

基于数值模拟的某临河工业固体废物渣场地下水污染控制研究

肖再亮¹, 王飞², 洒永芳², 宋凯², 刘建²

(1. 四川省环境工程评估中心, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 简易渣场无规范环保措施, 是地下水和土壤的重要污染源。针对简易渣场, 以彻底清除污染源和重新规范渣场建设为优先方案, 但确无条件实施上述方案时, 一些地方也采用封场配套物理阻隔和抽出-处理等措施, 最大程度控制和缓解渣场对周边地下水环境的影响。以某临河工业渣场为例, 建立了就地封场、就地封场联合水动力阻隔、就地封场联合防渗帷幕及抽出-处理方案的 Modflow 模型, 模拟了各方案的控制效果。结果表明: 封场虽可较快恢复渣场区地下水质量, 但并未从根本上消除污染物; 封场基础上在临河侧设置抽水量 170 m³/d 的水井 1 口亦有较好的控制效果, 但存在运行管理困难的问题; 封场基础上联合帷幕注浆及抽出-处理, 相对有一定优势, 但运行管理仍有一定难度。因此, 若条件允许, 最好的方案仍是彻底清除污染源或重新规范渣场建设。

关键词: 渣场; 地下水污染; 帷幕注浆; 水动力阻隔; 数值模拟; 临河工业固体废物渣场

中图分类号: X523; X705

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0095-05

Research on groundwater pollution control of a riverside industrial solid waste slag field based on numerical simulation

XIAO Zailiang¹, WANG Fei², SA Yongfang², SONG Kai², LIU Jian²

(1. Sichuan Environment and Engineering Appraisal Center, Chengdu 610031, China; 2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Simple slag without standardized environmental protection measures is an important source of groundwater and soil pollution. Completely removing pollution sources or re-regulating it is a priority plan. However, when unconditionally implementing the above schemes, some places also adopt measures such as physical barrier and extraction-treatment based on field sealing to minimize the impact of slag yards on groundwater environment. Taking a riverside industrial solid waste slag as an example, the Modflow models of in-situ closure, in-situ closure combined hydrodynamic barrier, in-situ closure combined seepage proof and extraction-treatment schemes were established. The numerical simulation results showed that: although the quality of groundwater around the slag would recover in a relatively short time, the pollutants can't be eliminated completely; a well with pumping capacity of 170 m³/d based on in-situ closure also has good control effect, but it has some problems in operation and management; combining curtain grouting and pumping-treatment based on in-situ closure has some comparatively advantages, but the operation management is still difficult. Therefore, the best solution is to completely eliminate the source of pollution or re-regulate the slag, if conditions permit.

Key words: slag field; groundwater pollution; curtain grouting; hydrodynamic barrier; numerical simulation; riverside industrial solid waste slag field

收稿日期: 2018-08-17; 修回日期: 2018-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602241)

作者简介: 肖再亮(1982-), 男, 四川剑阁人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为排污许可、事中事后环境管理。

通讯作者: 刘建(1982-), 男, 四川威远人, 博士, 副研究员, 研究方向为固体废物处理与处置、工程水环境效应及其控制。

1 研究背景

随着工业快速发展,我国工业固废产生量持续增长,至2016年我国214个大、中型城市一般工业固废产量达 17.9×10^8 t,综合利用率48%,处置率21%,贮存率31%^[1]。工业固废贮存过程中,因监督、管理不善,尚存在大量违规简易堆放现象,如甘肃兰州某电解铝废渣违规堆放^[2],安徽贵池某工业园区碱渣沿江简易堆存^[3],四川德阳17座磷石膏渣场简易堆放^[4]等。简易工业固废堆场运行过程中,污染物通过降雨淋滤进入地下污染含水层^[5-6]。

根据《固体废物污染环境防治法》《土壤环境保护和污染治理行动计划》等法律法规和近年来环保督察的要求,简易堆场须进行治理,并以彻底清除污染源和重新规范渣场建设为优先方案。但针对无条件彻底清除污染源或重新规范建设的简易堆场,一些地方也采用就地封场并配套水动力阻隔、防渗帷幕、抽出-处理等措施予以缓解和控制污染^[7-14]。

本文以某临河工业固体废物渣场为研究对象,通过模拟就地封场和就地封场基础上联用水动力阻隔、防渗帷幕、抽出-处理等多种方案的治理效果,为渣场污染控制提供依据。

2 渣场概况

某渣场位于A河左岸,面积约 3.0×10^4 m²,堆渣总量约 25×10^4 m³,已运行10余年。渣场南侧、西侧外围设置有挡墙,无规范防渗、渗滤液收集处理和雨污分流措施。与《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III类标准相比,渣场区地下水中SO₄²⁻超标范围约0.1 km²。

3 地下水污染控制方案

彻底清除污染源或按相关标准、规范要求重新

规范渣场是有条件时应优先考虑的方案。在确无上述条件时,有些地方也采用就地封场并配套相应物理阻隔和地下水抽出处理措施,以最大程度控制和缓解渣场对周边地下水环境的影响。

本文仅就就地封场、就地封场联合水动力阻隔、就地封场联合防渗帷幕及抽出-处理3种方案进行比较,采用Modflow模拟各方案的控制效果。3种方案的具体措施如下:

(1)就地封场:主要内容包括建设雨污分流和渗滤液收集处理系统、采用HDPE等材料进行封场覆盖。

(2)就地封场联合水动力阻隔:在就地封场的基础上在南侧拦渣坝下游设置抽水井抽取受污染地下水至地表处理。假设抽水井数量相同,设计单井抽水量为30、50、70、90、110、130、150、170及190 m³/d依次变化。

(3)就地封场联合防渗帷幕与抽出-处理:封场基础上,将防渗帷幕布设位置于污染羽上游、污染羽侧向及污染羽下游。抽水井布设于下游帷幕内侧,以避免帷幕内地下水位雍高。共设计8种方案,见表1。

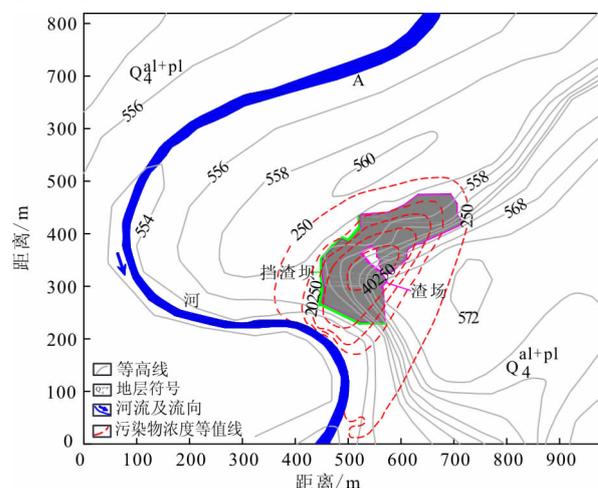


图1 渣场区地下水中SO₄²⁻污染范围(单位:mg/L)

表1 防渗帷幕与抽出-处理联用方案设计

方案设计编号	方案设计内容
Wa11-1 [#]	仅南侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-2 [#]	南侧+北侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-3 [#]	南侧+西侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-4 [#]	南侧+东侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-5 [#]	南侧+东侧+西侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-6 [#]	南侧+北侧+西侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-7 [#]	南侧+北侧+东侧设置帷幕,南侧下游帷幕内设置1口抽水井
Wa11-8 [#]	帷幕包围渣场,南侧下游帷幕内设置1口抽水井

4 地下水污染控制效果模拟

4.1 模型基本设置

4.1.1 数学模型 将模拟区地下水概化为均质各向异性非稳定地下水流动系统^[16],建立地下水流动的污染物迁移数学模型^[17],并分别选用 MODFLOW 和 MT3D 进行数值模拟。

4.1.2 模型离散及边界条件设置 模型范围设置:东-西方向作为模型 x 轴方向,长 3 000 m,每 40 m 划分一个网格;南-北方向作为模型 y 轴方向,长

2 400 m,每 40 m 划分一个网格;垂直于 xy 平面向上为模型 z 轴方向,模拟范围 552 ~ 660 m,垂向上概化为 2 层。模型边界条件设置:排泄面 A 河设置为河流边界;东侧碎屑岩山区地表分水岭设置为零流量边界;模型北侧设置为补给边界。

4.1.3 参数设置及模型校正 根据场区水文地质勘查报告、区域水文地质资料、有关规范和模型校正确定模型区降雨补给量、含水层渗透系数、给水度、弥散度等参数,见表 2。以场区钻孔实测水位作为校验获得模型区初始流场,见图 2。

表 2 模型参数取值

介质分类	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		给水度/ %	补给量/ mm	弥散度/ m
	K_x, K_y	K_z			
第四系松散岩类卵石层	9.0×10^{-3}	9.0×10^{-4}	20	450	10
强风化层碎屑岩	8.0×10^{-5}	8.0×10^{-6}	10	150	

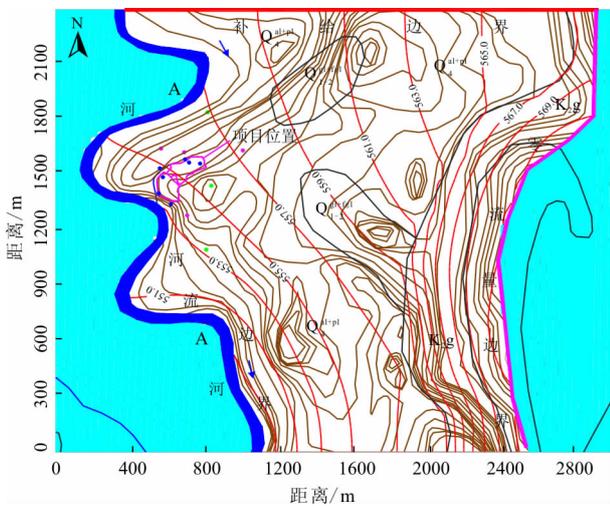


图 2 模型区边界条件及初始流场

4.1.4 污染现状拟合及污染源项分析

(1) 污染现状拟合。渣场非覆盖状态下入渗系数取 0.3^[18],计算得降雨补给量约 450 mm。以非稳定流方式运行模型,采用实测数据进行校正,获得模型区 SO_4^{2-} 浓度分布,如图 1 所示。

(2) 污染源项分析。根据数值模型校正结果,渣场 SO_4^{2-} 平均下渗浓度约 110.5 g/L,下渗量约 450 mm/a。据有关测算,废渣中可溶 SO_4^{2-} 还余约 0.5×10^4 t。封场后,入渗量设置为非覆盖状态的 10%, SO_4^{2-} 下渗浓度仍假设为 110.5 g/L,根据估算,封场 30 a 后,堆渣剩余 SO_4^{2-} 完全进入地下水,即封场 30 a 后渣场 SO_4^{2-} 下渗浓度衰减为 0。

4.2 模拟结果

4.2.1 就地封场 封场后地下水中 SO_4^{2-} 浓度贡献值变化见图 3。由图 3 可知,渣场区、南侧拦渣坝及南侧下游 A 河周边在封场后 0 ~ 30 a, SO_4^{2-} 贡献值分别由 46 277、40 974 和 19 529 mg/L 降低至 5 229.4、5 144.5、777.5 mg/L;30 a 后, SO_4^{2-} 继续降低,至 42 a,渣场及其下游地下水恢复至地下水环境质量 III 类标准。封场虽降低了污染源强,改善了地下水环境质量,但封场后污染物主要以对流扩散形式进入含水层和 A 河,事实上污染物并未得到清除。

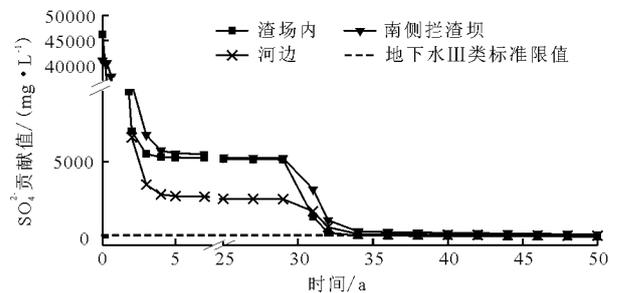


图 3 封场后渣场区、南侧拦渣坝及河边 SO_4^{2-} 贡献值随时间变化情况

4.2.2 就地封场联合水动力阻隔

(1) 方案筛选。封场基础上,于渣场南侧拦渣坝下游设置 1 口抽水井,以抽水量 30、50、70、90、110、130、150、170 及 190 m^3/d 为条件运行模型。利用 Modflow 粒子跟踪功能,在渣场北东侧上游、垂直地下水主流方向设置 1 排示踪粒子,单井捕获带见图 4(a)。调整抽水井数量、位置至抽水井数量最

少且捕获带形成的包络线能覆盖渣场,见图4(b)。

布井方案及捕获范围统计见表3。

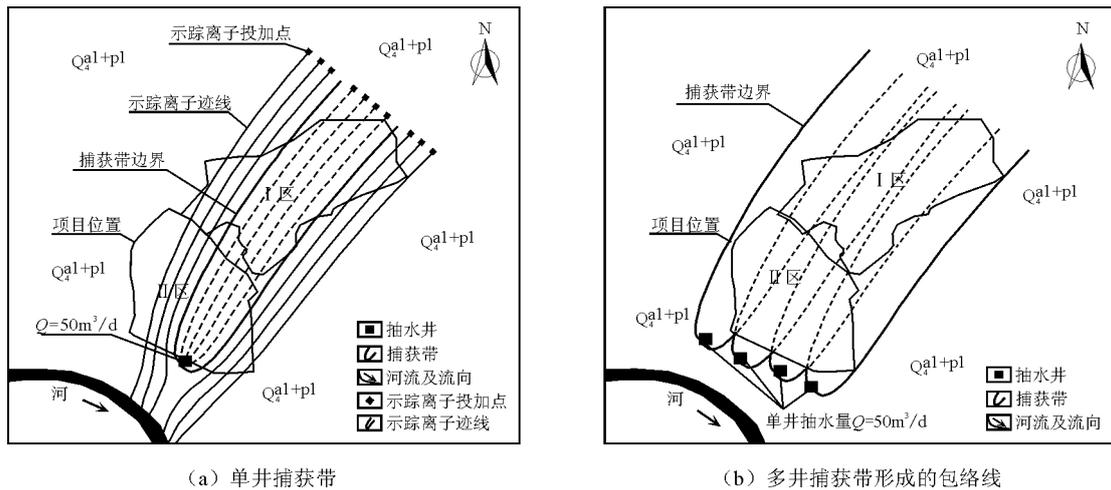


图4 捕获带及抽水井数量确定过程示意

表3 布井方案及捕获带统计

单井抽水量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	抽水井设置数	总抽水量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	抽水井捕获带包络线宽度/m	渣场垂直于地下水主流方向投影宽度/m
30	6	180	171 ~ 202	
50	4	200	168 ~ 207	
70	3	210	178 ~ 198	
90	2	180	183 ~ 193	
110	2	220	203 ~ 239	149 ~ 195
130	2	260	195 ~ 261	
150	2	300	179 ~ 287	
170	1	170	165 ~ 248	
190	1	190	171 ~ 262	

由表3知,在就地封场联合水力阻隔方案中,设置抽水量 $170 m^3/d$ 的抽水井1口,为最优。

(2) 优选方案的污染控制效果。优选方案下地下水中 SO_4^{2-} 浓度贡献值变化见图5。由图5可知,0~30 a 渣场区、南侧拦渣坝 SO_4^{2-} 贡献值分别由46 277、40 974 mg/L降低至4 612、3 759 mg/L;封场后38 a,渣场区、南侧拦渣坝 SO_4^{2-} 贡献值恢复至地下水环境质量 III 类标准限值。A 河周边在采取水力阻隔措施后5a, SO_4^{2-} 贡献值恢复至地下水环境质量 III 类标准限值。水力阻隔技术强化了地下水的水力交替,对渣场及下游地下水质量的恢复具有明显效果。

4.2.3 就地封场联合防渗帷幕与抽出处理

(1) 方案筛选。在封场基础上,按 Wall-1# ~ Wall-8# 方案运行模型,确保场区内地下水位不壅高的抽水量见表4。

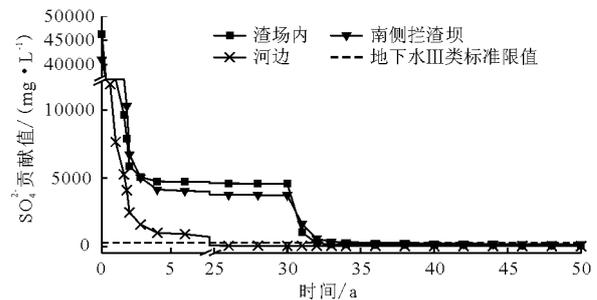


图5 最优抽水井设置方案下渣场区地下水中 SO_4^{2-} 贡献值随时间变化情况

表4 各帷幕设置方式下防渗渣体内水位不壅高的抽水量模拟结果

方案编号	设置方式	示意图	抽水量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)
Wall-1#	南侧帷幕		100
Wall-2#	南侧+北侧帷幕		95
Wall-3#	南侧+西侧帷幕		95
Wall-4#	南侧+东侧帷幕		95
Wall-5#	南侧+东侧+西侧帷幕		90
Wall-6#	南侧+北侧+西侧帷幕		85
Wall-7#	南侧+北侧+东侧帷幕		80
Wall-8#	帷幕包围渣场		5

注:示意图中方块表示渣体,段线表示帷幕。

由表4可知,Wall-1# 方案抽水量与 Wall-2# ~ Wall-7# 方案相差不大,但帷幕长度最少;Wall-8# 方案帷幕长度虽最长,但其抽水量仅为 Wall-1# ~ Wall-7# 方案抽水量的 $1/20 \sim 1/16$ 。因此,选择 Wall-1# 和 Wall-8# 方案作比较。

(2) 优选方案的污染控制效果。Wall-1#、Wall-8# 方案地下水中 SO_4^{2-} 贡献值变化情况见图6。

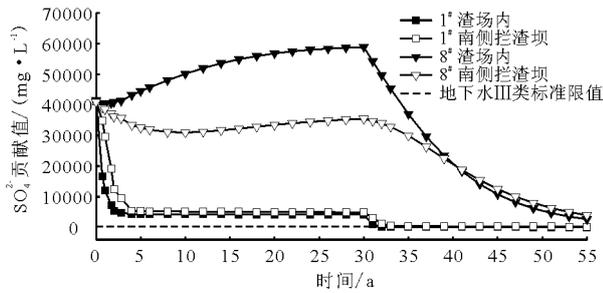


图6 渣场区地下水水质恢复情况对比

由图6可知,Wall-1[#]方案实施后0~30a,渣场、南侧拦渣坝周边 SO_4^{2-} 贡献值分别由46 277、40 974降低至4 201、4 947 mg/L;至封场后47 a,渣场区、拦渣坝 SO_4^{2-} 恢复至地下水环境质量III类标准限值。Wall-8[#]方案实施后,帷幕完全截断渣场区地下水侧向补给,但由于渣场内污染物的持续释放,致使渣场区地下水中污染物浓度持续升高,至封场30 a时 SO_4^{2-} 贡献值由46 277上升至58 864 mg/L;南侧拦渣坝因靠近抽水井,方案实施开始受抽水井影响 SO_4^{2-} 贡献值降低,后仍表现为逐步上升的趋势,至封场后30 a,南侧拦渣坝 SO_4^{2-} 贡献值仍达35 452 mg/L。帷幕外侧,因防渗帷幕截断污染源,帷幕外侧地下水逐步恢复。

4.3 综合对比分析

综合前述模拟结果:(1)封场处理虽能减少污染源强,但仍将持续向含水层和A河释放 SO_4^{2-} ,因此地下水的恢复时限较长,且这种方式不能从根本上消除污染物;(2)在封场基础上,设计水动力阻隔方案,以在渣场南侧设置1口抽水量 $170 \text{ m}^3/\text{d}$ 的抽水井为佳,但存在运行费用较高等缺点;(3)封场基础上,配套设置帷幕和抽出处理在污染控制、工程量和运行管理方面具有一定优势,该方案中以在渣场南侧设置帷幕并配套 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的抽水井1口为佳。需要说明是,上述3种方案并不能在短时间内恢复地下水环境质量且或多或少存在运行管理困难、污染物持续下渗等问题,有条件时建议彻底清除污染源或按相关标准、规范要求重新规范渣场建设。

5 结论

(1)单纯的封场方案可以在一定时间内恢复地下水环境质量,但主要依靠地下水的对流、扩散作用,并不能从根本上消除污染物。

(2)封场联合水动力阻隔亦可控制污染物的扩散,但运行费用相对较高;封场联合帷幕注浆和抽出-处理对于污染控制有一定优势,但运行管理方面仍有一定困难。

(3)为切实保护地下水环境,建议有条件时彻

底清除污染源或按相关标准、规范要求重新规范渣场建设。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2014年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报(节选)[J]. 再生资源与循环经济, 2015, 8(1): 4-8.
- [2] 李树恩, 李向红, 滕萍, 等. 甘肃电解铝厂大修槽废渣排放现状的调查研究[J]. 甘肃冶金, 2001(2): 28-30.
- [3] 周凌云. 强酸废水直排长江, 酿南通特大环境污染案[J]. 绿色视野, 2015(1): 48-51.
- [4] 刘波. 德阳: 面向17座矿渣山的环保之战[EB/OL]. (2017-07-14) [2018-11-7] <http://sichuan.scol.com.cn/dyxw/201707/55952180.html>.
- [5] 沈东升, 何若, 刘宏远. 生活垃圾填埋生物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 陈忠荣, 王翊虹, 袁庆亮, 等. 北京地区垃圾填埋对地下水的污染及垃圾填埋场选址分区[J]. 城市地质, 2006, 1(1): 29-33.
- [7] 金卫忠. 生活垃圾堆场整治及利用方案研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [8] 詹良通, 贾官伟, 邓林恒, 等. 湿润气候区固废堆场封场土质覆盖层性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1812-1818.
- [9] 郭敏丽, 王金生, 刘立才. 非正规垃圾填埋场地下水污染控制技术比较[J]. 水资源保护, 2009, 25(4): 28-30+36.
- [10] MACKAY D M, CHEYY J A. Groundwater contamination: pump-and-treat remediation[J]. Environmental Science and Technology, 1989, 23(6): 630-636.
- [11] 王燕. 硝酸盐地下水污染数值模拟与抽出-处理技术抽水井优化研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [12] 王颖. 氯代有机物污染地下水修复的水力控制与数值模拟研究[D]. 北京: 轻工业环境保护研究所, 2012.
- [13] CHEN Zongyu, NIE Zhenlong, ZHANG Zhaoji, et al. Isotopes and sustainability of ground water resources, North China Plain[J]. Ground Water, 2010, 43(4): 485-493.
- [14] LIU Jie, ZHENG Chunmiao, LI Zheng, et al. Ground water sustainability: methodology and application to North China Plain[J]. Ground Water, 2008, 46(6): 897-909.
- [15] 鞠晓明. 地下水污染场地水力控制优化方案研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [16] ZHENG Chunmiao, WANG P P. A field demonstration of the simulation optimization approach for remediation system design[J]. Ground Water, 2002, 40(3): 258-266.
- [17] LI Fawen, ZHU Jingzhao, DENG Xiyuan, et al. Assessment and uncertainty analysis of groundwater risk. [J]. Environmental Research, 2018, 160: 140-151.
- [18] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程水文地质勘察规程: TB10049-2004[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.