

文章编号:1001-4810(2003)02-0124-06

扎塘赤泥库渗漏污染评价及治理研究

丁坚平¹, 蔡良钧², 毛健全¹, 姜涛¹

(1. 贵州工业大学, 贵州 贵阳 550003; 2. 中国铝业公司贵州分公司, 贵州 贵阳 550014)

摘要:通过水文地质勘察,查清了扎塘赤泥库向牟老泉和百花湖方向的岩溶渗漏通道,根据弥散试验和长期水质监测资料,建立了水动力弥散叠加模型,进行了渗漏污染预测评价。对岩溶渗漏通道采取了垂直帷幕注浆、库内封堵落水洞、赤泥铺盖等综合防渗措施,历时10年,实现了在岩溶发育地区对高浓度碱水进行防渗治理的预定目标,杜绝了扎塘赤泥库废水外排,治理工程取得了显著的效果,保护了岩溶水资源环境。

关键词:赤泥库; 渗漏; 污染评价; 防渗治理
中图分类号:TV223.4 **文献标识码:**A

0 前言

贵州铝厂扎塘赤泥库(5[#]、6[#]赤泥库)位于贵阳市白云区曹关村,距氧化铝厂6km,赤泥排放采用国内传统的管道输送,湿法堆存技术。扎塘赤泥库为一封闭的岩溶洼地,库中蓄存着几十万方pH=14、总碱度为14g/l的废水,使用后即产生了严重的岩溶渗漏,造成周围地下水的污染,严重影响了猫跳河和百花湖水资源环境。

1988年以来,通过水文地质勘察工作,基本查清了扎塘赤泥库向牟老泉和向百花湖方向的岩溶渗漏通道。根据连通试验及长期的水质监测资料,建立了水动力弥散叠加模型,并预测评价了岩溶渗漏污染对岩溶地下水的影响。根据勘察和预测评价结果,提出了先堵老马寨方向的岩溶渗漏通道,取得经验后再堵陆家湾、白水泉方向的岩溶渗漏通道,治理方式以帷幕注浆垂直防渗为主,以及实施封堵库内落水洞、赤泥铺盖等综合治理措施,这一工程历时10年,先后投入治理资金数千万元,达到了堵漏防渗的预定目标,杜绝了扎塘赤泥库废水外排,取得了显著的环境效益,以及社会和经济效益。

1 扎塘赤泥库岩溶渗漏分析

5[#]、6[#]库址为二叠系下统栖霞组(P_1q)和茅口组(P_1m)灰岩、白云岩地层,厚度185m,岩层倾角45°,为裸露型岩溶。在5.2km²范围内以落水洞、岩溶竖井为主,平均25个/km²,平均深15m,最深40m,分布高程1225~1430m。据物探、钻孔资料,1250m以上为上部岩溶发育带,以落水洞、竖井、垂直溶隙为主,1250m以下以大溶隙为主,沿 F_3 断层及破碎带发育。岩溶介质含水性极不均匀,地下水以裂隙、管道流为主,大气降水是地下水唯一补给来源。5[#]、6[#]库址东部为龙潭组(P_2l)煤系地层构成隔水边界,西部为 F_1 、 F_2 断层及其所夹煤系地层构成隔水边界,但由于 F_3 断层破坏了西部隔水边界,造成了库水向西部的渗漏。根据调查、勘察及连通试验分析,扎塘赤泥库的渗漏有两个方向:主要是向牟老泉(位于扎塘赤泥库以西,已超出插图范围)方向进入猫跳河,其次是向马寨方向进入百花湖,三条渗漏途径:第一渗漏途径(A):扎塘—白水泉(S313)—牟老泉(S10);第二渗漏途径(B):扎塘—陆家湾S407泉—牟老泉;第三渗漏途径(C):扎塘—老马寨S639泉(图1,表1)。扎塘有

基金项目:贵州省自然科学基金项目(3018号)

作者简介:丁坚平(1956—),男,教授,水文地质工程地质专业。

收稿日期:2003-04-14

两个集中渗漏地段:扎塘 5[#]、6[#]库的西段和 6[#]库的西南段,5[#]、6[#]库水位标高为 1314m(1991 年 5 月),通过连通试验地下水平均流速 16.2m/h,最大流速 30.4m/h,纵向弥散系数 0.228m²/d。

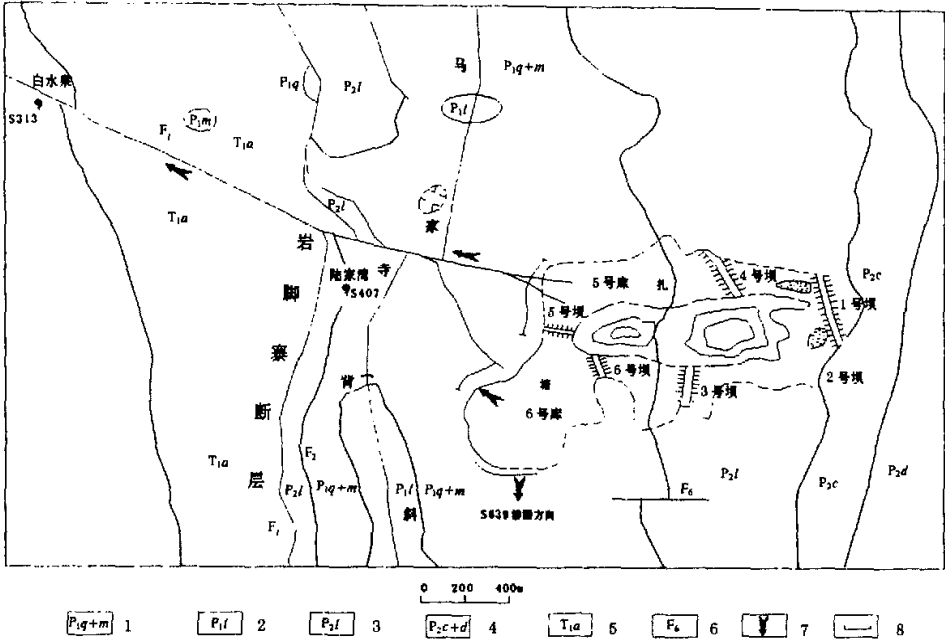


图 1 扎塘赤泥库防渗灌浆帷幕线

Fig.1 Leak-proof curtain grouting map in Zhatang Red-Clay Disposal Site
1. 二叠系栖霞+茅口组;2. 二叠系梁山组;3. 二叠系龙潭组;4. 二叠系长兴+大隆组;
5. 三叠系安顺组;6. 断层;7. 渗漏方向;8. 防渗帷幕线

表 1 扎塘赤泥库渗漏排泄点特征表

Tab.1 Features of leakage and discharge in Zhatang Red-Clay Disposal Site

点号	高程(m)	水力坡度(%)	观测流量(l/s)	距扎塘(km)	方向	渗漏途径	渗漏类型	最终受纳水体
S313	1199	7.0	20.8(1991.4.27)	1.7	NW	A	岩溶管道、裂隙	猫跳河
S010	1175	3.9	95.0(1991.5.6)	10.7				
S407	1223	16.4	0.5(1991.4.27)	0.59	NW	B		
S639	1250	4.25	2.3(1991.4.20)	1.6	SW	C	岩溶裂隙	百花湖

2 赤泥污染特征

在氧化铝生产过程中,采用含有大量游离 NaOH 的循环母液来处理铝土矿,使矿石中的氧化铝转化为

含铝酸钠的浆液,浆液经高压溶出后,进入沉降分离,沉降分离后的固相即为赤泥。据分析,贵州铝厂赤泥浸出附液的化学成分见表 2。

表 2 赤泥附液化学成分

Tab.2 Chemical composition of wastewater in Red-Clay

(单位:mg/l)

生产工艺	pH	总碱度以(CaCO ₃ 计)	K+Na ⁺	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	OH ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	AlO ₂ ⁻
拜耳法	13.106	18694	12675	0	3900	4154	297	776	7651
烧结法	13.26	27325	19701	0	4990	6469	329	1154	14209

资料来源:贵阳铝镁设计院

从表 2 可知赤泥附液中以 pH 值、总碱度较高为特征,如处置不当将危害周围环境。试验表明,赤泥对土壤的盐碱化作用是长期性的,土壤 pH 值太高,将使作物无法正常生长或被碱烧死,此外,还使土壤板结,甚至荒废。赤泥附液进入水体后,将使水体 pH 值较高,碱度上升,破坏自然水体的碳酸平衡,污染严重时将使自然水体失去饮用及农灌功能,河流自然生态平衡受到严重破坏。

在扎塘赤泥库渗漏时,受污染的地下水主要是位于扎塘西南面的老马寨 S639 泉、位于扎塘西面的陆家湾 S407 泉、白水泉 S313 和牟老泉 S10,受赤泥附液污染的地下水 pH 和总碱度普遍增高,最高可达 13.0(表 3),而《地下水质量标准》GB/T14848-93 中规定的 pH=6.5~8.5。

表 3 扎塘赤泥库渗漏时受影响的地下水水质

Tab. 3 The affected groundwater quality by the leakage water in Zhatang Red-Clay Disposal Site
(除 pH 外,单位:mg/l)

监测点	监测时间	pH	总碱度以 CaCO ₃ 计	资料来源
牟老泉 S10	1995.12.22~24	10.46	732.0	有色地勘公司
白水泉 S313	1991.5.18	13.0	1017.29	实测
陆家湾 S407	1991.5.18	13.0	2906.77	实测
老马寨 S639	1995.12.22~24	11.42	7021.6	有色地勘公司

3 渗漏污染预测评价

把管道裂隙类型的岩溶渗漏污染概化为一维水动力弥散污染质运移问题,该问题数学模型的解析解为:

$$\frac{c - c_1}{c_0 - c_1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4D_L t}} \right) \quad (1)$$

式中:erfc(ϕ)为余误差函数, x 为 5[#]、6[#]库至被污染地下水点的距离, v 为 x 方向(地下水主径流方向)地下水平均流速, D_L 为纵向弥散系数, c_1 为初始污染质浓度, c_0 为污染质浓度, c 为任意时刻被污染地下水点污染质浓度, t 为时间。

当 $c_1=0$ 时,把被污染地下水点污染质浓度变化看作是受 5[#]、6[#]库废水浓度连续改变(赤泥浆排放量、降水量、蒸发量等)影响的结果,于是根据叠加原理及式(1)可推导出:

$$c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (c_i - c_{i-1}) \operatorname{erfc} \left[\frac{x - v(t - t_{i-1})}{\sqrt{4D_L(t - t_{i-1})}} \right] \quad (2)$$

式中设 $t_0=0$,相应的 $c_0=0$,其中 c_i ($i=1,2,3,\dots,n$)为 t 时间内,被污染地下水点和 5[#]、6[#]库废水浓度。

由式(2)对 S407、S639 排污点进行模拟预测,结果见图 2。根据水动力弥散污染质运移叠加模型和被污染地下水点监测资料预测评价如下:

(1)当 5[#]、6[#]库废水浓度为 c_0-c_1 时,被污染地下水点 S407、S313、S639 污染质浓度由 $c-c_1$ 趋于 c_0-c_1 所需弥散时间分别为 1.8 天、4.1 天和 7.2 天;

(2)在 S407 渗漏方向,距离短,污染质浓度损耗小,水力坡度大,说明地下岩溶管道较为通畅,且垂直发育深度大;在 S639 渗漏方向,距离长,污染质浓度损耗大,说明地下岩溶裂隙组合相对集中和均匀,垂直发育深度相对较小;

(3)建议采用帷幕注浆垂直防渗方式进行治理,先治理 S639 方向岩溶裂隙渗漏带,再治理 S407 方向岩溶管道渗漏带。

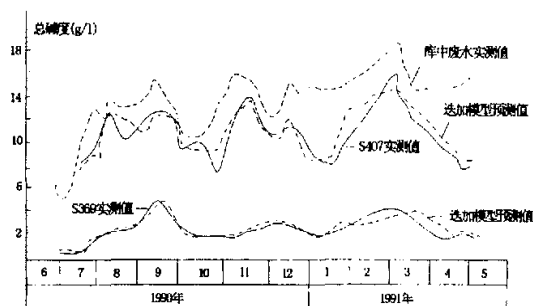


图 2 S407 和 S639 叠加模型预测曲线与实测曲线对比
Fig. 2 Comparison of the predicted curve by S407 and S639 superposed models with the actually measured curve

4 防渗治理工程

4.1 垂直防渗工程设计及实施^①

在扎塘赤泥库实施垂直防渗工程时,遇到的突出问题是:①岩溶十分发育,隔水层埋藏较深,帷幕无法与深部隔水层相衔接,形成悬挂式帷幕,其帷幕注浆的浓度如何选定问题;②对赤泥堆场进行防渗处理,必须考虑高浓度碱水对注浆水泥可能产生的侵蚀性影响问题;③注浆中遇到溶洞、大溶隙耗浆量过大,如何确保注浆质量问题、注浆帷幕防渗质量的检查问题。

① 贵州省有色地质勘察公司,贵州铝厂赤泥堆场 5[#]、6[#]库防渗帷幕注浆施工报告,1998

4.1.1 渗透性指标确定

通过对5[#]、6[#]库的西段向陆家湾、白水泉方向渗漏地段和6[#]库的西南段向老马寨方向渗漏地段压水试验的结果,岩溶地层的渗透性指标划分为5个级别:强渗透段($\omega \geq 10$)、中渗透段($1.0 \leq \omega < 10$)、弱渗透段($0.1 \leq \omega < 1.0$)、微渗透段($0.03 \leq \omega < 0.1$)、基本不渗透段($\omega < 0.03$)。

4.1.2 垂直帷幕注浆设计

由于该地区隔水层埋藏较深,只能采取悬挂式帷幕注浆,原则上以微渗透地段下5m为下限。帷幕注浆孔设计采取单排和双排布置,排距1m,孔距2.5m。施工方案采取“先上游排后下游排”的顺序,按Ⅰ序孔、Ⅱ序孔、Ⅲ序孔(序孔为顺序注浆,即按照排序逐孔注浆)的序次施工。注浆浆液浓度采用4个级别,水灰重量比分别为2:1、1:1、0.8:1、0.5:1,正常注浆段从2:1浆液浓度开始注,遇严重漏水段直接使用0.5:1浓浆液起注,浆液变换遵循“由稀到浓”的原则。各段注浆压力从0.5MPa到3.0MPa,并遵循由浅至深逐渐加压的原则。先后对扎塘6[#]库西南面,5[#]、6[#]西面、东南面施工了6条垂直帷幕注浆线,总长983.21m。

4.1.3 高浓度碱水对注浆水泥的侵蚀性研究

扎塘赤泥库区是对高浓度碱水进行防渗处理,有其特殊性,必须考虑到高浓度碱水对注浆水泥可能产生的侵蚀性影响。通过对水城水泥厂525[#]和都匀水泥厂525[#]水泥在碱水中的凝结时间、抗压强度、抗折强度与在水中和空气中的试件进行了对比试验,得出碱水对水泥拌制的净浆无侵蚀性,未发现试件崩解、脱落、开裂、扭曲等现象,可以作为注浆材料的结论^②。

4.1.4 注浆工程中遇到大溶洞、裂隙的处理方法

由于注浆工程是在岩溶发育的地段实施,时有遇到大的溶洞、溶隙,这时注浆不起压,不回浆,造成浆液大量流失。在该地区注浆时平均每米耗浆量466~1124kg/m(干料),但遇大的溶洞时个别段次耗浆量达到131000kg/m(干料),在进行垂直帷幕注浆时,遇到特大耗浆段占整个注浆量的17%。在确保工程质量的前提下采取以下处理方法:

(1) 采用高浓度浆液(0.5:1),实施低压灌注,使浓浆迅速初凝;

(2) 采取注注停停,间歇灌注方法,让注孔周围浆液凝固,提高浆液利用率,防止浆液大量流失;

(3) 实施扩孔,将砂粒、小碎石注入充填到溶洞中,再在浆液中掺入添加剂,如粉煤灰、水玻璃、重晶石粉等,其目的在于提高浆液的稠度、缩短初凝时间。

4.1.5 帷幕注浆质量控制

帷幕注浆是地下隐蔽工程,注浆质量的好坏将直接影响防渗效果,因此检查帷幕注浆的质量至关重要。对本工程采取了以下措施:

(1) 孔斜检查及孔深校正

本工程所设计的注浆孔和检查孔都是直孔,钻孔偏斜将影响帷幕质量,因此在开孔前、成孔后、终孔时都必须测斜、测深,达到要求方能终孔。

(2) 帷幕的渗透性检查

在帷幕注浆孔竣工后14天,打检查孔,采取单孔压水试验,本工程设计的防渗标准为透水率 $\omega \leq 0.03$,即检查段透水率 $\omega \leq 0.03$ 时为合格段。经检查孔检查绝大部分段透水率 $\omega \leq 0.016$,其余的均达到合格。

(3) 岩芯水泥结石情况

注入的水泥浆液在岩石裂隙、洞穴中充填、凝结的情况如何(称为结石),可以从检查孔采取的岩芯中观察,从检查情况看,水泥结石紧密。

(4) 单位注入量与序次的关系分析

本工程采取单排三个序次逐步加密,按正常的注浆规律,随注浆序次的增加,注浆孔的水泥单位注入量应逐渐减少,如C段工程Ⅰ序次孔单位注入量为2033.5kg/m,Ⅱ序次孔单位注入量为1268.6kg/m,比Ⅰ序次减少了37.6%,Ⅲ序次孔单位注入量为302.9kg/m,比Ⅰ序次减少了85.1%。这种递减符合正常规律,说明注浆质量良好。

(5) 注浆前后地层的渗透性对比

图3-A是6[#]库西侧(C段)帷幕注浆前帷幕线地层渗透性剖面图。从图3-A中可以看出, $\omega \geq 1.0$ l/min.m.m的渗漏地段占剖面面积的30%,基本不渗透段 $\omega \leq 0.03$ l/min.m.m占50%,注浆后经检查孔检查 $0.03 \leq \omega \leq 0.05$ l/min.m.m不到5%,其它均为不渗透地段, $\omega \leq 0.03$ l/min.m.m占95%,见图3-B。

4.1.6 对泉水的水质监测

在注浆过程中对周围地下水水质变化不断进行监测,可以及时掌握注浆防渗情况。表4是1998年8月4日至1999年1月9日,对5[#]、6[#]库西段(C段)注浆各阶段对S407和S313泉水监测结果,说明随着注浆工作的实施,地下水的水质得到了改善。

② 电力部贵阳勘测设计院,贵州铝厂赤泥堆场碱水对注浆水泥侵蚀性试验报告,1998

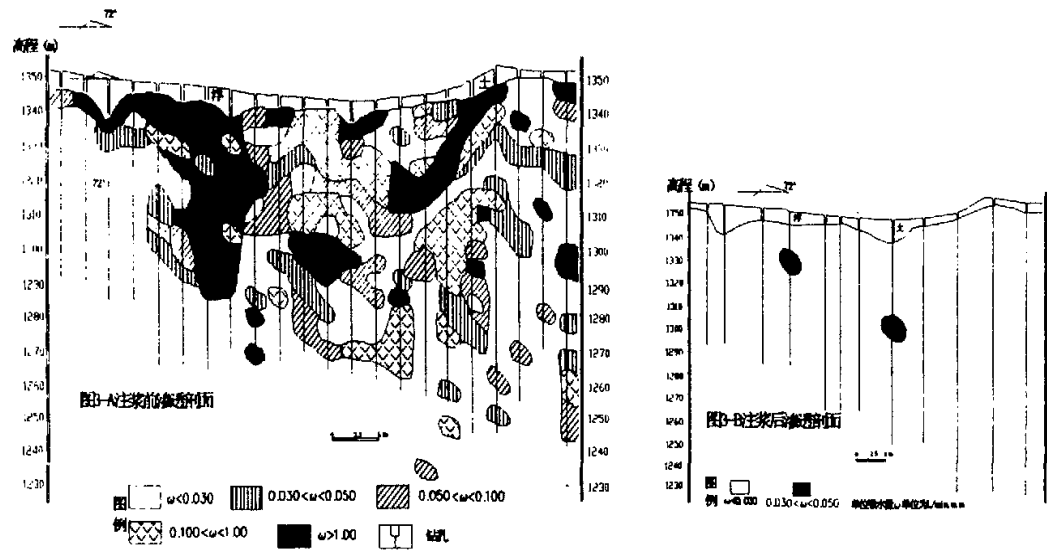


图 3 扎塘 6# 库西侧(C 段)注浆前后渗透剖面图
Fig. 3 The seepage profile of curtain-grouting from beginning to end to the west (C part) of Zhatang 6# reservoir

4.2 其它治理措施

一是封堵库区内 150 多处竖井、落水洞;二是对库区内水位线以下部分实施用烧结法赤泥铺盖,形成环库防渗带;三是采取赤泥附液全部回水措施,现每年回水量已达 $160 \times 10^4 \text{t}$;四是大幅度降低碱耗,每吨氧化铝碱耗由 20 世纪 80 年代末的 270kg/t ,下降到现在的 50kg/t 左右,赤泥堆场已实现多年亏水运行。

4.3 治理工程效果监测

实施垂直防渗工程和综合治理后,通过对曾经受到扎塘赤泥库岩溶渗漏污染的 4 个泉水长期监测结果表明,岩溶地下水的水质已得到恢复,达到《地下水质质量标准》(GB/T14848—93)Ⅲ类的要求,这说明综合治理是成功的。表 5 是质检部门随机检查的监测结果。

表 4 注浆过程中对 S407 和 S313 泉水水质监测结果(除 pH 外,单位:mg/l)
Tab. 4 Monitoring results of S407 and S313 groundwater quality in curtain-grouting

泉点 指标	S407			S313			扎塘赤泥库水质 (1998.12.11)
	注浆前 (1998.5.25)	注浆中 (1998.8.14)	注浆后 (1999.2.4)	注浆前 (1998.5.25)	注浆中 (1998.8.14)	注浆后 (1999.2.4)	
总碱度	4057.70	5710.0	1018.08	796.94	319.83	272.86	4459.94
pH	13.6	13.3	9.0	9.4	9.2	8.6	13.6
AlO_2^-	1612.70	94.84	0	119.01	0	0	1321.77
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	4971.23	4652.90	846.40	922.53	218.04	101.4	4809.53
OH^-	1682.71	0	0	0	0	0	897.45

表 5 综合治理后地下水质监测结果

Tab. 5 Monitoring results of groundwater quality after synthetic treatment (除 pH 外,单位:mg/l)

监测点	监测时间	pH	总碱度 (以 CaCO ₃ 计)	资料来源
牟老泉 S10	1999. 7. 27~29	7. 36	150. 7	铝镁设计院
	2000. 8. 9~11	7. 08	191	铝镁设计院
	2002. 1. 18~19	8. 03	160. 5	实测
白水泉 S313	1998. 8. 14	9. 2	319. 8	有色地勘公司
	1999. 2. 4	8. 6	272. 86	有色地勘公司
	2002. 1. 18~19	7. 72	203	实测
陆家湾 S407	1998. 12. 11	9. 4	65. 36	有色地勘公司
	1999. 2. 4	9. 0	1018. 08	有色地勘公司
	2002. 1. 18~19	8. 10	170	实测
老马寨 S639	1997. 5. 20~23	7. 80	260	有色地勘公司
	1999. 7. 27~29	7. 94	226. 04	铝镁设计院
	2000. 8. 9~11	6. 44	221	实测

注：当地未受污染地下水总碱度为 80~250 mg/l(以 CaCO₃ 计)

5 结 语

(1)扎塘赤泥库渗漏途径和类型,基本反应了水动力条件和弥散运移的特征,因此查清渗漏类型是制定防渗处理措施的关键。

(2)应用水动力弥散叠加模型进行弥散污染的预测评价,预测结果表明,应用条件的概化符合实际,具有理论意义和实用性。

(3)污染预测评价及综合防渗处理取得的研究

成果,对岩溶地区固体废渣堆场(渣库、尾矿库、垃圾填埋场等)的防渗防污治理有推广应用的示范作用。

参考文献

[1] 丁坚平,等. 工业废渣库岩溶渗漏污染评价[J]. 水文地质工程地质,1997,24(3):20-23.
[2] 丁坚平等. 工业废渣库岩溶渗漏水动力弥散污染及其防治研究[J]. 中国岩溶,1998,17(2):91-95.
[3] 蔡良鈞,毛健全,等. 扎塘赤泥堆场岩溶渗漏及防渗处理[J]. 贵州工业大学学报,2002,31(5):101-106.

STUDY ON EVALUATION AND TREATMENT OF LEAKAGE
POLLUTION IN ZHATANG RED-CLAY DISPOSAL SITE

DING Jian-ping¹, CAI Liang-jun², MAO Jian-quan¹, JIANG Tao¹

(1. Guizhou University of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China;
2. China Aluminum Company, Guizhou Branch, Guiyang, Guizhou 550014, China)

Abstract: Based on hydrogeological investigation, the karst leakage channels toward Moulao Spring and toward Baihua Lake have been found in Zhatang Red-Clay Disposal Site. With the application of superposed model of hydrodynamic dispersion, the leakage pollution is predicted and evaluated by means of hydrodynamic dispersion test and long-term groundwater quality monitoring. Integrated control measures, such as vertical grouting curtain of the karst leakage channels, enclosing funnels and paving red-clay, have been adopted to reach the goal of preventing leakage of alkaline wastewater with elevated concentration in karst well-developed areas for ten years as scheduled. It turns out that these measures have stopped wastewater discharging from Zhatang Red-clay Disposal Sites, which produced a remarkable leak-proof effect and protected the environment of karst water resources for ten years.

Key words: Red-Clay Disposal Site; Leakage pollution; Evaluation on pollution; Leak-proof treatment