

# 输油管泄露地下水污染模拟及防控管理方案比选

陈梦瑞<sup>1</sup>, 徐世光<sup>1,2</sup>, 刘和<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省地矿工程勘察集团有限公司, 昆明 650011)

**摘要:** 以云南某炼油厂区内地下水为研究对象, 通过分析其水文地质条件, 结合钻孔水位资料, 建立水文地质模型。选取石油类作为预测因子, 采用GMS软件建立地下水水流场模型和溶质运移模型, 计算在(156)d内石油类的迁移过程, 并对比3种抽出处理法防控管理方案, 选取最优方案。研究结果表明: 石油持续泄露156 d时JC02监测到污染物, 结合经济、人力等因素方案②为最优。

**关键词:** 地下水污染; 输油管道; GMS; 溶质运移; 防控管理

**中图分类号:** P641; X523 **文献标识码:** A

## SIMULATION OF GROUNDWATER CONTAMINATION FROM OIL PIPELINE LEAKS AND COMPARISON OF PREVENTION AND CONTROL MANAGEMENT SCHEMES

CHEN Meng-rui<sup>1</sup>, XU Shi-guang<sup>1,2</sup>, LU He<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources, Kunming 650011, China)

**Abstract:** The groundwater in an oil refinery area in Yunnan is taken as the research object, and the hydrogeological model is established by analyzing its hydrogeological conditions and combining with water level information of boreholes. Petroleum species were selected as predictors, and the groundwater flow field model and solute transport model were established using GMS software. Calculate the migration process of petroleum species in (156) days, and compare the three pump-and-treat method prevention and control management options to select the optimal one. The results of the study showed that JC02 monitored pollutants when the oil continued to leak for 156 days, and the combination of economic and human factors scheme ② was optimal.

**Key words:** groundwater contamination; oil pipeline; GMS; solute transport; prevention and control management

松散岩类孔隙水具有易于开采、含水量丰富等特点, 已成为许多地区的集中供水水源<sup>[1]</sup>, 随着我国经济的发展, 生产生活造成的地下水污染愈发严重, 由于孔隙水埋深较浅, 更易受到污染<sup>[2-3]</sup>, 因此对其防污问题具有重要现实意义。对于松散岩类孔隙水

污染的防控问题, 从1960年国外科学家Nielsen推导建立对流-弥散方程, 得出非反应性物质在多孔介质中的迁移规律, 开始溶质运移理论的发展, 由20世纪80年代山东地质局为主研究单位提出并建立的我国第一个水质数学模型为我国地下水溶质运移

的研究奠定了基础<sup>[4]</sup>。由于渗透系数和弥散系数获取困难及方程计算量较大,后经过 Jaynes<sup>[5]</sup>、Wagner<sup>[6]</sup>、Yamaguchi<sup>[7]</sup>、Jury<sup>[8]</sup>等都对溶质运移模型从运移理论、运移方程到软件应用及模型建立方法做了深入研究,促进了计算机模型运用的快速发展。

在松散岩类孔隙水污染的防控问题中,如何防止松散层污染物的进一步扩散至关重要,现运用最广泛的是水力控制法中的“抽出处理方法”,依据现有抽水井将松散层中污染物最有效、最合理地抽出<sup>[9]</sup>,单纯使用模型模拟只能得到可行解,为了得到最优解,本文针对该地层污染问题建立多目标优化模型,结合运筹学原理,运用有限差分进行求解,根据实际水文地质情况给出约束条件,结合可操控的决策变量,得出针对松散层抽水排污的最优解,对地下水安全防治具有指导意义。

## 1 研究区水文地质概况

研究区位于滇中滇池以西处的高原中部地带。

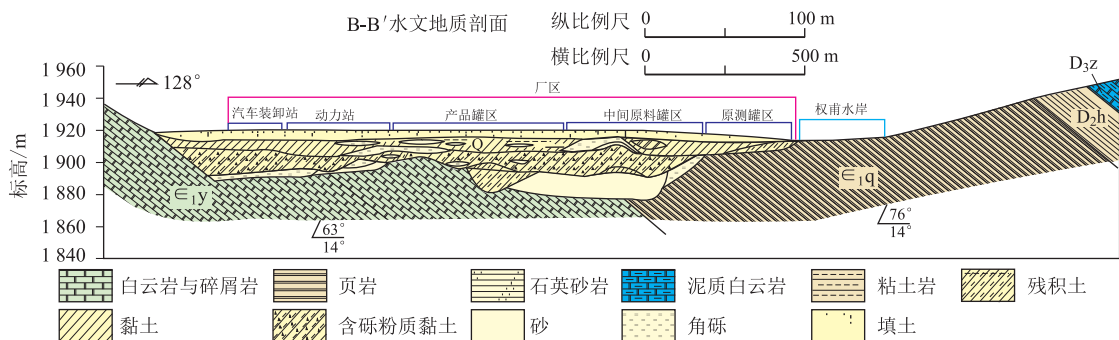


图1 厂区水文地质剖面图

## 2 研究方法

### 2.1 情景模拟

研究区地下水潜在污染源为航煤成品罐区、蜡油加氢裂化装置、中间原料罐区、产品罐区、污水处理池等。据含油污水水质表可知,厂区内石油类污染因子浓度较大为 500 mg/l,选取石油类作为对地下水环境影响最为显著的特征因子,并将污染物浓度限值 0.1 mg/l 作为污染扩散的浓度边界,监测井监测下限值为 0.1 mg/l。

### 2.2 水文地质模型

根据研究区域的水文特点进行边界状态概化,提供水文单元概念模型。

边界条件概化:据水文地质单元、水力联系强

多年平均气温 15.2℃,年均降雨量 913.24 mm,属于干湿季分明的亚热带季风气候区。研究区主要划分为由第四系(Q)松散岩孔隙水;泥盆系宰格组(D<sub>2z</sub>)碳酸盐岩及寒武系渔户村组(∈<sub>1y</sub>)碳酸盐岩裂隙溶洞水;由泥盆系海口组(D<sub>2h</sub>)、寒武系筇竹寺组(∈<sub>1q</sub>)、侏罗系下禄丰组(J<sub>1l</sub>)、二叠系、倒石头组(P<sub>1d</sub>)和三叠系舍资组(T<sub>3s</sub>)基岩裂隙水。3类地下水系统中以孔隙水为目标层划分出水文地质单元含水层为第四系砂、角砾层,上覆黏土层相对隔水层,地下水微承压。

研究区广泛覆盖第四系松散层并且整体厚度不均匀,5~20 m不等。垂向上主要分布着 Q<sub>4</sub><sup>al+pl</sup>、Q<sub>4</sub><sup>el+dl</sup>松散层,标准钻孔揭露松散层上部为回填土、黏性土层,中下部为砂、角砾层,下部为黏性土、残积土层。回填土、黏性土及残积土透性差,隔水性能好,砂、角砾为主要含水层,见图1。当发生污染物泄漏,主要的污染途径有两种:污染物在地表或近地表发生泄漏,然后在松散层中运移,经过一段时间垂向穿透黏性土弱透水层进入砂、角砾层;污染物直接泄漏在渗透性较好的砂和角砾中,沿水流方向扩散。

弱、水头状况及补给条件划分隔水、定水头、定流量3类边界,详见图2。

含水层概化:据钻孔资料,第四系松散层成因多为人工回填、冲洪积、残坡积,根据岩性特征,将含黏土粗砾砂、角砾层概化为松散层含水层,将素填土、耕土、粉质黏土、含砾黏性土、含角砾粉质黏土、残积土、黏性土夹砂、有机质粉质黏土概化为相对隔水层。由上到下按地层结构可大致分为3层:人工回填土、粉质黏土①层,该层分布较连续,由于黏性土的存在,该层透水性弱,为一个连续隔水层;角砾、含黏土粗砾砂互层②层,该层在场区分布较普遍,部分以透镜体的形式存在,透水性相对黏性土层较好,为不连续含水层;残积土③层,该层在场区分布较普遍,透水性较弱,为不连续含水层。本模型把砂、角



图2 厂区松散层概念模型边界图

砾层作为目的层。通过分析钻孔资料和水文地质调查资料,将目标含水层概化为均质各向异性含水层,水动力条件概化为稳定流。

源汇项概化:①模拟区地下水系统补给来源主要为降水补给,多年平均降水量 913 mm,降水入渗系数 0.068,降水补给量 0.000 2 m/d。②模拟区地下水系统排泄方式主要向北西侧向径流排泄。

2.3 水文地质参数

渗透系数:根据研究区地层岩性,将渗透系数分为 16 个区(图 3)。

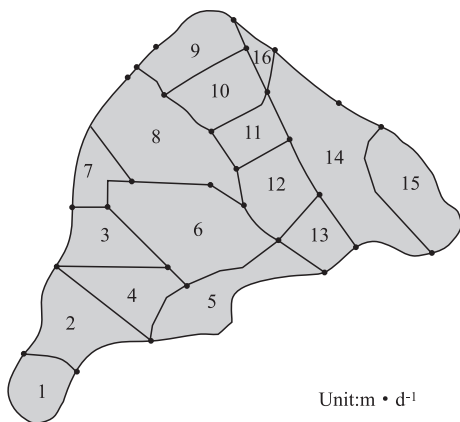


图3 渗透系数分区图(单位:m/d)

据渗透张量计算,按主轴向分别为  $K_x, K_y$  赋值,其中  $K_x/K_z=3$ ,赋值情况见表 1。

有效孔隙度: 0.12。

给水度:黏土、回填土取 0.06,角砾、含黏土粗粒砂取 0.17,残积土取 0.08。

2.4 地下水流场

根据水文地质概念模型,结合水动力条件及水文地质参数,基于 GMS 中 MODFLOW 版块构建研

究区地下水流场模型如图 4 所示。经校验模拟的流场与实际流场的趋势基本一致,且各个观测孔处水位误差由表 2 所示均小于 1.5 m,拟合结果较好,进而该流场可用作水质模型的预测分析。

表 1 渗透系数分区表

序号	$K_x/m \cdot d^{-1}$	$K_y/m \cdot d^{-1}$	序号	$K_x/m \cdot d^{-1}$	$K_y/m \cdot d^{-1}$
1 区	0.62	0.33	9 区	1.62	0.87
2 区	1.83	0.98	10 区	1.86	0.99
3 区	1.95	1.04	11 区	1.98	1.06
4 区	2.03	1.09	12 区	1.49	0.8
5 区	0.94	0.5	13 区	0.85	0.45
6 区	1.89	1.01	14 区	1.55	0.83
7 区	0.48	0.26	15 区	2.06	1.1
8 区	1.91	1.02	16 区	0.65	0.35

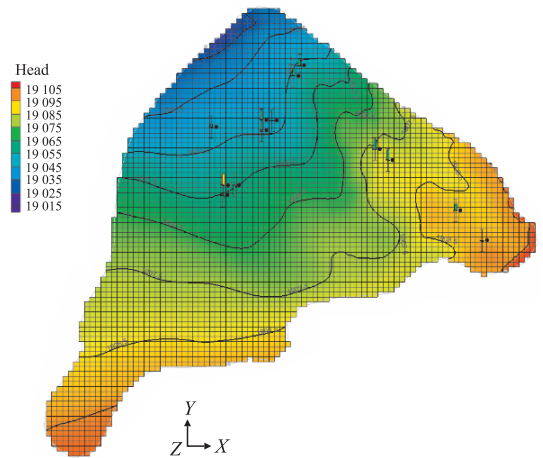


图4 地下水流场拟合图

表 2 稳定流模型拟合情况表

钻孔	实测水位/m	计算水位/m	绝对误差/m
JC02	1 904.344	1 904.366	0.022
YJ11	1 903.410	1 904.239	0.829
YJ13	1 903.650	1 904.406	0.756

3 石油污染物迁移及管理方案

3.1 源强设定

将污染源概化为持续点源,模拟石油类污染物发生泄漏,污染物浓度 500 mg/l,泄漏量 10 m<sup>3</sup>/d。采用 GMS 中 MT3DMS 模块<sup>[10]</sup>,结合地下水流场模型,得到石油类污染物在孔隙水中的运移结果。

3.2 污染物运移模拟结果

模拟结果如图 5 所示,泄漏第 156 d 后,监测井 JC02 监测到污染物,浓度为 0.102 mg/l。由于水平运移距离远,黏性土中污染物运移主要体现为垂向下渗。监测到污染羽的过程为,污染物垂向下渗至

第三层砂、角砾含水层中,在水动力作用下主要发生对流弥散直至松散层监测井 JC02 监测到污染羽边缘。此时,第一层黏土层中心浓度为 54.1 mg/l,污染羽面积为 0.008 2 km<sup>2</sup>;第三层砂、角砾层中心浓度为 7.033 mg/l,污染面积为 0.009 3 km<sup>2</sup>。

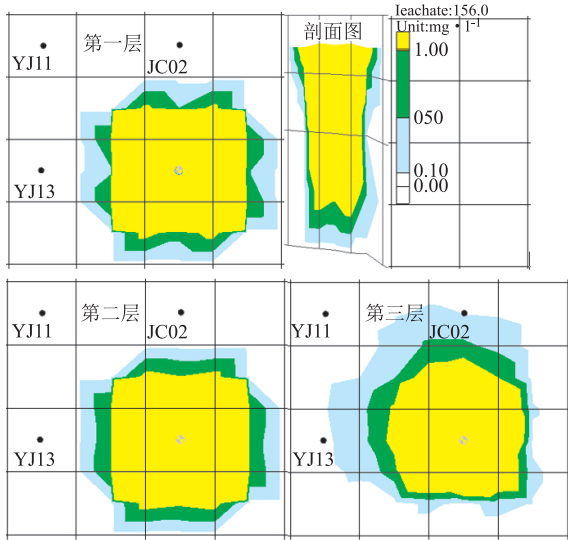


图 5 156 d 污染羽

### 3.3 抽水方案及约束条件

#### 3.3.1 抽水方案

由模拟结果可知,监测井 JC02 第 156 d 监测到污染物,泄漏量为 116 ml/s(10 m<sup>3</sup>/d),浓度为 500 mg/l,此时立刻采取措施截断污染源并利用“抽出处理法”启动相应抽水井和监测井。以抽水井空间分布位置为条件,控制抽水井数量制定 3 种方案。

方案①:启用监测井 JC02 和应急井 YJ11 同时抽水。

方案②:启用监测井 JC02 与应急井 YJ13 同时抽水。

方案③:启用监测井 JC02 与应急井 YJ11、YJ13 同时抽水。

#### 3.3.2 抽水约束条件

由上述方案可知,“抽出处理法”需要对厂区监测井和应急井同时抽水,多井长期抽水时,不仅要考虑各个抽水井含水层出水能力是否有限,还需考虑是否对周边建筑及居民生产生活产生影响。

##### (1) 抽水井出水能力约束

各抽水井抽出水量总和不能超过松散层极限开采量且各抽水井抽水量也受单井最大出水量约束。

$$Q_{(j,i)} \leq q_{(j,i)}$$

式中, $j$  为抽水井; $i$  为抽水时段; $q$  为抽水设备的定额抽水量。

模拟最大抽水量为 20 m<sup>3</sup>/d 稳定流抽水,得单井最大出水量见表 3。群井抽水总量间接取单井最大出水量下限值。

表 3 单井最大出水量

钻孔	JC02	YJ11	YJ13
最大出水量/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	80	70	95

##### (2) 地面沉降约束

在松散孔隙含水层中,长时间抽汲地下水所引起的水位下降,会导致孔隙水压力降低,致使土中有效应力增大,进而使得土层被压密,发生地面沉降<sup>[11]</sup>。各井抽水最大时长见下表 4。

表 4 单井抽水最大时长

钻孔	JC02	YJ11	YJ13
最大抽水时长/d	630	660	563

##### (3) 降落漏斗范围阈值约束

降落漏斗直径不超过区域水文地质单元过水断面的 1/10,但形成的降落漏斗范围至少需要包含高浓度污染物( $\geq 0.5$  mg/l)运移方向形成的污染羽,保证能够全部截获住下游污染物,这样以抽水排出污染物的方式才能起到有效防控管理的作用。

### 3.4 方案比选

模拟采用不同方案进行抽水时,各抽水井及观测井污染物浓度随时间增加的变化趋势如图 6~图 14 所示。

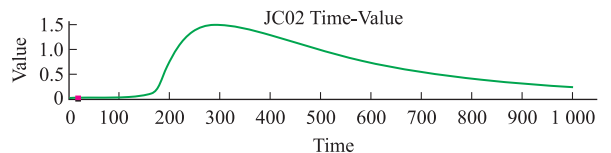


图 6 方案①抽水井 JC02 浓度趋势图

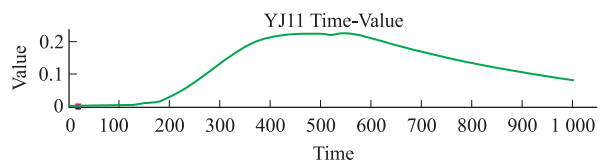


图 7 方案①抽水井 YJ11 浓度趋势图

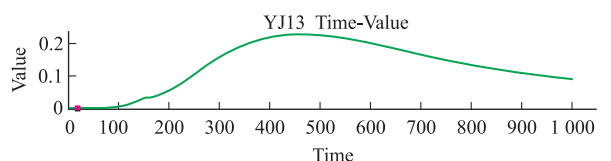


图 8 方案①监测井 YJ13 浓度趋势图

方案①中 JC02 井 287 d 污染物浓度达峰值

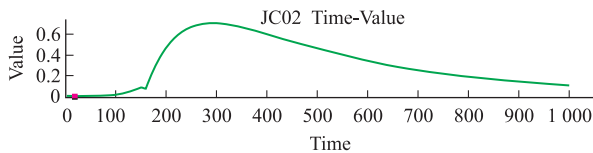


图9 方案②抽水井 JC02 浓度趋势图

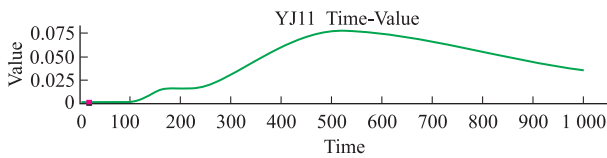


图10 方案②监测井 YJ11 浓度趋势图

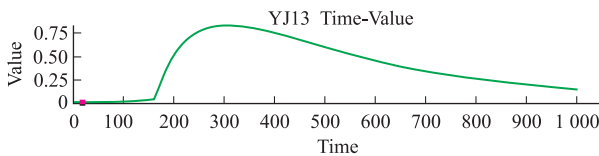


图11 方案②抽水井 YJ13 浓度趋势图

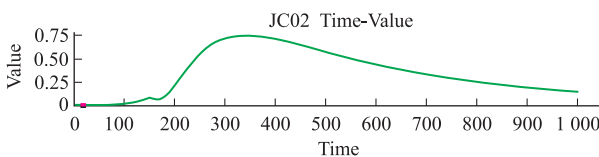


图12 方案③抽水井 JC02 浓度趋势图

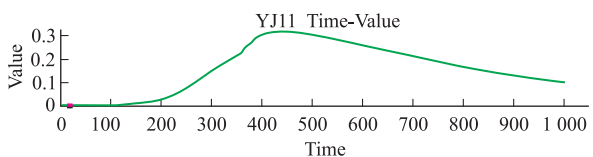


图13 方案③抽水井 YJ11 浓度趋势图

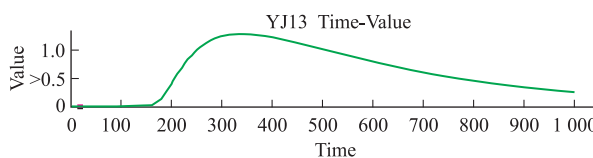


图14 方案③抽水井 YJ13 浓度趋势图

1.498 2 mg/l, 734 d 已经符合水质标准浓度为 0.499 mg/l。YJ11 和 YJ13 全程污染物浓度低于 0.5 mg/l, 水质始终达到地下水Ⅳ类标准, YJ13 未参与抽水, 主要监测污染羽侧向运移情况。结果表明, 抽出处理方案①能截获污染羽, 此时抽水时长从开始抽水时起为 578 d。

方案②中 JC02 与 YJ13 边抽水边做污染物监测, 检测结果表明, JC02 井 296 d 污染物浓度达到峰值 0.701 39 mg/l, 随后污染物浓度逐步下降, 于 474 d 时达到水质标准降至 0.497 mg/l。而 YJ13

井 308 d 达峰值 0.829 6 mg/l, 568 d 时达到水质标准降至 0.498 mg/l。未抽水的 YJ11 井作为污染物浓度检测防线, 其浓度趋势表明, 抽出处理方案②能截获污染羽, 抽水时长取 YJ13 抽水井污染物浓度达到水质标准天数 412 d。

方案③中, JC02 井 342 d 污染物浓度达峰值 0.744 46 mg/l, 于 556 d 时达到水质标准将至 0.498 mg/l。YJ13 井 330 d 达峰值 1.265 4 mg/l, 778 d 时达到水质标准降至 0.499 mg/l。而 YJ11 井始终满足水质标准。结果表明, 方案③能截获污染羽, 抽水时长取 YJ13 抽水井污染物浓度达到水质标准天数 622 d。

结合给出的浓度趋势图定量分析降落漏斗阈值约束, 3 种方案均满足。但据单井最大抽水时长约束, 由模拟抽水时长显示, 方案①需 578 d, 未超出约束时长 630 d, 满足约束; 方案②需 412 d, 未超出约束时长 563 d, 满足约束; 方案③需 622 d, 超出约束时长 563 d, 不满足约束。而对比方案①和②, 虽然都是使用两口井进行抽水, 但方案②具有更短的抽水时间, 从经济效益方面考虑方案②最佳。

## 4 结论

(1) 在详细调查收集和整理地质、水文地质、水位和地下水检测数据的基础上建立的地下水水流场和溶质运移模型, 能够达到精度要求, 通过模型识别验证后, 能够用于预测厂区的地下水环境影响预测和评价。

(2) 溶质运移结果表明, 在情景模拟情况下, 仅 156 d 监测井 JC02 便监测到污染物, 含水层污染面积 0.009 3 km<sup>2</sup>, 不仅造成地下水污染, 也会对周围居民生活安全造成危害。

(3) 根据模拟结果, 设计“抽出处理法”的 3 种防治管理方法中, 启用监测井 JC02 与应急井 YJ13 同时抽水的方案②不仅能够更快地解决污染物扩散的问题, 也更加具有经济效益。

## 参考文献

- [1] 李韵, 李薇, 黄奎, 等. 输油管道泄漏地下水污染模拟及预防措施研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(2): 8-11.
- [2] 白杰, 徐世光, 黄建国, 等. 基于 GMS 软件对某矿区松散层孔隙水污染的数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(1): 97-103.
- [3] 郭微微. 中俄输油管道沿线工程地质问题及地质灾害评价[D]. 黑龙江大学, 2013.
- [4] 颜萍, 邢芳, 徐世光, 等. 基于 GMS 软件对保山某尾矿库地下

- 水污染的数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(3):102-107.
- [5] 徐冰,郭克贞,王耀强,等. 土壤中溶质运移的研究现状及问题[J]. 内蒙古水利, 2003, 24(3): 20-21+28.
- [6] 刘春平,夏卫生,邵明安,等. 多孔介质中溶质运移参数拟线性化估计方法[J]. 水利学报, 2005, 50(12):1445-1449.
- [7] Richa Ojha, Arun Prakash, Corrado Corradini, et al. . Temporal moment analysis for stochastic-advective vertical solute transport in heterogeneous unsaturated soils [J]. Journal of Hydrology, 2015, 521:261-273.
- [8] P Knabner, C J van Duijn. Solute transport in porous media with equilibrium and non-equilibrium multiple-site adsorption: Travelling waves. [J]. Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal), 2009, 1991(415):1-49.
- [9] 张钟远,陆治斌,徐世光,等. 凯里市鱼洞河矿区矿井水水化学特征及污染地下水途径[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(2):86-92.
- [10] 黄婧. 基于GMS的宁夏清水河上游平原地下水数值模拟研究[D]. 宁夏大学, 2013.
- [11] 汤志刚,闫士民,蔡承刚,等. 徐州市地质灾害特征与防治研究[J]. 中国地质调查, 2020, 7(1):71-77.

**作者简介:** 陈梦瑞(1998— ),男,昆明理工大学硕士研究生在读,研究方向:水文地质与工程地质。E-mail:593527939@qq.com

**通讯作者:** 徐世光(1963— ),男,教授级高级工程师,博士生导师,研究方向:地质灾害,水文地质与工程地质等。

E-mail:xushiguang828@sina.com