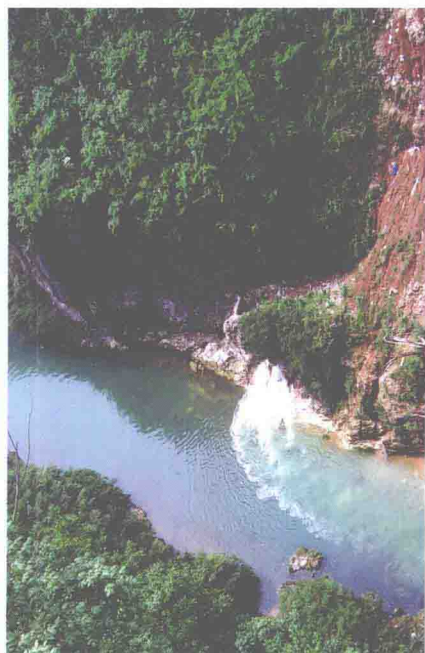


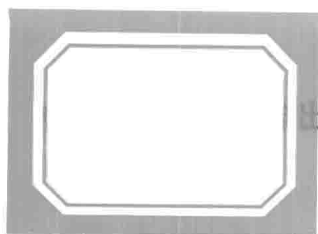
贵州大学学术著作出版基金资助

贵州岩溶地下水 渗漏污染预测及防治

丁坚平 王伍军 褚学伟 编著



地质出版社



出版基金资助

贵州岩溶地下水 渗漏污染预测及防治

丁坚平 王伍军 褚学伟 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书针对贵州岩溶地区工业废渣堆场、城镇化和工业园建设和运营中出现的岩溶地下水渗漏污染问题,结合工程实例,系统总结了贵州岩溶渗漏的水动力弥散污染类型,采用一维水动力弥散、有限元剖面、系统动态、神经网络等方法,对渗漏污染进行预测评价,并列举了有效防治措施的实用技术,对解决岩溶地区的水资源和水环境保护问题具有重要的现实意义。

本书可供从事水文地质、工程地质、环境地质及岩土工程、环境工程等方面工作的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

贵州岩溶地下水渗漏污染预测及防治 / 丁坚平, 王伍军, 褚学伟编著. — 北京: 地质出版社, 2014.3
ISBN 978-7-116-08751-4

I. ①贵… II. ①丁… ②王… ③褚… III. ①岩溶水—地下水污染—环境预测—贵州省②岩溶水—地下水污染—污染防治—贵州省 IV. ①X523.827.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 056827 号

Guizhou Yanrong Dixiashui Shenlou Wuran Yuce ji Fangzhi

责任编辑: 刘亚军 陈磊

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324578 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 7.25

字 数: 175 千字

版 次: 2014 年 3 月北京第 1 版

印 次: 2014 年 3 月北京第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08751-4

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

贵州大学资源与环境工程学院（原贵州工学院地质系），早在 1958 年就开始了贵州岩溶研究工作，主要在贵州南部地区进行岩溶水资源调查及开发利用的研究，其研究成果获 1978 年全国科学技术进步奖。20 世纪 70 年代末承担的贵州省重点攻关项目“贵州独山南部地区岩溶水资源评价及开发利用研究”，组织了全系各个专业的主要技术骨干力量，从基础地质、水文地质、工程地质等方面展开了全面的研究工作，该研究成果于 1983 年获贵州省科技进步奖三等奖。20 世纪 80 年代之后，随着贵州省工业化、城镇化的发展，鄢贵权、丁坚平、王伍军等开展的“岩溶地下水污染的水质模型研究”项目，进行了岩溶地下水污染特征、水动力弥散特征、污染质运移模型等研究，其研究成果获 1997 年获贵州省科技进步奖三等奖。在此基础上，丁坚平、王伍军等承担的贵州省科研基金课题“岩溶地下水渗漏污染预测及防治研究”（编号 3018），重点开展了对贵州岩溶地区大型工业废渣堆场的含水系统和渗漏弥散特征的研究，依据水文地质学、岩溶学、地下水水质模拟方法和系统方法，归纳总结了 4 种岩溶渗漏污染类型及水动力弥散类型，并建立了一维水动力弥散叠加模型、有限元剖面模型、系统动态模型、神经网络模型等，对渗漏污染进行预测评价；以岩溶发育的深度受地区排泄基面控制的观点，采用“悬挂帷幕搭接”垂直防渗、磷石膏堆场加高铺设水平防渗膜、采空区充填等进行渗漏防治，与美国 Ardaman 公司合作，执行美国的 ASTM Standard，在磷石膏堆场勘探和取样工程的技术规范上与国际接轨。通过对扎塘赤泥堆场、交椅山磷石膏堆场回水库、摆纪磷石膏堆场、湾河粉煤灰堆场和龙井湾磷石膏堆场等渗漏污染预测评价及防治工程的实践，取得了一定的成效，对岩溶地区工业废渣堆场渗漏污染预测及防治具有重要的参考意义，研究成果获 2007 年贵州省科技进步奖二等奖。

在工业园、城镇及矿山产生的岩溶渗漏污染评价方面，列举了贵阳市龙洞堡工业园区地下水污染对鱼梁河环境容量和纳污能力的分析以及蔡家关居民区、冒沙煤矿对阿哈水库污染评价的实例。

本书共六章：第一章概述了本书的学术思路和研究背景；第二章介

绍了贵州岩溶地区工业堆场 4 种岩溶渗漏污染类型以及水动力弥散类型特征；第三章介绍了岩溶渗漏污染水动力弥散系数的求取；第四章阐述了一维水动力弥散模型及叠加模型、有限元剖面模型、系统动态模型、神经网络模型等在工业废渣堆场岩溶渗漏污染预测评价中的应用；第五章评价了工业园、城镇及矿山岩溶渗漏污染对地表水及水库的影响；第六章列举了工业废渣堆场岩溶渗漏防治和治理的案例。

本书编写分工：第一章、第二章和第三章，丁坚平、吴浩东撰写；第四章，丁坚平、王伍军、周小义、吴浩东、段先前、綦娅、曾昭霞、杨建华、罗海洲、吴莹撰写；第五章，褚学伟、董毓、杨倩、仲星颖撰写；第六章，丁坚平、周小义、褚学伟、赵伟丽、党爽、羊永夫撰写。

最后，感谢中国铝业股份有限公司贵州分公司、开磷集团有限责任公司、贵阳中化开磷化肥有限公司、贵州宏福实业开发总公司等单位对本书研究项目的大力支持和帮助！

丁坚平

2013 年 12 月 26 日

目 录

前 言

第一章 地下水污染运移问题概述	1
第一节 地质环境工程	1
第二节 地下水污染运移及防治的国内外研究现状	1
一、地下水污染运移简介	1
二、地下水污染数学模型简介	2
三、水动力弥散方程的求解方法	2
第三节 贵州岩溶渗漏污染预测评价及防治面临的问题	4
一、勘察工作面临的问题	4
二、预测评价和防治面临的问题	4
第二章 贵州岩溶渗漏污染及水动力弥散类型	6
第一节 贵州岩溶	6
一、贵州岩溶概况	6
二、贵州岩溶水文地质概况	6
第二节 贵州工业废渣堆场岩溶渗漏污染	7
第三节 岩溶地区工业废渣堆场渗漏污染	8
一、碱污染	8
二、磷污染	9
三、硫酸盐污染	10
四、氟污染	11
五、钡污染	11
六、粉煤灰污染	11
七、煤矿矿坑废水污染	11
第四节 渗漏污染类型	12
一、裂隙溶洞含水系统渗漏类型	12
二、溶洞裂隙含水系统渗漏类型	13
三、裂隙溶孔系统渗漏类型	14
四、采空区渗漏类型	14
第三章 水动力弥散及弥散系数求取	16
第一节 基本概念	16
第二节 研究水动力弥散的意义	16
第三节 水动力弥散方程定解条件	17

一、初始条件	17
二、边界条件	18
第四节 水动力弥散方程	18
第五节 水动力弥散系数及其求解	19
第六节 实例	22
一、湾河粉煤灰堆场渗漏污染弥散	22
二、贵阳氟化盐厂氟石膏堆场渗漏污染弥散	23
三、凯里氧化铝厂赤泥堆场渗漏污染	24
第四章 岩溶地下水渗漏污染预测评价	27
第一节 一维水动力弥散模型：以龙井湾磷石膏堆场、鸡大陇赤泥堆场 渗漏污染预测为例	27
一、预测模型	27
二、龙井湾磷石膏堆场渗漏污染预测	28
三、鸡大陇赤泥堆场渗漏污染预测	32
第二节 一维水动力弥散叠加模型：以扎塘赤泥堆场渗漏污染预测为例	34
一、叠加模型	34
二、扎塘赤泥堆场（库）岩溶渗漏分析	35
三、渗漏污染预测评价	37
第三节 数值模拟模型：以贵阳氟化盐厂氟石膏堆场渗漏污染预测为例	37
一、数值模拟前提	37
二、氟石膏堆场水文地质概况	38
三、污染数值模拟	40
第四节 动态系统模型：以扎塘赤泥堆场渗漏污染预测为例	44
一、动态系统的预测模型概述	44
二、岩溶渗漏预测	47
第五节 污染贡献模型：以鸡心坡灰场渗漏污染预测为例	47
一、预测模型	47
二、鸡心坡灰场渗漏的环境水文地质概况	48
三、灰场渗漏分析	48
四、渗漏污染预测评价	50
第六节 BT 神经网络模型：以交椅山磷石膏堆场渗漏污染预测为例	51
一、人工神经网络	51
二、BP 神经网络	52
三、基于 MATLAB 的 BP 神经网络的应用	53
四、交椅山磷石膏堆场岩溶渗漏污染预测	54
第五章 工业园、城镇及矿山岩溶渗漏污染评价	60
第一节 贵阳市龙洞堡食品工业园岩溶渗漏污染评价	60
一、概况	60

二、岩溶水文地质条件	60
三、水生态环境	63
四、地下水污染评价	64
五、地表水水质评价	64
第二节 鱼梁河龙洞堡段水环境容量核算	65
一、盲数理论及运算	66
二、盲信息下河流水环境容量计算模型	67
三、鱼梁河龙洞堡段水环境容量计算	69
四、治理措施建议	74
第三节 贵阳市蔡家关地区、冒沙煤矿岩溶地下水渗漏污染评价	74
一、概述	74
二、环境水文地质条件	75
三、岩溶地下水污染现状	79
四、岩溶地下水水质评价	79
五、岩溶地下水污染贡献分析	80
六、渗漏污染防治措施的建议	81
第六章 渗漏污染防治与治理	82
第一节 湾河粉煤灰堆场渗漏污染防治	82
一、粉煤灰堆场工程及渗漏概况	82
二、粉煤灰堆场渗漏防治方案	85
第二节 贾家堰磷石膏堆场渗漏污染防治	85
一、堆场环境水文地质条件	85
二、岩溶地下水渗漏污染评价	88
三、堆场渗漏防治方案	89
第三节 交椅山磷石膏堆场水工坝及回水库防渗	89
一、渗漏分析	89
二、确定防渗帷幕底界	89
三、防渗评价	92
第四节 扎塘赤泥堆场渗漏污染治理	92
一、概述	92
二、扎塘赤泥堆场岩溶渗漏分析	93
三、防渗治理工程	93
四、注浆前后地层的渗透性对比	94
五、泉（渗出点）的水质监测	95
六、治理工程效果监测	95
第五节 摆纪磷石膏堆场岩溶渗漏污染治理	96
一、概况	96
二、磷石膏的渗透试验及水位计安装	98

三、磷石膏堆场 932m 堆高铺设防渗膜治理评价	101
第六节 龙井湾磷石膏堆场岩溶渗漏污染治理	102
一、概况	102
二、防渗治理工程	102
三、治理评价	103
参考文献	104

第一章 地下水污染运移问题概述

第一节 地质环境工程

地质环境工程是地质工程与环境工程交叉的边缘科学。地质环境工程的研究内容基本分为三类：①环境灾害工程。受自然条件演变、地壳运动、气候变暖等引起的沙漠化、滑坡、地震、火山、洪水、海啸等环境自然灾害问题以外，还包括大规模工程（如三峡工程、南水北调工程、寒区公路铁路等）在建设及运营过程中对环境的改变，以致引发山体滑坡、地震、冻土地区破坏、生态环境变化等环境灾害问题；②环境卫生工程。主要涉及工业及城市固体废弃物的处置，有毒有害无机物造成的岩土介质污染，以及污染物的迁移和治理等；③城市建筑、地下工程及其基础工程引起的环境问题，如深基坑和地下隧道施工对周围环境的影响等。

工业废渣堆场污染物渗漏运移及防治、城镇化和工业园建设和营运过程中地下水环境的改变及保护问题的研究，属于第二类地质环境问题。

第二节 地下水污染运移及防治的国内外研究现状

一、地下水污染运移简介

地下水流动与污染物运移是一个复杂的水动力弥散过程，我们既不能够直接观察到地下水和污染物在哪儿流，以多快的速度流动，也不能准确地确定含水层水文地质参数的空间变化。事实上，在开始的时候，人们仅仅知道可能的污染源（例如垃圾场、工业废水排放点、农药或化肥的面上污染等）或者在某点（如井、泉或观测井中）检测出污染物。然而，我们最想知道的并不仅仅是这些，而是地下水和污染物在地下的空间分布，地下水和污染物自补给区或污染源能否运移到达开采区、目标区以及到达开采区、目标区的时间，开采量和污染物运移与地下水水位的关系及其随着时间的动态变化过程。为了达到这样的目标，科学工作者进行了大量的野外勘察和试验研究，以期掌握地下水流动和污染物在时间和空间上的分布特征与规律。而长期以来这一科学问题仍然无法得到满意的解决。其中主要原因之一在于含水介质的非均质性及其参数的不确定性。因为人们只能根据有限的地质和水文地质勘探资料来分析和研究含水层系统，并利用传统的描述均质含水层系统的理论对其进行分析计算。然而，人们发现通过不同的钻孔进行的抽水试验所得到的参数不同，采用

传统的描述均质含水层系统的理论并不能准确地反映含水层系统的真实情况。水文地质学界一直在寻求一种能够更合理地描述含水介质非均质以及系统参数分布的理论与方法。

目前,世界各国对地下水污染问题都十分重视。在地下水污染物运移的研究过程中,新理论、新方法、新技术不断的发展和演变,从过去的物理模型发展到现在的概念模型、数学模型,从解析解法发展到数值解法,并通过数值模拟,求解出污染物浓度的时空变化趋势,以预测地下水污染的瞬时动态变化与影响范围,反映地下水污染的发展趋势。

二、地下水污染数学模型简介

国外,地下水研究中数学模型的应用早在上个世纪初已开始,但把数学模型应用于地下水水质模拟研究则是在 20 世纪 60 年代以后。美国在这一领域上发展尤为迅猛,其中研究最早的是美国学者 Schroeder 等,他们研制的“垃圾填埋场水力学评价模型”即 HELP 模型(1984 年),抓住了垃圾填埋场对地质环境影响程度的关键因素——垃圾渗滤液量的大小,并给出了不同结构组合下垃圾填埋场中垃圾渗滤液量的估算方法。目前,世界上已有很多国家开展了此类项目的研究,建立了预测性的地下水水质模型。在理论方面,解析法、有限差分法、有限元法、边界元法等都在地下水定量计算与评价中得到了广泛的应用。现在地下水水质模型方面的计算机软件也日益增多,应用日趋广泛。

国内,地下水污染问题日益突出,而地下水水质模拟研究起步比较晚。现在我国已经建立了囊括国际地下水模拟中心(IGWMC)分类中的所有模型,即预报模型(包括水流模型、溶质运移模型、热量运移模型、变形模型、多目标模型)、管理模型和识别模型。这些模型以水流模型为主,溶质运移模型次之,研究范围涉及饱和带、非饱和带与饱和—非饱和带、地下水—地表水,主要为饱和带模型为主。随着非稳定流理论的发展,以及电子计算机的广泛应用,使得各种复杂条件下的地下水运动都可以应用数值法求解。模拟模型的建立,把水文地质系统中模拟的各种作用进行系统分析,形成最新的计算机实验方法,将模拟方法与最优化法结合,制定系统中的最佳组合方式。

三、水动力弥散方程的求解方法

当前,世界各国都非常重视地下水污染问题,研究污染物在地下水中的运移时,一般以多孔介质中溶质运移为基础,建立地下水水质数值模拟,求出浓度的变化趋势,以预测地下水污染的瞬时动态变化与影响范围,反映地下水污染的发展趋势,为制定合理有效的地下水污染防治措施及选择最佳的治理方案提供科学依据。

地下水水质模型分为两类,第一类是确定性水质模型,第二类是随机性水质模型。确定性水质模型中应用较为广泛的是建立在弥散理论基础上的对流—弥散模型,这种模型理论比较严谨,解法比较完善,其不足之处在于水动力弥散参数的本身就具有不确定性,所以预测精度不高。但是,当缺乏长期的观测资料时,这种方法几乎是地下水水质模型预测中唯一可用的方法,所以它具有不可替代性。

随着地下水水质模型的发展,解法也将日趋成熟,主要有解析解法、数值解法、统计分析法和系统分析法等。

（一）解析解法

多孔介质中溶质运移的解析解法较为易于应用，但是由于其微分方程的复杂性，使得解析解法只适用于径向流问题或者只限于研究区域具有均匀流速的情况。对于绝大多数的实际溶质运移问题，通常只能运用数值法来求取其近似解。尽管如此，研究和掌握溶质运移模型的解析解仍然是非常重要的。一方面可利用解析解验证数值解方法的正确性；另一方面可以在实验室的条件下，利用实验数据，拟合一些标准曲线，来确定弥散系数。

目前，溶质运移模型的解析解一般是在均质、各向同性的含水层中一维稳定流或轴对称的径向稳定渗流的条件下求得。

（二）数值解法

目前，用于求解溶质运移的数值解法主要有：有限差分法、有限单元法和边界元法。

1. 有限差分法

该法方便简单，物理意义直观，在求解溶质运移模型过程中首先得到普遍应用。其基本思想是：将求解问题的偏微分方程中出现的各阶导数用差分式近似代替，从而把表示变量连续变化关系的偏微分方程离散为有限个代数式方程，然后解此线性代数方程组，以求出溶质在离散空间域上各网格节点上不同时刻的浓度。

差分法主要有显式差分格式、隐式差分格式和 Crank-Nicolson 差分格式三种。大量的计算实践表明，用普通的差分方法求解，只有当弥散作用占优势时才能取得较为满意的计算结果。当求解弥散系数较小、流速相对较大、对流作用占优势的问题时，差分法求解过程中都会遇到数值弥散和震荡两个困难。为此，出现了改进的特征有限差分法。

2. 有限单元法

有限单元法是把研究区域剖分成有限个单元，在每个单元上用某种插值函数来近似待求解的未知函数，从而得到求解相应的偏微分方程的线性代数方程组。迦辽金有限单元法根据需要构造相应的形函数为权函数，通过求解残数的加权积分等于零来建立方程组的方法，这是一种常用的有限单元法。

3. 边界元法

边界元法是 20 世纪 70 年代发展起来的一种数值计算方法，基本思想是用 Green 定理把所研究问题的微分方程定解问题转化为边界上的积分方程求解的问题，已经成为解决地下水流动问题研究中的一种新方法。与有限元法相比，由于离散化引起的误差仅仅来源于边界，不仅提高了精度，而且使输入数据简化，避免了有限元数据的准备与核对等烦琐工作。该法是将求解问题的微分方程连同它们的边界条件用边界以积分的形式表达，再进行离散求解计算，从而可以将三维问题简化为二维问题，将二维问题简化为一维问题。因此，边界元法又称为边界积分方程法。

（三）统计分析法

对于污染物在含水介质中的运移规律及其控制是水文地质学的一个研究重点。地下水系统是一个由输入、输出及地质实体构成的复杂系统，整个系统的各因素相互影响、相互联系，构成一个有机整体。地下水的动态变化是诸多要素相互影响、共同作用的结果，地下水动态受多种因素影响呈现出不同的变化态势，为了更清晰地反映诸多影响因子的相互

作用,利用数理统计中的多元回归分析方法,对地下水动态变化影响因子加以阐述,选取合理影响因子,建立地下水污染物质运移的数学模型,这对于岩溶地区地下水的污染预测和防治具有一定的实际意义。

(四) 系统分析法

系统分析法为地下水物质迁移模型中的“黑箱模型”,主要有动态系统方法、神经网络方法等。

黑箱模型(Black Box)或称经验模型,是指对一个内在结构或内部规律还处于未知状态的系统,建立的系统输入和输出关系的模型。黑箱模型应用于地下水污染的原理就是将污染物质输入和输出的含水层作为一个黑箱,通过省略具体的污染物在系统中的各种迁移转化规律和过程,只研究系统的输入和输出的关系来了解黑箱的综合效应,通过这种综合效应,根据输入来预测输出或者根据输出来反求输入。

由于岩溶地下水污染,特别是在岩溶发育强烈地区,污染物沿管道运动扩散迁移,其迁移介质存在特殊性致使其迁移过程难以确定,只能在对污染物的输入和输出进行相关监测工作时获取数据,因此选择黑箱模型来进行模拟是比较合理的选择。

第三节 贵州岩溶渗漏污染预测评价及防治面临的问题

一、勘察工作面临的问题

贵州裸露型和半裸露型岩溶,以峰丛洼地、峰丛谷地、槽谷、沟谷和峡谷为主要地貌特征。可溶岩上覆红黏土层厚度变化大,而且分布不连续,下伏隐伏的溶沟、溶槽及石芽发育,无天然防渗层可利用,致使岩溶含水系统抗污染能力弱。

岩溶含水系统的不均匀性及多层性,致使渗流场复杂,一旦岩溶地下水遭受渗漏污染,即使采用较多的勘察工程手段,也很难查清渗漏途径及弥散运移的空间变化特征,给评价和治理工作带来较大的困难。

二、预测评价和防治面临的问题

在岩溶渗漏污染预测评价方面,解析解法、数值法等,受到岩溶地区含水介质不均匀性的制约,其水文地质参数、弥散系数的获取只有在特定概化的岩溶水文地质条件下才能使用,缺乏普遍性和代表性。而系统分析法和统计分析法等,由于监测资料的不足,应用亦受限制。

贵州各种工业堆(渣)场场址只要分布有碳酸盐岩地层,就存在岩溶渗漏问题。在防渗措施设计上面临的问题在于,一方面由于岩溶含水系统的隔水层埋藏深度大或含水层呈急倾斜,根据压水试验值($K \leq 0.03 \times 10^{-6} \text{cm/s}$)作为相对隔水底板,采用垂直(悬挂注

浆帷幕)防渗处理即使能够防止堆(渣)场底部的渗漏,但由于岩溶发育的多层性及连通性,随着堆(渣)场堆高,堆积物中废水下渗水位的抬升,往往不能彻底解决渗漏污染,有较大的风险;另一方面采用水平防渗处理(黏土垫层+土工布+HDPE膜),因缺乏黏土材料、HDPE膜本身和焊接缝强度的牢固性、岩溶区存在土洞和塌陷隐患等问题,也存在风险。

第二章 贵州岩溶渗漏污染 及水动力弥散类型

第一节 贵州岩溶

一、贵州岩溶概况

贵州位于长江和珠江两大水系的分水岭地段，为云贵高原的组成部分，平均海拔1000m左右，西高东低，并分别向南向北倾斜。全省年均温度 $11^{\circ}\text{C} \sim 19^{\circ}\text{C}$ 之间，年平均降水量为900 ~ 1500mm。分布趋势是南部多于北部，东部大于西部。

贵州属于典型的岩溶特征区域，是我国碳酸盐类岩石分布的主要地区之一。贵州全境除东部外，震旦系—三叠系的碳酸盐岩广泛分布，总厚度在3000 ~ 12000m之间，分布面积为 $12.96 \times 10^4 \text{km}^2$ ，占全省总面积的69.1%。在可溶岩层中，分布着各种类型的岩溶地下水。黔南、黔西北地区主要分布以石灰岩为主的裂隙溶洞水，占全省面积的三分之一；以白云岩为主的溶洞裂隙水，主要分布于黔中、黔西南、黔北、黔东北等地，分布面积接近全省面积的五分之一；碳酸盐岩及碎屑岩裂隙岩溶水分布面积也大约为全省面积的五分之一。

岩溶十分发育，地面岩溶为谷地、洼地、落水洞、漏斗、溶沟槽；地下岩溶为裂隙、裂缝、溶洞、管道、地下河等。

二、贵州岩溶水文地质概况

贵州岩溶水的主要补给来源是大气降水，补给方式有两种，一种是通过裸露岩溶石山的裂隙等以面状分散形式通过包气带补给；二是通过落水洞、深大溶隙（缝）、溶井以集中注入方式直接补给饱水带岩溶地下水。

贵州岩溶地下水的分布受地质构造、地貌及现代水文网控制。根据岩溶水赋存的含水层岩性、含水介质组合及水动力特征，可将岩溶水划分为裂隙溶洞水、溶洞裂隙水及溶孔裂隙水。

1. 裂隙溶洞水

代表性的含水岩组有下三叠统茅草铺组，中二叠统栖霞组—茅口组，上石炭统黄龙组、马平群，下奥陶统桐梓组、红花园组，下寒武统清虚洞组等，以石灰岩为主，岩溶发育强烈，含水介质为溶洞—管道—裂隙组合，赋水极不均匀，富水性中等至强。

2. 溶洞裂隙水

代表性的含水岩组有中三叠统杨柳井组、关岭组、松子坎组、下三叠统永宁镇组、上二叠统长兴组一大隆组，中泥盆统独山组等，以白云岩、泥质白云岩夹泥岩、灰岩夹泥质灰岩等，岩溶发育较强烈，含水介质为裂隙、小规模管道-溶洞等，赋水不均匀，富水性弱至中等。

3. 溶孔裂隙水

代表性的含水岩组有上震旦统灯影组、中上寒武统石冷水组、娄山关群等，以白云岩夹泥质白云岩为主，岩溶呈弥散状发育，含水介质为裂隙、溶隙、孔隙等，赋水相对均匀，富水性均匀。

第二节 贵州工业废渣堆场岩溶渗漏污染

据不完全统计，贵州省境内磷化工、铝工业、煤电工业、采矿工业等的废渣堆场大部分设置在岩溶地区，由于建设和管理不到位等历史原因，85%的废渣堆场存在渗漏污染问题。由于废渣堆场选址、勘察设计等对岩溶渗漏类型及水动力弥散污染方式分析研究不足，一方面不能准确定量预测评价废渣堆场岩溶渗漏污染对岩溶水系统影响的危害性，另一方面在废渣堆场建设、运营、管理及环境的监管上对防渗工程的重要性认识不够，导致了岩溶渗漏污染，威胁着当地流域的水资源及水环境。贵州工业废渣堆场岩溶渗漏污染特征见表 2-1。

表 2-1 贵州工业废渣堆场岩溶渗漏污染特征 浓度单位：mg/L (pH 值除外)

堆场名称	废渣类型	堆放形式	渗漏类型	污染物	污染源 污染物浓度 (或 pH 值)	污染方式	备注
扎塘 赤泥堆场	赤泥	湿排干堆	裂隙溶洞	含碱 废水	pH = 13	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 猫跳河
青菜冲 赤泥堆场	赤泥	湿排干堆	裂隙孔隙	含碱 废水	pH = 13	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 巴拉河
交椅山 堆场	磷石膏	湿排干堆	裂隙溶洞	总磷氟	6000 2500	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 乌江
摆纪堆场	磷石膏	湿排干堆	裂隙溶洞	总磷氟	6000 2500	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 浪坝河
龙井湾 堆场	磷石膏	干排干堆	裂隙孔隙	总磷氟	2500 250	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 两岔河、洋水河
贾家堰 堆场	磷石膏	干排干堆	裂隙溶洞	总磷氟	2500 250	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 息烽河
大坝渣库	氟石膏	湿排干堆	溶洞裂隙	氟	2500	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 麦架河
清镇铁厂 尾矿库	废渣	干排干堆	溶洞裂隙	硫酸盐	2500	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 鸭池河
大沟冲 渣库	盐泥	干排干堆	裂隙	硫酸盐	3500	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 大塘河
镇宁 钡渣库	钡渣	干排干堆	裂隙	硫酸钡	3000	直接污染 地下水	桂家河

续表

堆场名称	废渣类型	堆放形式	渗漏类型	污染物	污染源 污染物浓度 (或 pH 值)	污染方式	备注
白岩 尾矿库	磷矿石	干排干堆	裂隙	硫酸盐	1000		小翁光河
天柱 钼渣库	硫酸钼渣	干排干堆	孔隙	硫酸钼	3000	直接污染 地下水	泄流剑江河
湾河 堆场	脱硫废渣	湿排干堆	溶洞裂隙	硫酸盐	3000	直接污染 地下水	以岩溶泉排入 波玉河
水帘洞 渣库	尾矿	干排干堆	孔隙	氰化物			地表水
鸡心坡 灰库	粉煤灰	干排干堆	矿洞	硫酸盐	1500	直接污染 矿洞水	以矿洞溢流水排 入阿哈水库

第三节 岩溶地区工业废渣堆场渗漏污染

在贵州岩溶地区，特别是裸露型和半裸露型岩溶地区，由于工业废渣堆场（库）的选址、建设、运营过程中，因防渗措施处理不当，废渣堆场中的强酸碱废水通过落水洞、漏斗、溶缝、溶隙等产生渗漏，进入含水系统，产生岩溶渗漏污染问题。如赤泥堆场的碱污染；磷石膏堆场的磷污染；氟石膏堆场的氟污染；盐泥堆场的硫酸盐污染等。岩溶水污染造成以下的环境问题：①对岩溶泉井的污染，使地下水不能饮用；②对河流、水库、湖泊的污染，除对供水水源地产生直接影响外，污染严重的会造成鱼类大量死亡；③对山区河流的污染，影响了水电站的安全运行；④污染治理技术难度大。

一、碱污染

1. 赤泥化学成分

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，其化学成分、浸出附液的化学成分，见表 2-2、表 2-3。

表 2-2 贵州铝厂赤泥化学成分分析结果

$w_B/\%$

生产工艺	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	灼减
拜耳法	12.8	22.0	3.4	32.0	3.9	6.5	0.2	4.0	10.7
烧结法	25.9	38.4	5.0	8.5	1.5	4.4	0.2	3.1	11.1

资料来源：贵阳铝镁设计院。

表 2-3 贵州铝厂赤泥附液成分

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⁻	Al ₂ O ₃
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：贵阳铝镁设计研究院。