

Some Geological Affairs Encountered in Water Resource & Hydropower
Engineering and Relevant Countermeasures

水利水电工程若干地质问题 实例及对策

主编 何 鹏

中国建筑工业出版社

水利水电工程若干地质问题实例及对策

Some Geological Affairs Encountered in Water Resource & Hydropower
Engineering and Relevant Countermeasures

主 编 何 鹏

副主编 江启生 李 弋

参 编 刘发祥 胡彬锋 李 黎 李 剑 潘荟霖

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水利水电工程若干地质问题实例及对策/何鹏主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2015. 5
ISBN 978-7-112-18010-3

I. ①水… II. ①何… III. ①水利水电工程—工程地质—
研究 IV. ①P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 070082 号

水利水电工程因其大多位处山区地质构造变动强烈区, 工程影响范围广, 因此涉及的地质问题较其他土木工程更为繁杂。特别是在我国的西南地区, 在诸多的工程地质问题中, 又以岩溶、闸坝基可溶盐物质的溶蚀、库岸边坡的稳定、泥石流等不良地质条件所带来的影响及后果为甚。

本书集编了作者若干年来在西南地区从事水利水电工程地质勘察、设计、科研、咨询等方面的工作成果, 内容涉及边坡稳定分析、岩溶地区水利工程初设阶段地质问题论证、坝基石膏质溶蚀机理、半成岩昔格达地层工程特性, 以及在航空航天信息处理系统支撑下的水利水电工程地灾评估方法等, 作者愿与同行们分享这些工作经验, 同时也敬请同行们批评指正。

责任编辑: 辛海丽

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 关 健

水利水电工程若干地质问题实例及对策

Some Geological Affairs Encountered in Water Resource & Hydropower
Engineering and Relevant Countermeasures

主 编 何 鹏

副主编 江启生 李 弋

参 编 刘发祥 胡彬锋 李 黎 李 剑 潘芸霖

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京永峥有限责任公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17¼ 字数: 431 千字

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-18010-3
(27252)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

由于我国的西南地区位处强烈的构造变动区，在未经人为扰动的情況下，这一地区已然成为地质条件脆弱地区，地震、边坡失稳、岩溶塌陷等地质灾害频发。近年来，由于大量规模不等的水利水电工程的兴建，一方面利用了丰富的水利水电资源，为人民的生活、生产提供了清洁水资源和能源；另一方面，这些工程的建设又进一步加剧了受影响地区地质条件的脆弱性，人为地诱发了一系列的地质灾害。因此，如何平衡水利水电工程对地质环境所造成的负面影响以及为人民所带来的福利，如何尽可能地趋利避害，就成为从事水利水电工程地质人员亟待解决的关键问题。

归纳起来，在西南地区进行水利水电工程建设活动，以及工程完工后运行时期，普遍存在的地质问题有：

(1) 边坡稳定问题 由于工程开挖、运行，边坡岩土体原始平衡要素，如原来的地形地貌、地表水位、地下水位、岩体中主要结构面的工程特性等发生了变化。这些变化势必会导致边坡岩土体内部应力的调整，当调整的结果超出了岩土体的承载极限时，边坡就会出现各种失稳现象。1963年意大利瓦依昂水库库岸失稳，导致惨痛人员伤亡的事件，即为水库蓄水后库岸坡体内地下水位的上升，使顺坡向结构面内地下水动、静水压力上升、工程性质恶化等诸多地质要素的改变所带来的综合性反应。

(2) 闸坝基可溶盐物质溶蚀问题 水利水电工程闸坝地基地层中，常赋存有不同规模、形式的可溶盐物质，如溶蚀性微弱的碳酸盐矿物质（方解石等），溶蚀性中等的硫酸盐矿物质（石膏质等）。作为我国主要水电基地的西南地区也是红层的主要分布地区，该地层的一大特征就是普遍含有以不同形式、不同规模存在的石膏质。多年来，通过对这一地区以红层为坝基的若干水电站闸、坝排水廊道渗漏水的化学检测发现，渗漏水中普遍存在 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度远超出其他环境水（如上游库水及下游河道水）的现象，让人不得不怀疑这些高浓度离子是否就是由闸、坝红层地基中的石膏质溶蚀而来。作为坝基岩土介质体，如果其中的石膏质持续发生溶蚀，势必会对闸、坝等水工建筑物的安全，乃至对周边尤其是下游地区人民的生命财产构成严重威胁。上述疑虑多年来已为众多工程人员所关注和研究，但都没有定论。

(3) 水利水电工程地灾评估的效率问题 水利水电工程相关的地质灾害评估工作一般具有工作范围广、评估时效性强、评价对象和内容复杂、缺乏大比例尺地质图件以及交通不便等特征。中国西部的水利工程大多所处地理位置偏远、地形地貌险峻，往往对评估工作造成诸多的不便，使得地质工程师们难以或难以及时到达某些灾害发生的热点地区，由此影响了评估工作的时效性、准确性以及经济性。随着航天科学技术的不断发展，解析度越来越高的航空、航天地球影像资料正越来越多地被用于地灾评估工作中，有效缓解或克服了上述传统地灾评估工作所面临的困难。而且，相较以往对这些资料的使用，目前已出现了以 Google Earth 为代表的诸多卫星地球影像操作系统，使资料的使用者能更加方便地

在普通电脑上以不同的角度实现对关注区域的三维立体观察。

针对上述问题，作者以自身工作经历为依托，试图展现不同视角、路径的解决方案。书中，将以西藏林芝多布水电站右坝肩、甘肃苗家坝水电站坝址区岩体结构特征分析结果展示岩体深部裂隙发育及浅表部变形破坏模式和机理分析成果；以南充青居水电站闸基石膏质可溶盐物质的溶蚀机理分析成果解释其对水工结构物的影响；以古蔺县朝门水库岩溶勘察成果，展示岩溶地区库、坝区渗漏问题的评估工作方法；以康定金坪水电站工程要点地灾评估成果，展示借助卫星图片及操作系统进行工程地质工作的方法；以加州大学戴维斯分校地质系 E. Cowgill、R. Gold 以及数据分析及可视化研究所及计算机科学系的 T. Bernardin 等人结合地质工作的特点，所开发的专供地质人员使用的一套实时交互式制图软件系统（RIMS）以及 Google Earth 的应用成果为基础，论证这些地球影像操作系统在结合了基础地质资料、地灾历史记录资料以及不同时段影像资料后，成为水利工程地灾评估强有力工具的可能性，并由此提出了以类似系统作为支撑，进行水利工程地质灾害评估的工作程序。

本书相关设计、研究工作得到了王琛副教授、李艳玲教授、符文熹教授、张志龙博士、程晓刚高工、中电顾问集团西北院、四川省水利院等个人和单位的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有缺点与错误，恳请读者批评指正。

目 录

第一篇 坝基地层石膏质的存在及其对水电工程的影响 (以青居水电站为例)

1	关于红层及潜在的工程问题	2
1.1	关于红层	2
1.2	红层地区可能出现的与水利水电工程相关的地质问题	2
1.3	红层地区已建水利水电工程已出现的工程问题	3
2	地层中的可溶盐及其存在形式	5
2.1	可溶盐的基本性质	5
2.2	地层中的可溶盐	7
2.3	红层中可溶盐的溶蚀形态及特征	8
2.4	地层中石膏质的存在形式	9
3	青居水电站基本概况	10
3.1	电站工程概况及工程运行情况	10
3.2	库、闸址区工程地质条件	10
3.3	电站运行面临的地下水问题	15
4	青居水电站溢流坝段出水点水源分析及危险性评估	16
4.1	溢流坝段坝地质条件	16
4.2	溢流坝段“漏水”状况	16
4.3	溢流坝段右岸坡脚出水点水源分析	17
4.4	溢流坝段坝基防渗措施效果分析	18
4.5	出水点地下水活动对右边边坡稳定性影响分析	19
5	青居水电站泄洪闸坝段基础廊道排水孔渗漏特征及原因分析	20
5.1	泄洪闸坝段基本概况	20
5.2	泄洪闸坝段基础廊道排水孔漏水量特征	20
5.3	泄洪闸坝段基础廊道排水孔漏水量较大原因分析	21
6	青居水电站泄洪闸坝段基础廊道排水孔渗漏水钙质成因及分析	23
6.1	水样采集点说明	23
6.2	水样分析内容说明	26
6.3	水样水化学特征分析	27

6.4	岩层中石膏质溶蚀的化学机理	33
7	青居水电站闸基钙质溶蚀可能性、程度及其对工程的影响	36
7.1	青居水电站坝基地层石膏溶蚀量估算	36
7.2	岩层中石膏物质溶蚀的控制因素	36
7.3	青居坝基石膏物质分布特征	37
7.4	青居坝基库水入渗及石膏溶蚀模式	37
7.5	青居坝基石膏溶蚀可能对工程产生的影响及程度	38
8	青居水电站坝基渗漏以及高浓度钙离子、硫酸根离子渗漏水对策	40
8.1	针对坝基较大漏水量的对策	40
8.2	针对坝基石膏溶蚀的对策	40
9	后记	42
9.1	闸坝基可溶物质对水工建筑影响再研究的必要性	42
9.2	国内外研究现状	43
9.3	未来此类问题的研究思路	48

第二篇 RIMS 类似系统支撑下的水利水电工程相关地质灾害评估

1	概述	52
1.1	地质灾害评估工作的目的	52
1.2	水利工程地质灾害评估工作存在的问题	52
1.3	相应对策	53
2	RIMS 类似系统简介	54
2.1	关于 RIMS	54
2.2	RIMS 的实现过程	54
2.3	RIMS 的独到之处	55
3	RIMS 类似系统在水利水电工程地灾评估中的优势	56
3.1	水利水电工程相关的地灾评估工作的主要内容及意义	56
3.2	水利水电工程地质灾害评估工作的特点	56
3.3	RIMS 类似系统的优势	58
4	RIMS 类似系统支撑下的水利水电工程地灾评估模式	63
4.1	所需工具、资料及用途	63
4.2	工作程序	64
5	RIMS 类似系统支撑下的水利水电工程地灾评估	66
5.1	贝利耶萨湖西岸岸坡地质条件初评	66
5.2	泥石流物源判断案例	71
5.3	边坡稳定性分析案例	72
6	后记	73

第三篇 四川省古蔺县朝门水库工程地质条件评价

1	概述	76
2	区域构造稳定性与地震动参数	77
2.1	地形地貌	77
2.2	地层岩性	77
2.3	地质构造	79
2.4	物理地质现象	81
3	水库区工程地质	82
3.1	基本地质条件	82
3.2	岩溶	83
3.3	库盆左邻谷渗漏可能性分析	86
3.4	水库渗漏问题	91
3.5	库岸稳定问题	98
3.6	水库淤积问题	100
3.7	水库浸没及矿藏淹没问题	100
3.8	水库诱发地震问题	100
4	坝址区工程地质条件及评价	101
4.1	坝址区基本地质条件	101
4.2	坝区岩(土)体物理力学特征	103
4.3	枢纽区岩(土)体物理力学参数建议值	110
4.4	上坝线工程地质条件及评价	110
4.5	下坝线工程地质条件及评价	112
4.6	坝线比较推荐意见	114
4.7	推荐坝线坝址工程地质条件及主要工程地质问题	115
4.8	推荐坝线水工建筑物工程地质条件及评价	117
5	天然建筑材料	119
5.1	人工骨料料场	119
5.2	人工骨料碱活性分析	119
5.3	渠道及围堰建筑材料	120
6	结论及工作后记	121
6.1	结论	121
6.2	后记	123

第四篇 西藏尼洋河多布水电站坝址区右坝肩边坡岩土工程性质分析及评价

1	前言	126
---	----------	-----

1.1	国内外研究概况	126
1.2	工程概况	128
2	地质环境	130
2.1	区域地质概况	130
2.2	坝址区工程地质条件	134
3	右坝肩岩体稳定状况分析	138
3.1	右坝肩山脊地貌特征	138
3.2	右坝肩岩体结构特征	138
3.3	右坝肩岩体古变形可能模式分析	151
4	右岸覆盖层稳定状况定性分析	159
4.1	覆盖层成因类型	159
4.2	覆盖层分布规律	161
4.3	覆盖层稳定状况	161
5	工作后记	164

第五篇 金汤河二期工程金平、金元水电站安全风险现状评估

1	概述	167
1.1	评估依据	167
1.2	评估目的	167
1.3	评估原则	167
1.4	评估范围与重点	167
1.5	评估工作程序	168
2	工程区自然环境概况	169
2.1	水文气象	169
2.2	区域地质及工程地质	170
3	工程区主要地灾形式	172
3.1	主要地层及构造特征	172
3.2	岩、土体主要结构特征	172
3.3	工程区主要地灾形式及形成原因	173
4	工程区各要点主要地质灾害形式及影响	175
4.1	双鸡沟料场上游冲沟	175
4.2	2#桥铜林沟	175
4.3	金平电站进水口	176
4.4	左岸双鸡沟	177
4.5	金平电站引水隧洞进水口下游岩石崩落	177
4.6	金平电站近坝公路边坡	178

4.7	金平电站葛洲坝项目部施工营地	178
4.8	金平电站 2#支洞施工营地	180
4.9	金平电站 2#支洞洞脸边坡	181
4.10	石喇嘛沟泥石流隐患	181
4.11	水电七局金平电站引水隧洞施工项目部后坡	182
4.12	4#支洞洞脸边坡	183
4.13	水电五局 3#营地后坡	183
4.14	水电五局项目部施工营地 (2#营地)	184
4.15	金平电站地下厂房进口洞脸边坡	185
4.16	金平电站地下厂房对岸危石	186
4.17	金元电站大坝施工场地	186
4.18	粤水电二局营地	187
4.19	砂石骨料加工系统及 2#和公地沟副 2#施工支洞营地	188
4.20	公地沟副 1#施工支洞营地	188
4.21	中铁五局项目部营地	189
4.22	中铁五局 4#支洞施工营地	189
4.23	5#支洞施工营地、捧塔乡集镇及业主营地	190
4.24	地下工程地质灾害评估及对策	192
4.25	工程区地质灾害特性小结	199
5	各要点地灾危险性分级	200
5.1	地质灾害危险性分级依据	200
5.2	各施工要点地灾风险分级	200
6	结论及建议	203
6.1	结论	203
6.2	建议	204
6.3	工作后记	204

第六篇 白龙江苗家坝水电站枢纽区工程边坡稳定性及工程措施研究

1	前言	208
2	地质环境	210
2.1	区域地质环境	210
2.2	枢纽区基本地质	213
3	枢纽区工程边坡结构面统计及优势结构面特征	215
3.1	岩体结构调查与结构面统计	215
3.2	优势结构面及其特征	217
4	枢纽区工程边坡岩体结构分类	222

4.1	岩体结构分类依据	222
4.2	枢纽区岩体结构分类	223
5	枢纽区工程边坡岩体质量分级	225
5.1	边坡岩体质量分级目的	225
5.2	边坡岩体质量分级依据	225
5.3	边坡岩体质量分级	228
5.4	枢纽区工程边坡岩体质量分级小结	243
6	枢纽区工程边坡主要破坏模式分析	245
6.1	左坝肩永久边坡主要破坏模式	245
6.2	右坝肩永久边坡主要破坏模式	249
6.3	右岸厂房后边坡主要破坏模式	254
6.4	右岸泄洪排沙洞进口洞脸边坡主要破坏模式	256
6.5	右岸泄洪排沙洞出口洞脸边坡主要破坏模式	258
6.6	左岸导流洞进口洞脸边坡主要破坏模式	259
6.7	左岸导流洞出口洞脸边坡主要破坏模式	260
7	工作后记	262
	参考文献	263

第一篇

坝基地层石膏质的存在及其对水电工程的影响 (以青居水电站为例)

西南地区是我国重要的水电能源基地之一，据相关统计，我国的水能资源总蕴藏量约为 $676 \times 10^6 \text{ kW}$ ，其中 68% 都分布在西南地区，云南、贵州、四川和重庆四个省（直辖市）人均拥有的水能可开发量为全国人均值的 3.26 倍，随着我们西部大开发的加速推进，西部丰富的水力资源开发的步伐会越来越快，众多的水电站有序的在建、投产，积极地推动了社会经济迅速发展。然而，因为水电站所处的地质条件的影响，电站运行后陆续出现了一些工程问题^[1,2]。其中，红层地区特有的可溶盐溶蚀及对电站工程的影响，即为多年来困扰水电行业的问题之一。

1 关于红层及潜在的工程问题

1.1 关于红层

红层的意思是红色地层，因其岩石中含有 Fe_2O_3 、 FeO 而呈红褐色、紫红色和砖红色等颜色，主要是指侏罗纪、白垩纪至第三纪大陆相沉积的碎屑岩，主要岩性为粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和黏土岩（含页岩）等黏土质软弱岩石、砂岩及砾岩等。

我国的红层主要分布在西南、东南、华南和西北四个地区，而西南地区的四川盆地、云南的高原中部和南部等地区与西北的陕甘宁盆地都有完整成片的红层分布，是我国红层分布最多的地区，其总面积约为 $2.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，约占我国陆地面积的 2.9%。

1.2 红层地区可能出现的与水利水电工程相关的地质问题

在我国红层地区，水利水电工程建设集中的有黄河、汉江、嘉陵江及红河等流域。红层是一个较为复杂的工程地质体，有着极为特殊的物质组成、结构及构造特征。随着红层地区建坝数量及规模的增大，红层中存在的一些工程地质问题也随之出现。红层上修筑的大坝在国内、外的筑坝史上主要出现以下几个问题：

（1）存在软弱夹层，容易导致坝基出现抗滑稳定问题。红层是以陆相沉积为主的碎屑岩，多呈现“软岩—硬岩—软岩”等软硬相间的多元层状结构，地层中的泥质粉砂岩、黏土岩等构成岩体中的软弱夹层，易发育形成剪切破碎带，致使坝基发生剪切破坏而导致大坝失稳；

（2）红层岩体的总体强度低，岩体结构完整性差，岩石呈现胶结不良或半胶结状态，用作水电工程坝基容易导致出现坝基沉降量过大或不均匀沉降而危及大坝安全；

（3）红层中的黏土类岩石主要由蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物组成，在构造作用下岩石结构被破坏，使得地下水进入岩体内部，这些黏土矿物长期与地下水接触后会导致所在岩石体积发生膨胀，从而可能导致坝基发生膨胀变形；

（4）可溶盐的溶蚀（溶解）可能会导致坝基渗漏量增大和渗透变形问题，红层中的可溶盐在地下水的长期作用下发生溶蚀（溶解），使岩体中原有的节理与裂隙扩大，坝基

产生集中渗漏且渗漏量增大,进而产生较大的渗透变形;

(5) 可溶盐溶蚀(溶解)后,解离的离子进入地下水会腐蚀混凝土结构,红层中常见的膏盐矿物被地下水溶蚀(溶解)后产生大量的 SO_4^{2-} , 进入地下水后对混凝土有较强的腐蚀性,容易使混凝土结构物遭到腐蚀破坏。

1.3 红层地区已建水利水电工程已出现的工程问题

(1) 八盘峡水电站

位于黄河干流上的八盘峡水电站坝基岩体由白垩系河口群的红色黏土质粉砂岩、砂岩、疏松砂岩及页岩组成,地层中含有石膏、芒硝、氯化物等可溶性组分,断层带和裂隙中均充填有针状、片状的可溶物。该水电站运行十余年后,大坝混凝土结构显现出受到日益严重的侵蚀现象,廊道的纵、横排水沟中出现大量的白色析出物,排水孔周围的混凝土表面也受到不同程度的破坏,尤其是横向廊道表面混凝土已经松散解体、失去强度,坝顶左侧平洞内发现大量的白色针状结晶物,廊道地面混凝土遭到破坏的部位也均有白色针状晶体析出。经化学分析,这些白色针状结晶均为硫酸盐晶体。大坝左岸坡部位的地下水中 SO_4^{2-} 的浓度由建坝蓄水前的 $600 \sim 1500 \text{ mg/L}$ 上升到了 $3000 \sim 8000 \text{ mg/L}$ 。目前,地下水中 SO_4^{2-} 的浓度已经稳定在 $6000 \sim 10000 \text{ mg/L}$ 的范围内,但有时高于 10000 mg/L 。左侧坝段基岩中地下水所含 SO_4^{2-} 的浓度为 $3654.38 \sim 7202.29 \text{ mg/L}$,右侧基岩地下水所含 SO_4^{2-} 浓度为 $804.61 \sim 1878.97 \text{ mg/L}$,均远高于黄河干流河水中 SO_4^{2-} 的浓度。上述现象的出现充分证明,地层中有大量的石膏发生了溶蚀,地下水中过量的 SO_4^{2-} 侵蚀了大坝的混凝土结构^[29~31]。

(2) 青海朝阳水电站

该电站大坝基岩为第三系红色黏土粒状石膏与混凝土石膏岩互层,地层中有 8m 厚的部分已溶蚀成土状的硬石膏层,地下水中 SO_4^{2-} 浓度高达 $4400 \sim 5400 \text{ mg/L}$ 。电站运行后很快发生了严重的硫酸盐对混凝土结构物的侵蚀作用,出现混凝土表面胀裂、结构变得疏松、表面有大量的白色絮状及针状结晶析出等结晶类腐蚀现象,导致压力前池的混凝土结构疏松、开裂,水轮机房的沉降缝和排水沟及其墙角以上 20cm 的混凝土表面发生胀裂,出现大量白色针状、絮状结晶体,地面以上 1m 左右有盐霜析出。显然,地下水中高 SO_4^{2-} 浓度所带来的对混凝土的侵蚀问题已在一定程度上影响到了电站的正常运转^[32,33]。

(3) 新疆柯尔克孜水库

大坝修筑在晚近系的红层上,坝基主要岩性为砂、泥岩互层。由于地层中富含易溶盐和中溶盐(主要为膏盐矿物),水库运行 8 年后,廊道底板的混凝土表面出现了较为严重的侵蚀现象,在库水与地下水的作用下,左岸坝肩岩体中的石膏质发生了溶蚀(溶解),增大了岩体的透水性,左岸坝肩出现明显的渗漏;同时,高浓度的 SO_4^{2-} 改变了地下水化学特性,使得地下水具有了较强的侵蚀性,地下水中 SO_4^{2-} 的浓度为 $2881.8 \sim 4082.55 \text{ mg/L}$,最高的部位可以高达 9846.15 mg/L ,导致排水廊道右侧的环境水对混凝土产生了硫酸盐(SO_4^{2-})强腐蚀,后经过工程措施整治方能正常运行^[34~36]。

(4) 甘肃省盐锅峡水电站

大坝坝基是白垩系的红层,主要岩性为白垩系粉砂岩、砂岩、黏土页岩、砂质砾岩及

黏土岩等互层，裂隙水为 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 型的高矿化水，坝基排水孔中溢出的地下水使附近廊道底板的混凝土遭受严重的侵蚀，出现鼓胀、碎裂和 CaSO_4 结晶现象，表面有白色盐类析出，硬化的水泥砂浆遭到侵蚀后变成软塑状态，呈现疏松状态，但排水孔内水面以下的混凝土孔壁仍然坚硬、完整。而新修的混凝土一般在数月内便会重新出现上述现象，这是典型的硫酸盐侵蚀导致混凝土结构遭受破坏的现象^[37~40]。

（5）新疆风城高库

为引额济克工程西线干渠尾部的调节水库，坝基基岩由侏罗系与白垩系红层地层构成，地层中的全（强）风化裂隙中普遍填充着芒硝、石膏和方解石，易溶盐和中溶盐在全（强）沿风化地层和断裂破碎带的表面分布，含量较高且在局部区域形成大面积的富集，而易溶盐在弱风化岩体中则主要沿着裂隙表面发育。水库运行后，放水隧洞底板、边墙衬砌和上部挡墙坝段以及防渗帷幕的混凝土发生明显的腐蚀现象，表面膨胀疏松，放水隧洞渗漏水中 SO_4^{2-} 的浓度为 $4370.7 \sim 260003.75 \text{ mg/L}$ ，大量的易溶盐和中溶盐的溶蚀（溶解）导致了水库出现漏水量过大，混凝土结构物不同程度遭受侵蚀，大坝的坝基出现了变形等一系列问题^[41]。

（6）南充青居水电站

该水电站闸坝基岩为侏罗系中统遂宁组中下部砂质黏土岩夹砂岩、泥质粉砂岩、砂岩，砂质黏土岩中普遍含石膏。石膏多沿层间及裂隙发育，其形状多呈薄层或薄膜状、脉状及斑状。截止到 2013 年 12 月，电站已经运行发电有近 10 年。运行期间，水工观察人员注意到右岸溢流坝 8[#] 坝段近岸坡脚处有地下水出露点，同时注意到，在灌浆排水廊道的排水孔中，个别排水孔排水量较大，经水质分析还发现廊道排出水中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 浓度显著高于周围其他环境水。多年来该现象均被解释为挡水坝及泄洪闸坝段闸基基岩中石膏层溶解所致。若是这样，则挡水坝段、泄洪闸坝段的坝基岩体有化学潜蚀可能。

总结上述几个修建于红层上的水利水电工程所出现的问题，其共同之处均为地层中可溶物发生溶蚀（溶解）而使工程结构物受损，归结起来表现为：①地层中的可溶物发生溶蚀（溶解），致使地下水中 SO_4^{2-} 的浓度偏高，使水工混凝土建筑物在一定程度上受到结晶类腐蚀；②坝基、坝肩并未出现显著趋势性沉降、不均匀沉降或失稳的工程现象，水工建筑物本身能够安全运行；③坝基、坝肩渗流量虽有偶发性增大迹象，但多保持整体平稳，无显著趋势性增大的现象；④水工混凝土建筑物受到结晶类腐蚀作用影响而出现表面开裂是实际观察的结果，但引发此类腐蚀作用的化学成分，如浓度超标的 SO_4^{2-} 是否就来自于闸坝地基地层，亦或是其他来源，目前均未有定论。

2 地层中的可溶盐及其存在形式

可溶盐是指在溶剂中溶解后能够导电的化合物。红层中的可溶盐多形成于湖泊或河、湖交替的沉积环境，而湖泊沉积环境中则生成诸如常硫酸盐、碳酸盐、氯化物及硼酸盐等可溶性盐类矿物^[3,4]。

修建于红层发育地区的水电站，地层中可溶盐的存在及其溶蚀，可能会使得坝基岩土体结构遭到破坏，岩土体工程性质由此恶化，可能导致发生坝基沉降量过大或不均匀沉降，甚至发生闸坝基的破坏。可溶盐溶解后进入地下水中，可能会造成地下水的高矿化度现象和对水工建筑物产生腐蚀等问题^[3~5]。

2.1 可溶盐的基本性质

2.1.1 溶解度及可溶盐溶解难易程度

溶解度是指在一定温度下，某固态物质在 100g 溶液中达到饱和状态时所溶解的质量^[6]。按照溶解度的量值，可溶盐可分为易溶盐、中溶盐和难溶盐三类，分类标准如表 1-2-1 所示。

可溶盐的溶解度分类标准			表 1-2-1
可溶盐	易溶盐	中溶盐	难溶盐
溶解度	≥5g	0.01 ~ 5g	<0.01g

2.1.2 可溶盐的溶解性和溶蚀性

可溶盐大多数都具有较大的溶解度，在地下水的溶解作用下产生强烈的溶蚀和淋滤作用，不仅导致地基与基础变形破坏，而且往往形成较大的地下水渗漏带或地下塌陷带，对地下工程和地基的岩体稳定性或渗透性造成严重的影响。特别是水利工程建设，如果不采取可靠的封闭措施，使原来的渗漏带扩大或形成新渗漏带，就会产生严重后果。

(1) 可溶盐的溶解性。红层中可溶盐的溶解主要受两方面的因素控制：①受到可溶盐本身的溶解度、在地层中的含量及可溶盐岩脉分布特征等因素的控制，在相同环境水的作用下，可溶盐本身的溶解度越大，含量越高且分布越连续，溶解就越强烈；②受环境水的离子浓度（尤其是可溶盐解离后产生的离子）、水温的变化及水的循环交替条件等条件的控制，对于可溶盐，溶蚀（溶解）环境水的离子浓度越低，温度越高，水的循环条件越好，则溶解越强烈。

(2) 可溶盐的溶蚀性。岩体中可溶盐的溶蚀性与水流的流速和矿化度、可溶盐的含量、岩石的透水性及气候等因素有关。岩体的透水性越强，水流的矿化度越低，流量越大，可溶盐含量越高，气候温暖、潮湿，则可溶盐的溶蚀性就越强；反之，可溶盐的溶蚀

性就越弱^[3~5,7~11]。

2.1.3 可溶盐的膨胀变形和膨胀压力

地层中有一些可溶盐在地下水的浸泡下能够大量吸水，使可溶盐晶体体积发生膨胀变形，进而对晶体周围建筑或岩体产生较大的体积膨胀压力，如硬石膏（CaSO₄）吸水后变成石膏（CaSO₄·2H₂O）。地层中硬石膏的含量多少决定了其膨胀力及膨胀变形的大小。含量越高，膨胀力及膨胀变形越大；反之，膨胀力及膨胀变形越小。地层中可溶盐产生的膨胀力及膨胀变形大到一定程度，会导致地下建筑结构或建筑物的地基与基础发生严重的破坏^[3~5,7~12]。

2.1.4 可溶盐的侵蚀性

可溶盐溶解后可使地下水中的SO₄²⁻浓度增高，含SO₄²⁻的侵蚀液体首先在混凝土表面浸渍，水泥水化产物Ca（OH）₂在混凝土孔隙液与环境水较大的浓度梯度下随着渗漏不断流失，通过对混凝土结构棱角的侵蚀并逐步深入，使结构物表面发生剥蚀、轮廓模糊、结构松散、脆弱，这个过程进行得比较缓慢，结构的破坏程度也最低；然后，SO₄²⁻的侵蚀液体沿着混凝土中产生的微裂隙侵入并与微裂隙周围的Ca（OH）₂反应，生成水泥杆菌，其体积较原体积增大221.86%，在混凝土中产生极为强烈的内应力，使已有的微裂隙扩大，混凝土结构产生膨胀破坏，导致混凝土结构受到严重破坏；最后是SO₄²⁻的侵蚀液体在混凝土中的空隙内积聚，与周围的Ca（OH）₂发生反应，生成膨胀性、低强度的水化产物，产生压应力，使SO₄²⁻的侵蚀液体又向其他的空隙渗透，再产生膨胀压力，最终使孔隙相连，直至完全破坏混凝土结构，使其呈疏松、软塑状态。然而，在实际侵蚀过程中，发生硫酸盐侵蚀的速度缓慢，但是浸泡时间越长，腐蚀性越重^[13~25]。

根据《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287—2006，针对混凝土周围环境水对混凝土结构物是否发生上述腐蚀的判别标准，见表1-2-2。

我国水电工程环境水产生混凝土结晶类腐蚀判定标准 表 1-2-2

腐蚀类型	化学类型	判定标准	腐蚀等级	对应标准	
				普通水泥	抗硫酸盐水泥
结晶类	硫酸盐型	SO ₄ ²⁻ 含量 (mg/L)	无腐蚀	SO ₄ ²⁻ < 250	SO ₄ ²⁻ < 3000
			弱腐蚀	250 ≤ SO ₄ ²⁻ < 400	3000 ≤ SO ₄ ²⁻ < 4000
			中等腐蚀	400 ≤ SO ₄ ²⁻ < 500	4000 ≤ SO ₄ ²⁻ < 5000
			强腐蚀	SO ₄ ²⁻ ≥ 500	SO ₄ ²⁻ ≥ 5000

各个国家对混凝土结晶类腐蚀的判别标准不一，我国水利水电工程的标准较国际标准要低，表1-2-3所示，列举了欧美国家的判别标准。