

矿产资源开发对地下水环境的影响及对策

—以广东省封开县某矿区为例

罗育池, 宋宝德, 阮文刚

(广东省环境科学研究院, 广州 510045)

摘要: 以广东省封开县某矿区为例, 在对研究区地下水环境调查评价的基础上, 通过数值模拟计算, 预测分析了矿产资源开发活动对地下水环境的影响程度。研究表明, 矿产资源开发过程中地下水流场变化较大的区域主要分布于巷道上游约 1 000 m、下游约 600 m 范围内, 在该区域应定时监测水位变化情况; 稳定流场条件下, 非正常工况选矿废水沉淀池污染物渗漏 8 a 后 Cu 对地下水贡献值超过 0.05 mg/L 的距离可达 149 m, 污染物超标带地下水开始向板梯河以泄流方式排放污染物。如果能采取有效的防渗措施, 可大大降低矿产资源开发活动对矿区及周边地下水环境的影响。

关键词: 矿产资源开发; 地下水; 环境影响; 污染防治

中图分类号: P641.69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0289-05

Effects and measures of mineral resources development on groundwater environment — a case study of a mining area in Fengkai County of Guangdong Province

LUO Yu chi, SONG Bao de, RU AN Wen gang

(Guangdong Provincial Academe of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China)

Abstract: On the basis of groundwater environment investigation and evaluation, a numerical simulation was performed to analyze the effects of mineral resource development on groundwater environment of a mining area in Fengkai County of Guangdong Province. The results showed that the area with significant effects on groundwater flow field during the mineral resource development is within the range of 1 000 m upstream and 600 m downstream, and groundwater levels in this area need to be regularly monitored. Under steady groundwater flow and after the pollutants in the mineral processing wastewater settling tank under the abnormal working conditions spill eight years, the distance that the content of Cu in groundwater exceeds 0.05 mg/L can reach 149 m, and groundwater in the excessive pollutants zones begins to discharge pollutants to the Banti River. Effective seepage control measures need to be conducted to reduce the impact of mineral resource development activities on groundwater environment in the mining and its surrounding areas.

Key words: mineral resources development; groundwater; environmental effects; prevention and remediation of pollution

矿产资源是国民经济和社会发展的重要物质基础, 但资源开发活动也会不同程度的引发一系列地下水环境问题, 如采掘工程过量排水导致地下水位下降而引发地质灾害, 矿山“三废”未经有效处置使地下水水质受到污染^[1-2]。国内外许多学者大多关注矿山涌水对地下水环境的影响, 而对开发活动导致的地下水水质污染关注较少^[3-7]。本文以广东省封开县某矿为例, 对矿产资源开发全过程进行地下水环境影响评价, 并通过数值模拟预测开发活动对地下水环境的影响程度, 为采取合理可行的环境保护和污染防

治措施提供基础。

1 矿区地质与水文地质条件

广东省封开县某矿区位于封开县金装镇, 海拔标高 +365.1~+120 m。区内沟谷发育, 最大的溪沟板梯河由东向西流经矿床。矿区位于佛冈-丰良东西向斜构造带和郴州-怀集断褶带的交汇地段。区内褶皱构造发育, 岩浆活动强烈, 成矿地质条件良好。矿区占地 1.0 km², 年矿石开采量 3 万 t, 矿山总服务年限 10 a, 其中生产服务期 8 a, 采用两段破

收稿日期: 2014-07-24 修回日期: 2014-10-09 网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0941.015.html>

作者简介: 罗育池(1974), 男, 湖南耒阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事水环境污染防治方面的研究。E-mail: luoyuchi8848@163.com。

碎、一段闭路磨矿和浮选流程,产品为精矿。矿区布置有采矿作业区、选矿厂、废石堆场、尾矿暂存池(不设尾矿库)、废水处理站和办公生活区等。

矿区所在区域地下水类型主要属于层状岩类裂隙水,其次是沿沟谷河道赋存于第四系松散土层中的孔隙水(图 1)。层状岩类裂隙水主要赋存于寒武系地层上部风化裂隙带中,与上覆第四系松散层呈不整合接触,矿区范围内松散层大多透水但不含水,向下游沿着地下水流向,松散层的孔隙水含水层厚度逐渐增大,至板梯河下游逐渐成为区内主要含水层。

矿区内矿体沿矿区断裂带呈条带状分布于寒武系地层中,破碎带均被细粒物质充填,导水性能较差。层状岩类裂隙含水层为强风化~微风化轻变质中细粒石英砂岩、云母石英细砂岩夹粉砂岩、页岩,成分以石英为主,地下水位埋深 3~50 15 m,标高 210 78~120 84 m,单位涌水量为 0 001 5 L/(s·m),渗透系数为 0.38 m/d。第四系孔隙潜水含水层为冲积或冲洪积粉质黏土、含砾粉质黏土,厚度 0.57~4.37 m,底板标高 143 25~109 10 m,地下水位埋深 0.23~3.93 m,单位涌水量 0.001 7~0.613 9 L/(s·m),富水性贫乏~中等。矿区所在区域浅层地下水功能区划定为地下水水源涵养区,水质类别为《地下水质量标准》(GB 14848-1993)Ⅰ类标准^[8]。

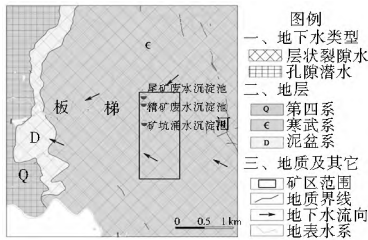


图 1 矿区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological map of the mining area

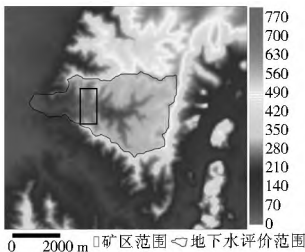


图 2 矿区 DEM 及评价范围

Fig. 2 DEM of the mining area and evaluation area

2 矿区开发对地下水环境的影响

2.1 矿区开发对地下水流场的影响

2.1.1 地下水流模型

本次计算区域以矿区范围为中心,西部以第四系与泥盆系地层接触面为边界,其余边界以周边山脊线为界,共围城约 12.78 km² 的区域(见图 2);根据区域水文地质条件分析,计算区地下水自东向西流动,在西部排出计算区域,故西部边界概化为流量边界,其余周边边界为山脊线,概化为零流量边界。由于矿区为地下开采,巷道以下一定深度含水层对矿坑涌水补给作用较小,故可概化为隔水边界。计算区域上

部接受大气降水等补给作用,可概化为潜水面边界。根据计算区水文地质概念模型,建立计算区三维地下水稳定流数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 & (x, y, z) \in \Omega \\ -K \frac{\partial H}{\partial n} = 0 & \text{零流量边界} \\ Q_B = C_B(H - H_B) & \text{西部边界透水流边界} \\ Q_r = C_r(H - H_r) & \text{河流边界} \\ H = z & \text{潜水面} \\ -(K + W) \frac{\partial H}{\partial z} + W = 0 & \text{巷道} \\ Q_D = C_D(H - H_D) & \text{巷道} \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为水头(m); K 为渗透系数(m/d); W 为降水入渗补给强度(m²/d); μ —给水度; Ω 为渗流区; n 为各边界面的外法线方向; Q_B 为西部边界排泄量(m³/d); H_B 为西部边界外水位标高(m); C_B 为西部边界渗透性能参数(m²/d); Q_r 为河流地下水交换量(m³/d); H_r 为河流水位标高(m); C_r 为河床介质渗透性能参数(m²/d); Q_D 为巷道排泄量(m³/d); H_D 为巷道排水标高(m); C_D 为巷道渗透性能参数(m²/d)。

模型采用分别平行于 X 、 Y 轴的等间距正交网格对计算域进行平面上的剖分,网格间距为 20 m,将整个模拟区在平面上沿南北向剖分为 179 行,沿东西向剖分为 310 列,单层活动单元为 31 998 个。考虑到矿体开采过程巷道空间分布变差较大,而用常规地层空间剖分模式对巷道的剖分及赋值难度较大,故在垂向上采用与 XOY 平面平行的切面对模拟区进行水平切片式剖分,将整个模拟区在垂向上剖分为 10 层,该剖分模式将地面以上的单元格赋值为非活动单元格,参数赋值时参照水平面参数赋值原理进行空间赋值。最终,整个模型共剖分 319 980 个活动单元,实际代表平面面积 12.80 km²。

地面标高由 1:10 000 数字高程模型获得,各层层面标高则依据钻孔揭露及各地层分布出露特征来确定。根据水文地质概念模型,平面上的西部边界为二类流量边界外,周边边界属第二类零流量边界,底边界为隔水边界。模型中计算大气降水入渗补给量时,将该补给量作用于最上一层活动单元,即当某地段第一层为透水不含水时,大气降水补给量将作用于其下部含水的单元上。模拟区内发育有板梯河等,将其概化为河流边界,排泄区内地下水。

数值模型采用美国地质调查局(USGS)开发的 MODFLOW,选取预调共轭梯度方法(PCG)进行求解,外部迭代最大次数设定为 500,内部迭代最大次数为 250,水位变化收敛标准为 0.001 m,残差收敛标准为 0.000 1 m,阻尼系数为 0.8。通过收集矿区内已有钻孔的水位观测数据,采用稳定流模型模拟计算区初始流场(图 3),并使钻孔处观测水位与计算水位尽量拟合,通过模型识别,拟合水位差多在 2 m 以内,拟合效果较好,故可采用建立的数值模型对地下水流场进行预测^[9-13]。

2.1.2 模型预报

将矿体开挖位置、高度、范围等数据输入数值模型,模拟地下水流场的变化情况,直至达到新平衡(见图 4)。可以发

现,达到平衡时Ⅰ号矿体正常稳定涌水量为 755 50 m³/d,Ⅱ号矿体正常稳定涌水量为 571 25 m³/d,矿区总正常稳定涌水量 1 326 75 m³/d;随着巷道施工的推进,地下水位下降幅度逐渐增大,降落漏斗除沿巷道方向随施工方向逐渐发展外,向巷道两侧也逐渐扩展。受开采施工段排水影响,地下水位下降最大值为 84.64 m,出现在Ⅰ号矿体巷道开发中心位置;渗流区内水位下降值大于 10 m 的范围为 4 27 km²,侧向最大影响宽度为 3.43 km;大于 5 m 的范围为 3 82 km²,侧向影响宽度为 6 61 km;大于 1 m 的范围为 11.41 km²,侧向影响宽度为 5 20 km。沿开采巷道延伸位置,地下水位降落漏斗向两侧扩展范围和水位下降值均明显大于其他地区(见图 5),可见矿产开采主要通过巷道开挖断面对地下水径流的游截断作用,导致上下游地下水向巷道的涌水排泄;而且矿产开采对上游的地下水水流影响明显大于下游方向,地下水降深大于 10 m 的范围距巷道平均约 1 000 m,下游平均约 600 m。

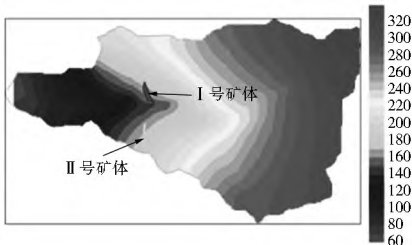


图 3 渗流区初始流场

Fig. 3 Initial groundwater flow field

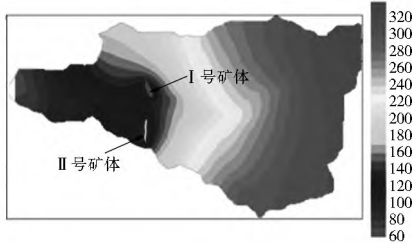


图 4 渗流区稳定流场

Fig. 4 Steady state groundwater flow field

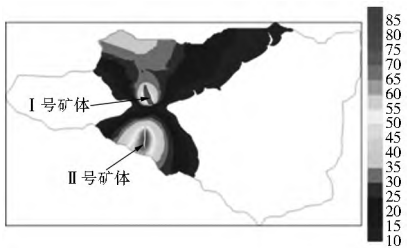


图 5 渗流区水位降深等值线

Fig. 5 Contour map of drawdown

根据预测结果,矿区巷道周边将出现地下水位的大幅度下降现象,开发利用过程中应在矿区周边设置地下水水位监测井,尤其是沿地下水流向,距巷道上游 1 000 m、下游 600 m 范围内,定时监测水位变化情况,对于观测孔中水位突然大幅度下降的情况,应查明原因,必要时应采取合理的工程措施;此外,在开发过程中,应先预报后开采,对导水性较大的裂隙断层等采取必要的封堵措施,尽量减少对地下水资源的

的扰动。

2.2 矿区开发对地下水水质的影响

2.2.1 矿区开发工艺流程及地下水污染识别

矿区采矿时采用的是平底结构留矿采矿法。工艺过程主要分为凿岩、井巷开拓、爆破、装载运输等环节,可能对地下水产生污染的环节主要是矿坑涌水(GW1)和废石堆场淋滤水(GW3)。选矿采用两段开路破碎、一段开路磨矿和重选的工艺流程,可能对地下水产生污染的环节主要是选矿废水和尾矿暂存池淋滤水(GW2)。矿区开发工艺流程及地下水污染节点见图 6。

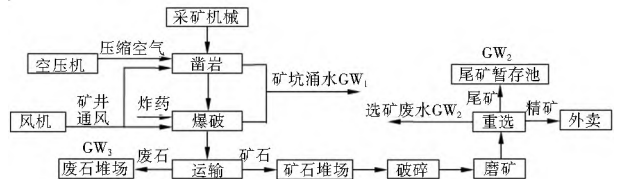


图 6 矿区开发工艺流程及地下水污染节点

Fig. 6 Process flow of mineral resource development and groundwater pollution node

2.2.2 矿区地下水污染物产排特征

矿坑涌水 GW1 主要来自基岩风化裂隙水、上部采空区积水和断层水。根据监测结果,矿坑涌水中硫化物、As、Hg、Cd、Cr⁶⁺、Pb、Cu、Zn 等指标浓度均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类标准,为洁净矿井水,经沉淀池沉淀后部分回用于采矿、选矿及空压机补充用水,其余外排;选矿废水 GW2 包括尾矿废水和精矿废水,产生量 210 m³/d,为地下水主要污染源,经过沉淀池沉淀后全部回用于选矿工序不外排;淋滤水 GW3 主要来自废石堆场。废石堆场占地 0.5 hm²,废石主要成份为石英,其次为绢云母、泥质、方解石等。雨季废石堆场产生的淋滤水经沉淀池沉淀后外排。

2.2.3 矿区地下水环境影响分析

根据前述分析,矿坑涌水多为洁净水,矿区开发对地下水水质可能产生影响的主要是选矿废水。选矿废水沉淀池虽然采取了防渗措施,但仍有一定少量的废水会渗漏到地下水,其渗漏过程为定浓度的连续渗入过程。可将上述渗漏过程概化为:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial x_i} (D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x}) - V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial c}{\partial t} & x, y, z \in D, t > 0 \\ c(x, y, z, 0) = c_0(x, y, z) & x, y, z \in D \\ c(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = c_1(x, y, z) & x, y, z \in \Gamma_1, t > 0 \\ c(x, y, z, t)|_{D_1} = c_2(x, y, z) & x, y, z \in D_1, t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: c 为溶质浓度(mg/L); c_0 为初始浓度(mg/L); D_{ij} 为水力弥散系数(m²/d); V_i 为空隙流速(m/d); D 为整个研究区范围; D_1 为连续面状注入范围; Γ_1 为二类边界。

方程(2)采用郑春苗编写的 MT3DMS 进行运算^[14]。根据选矿废水水质特点,选矿废水中各种特征组份基本均能满足《地下水质量标准》(GB 14848-1993)Ⅲ类标准,只有 Cu 超出标准限值要求,若废水泄漏渗入地下水中,则 Cu 有可能对周边地下水环境产生影响,故本次选取 Cu 作为预测指标,根据对选矿废水的水质检测,选矿废水中 Cu 污染物浓度为

1.05 mg/L, 故将该浓度作为污染物渗入地下水中的初始浓度。根据地下水环境质量标准, 污染物 Cu 的 0 类标准限值为 0.05 mg/L, 而通过对区域地下水环境质量现状监测结果, 地下水中 Cu 为未检出, 故后续预测及影响分析以污染源对含水层的贡献值 0.05 mg/L 作为评价依据, 超过 0.05 mg/L 即为超标区域, 反之为非超标区域。

假设选矿废水沉淀池在采取防渗措施后入渗率为 0.1%, 根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T 338-2007), 地下水一级、二级饮用水源保护区分别为溶质质点运移 100 d、1 000 d 的范围。据此, 本次研究分别预测污染物 Cu 在地下水中运移 100 d、1 000 d 及项目运营期结束 (8 a) 时的分布情况, 结果见图 7。可以看出: 随着时间的推移, 污染范围逐渐扩大, 沿水流方向及垂直水流方向的污染晕不断扩大, 污染物浓度值随流程的增加呈现污染羽状分布。从表 1 可见, 渗漏 100 d 后 Cu 对地下水贡献值超过 0.05 mg/L 的距离达 36 m, 渗漏 1 000 d 后距离达 56 m, 渗漏 8 a 距离达 149 m, 此时污染物超标带地下水开始向板梯河以泄流方式排放污染物, 但影响很小。

表 1 污染物运移概况

Tab. 1 The migration of pollutants

预测指标	污染物初始浓度 / (mg · L ⁻¹)	预测时间	超标最大宽度 / m	超标最大长度 / m	超标面积 / m ²
Cu	1.05	100 d	34	36	1 797
		1 000 d	46	56	4 273
		8 a	88	149	10 300

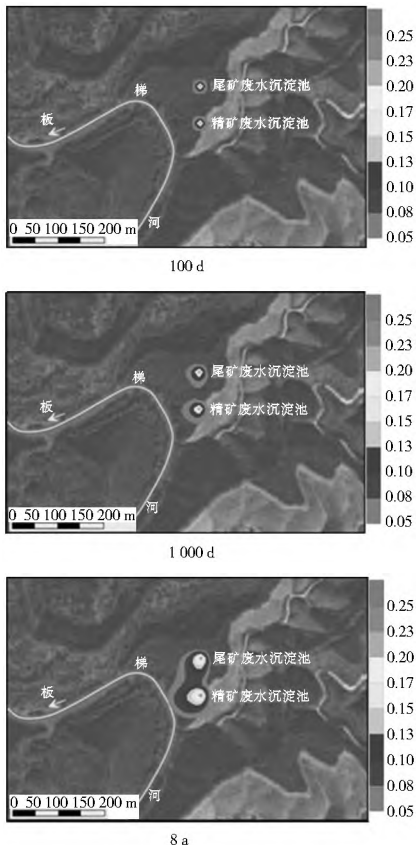


图 7 污染物运移等值线 (单位: mg/L)

Fig. 7 Contour map of migration of pollutants (unit: mg/L)

2.2.4 矿区地下水污染防治对策

根据矿区开发对地下水环境的污染环节识别和影响分析结果, 应遵循“源头控制、分区防治、污染监控、应急响应”的原则^[15], 采取地下水污染防治对策。

(1) 源头控制。矿坑涌水和选矿废水经沉淀后尽量回用于采矿和选矿等环节, 减少废水排放量。同时, 在废石堆场及巷道区周边布设截洪沟, 拦截汇入的地表径流, 减少淋滤水的产生量和地下水的汇入量。

(2) 分区防治。根据对地下水造成影响程度不同, 将选矿厂、尾矿暂存池、沉淀池、废石堆场划为重点污染防治区, 重点防治区之外的生产、生活区划为一般污染防治区, 各分区采取相应的防渗措施 (表 2)^[16]。

表 2 各分区防渗体系构成

Tab. 2 Seepage control measures in each zone

防渗分区	防渗措施
一般 防治区	地面防渗方案自上而下: ① 普通混凝土现浇地面 100 mm 厚; ② 150 mm 厚水泥砂砾基层 (水泥含量 5%); ③ 天然砂砾垫层 150 mm 厚; ④ 原土夯实。
选矿 厂	地面防渗方案自上而下: ① 2 mm 环氧砂浆地坪; ② 2 mm 厚 HDPE 膜; ③ 防渗钢纤维混凝土 (钢纤维用量 20 kg/m ³) 现浇地面 100 mm 厚; ④ 150 mm 厚水泥砂砾基层 (水泥含量 5%); ⑤ 150 mm 厚天然砂砾垫层; ⑥ 100 mm 粉质黏土夯实; ⑦ 原土夯实。确保渗透系数 < 10 ⁻¹¹ cm/s。
重点 防治区	尾矿 暂存 池 沉淀 池 废石 堆场 参照《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB 18599-2001) 制定防渗方案。

(3) 污染监控。在矿区上游、尾矿暂存池下游、选矿厂下游、废石堆场以及沉淀池下游设置 5 个地下水水质监测井, 丰水期和枯水期各监测一次, 掌握厂区及周边地下水水质状况, 发现问题及时采取措施。

(4) 应急响应。根据矿区开发过程可能造成地下水污染的环节和影响程度, 制定矿区地下水风险事故应急响应预案, 明确风险事故状态下采取停产、封闭、截流等分级响应措施, 防止污染扩散。

3 结论

(1) 矿区总正常稳定涌水量 1 326.75 m³/d, 受此影响地下水位下降最大值为 84.64 m, 出现在 0 号矿体巷道开发中心位置; 渗流区内水位下降值大于 10 m 的范围为 4.27 km², 侧向最大影响宽度为 3.43 km; 大于 5 m 的范围为 3.82 km², 侧向影响宽度为 6.61 km; 大于 1 m 的范围为 11.41 km², 侧向影响宽度为 5.20 km。在矿区巷道周边应加强地下水水流场监测, 严防环境水文地质问题的发生。

(2) 稳定流场条件下, 选矿废水沉淀池污染物渗漏 100 d 后, Cu 对地下水贡献值超过 0.05 mg/L 的距离达 36 m, 渗漏 1 000 d 后距离达 56 m, 渗漏 8 a 后距离达 149 m, 此时污染物超标带地下水开始向板梯河以泄流方式排放污染物, 但影响很小。

(3) 在采取有效的地下水水流场监测、分区污染防治和水质监控应急措施情况下,矿产资源开发对地下水环境的影响可以得到有效控制。

参考文献(References):

[1] 林庞鲲. 矿山污染及环境破坏问题的思考[J]. 中国环境管理理论与研究, 2010(4): 44-46. (LIN Pangkun. Thinking of mine pollution and environmental damage[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2010, 4: 44-46. (in Chinese))

[2] 彭建, 蒋一军. 我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 38-48. (PENG Jian, JIANG Yijun. Ecological environmental effects of mining and related land reclamation technologies in China[J]. Progress In Geography, 2005, 24(2): 38-48. (in Chinese))

[3] 吴孔军, 李平, 郭会荣, 等. 区域地下水流对王河煤矿水害影响数值模拟[J]. 工程勘察. 2011(7): 41-45. (WU Kongjun, LI Ping, GUO Huirong, et al. Numerical simulation of the influence of regional groundwater flow on water hazard of Wanghe coal mine[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011(7): 41-45. (in Chinese))

[4] Zhu W C, Wei C H. Numerical simulation on mining induced water intrusions related to geologic structures using a damage based hydromechanical model [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(1): 43-54.

[5] 冯更辰, 郝俊杰, 谭俊, 等. Visual Modflow 模型在白洞铁矿区矿井涌水量预测中的应用[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 271-277. (FENG Gengchen, HAO Junjie, TAN Jun, et al. Application of Visual Modflow in predicting shaft water inflow in the Baijiao iron mining area[J]. Carsologica sinica, 2011, 30(3): 271-277. (in Chinese))

[6] 王军, 容玲聪. 安庆铜矿地下水渗流场的模拟[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(6): 25-27. (WANG Jun, RONG Lingcong. Simulated Analysis of groundwater seepage field in anqing copper mine[J]. Mining Research and Development, 2004, 24(6): 25-27. (in Chinese))

[7] 王友长, 魏克敏, 文泽康, 等. 宝鼎矿区矿井涌水量影响因素分析[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(6): 82-84. (WANG Youchang, WEI Kemin, WEN Zekang, et al. Analysis of water inflow influence factors of Baoding mining area[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(6): 82-84. (in Chinese))

[8] 广东省水利厅. 广东省地下水功能区划(2009) [R]. 广东省水利厅, 2009. (Water Resources Department of Guangdong Province. Groundwater Functional zoning of Guangdong Province [R]. Water Resources Department of Guangdong Province, 2009.)

[9] 曹剑锋, 迟宝明, 王文科, 等. 专门水文地质学(第三版) [M]. 北京: 科学出版社. 2006. (CAO Jiar feng, CHI Baoming, WANG Wenke, et al. applied hydrogeology (Third Edition) [M]. Beijing: Science Press. 2006. (in Chinese))

[10] Theis C V. The relations between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage [J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1935: 19-524.

[11] Hanstush M S. Growth and decay of groundwater mounds in response to uniform percolation [J]. Water Resour. Rrs. 1967, 3(1): 227-234.

[12] 郭东屏, 宋炎勋, 钱会, 等. 地下水动力学 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社. 1994. (GUO Dongping, SONG Yaxun, QIAN Hui, et al. Groundwater dynamics [M]. Xi'an: Shaanxi science and Technology Press. 1994. (in Chinese))

[13] 陈崇希, 陈明佑, 陈爱光, 等. 矿坑涌水量计算方法研究 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社. 1985. (CHEN Chongxi, CHEN Mingyou, CHEN Aiguang, et al. Study on calculation method of water yield of mine [M]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press. 1985. (in Chinese))

[14] 郑春苗, 贝曼特. 地下水污染物迁移模拟 [M]. 2版. 孙晋玉等译. 北京: 高等教育出版社, 2009. (ZHENG Chunmiao, Gordon D Bennett. Applied contaminant transport modeling [M]. Second Edition. SON Jinyu translation. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese))

[15] HJ 610- 2011. 环境影响评价技术导则—地下水环境 [S]. 环境保护部, 2011. (HJ 610- 2011. Technical guidelines for environmental impact assessment groundwater environment [S]. The Ministry of environmental protection, 2011. (in Chinese))

[16] 沈春林, 潘建立, 苏立荣, 等. 市政工程防水设计与施工 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. (SHEN Chunlin, PAN Jianli, SU Lirong, et al. Waterproof design and construction of Municipal Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese))