高密度聚乙烯瓶密封盛装后,通过离子色谱法测定 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等主要阴、阳离子浓度(分析仪器采用美国 THEROM 公司生产的 iCAP6300 型全谱直读等离子体发射光谱仪),并对水样的 pH 值进行测量。检测结果见表 4。



### 3.2 水化学特征分析

为研究采集水样的水化学类型,绘制 Piper 三线图见图 4。

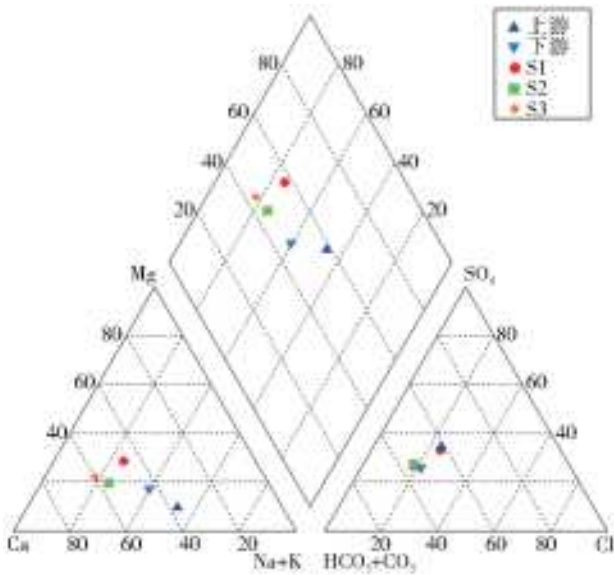


图 4 石漫滩水库水样 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of water samples from Shimantan reservoir

由表 4 和图 4 可以看出:

(1)上、下游库水的水化学组成较为近似,其水

化学类型皆为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ ,可以看出,其阳离子主要为  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$ ,阴离子主要为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,其 pH 值相对较低,呈中性至弱碱性,分别仅为 7.78 和 7.44,而矿化度分别为 182.92 mg/L 和 219.65 mg/L;

(2)廊道内采集的 S1 水样,其水化学类型为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ ,主要阴、阳离子组分与上游库水较为近似,仅阳离子中  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度略高,仅次于  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度,且其 pH 值也相对较低,仅为 7.65,其矿化度也仅略高于上游库水,为 210.85 mg/L;

(3)廊道内采集的 S2 和 S3 其水化学类型较为一致,为  $\text{CO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$  型,不同于上游库水,其阴离子主要为  $\text{CO}_3^{2-}$ ,而阳离子主要为  $\text{Ca}^{2+}$ ,其 pH 值分别为 9.87 和 9.65,达到了碱性,矿化度较上游库水也有较大增长,达到了 256.92 mg/L 和 254.55 mg/L。

可以看出,部分廊道内采集获得的水样其水化学组成较上游库水发生较大改变,为更加直观地比较其组分的异同,可通过水化学图示法进行分析,作上游库水以及廊道内 S1、S2 和 S3 的 Stiff 图见图 5。

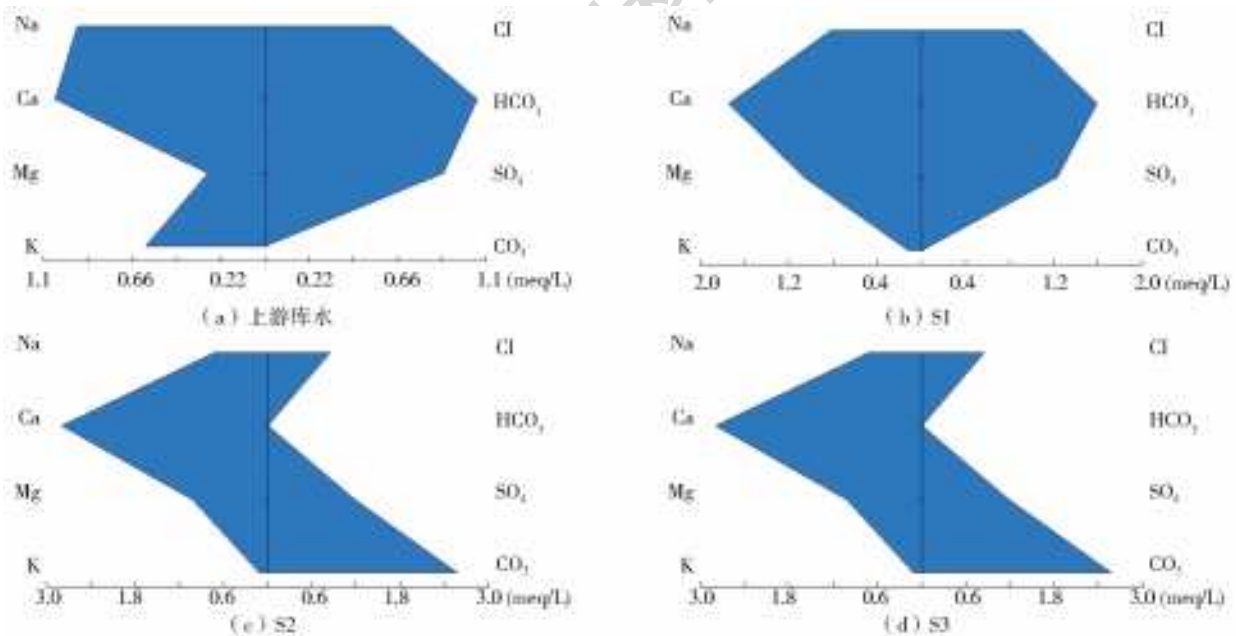


图 5 石漫滩水样 Stiff 图

Fig. 5 Stiff diagram of water samples from Shimantan reservoir

由图 5 可以看出:

(1)S1 与上游库水阴离子形状较为一致,而阳离子部分差异也相对较小,仅库水中  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  相对较高,而在 S1 中  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度相对高一些,且 S1 的离子毫克当量较上游库水仅略有增加,但增幅不大;

(2)S2 和 S3 图形形状基本一致,且与上游库水

差异较大,表明这两处水样的化学组成较其来源的上游库水发生较大改变,阳离子中  $\text{Ca}^{2+}$  毫克当量达到 2.4 meq/L 以上,远大于上游库水中的,而阴离子中  $\text{HCO}_3^-$  也全部转化为了  $\text{CO}_3^{2-}$ 。

### 3.3 溶液饱和指数计算

由于在廊道内采集获得的水样附近同时采集了

析出物样,析出物的形成与溶液中对对应矿物的饱和指数 SI 值有关<sup>[20]</sup>。因此,计算水溶液中的方解石( $\text{CaCO}_3$ )、白云岩( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )和石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )等矿物的饱和指数 SI 见图 6。

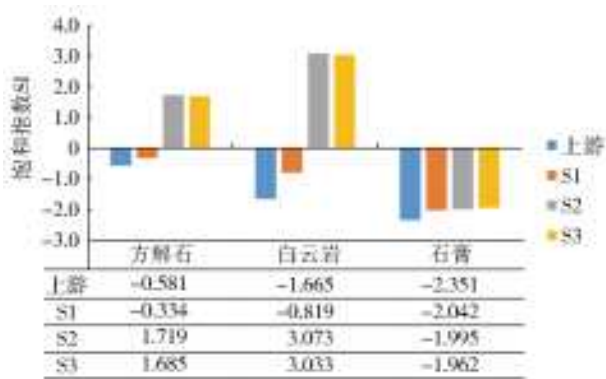


图 6 石漫滩水库采集水溶液中部分矿物饱和指数

Fig. 6 Mineral saturation index of aqueous solution from Shimantan Reservoir

由图 6 可以看出:

(1)对于溶液中方解石饱和指数 SI 值,S2 和 S3 水样中其值大于 0,分别达到了 1.719 和 1.685,呈过饱和形态,而在上游库水和 S1 中则小于 0,仅为 -0.581 和 -0.334,为不饱和;

(2)对于溶液中白云岩饱和指数而言,与方解石较为相似,同样 S2 和 S3 中为过饱和形态,饱和指数 SI 值分别达到了 3.073 和 3.033,而上游库水和 S1 中则不饱和,分别为 -1.665 和 -0.819;

(3)对于溶液中石膏的饱和指数,4 个水样中的值皆小于 0,按从大到小依次为  $S3 > S2 > S1 >$  上游库水。

## 4 结 论

针对石漫滩水库坝基廊道部分部位扬压力偏高、析出物大量析出并伴有渗水等现象,为探明析出物的物质组成与来源,对析出物和水样进行采集和检测分析。析出物样的 X 射线衍射和荧光光谱分析结果表明,水库大坝廊道析出物主要可分为两种类型,其中黑色析出物主要成分为  $\text{MnO}$ ,其形成主要是与坝基水对基岩裂隙面中的锰质胶结物质的化学侵蚀作用有关,表明主要发生在坝基基岩裂隙,且通过水化学图示法显示,此类析出物附近的渗漏水与上游库水差别不大,各类离子组分质量浓度以及 pH 值无明显变化;另一类析出物主要以白色为主,夹杂有粉色或黄色物质,其化学成分主要为  $\text{CaO}$  和烧失量,并且在矿物形态中以具有晶形的方解石为主,同时,此类析出物附近的水溶液 pH 值相对较高,以碱性为主,同时溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  以及  $\text{CO}_3^{2-}$  质量

浓度较上游库水明显增大,通过计算溶液中相关矿物相的饱和指数表明溶液中方解石和白云岩呈过饱和形态,表明此类部位主要以坝基水对坝体混凝土材料的化学侵蚀作用为主。

由析出物分析可获得坝基水化学侵蚀发生的主要部位,可为之后除险加固工程中坝体及坝基相应补强部位的科学选取提供依据。

## 参考文献 (References):

- [1] 宋汉周,霍吉祥,王建平,等. 水电站坝址渗流微观动态研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):472-479. (SONG H Z, HUO J X, WANG J P, et al. Review of micro-regimes of seepage around dam sites of hydropower stations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(5): 472-479. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2015. 05. 012.
- [2] 郑贞宝,屠毓敏,刘国华,等. 龙凤山水库土石坝渗流混水现象研究[J]. 岩土力学,2009,30(4):1029-1034. (ZHENG Z B, TU Y M, LIU G H, et al. Research on seepage muddle water phenomena at earth-rock dam for Longfengshan reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1029-1034. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2009. 04. 029.
- [3] 胡明玉,徐旺敏,何雯,等. 江西省大中型混凝土水库大坝溶出性侵蚀调查研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(4):54-59. (HU M Y, XU W M, HE W, et al. Investigation on dissoluble erosion of large-and-medium-sized concrete dams in Jiangxi Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(4): 54-59. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20161179.
- [4] 邢林生. 坝基析出物分析与评判[J]. 水力发电,2007,33(9):85-88. (XING L S. Analysis and evaluation on sludge from dam foundation[J]. Water Power, 2007, 33(9): 85-88. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2007. 09. 030.
- [5] 孔俐丽,于萍,罗运柏. 水电站大坝廊道内及坝体析出物的分析与试验研究[J]. 水力发电,2006,32(8):85-88. (KONG L L, YU P, LUO Y B. Analysis and tests on the sludges from galleries and dam body of hydropower station[J]. Water Power, 2006, 32(8): 85-88. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2006. 08. 028.
- [6] 邵晓妹,李珍,陈亮. 某水电站坝基析出物分析[J]. 水力发电,2015,41(1):42-45. (SHAO X M, LI Z, CHEN L. Analysis on the precipitates of a hydropower station [J]. Water Power, 2015, 41(1): 42-45. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2015. 01. 014.

- [7] 张志敏,龙建辉,周子东.某 RCC 坝体廊道大量白色异物析出成因及对坝体的危害分析[J].太原理工大学学报,2013,44(6):776-780. (ZHANG Z M, LONG J H, ZHOU Z D. The precipitation causes and hazard analysis of a large number of white foreign body in RCC Dams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(6):776-780. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-9432.2013.06.023.
- [8] 何鹏,陈健康,王东,等.宝珠寺水电站廊道析出物中钙质成因分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(4):450-455. (HE P, CHEN J K, WANG D, et al. Analysis of the formation mechanism of the calcareous sludges from the drainage galleries in Baozhushi hydropower plant, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(4):450-455. (in Chinese)) doi:10.3969/j.issn.1671-9727.2011.04.012.
- [9] 吕全伟,王东,何鹏,等.宝珠寺水电站坝基析出物的聚类分析[J].中国农村水利水电,2013,(8):155-157. (Lu Q W, WANG D, HE P, et al. Cluster analysis of precipitates in dam foundation of Baozhushi hydropower station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (8):155-157. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2013.08.040.
- [10] 管清晨,宋汉周,霍吉祥,等.基于化学热力学的大坝廊道渗水析出物量化分析[J].水文地质工程地质,2015,42(1):42-46. (GUAN Q C, SONG H Z, HUO J X, et al. Quantitative analysis of precipitate in dam corridor based on chemical thermodynamics [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1):42-46. (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.01.07.
- [11] 彭红明,梁杏,毛绪美,等.基于 PHREEQC 的某大坝排水洞析出物定量预测[J].水文地质工程地质,2010,37(4):111-115. (PENG H M, LIANG X, MAO X M, et al. Quantitative prediction of precipitate in a dam's drainage holes based on PHREEQC [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4):111-115. (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2010.04.023.
- [12] 余波,郑克勋,王建平,等.混凝土坝基防渗帷幕体老化的基本模式及识别指标[J].水利水电科技进展,2017,37(6):48-53. (YU B, ZHENG K X, WANG J P, et al. Basic patterns and identification indexes for ageing behavior of anti-seepage curtains under a concrete-dam foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6):48-53. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2017.06.009.
- [13] 罗黎,王健平,宋汉周.基于渗流动态的富春江大坝基础运行性态分析评价[J].水电能源科学,2016,34(2):60-64. (LUO L, WANG J P, SONG H Z. Analysis and evaluation of Fuchunjiang dam foundation operating performance based on seepage dynamic [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(2):60-64. (in Chinese))
- [14] 沈振中,魏金帅,马福恒,等.基于功效函数的台风作用下水利工程风险度分析方法[J].南水北调与水利科技,2012,10(6):1-5. (SHEN Z Z, WEI J S, MA F H, et al. Risk degree analysis method of water conservancy project under action of typhoon based on power function [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(6):1-5. (in Chinese)) DOI:1672-1683 (2012) 06-0001-05.
- [15] 袁自立,马福恒,李子阳.石漫滩碾压混凝土重力坝渗流异常成因分析[J].水电能源科学,2013,31(5):42-45. (YUAN Z L, MA F H, LI Z Y. Cause analysis of seepage anomaly of Shimantan RCC gravity dam [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5):42-45. (in Chinese))
- [16] 袁自立,马福恒,焦延涛.石漫滩碾压混凝土重力坝温度效应分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):61-64. (YUAN Z L, MA F H, JIAO Y T. Analysis of temperature effects of shimantan RCC gravity dam [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5):61-64. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.05061
- [17] 解其云,吴小山. X 射线衍射进展简介 [J]. 物理, 2012, 41(11):727-735. (XIE Q Y, WU X S. The development of X-ray diffraction [J]. Physics, 2012, 41(11):727-735. (in Chinese))
- [18] 章连香. X-射线荧光光谱分析技术的发展 [J]. 中国无机分析化学, 2013, 3(3):1-7. (ZHANG L X. Advances in X-ray fluorescence spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2013, 3(3):1-7. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.2095-1035.2013.03.001.
- [19] 宋汉周. 大坝环境水文地质研究 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007. (SONG H Z. environmental hydrogeology around dam-site [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [20] 杨敏,卢耀如,张凤娥,等.柳林泉域岩溶水化学演化及地球化学模拟 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1):127-134. (YANG M, LU Y R, ZHANG F E, et al. Hydrochemical evolution and geochemical simulation of karst groundwater in Liulin Springs [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1):127-134. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180020.