# 乌东德水电站坝址区 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 成因与分布特征分析

骆祖江<sup>1</sup> ,张 弘<sup>1</sup> ,李会中<sup>2</sup> ,王团乐<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文地质研究所,南京 210098;2. 长江三峡勘测研究院有限公司,武汉 430010)

摘要:针对金沙江乌东德水电站坝址区左右两岸地下水中 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>含量的差异,尤其是左岸 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>含量普遍高于右岸的特征,通过岩矿和水化学成分分析,采用聚类分析法分析了地下水中 SO<sub>4</sub><sup>--</sup>与其他离子成分的相关性,并结合水岩相互作用 及水化学场、水温场、水动力场等方面的分析研究,发现坝址区地下水中 SO<sub>4</sub><sup>--</sup>的来源主要与地层中的黄铁矿有关,左右 两岸地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量的差异主要由于二岸地下水循环不同所致。

关键词: 乌东德;聚类分析;水化学场;水温场;水动力场

中图分类号: P641.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3665(2011)04-0032-06

乌东德水电站位于金沙江下游四川省和云南省的 界河上,是金沙江下游河段(攀枝花市至宜宾市)4个 水电梯级(乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝)中的最上 游梯级 坝址所处河段的右岸隶属云南省昆明市禄劝 县 左岸隶属四川省会东县。电站坝址位于乌东德峡 谷下段,金沙江在此河段流向 SE160°左右,两岸地形 陡峻 形成峡窄的 "V"型谷 高程 1 150~1 200m 岸坡 陡峻,坡角一般 60°~75°。河床高程 800m 左右,枯水 期水面高程约 815m 相应水面宽 100~150m。坝址区 内出露的地层有因民组(Pt, y)大理岩、落雪组(Pt, l) 变质灰岩和大理岩、灯影组(Z,d)白云岩等可溶岩(图 1)。坝址区两岸顺层溶蚀问题较明显,地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量差异较大,左岸SO<sup>2-</sup>含量普遍高于右岸,尤其是 左岸落雪组第二段大理岩化白云岩地层中地下水  $SO_4^2$  含量高达 646 mg/L 具弱硫酸盐型腐蚀性<sup>[1]</sup>。因 此,查明坝址区地下水中 SO4<sup>-</sup>的来源及其左右二岸 地下水中 SO<sup>2-</sup> 含量的差异原因,对大坝工程建设具 有重大意义。

1 地下水化学成分特征

乌东德水电站坝址区两岸地下水位埋深均较大, 一般都在150~250m之间。2009年8月左、右两岸共 取钻孔地下水样39个(图1)。

分析结果发现 左岸 19 个水样中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量超过

收稿日期: 2010-08-30;修订日期: 2010-11-14

作者简介: 骆祖江(1964 –),男,教授,主要从事水文地质、工程地质方面的研究。

E-mail: luozujiang@ sina. com



图 1 研究区地质略图及地下水取样钻孔分布图

Fig. 1 Geological map of the Wudongde dam site and the distribution of boreholes for groundwater samples

200mg/L 有 8 个,最小为 84mg/L,最高达 646mg/L,溶 解性总固体最小为 387mg/L,最大为 1350mg/L,地下 水化学类型主要为溶解性总固体小于 1.5g/L 的 HCO<sub>3</sub> •SO<sub>4</sub>—Mg•Ca 型<sup>[2]</sup>;右岸 20 个水样中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量最小 为 49mg/L,最大为 177mg/L,溶解性总固体最小为 357mg/L,最大为 781mg/L,地下水化学类型主要为溶 解性总固体小于 1g/L 的 HCO<sub>3</sub> • SO<sub>4</sub>—Mg•Ca 和 HCO<sub>3</sub>—Mg•Ca 型。两岸水样 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量差异显著,左岸 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量总体高于右岸。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量的差异是导致两 岸地下水化学类型存在差异的主要原因<sup>[3-4]</sup>。

### 2 地下水化学成分 R 型聚类分析

地下水中某一离子成分的出现并不是单一的,往

往和其他离子伴生出现,呈现出较好的相关性。R型 聚类分析可以将地下水中各离子成分进行比较,建立 不同离子之间的相关关系,从而对离子进行分类。通 过对2009 年 8 月所取水样分析资料,分别进行左岸、 右岸和全坝址 R型聚类分析,结果见图2。

左岸水样中, $SO_4^{2-}$ 和 $Mg^{2+}$ 的相关系数为0.930, 相关性最好,优先进行并类,接着与 $Ca^{2+}$ 进行并类,然 后又和 $HCO_3^{-}$ 进行并类,形成一个大类。右岸水样  $SO_4^{2-}$ 和 $Ca^{2+}$ 的相关系数为0.785 $SO_4^{2-}$ 与 $Ca^{2+} Mg^{2+}$ 与 $HCO_3^{-}$ 先并类,接着二者又进行并类,形成一个大 类。两岸地下水中  $SO_4^{2-}$  和  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 均有很好的相 关性,同时又与  $HCO_3^{-}$  相关,说明左右岸地下水中  $SO_4^{2-}$  的成因是相同的<sup>[5]</sup>。

## 3 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 成因分析

坝址区在勘探过程中共有 18 个钻孔发现有黄铁 矿晶体分布:其中河床处有 3 个,左岸有 11 个,右岸有 4 个,左岸分布较多,晶体在灰岩及白云岩地层内均有 出露,出露高程 678.05 ~ 947.87m,且大多位于 830m 高程以下,即坝址区地下水位以下,详见表 1。

	衣Ⅰ	坝址珀扎迺典	、钛钡盲	自144 犹 江 す	文			
Table 1	Boreholes	encountering	pyrite	crystals	in	the	dam	site

钻孔	所在位置	地层	岩性	黄铁矿晶体出现高程	备注
ZK74	坝址上游河床	$\operatorname{Pt}_2 l^1$	薄层状灰岩	734.50 ~ 733.88m , 727.50 ~ 727.40m ,724.50 ~ 724.20m	河床
ZK44	I 勘线上游江心处	$Pt_2 l^{3-1}$	中厚层灰岩	678.18 ~ 678.05 m	河床
ZK40	坝址 III 勘线河床	$Pt_2 l^{3-1-2}$	白云岩	702. 47 ~ 702. 42 m	河床
ZK121	950mLPD15 号平硐 硐深 29.2m 处	$\operatorname{Pt}_2 l^2$	白云石大理岩	818.99 ~ 818.69m , 818.49 ~ 818.41m &00.24 ~800.16m	左岸
ZK105	Ⅳ 堪线坝肩 990	$Pt_2 l^{3-1-1}$	白云岩	947. 87 ~ 947. 47 m	左岸
ZK134	左岸 850 勘探路交通硐内	$Pt_2 l^{3 - 1 - 1}$ , $Pt_2 l^2$	灰岩、白云岩夹灰岩	多处可见	左岸
ZK135	坝址 I 堪线( 左岸 850)	$\operatorname{Pt}_2 l^2$	厚层大理岩化白云岩	799.23m 以下见多处	左岸
ZK136	坝址I堪线(左岸 850)	$\operatorname{Pt}_2 l^3$	厚层大理岩化白云岩	见 5 处	左岸
ZK139	左岸 850 勘探路	$\operatorname{Pt}_{2}l^{3-1-1}$	大理岩、灰岩	826.84 ~ 826.64m , 727.14 ~ 726.82m	左岸
ZK140	坝址区坝肩 I 堪线 850 高程 PD5 - 2 硐内	$Pt_2 l^{3-1-1}$	大理岩	见于上部大理岩内	左岸
ZK141	左岸 850 勘探路 PD5 - 3 号平硐内	$Pt_2 l^{3-1-1}$	灰岩	783. 62 ~ 783. 52m	左岸
ZK143	左岸 850PD19 内	$Pt_2 l^{3-1-1}$	灰岩	751. 34 ~ 750. 74m	左岸
ZK145	左岸 850 勘探路上	$\operatorname{Pt}_{2}l^{3-1-1}$	灰岩	813.40 ~ 813.38m , 752.53 ~ 751.83	左岸
ZK249	990 左岸 PD41 - 1 内	$Pt_2 l^{3-1-1}$	灰岩	867. 87 ~ 867. 40m	左岸
ZK157	右岸 850 勘探路	$Pt_2 l^{3-1-1}$	大理岩化灰岩 夹大理岩	见于 751.47m 以下 ,孔底高程 715.47m	右岸
ZK162	右岸 850 勘探路Ⅳ勘线与Ⅱ勘线间	$\operatorname{Pt}_2 l^{2-2}$	白云岩	818.28 ~ 818.25m, 815.63 ~ 815.59m	右岸
ZK163	右岸 850 PD - 54 - 1 内	$Pt_2 l^{3-2-1}$	灰岩	775.01 ~ 774.86m,773.96 ~ 773.61m,顺层面	右岸
ZK166	右岸 850 PD - 58 内	$\operatorname{Pt}_2 l^{3-3}$	灰岩	764.22 ~ 764.13m,762.94 ~ 762.29m 顺层面	右岸

开放系统下地下水流经含黄铁矿的灰岩和白云岩 地层,可发生下列一系列化学反应:

 $2 \operatorname{FeS}_{2} + 7 O_{2} + 2 H_{2} O = 2 \operatorname{FeSO}_{4} + 2 H_{2} SO_{4}$   $12 \operatorname{FeSO}_{4} + 3 O_{2} + 6 H_{2} O = 4 \operatorname{Fe}_{2} (SO_{4})_{3} + 4 \operatorname{Fe} (OH)_{3} \downarrow$   $\operatorname{Fe}_{2} (SO_{4})_{3} + 6 H_{2} O = 2 \operatorname{Fe} (OH)_{3} + 3 H_{2} SO_{4}$   $\operatorname{CaCO}_{3} + H_{2} SO_{4} = \operatorname{Ca}^{2^{+}} + SO_{4}^{2^{-}} + H^{+} + \operatorname{HCO}_{3}^{-}$  $\operatorname{CaMg} [CO_{3}]_{2} + 2 H_{2} SO_{4} = \operatorname{Mg}^{2^{+}} + \operatorname{Ca}^{2^{+}} + 2 \operatorname{SO}_{4}^{2^{-}} +$   $2H^{+} + 2HCO_{3}^{-}$ 

黄铁矿在地下水运动下被氧化<sup>[6-7]</sup>,与灰岩和白 云岩产生水岩作用,使得地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 有很好的相关性,又和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>有一定的相关性,这与 聚类分析的结果完全一致。说明坝址区地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的来源与坝址区灰岩和白云岩地层中黄铁矿的 存在有关。









4 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 分布分析

## 4.1 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 分布特征

据 2009 年 8 月的实测资料分析,坝址区左岸地下 水中  $SO_4^{2^-}$  含量由河岸向山里逐渐升高,右岸  $SO_4^{2^-}$  含 量变化较平缓,左岸地下水中  $SO_4^{2^-}$  含量远高于右岸, 其中落雪组第二段大理岩化白云岩地层中地下水 $SO_4^{-}$ 含量最高,达 646 mg/L(图 3)。



图 3 2009 年 8 月坝址区 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

#### 浓度(mg/L)等值线图



4.2 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 分布特征形成原因分析

(1) 渗透率场分析

通过对坝址区钻孔压水试验资料统计分析,发现 坝址左右二岸830m高程以下,钻孔压水试验得到的 吕荣值相差较大,右岸钻孔吕荣值明显高于左岸(图 4)。说明右岸岩体透水性强于左岸。

(2) 水动力场分析

根据 2009 年 7 月 1 日实测坝址区地下水流场可 知,右岸地下水位较平缓,左岸地下水位由河岸向山里 提高幅度远高于右岸,左岸地下水水力梯度明显高于 右岸(图 5~6),说明右岸地下水径流条件好于左岸。

(3) 水化学场分析

溶解性总固体是反映地下水径流强度的重要指标,径流强度越大,溶解性总固体越低,反之越高。径流强度是单位时间内地下水通过某断面的流量,与岩石的透水性及水力梯度成正比,因此,溶解性总固体越高,表明岩石的透水性越弱,地下水径流的条件越差; 溶解性总固体越低,表明其径流条件越好,其位置越靠近岩溶管道发育区或地下水排泄区<sup>[8]</sup>。

左岸地下水中溶解性总固体大小由河岸向山里逐 渐升高,右岸溶解性总固体大小变化较平缓,说明右岸 地下水径流条件好于左岸(图7)。

(4) 水温场分析







据 2009 年 8 月坝址区实测地下水温度场,坝址区 地下水温度无明显异常,左岸地下水温度高于右岸,且 由河岸向山里提高幅度也高于右岸(图 8)。说明右岸 岩体透水性强,地下水径流条件好,地下水循环快;左



图 7 2009 年 8 月坝址区溶解性总固体(mg/L)等值线图 Fig. 7 Concentration (mg / L) contour map of salinity in the dam site area in August, 2009

岸岩体透水性弱,地下水径流条件差,地下水循环缓 慢<sup>[9]</sup>。





综上所述,从渗透率场、水动力场、水化学场、水温 场四个方面说明了右岸岩体地下水径流条件好于左 岸。乌东德坝址区盖层和基底之间,分布有澄江组石 英砂岩,为一隔水层,盖层和基底含水层之间没有水力 联系。然而由于构造运动影响,坝址区基底地层近直 立,并在金沙江河谷两侧直接出露地表,因此盖层和基 底都接受大气降水补给(图9)。右岸地形相对左岸较 平缓,且基底出露面积要比左岸大,因此接受大气降水 补给要比左岸多,有利于岩溶的发育,也有利于大气降水、地下水和金沙江地表水之间的循环交替<sup>[10]</sup>,导致 右岸地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量要比左岸少,地下水的溶 解性总固体、温度比左岸低。





## 5 结论

乌东德坝址区地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的来源与坝址区灰 岩和白云岩地层中黄铁矿的存在有关。坝址区右岸基 底地形较左岸平缓,出露面积较左岸大,右岸更多地接 受大气降水补给,岩溶发育程度高于左岸,地下水径流 条件好于左岸,导致了右岸地下水位变化平缓,左岸水 位由河岸向山里抬升较快。左岸地下水循环较右岸 差,是左岸 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量高于右岸的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 黄润秋,徐则民,许模.地下水的致灾效应及异常 地下水流诱发地质灾害[J].地球与环境,2005, 33(3):1-9. [HUANG R Q, XU Z M, XU M. Hazardous Effects of Underground Water and Extraordinary Water Flow-Induced Geohazards [J]. Geology-geochemistry,2005,33(3):1-9. (in Chinese)]
- [2] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础
  [M].北京:地质出版社,1995:54-56. [WANG
  D C, ZHANG R Q, SHI Y H, et al. Basic
  Hydrogeology [M]. Beijing: The Geological Publishing
  House, 1995:54-56. (in Chinese)]
- [3] Atasoy Ayse Dilek, Yesilnacar Mehmet Irfan. Effect of high sulfate concentration on the corrosivity: A case study from groundwater in Harran Plain, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010 (166): 595 - 607.
- [4] Ting-Nien Wu, Chen-Hsiang Huang. Statistical

Diagnosis of Groundwater Quality Data in Kaohsiung Science Park [C]//Web Information Systems and Mining , 2009: 265 - 269.

- [5] Lin N H ,Lee H M ,Chang M B. Evaluation of the characteristics of acid precipitation in Taipei , Taiwan using cluster analysis [J]. Water , Air , and Soil Pollution , 1999(113): 241 - 260.
- [6] 宋汉周,岳克强,施永新.湖南镇水电站左坝肩地下水质酸性化的成因机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(4).73-76. [SONG H Z, YUE K Q, SHI Y X. Formation mechanism of acid groundwater in left dam abutment of Hunanzheng Hydro power Station [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002,13(4):73-76. (in Chinese)]
- [7] 马致远,范基姣.陕西渭北东部岩溶地下水中硫酸盐的形成[J].煤田地质与勘探,2005,33(3):
  45-47. [MAZY,FANJJ. Sulphate forming from groundwater in eastern Weibei karst area, Shaanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2005,33 (3):45-47. (in Chinese)]
- [8] 董维红,苏小四,侯光才,等.鄂尔多斯白垩系盆 地地下水溶解性总固体和主要离子浓度的分布规

```
律[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 11 –
16. [DONG W H, SU X S, HOU G C, et al. Study
on distribution law of TDS and main ion concentration
in groundwater in the Ordos Cretaceous Artesian Basin
[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35
(4): 11 – 16. (in Chinese)]
```

- [9] 张发旺,王贵玲,侯新伟,等.地下水循环对围岩温度场的影响及地热资源形成分析——以平顶山矿区为例[J].地球学报:中国地质科学院院报,2000 21(2):142 146. [ZHANG F W, WANG G L, HOU X W, et al. An Analysis of the Formation of Geothermal Resources and the Effects of Groundwater Circulation on the Wall Rock Temperature Field——Taking the Pingdingshan Mining Field as an Example [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(2):142 146. (in Chinese)]
- [10] 王德潜,刘祖植,尹立河.鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J].第四纪研究,2005,25(1):6-14. [WANG D Q,LIU Z Z,YIN L H. Hydro-geological Characteristics and Groundwater Systems of the Erdos Basin[J]. Quaternary Sciences,2005,25(1):6-14. (in Chinese)]

## An analysis of the source and distribution of $SO_4^{2-}$ in dam site area of the Wudongde Hydroelectric Station on Jinshajiang River

LUO Zu-jiang<sup>1</sup> ZHANG Hong<sup>1</sup> ,LI Hui-zhong<sup>2</sup> ,WANG Tuan-le<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Hydrogeology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Three Gorges Survey and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract**: Difference in  $SO_4^{2^-}$  contents exists in groundwater in two banks of the Wudongde Hydro-electric Station. In particular, the  $SO_4^{2^-}$  contents in left side is generally higher than those in the right side. Combined with the study of water-rock interaction, hydrochemical data, temperature and hydrodynamic data, the characteristics of rock and mineral and hydrochemistry were analyzed. The cluster analysis was used to search the relativity of  $SO_4^{2^-}$  and other ions. It is found ultimately that the source of  $SO_4^{2^-}$  is related to the pyrite occurring in the formations. The difference in  $SO_4^{2^-}$  contents in the two sides is mainly due to the different in groundwater circulation.

Key words: Wudongde; cluster analysis; hydrochemistry field; temperature field; hydrodynamic field

责任编辑:汪美华