

川藏铁路规划区 K208 滑坡数值模拟分析

邱 鹏¹, 苏培东¹, 郭长宝², 陈婉琳¹

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 由于路基开挖, 川藏铁路规划区 K208 大型古滑坡群局部复活, 威胁道路安全。在分析滑坡区工程地质条件的基础上, 利用 FLAC3D 建立滑坡地质模型, 模拟滑坡在未开挖、开挖后和治理后, 分别在天然工况、暴雨工况以及地震工况下的剪切变形分布特征。安全系数计算结果表明, 未开挖时, 边坡在 3 种工况下均处于稳定状态; 开挖后, 边坡在天然工况和地震工况下处于基本稳定状态, 在暴雨工况下处于不稳定状态; 治理后, 边坡在 3 种工况下均处于稳定状态。

关键词: 滑坡; 稳定性分析; 数值模拟; FLAC3D; 川藏铁路规划区

Numerical Analysis of K208 Landslide in Planning Area of Sichuan-Tibet Railway

QIU Peng¹, SU Peidong¹, GUO Changbao², CHEN Wanlin¹

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: The big landslide group at K208 of planning area of Sichuan Tibet Railway has locally revived as a result of road excavation. As thus, the road is in danger. On the basis of engineering geological condition analysis of landslide area, a geological model is constructed by using FLAC3D to analyze the deformation of landslide. The distribution characteristics of shearing deformation of slope in nature, rain and earthquake conditions before excavation, in excavating and after engineering treatment are simulated respectively. The safety factors for each condition have been calculated. It shows that: (a) the slope is stable before excavation; (b) the slope is basically stable in nature and earthquake condition after excavation, but instable in rain condition; and (c) the slope is stable in three conditions after engineering treatment.

Key Words: landslide; stability analysis; numerical simulation; FLAC3D; planning area of Sichuan Tibet Railway

中图分类号: TU457(271)

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2016)11-0042-05

0 引 言

川藏铁路沿线地形地貌复杂, 构造发育, 气候多变, 滑坡地质灾害发育。在铁路施工中, 如果对地质环境条件及地质灾害重视程度不够, 往往会导致古滑坡完全或局部复活, 形成新的滑坡灾害。川藏铁路规划区 K208 滑坡位于甘孜县城东南, 即国道 G317 线 K208 里程处。受甘孜-玉树断裂的影响, 该处碳质板岩岩体极为破碎, 节理裂隙发育, 存在大型~巨型滑坡群。由于公路开挖不当, 古滑坡局部复活, 蠕滑现象明显, 严重威胁公路安全和影响川藏铁路规划建设^[1-3]。

本文以 K208 滑坡为例, 针对开挖前、开挖后和加固后的滑坡, 利用 FLAC3D 对天然工况、暴雨工

况和地震工况下的滑坡剪应变进行了模拟计算^[4], 得到了各工况下滑坡稳定性安全系数, 探讨了滑坡变形规律, 以期对川藏铁路规划区滑坡灾害治理提供参考。

1 滑坡区工程地质环境

1.1 地形地貌

滑坡区属构造剥蚀侵蚀高山地貌, 位于洛锅梁

收稿日期: 2016-07-08

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113038000); 中国中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(二院科字 201303)

作者简介: 邱鹏(1991—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程勘察与地质灾害评估; 苏培东(通讯作者)。

子高山中深切割区。K208 滑坡位于 G317 线 K208 + 130 ~ K208 + 250 段, 滑坡平面上呈不规则的圈椅状, 横向宽约 120 m, 纵向长约 60 m, 面积约 6 200 m², 滑坡高程介于 3 605 ~ 3 645 m。滑坡区最危险断面为 K208 + 200, 相对高差 46 m, 坡面多阶梯状, 滑坡总体坡度 35° ~ 45°, 坡脚由于公路开挖形成 2 ~ 7 m 的陡坎, 地形起伏较大。滑坡工程地质平面见图 1。

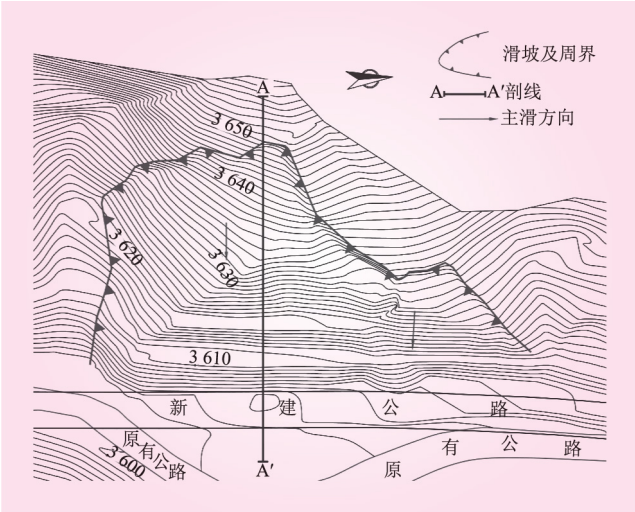


图 1 滑坡工程地质平面(高程: m)

1.2 地层岩性

滑坡区地层为中生界三叠系上统两河口组 (T₃ln) 板岩, 灰黑色, 千枚状泥质结构, 薄层状构造, 矿物成分以粘土矿物为主, 可见少量绢云母、石英等。裂隙发育, 裂面起伏粗糙。强风化岩体岩芯多呈 1 ~ 3 cm 碎砾状、薄饼状, 岩体完整性差, 质软; 中风化岩体裂隙不甚发育, 岩体完整性较好。岩层产状 NW335° ∠ 26°, 倾向坡内。滑坡工程地质剖面见图 2。根据现场及室内试验, 岩体物理力学参数见表 1。

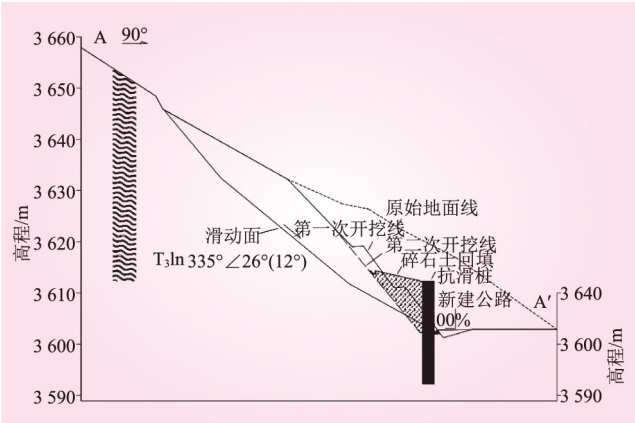


图 2 滑坡工程地质剖面

表 1 岩体物理力学参数

岩体名称	风化程度	天然密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	饱和密度 $\rho_{\text{sat}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
板岩	强风化	2 200	2 300	35	35
	中风化	2 500	2 600	50	40

1.3 地质构造

滑坡区隶属青藏滇缅印尼“歹”字形构造区, 扬子准地台四川台拗西部。次一级构造属北北西向构造带—罗锅梁子复式向斜, 位于罗锅梁子复式向斜南西翼。根据区域资料, 滑坡区内未发现断层直接通过^[5-6]。

滑坡区新构造运动强烈, 地貌表现主要为山岳抬升、河流下切。新构造运动的构造形迹主要表现为褶皱与断裂^[7-8]。滑坡区地震严格受鲜水河断裂控制, 从地震历史资料记录来看, 鲜水河地震带活动频繁, 强度大, 1916 年以来发生 V 级以上强震 10 次, VI 级以上 7 次, VII 级以上 3 次。震中区烈度 IX ~ X 度, 震源深度 8 ~ 13 km。鲜水河断层是一条活动性导震断层。GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》表明, 工程区地震动峰值加速度为 0.20g, 相应地震基本烈度为 VIII 度。场地属构造欠稳定区。

1.4 水文地质

滑坡区内的地表水系主要为山间槽谷的沟渠水, 水位高程及流量主要受大气降水的控制和影响, 补给源主要为大气降水和山坡地表水以及冰雪融水。滑坡区地下水类型主要为基岩裂隙水。基岩裂隙水无统一水位, 其流量受季节性变化影响很大, 多为季节性山泉, 主要接受大气降水补给, 向低洼处排泄。

2 滑坡基本特征及形成机制

2.1 滑体基本特征

滑体物质主要为中生界三叠系上统两河口组 (T₃ln) 炭质板岩, 岩体风化强烈, 呈强风化状。主要发育 2 组风化卸荷裂隙: ①产状 SE158° ∠ 70°, 间距 0.2 ~ 0.4 m, 裂面粗糙, 充填粉质粘土, 延伸长度 1 ~ 4 m, 张开度 0.1 ~ 0.5 mm; ②产状 SW240° ∠ 55°, 间距大于 0.3 ~ 0.6 m, 裂面粗糙, 充填粉质粘土, 延伸长度 1 ~ 3 m。滑体最厚处约 20 m, 平均约 13 m, 方量约 13 × 10⁴ m³, 为中型中层岩质滑坡, 主滑方向约 90°。滑床为中风化板岩, 风化裂隙不发育, 岩体结构较完整。滑坡变形特征明显, 滑坡沿坡脚剪出, 滑坡后缘出现大量拉裂缝和滑坡陡坎, 整体表现为前沿牵引, 后缘推动的复合式滑坡。

2.2 滑坡体形成机制

滑坡区原为滑坡场地, 坡度约 35° ~ 45°, 后因

公路施工开挖形成4级台阶,最大高差达40 m,坡度 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$,过高的临空面和过陡的坡度为滑坡失稳创造了有利的地形条件。板岩强风化层风化裂隙发育,完整性差,岩性软弱,遇水易软化,这是滑坡产生的物质基础。由于板岩强风化层裂隙发育,为地表水下渗提供了有利条件。地下水对滑坡失稳影响明显,一是改变滑体物理力学性质,增加滑体密度,从而增加了下滑力,降低了滑体抗剪强度;二是地下水的冻融循环作用加剧了岩体裂隙扩张,进一步降低了滑体强度,加速了地下水下渗;三是滑床中风化岩体较完整,为相对隔水层,地下水沿中风化层顺坡向下渗流时会产生动水压力和浮托力。由此可见,K208滑坡主要是由于人工不合理开挖、滑体物质裂隙发育,力学性质差,以及地下水的冻融循环作用等因素综合导致了古滑坡局部复活发生失稳。

3 滑坡稳定性分析

3.1 强度折减法

J. M. Duncan^[9]认为,滑坡安全系数可以定义为滑坡刚好达到临界破坏状态时,对土的剪切强度进行折减的程度。通过逐渐减小抗剪强度参数,将 c 、 ϕ 值同时除以折减系数 k ,得到一组新的强度指标 c' 、 ϕ 进行数值计算分析,反复计算直至滑坡达到临界破坏状态,此时岩土体原有的强度指标与采用的强度指标之比即为该滑坡的安全系数 F_s 。强度折减法应用中存在的关键问题是临界状态的判别准则。

目前,临界状态的判别准则主要有4种:①以特征点处的位移(坡顶点竖直方向的位移及坡脚点水平方向的位移)是否突变作为边坡的失稳判据^[10-11]。②滑动面某一幅值的广义剪应变的贯通^[12-13]。③计算不收敛^[14]。④滑动面塑性区贯通^[15]。本文采用三维有限差分分析软件FLAC3D进行滑坡体的稳定性计算分析和治理措施的效果评价。临界状态的判别准则采用目前使用较多的计算不收敛判别法,即剪应变不收敛点为临界状态。

3.2 滑坡体稳定性评价

根据滑坡区地质结构与工程施工情况进行三维建模(见图3)。模型取典型剖面A—A',对滑坡在未开挖、工程开挖以及工程治理后,分别在天然工况、暴雨工况以及地震工况下的稳定性进行模拟。根据现场实际开挖过程,计算分为以下4步:

(1) 确定初始条件。在天然未开挖状态下计算,模型达到平衡状态模拟初始地应力,然后将位移、速度清零。

(2) 模拟此次开挖。由于修筑公路对边坡进行切坡,软件中将开挖单元体赋值为NULL模型,求

出其剪应变云图,以分析变形情况。

(3) 模拟工程治理。由于切坡不当造成滑坡变形,对其进行工程治理。治理措施为削方+抗滑桩。软件中将工程治理需要开挖单元体赋值为NULL模型,抗滑桩按弹性材料考虑,弹性模量取30 GPa,泊松比取0.2,密度取 25 kg/m^3 。桩体后方使用碎石土回填。

(4) 安全系数求解。按照强度参数折减法,计算滑坡在未开挖、工程开挖以及工程治理后在天然、暴雨以及地震工况下的安全系数。

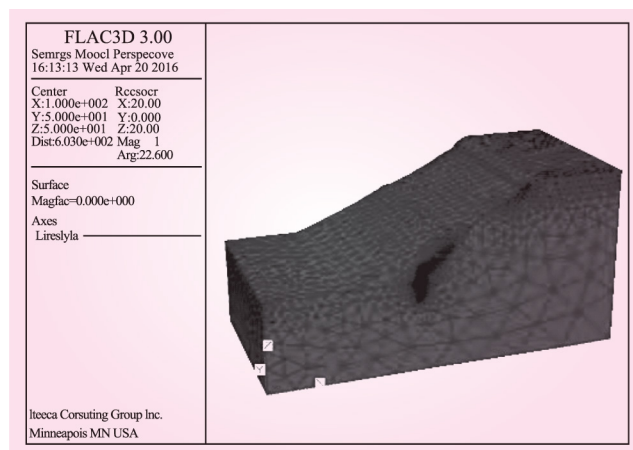


图3 K208滑坡三维模型

图4为滑坡在天然未开挖状态下、开挖后以及治理后在暴雨工况下各执行5 000步后的剪应变增量云图。从图4可知,在未开挖状态下,暴雨使滑坡内沿古滑坡滑动带分布的岩土体发生剪切破坏,该剪切破坏从坡顶开始,但未贯穿到坡脚,即没有发生新的滑坡。在工程开挖后,执行5 000步后,由于坡脚没有足够的抗滑力,使滑坡内沿古滑坡滑动带分布的岩土体发生剪切破坏,且剪切破坏区域贯穿整个滑坡,此时古滑坡复活,产生滑动。治理后,发生剪切破坏的区域与工程开挖条件下相比明显退化,并且退化是从坡脚处往坡顶处进行的。这说明对滑坡进行治理后,由于坡脚处有足够的抗滑力,坡脚处的岩土体不再发生剪切破坏,有效地阻止了滑坡的发育。

不同工况下的安全系数见表2。从表2可以看出,滑坡在未开挖条件下处于稳定状态,在工程开挖条件下处于不稳定~基本稳定状态,在工程治理条件下处于稳定状态。

表2 不同工况下的安全系数

工况	未开挖	开挖后	治理后
天然工况	2.24	1.13	1.66
暴雨工况	2.00	0.98	1.48
地震	1.98	1.06	1.59

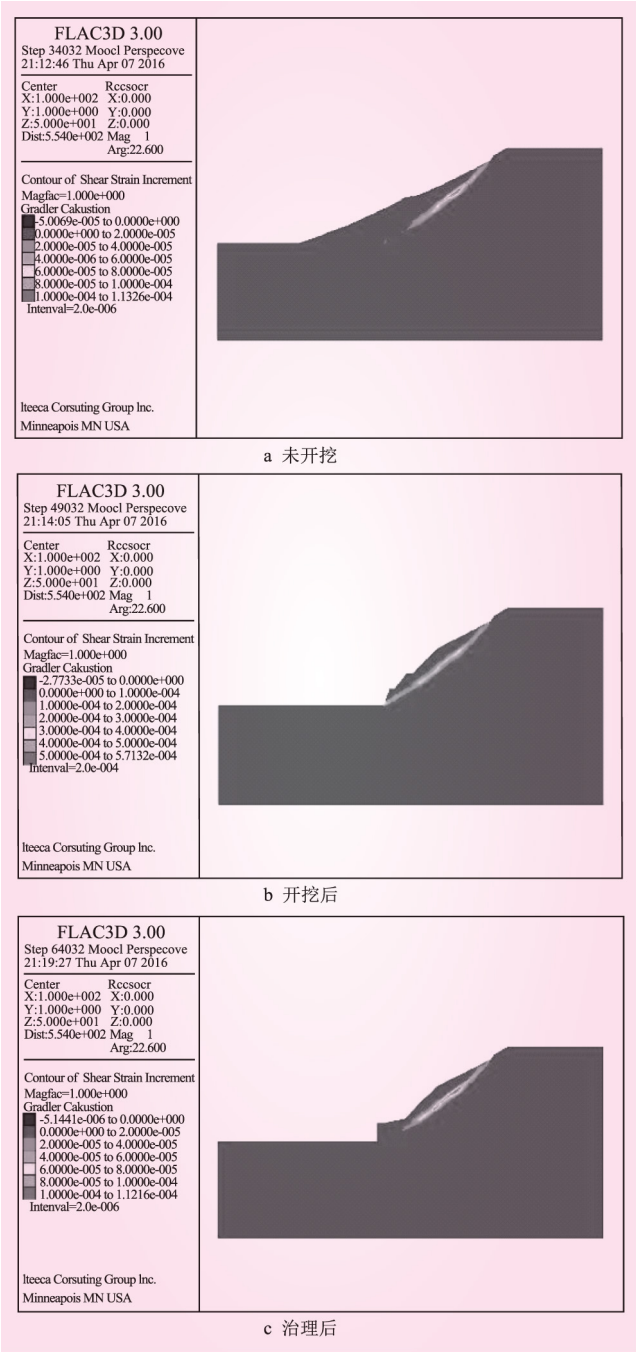


图 4 K208 滑坡在暴雨工况下的剪分布

在天然工况下，滑坡在未开挖时安全系数为 2.24，开挖后降为 1.13，安全系数下降约 50%，滑坡由稳定变为基本稳定；暴雨工况下，滑坡在未开挖时安全系数为 2.00，开挖后降为 0.98，安全系数下降 51%，滑坡由稳定变为不稳定；地震工况下，滑坡未开挖时安全系数为 1.98，开挖后变为 1.06，安全系数下降约 46%。不合理工程开挖使滑坡安全系数在 3 种工况下降低 46%~51%，说明不合理的工程开挖是导致滑坡发生的最直接因素。工程开挖形成的高陡边坡是滑坡形成的基础条件，开挖形成

临空面降低坡脚抗滑力，是导致滑坡形成的重要因素。

在未开挖时，天然工况下安全系数为 2.24，暴雨工况下为 2.00，暴雨使安全系数降低约 11%；地震工况下为 1.98，地震使安全系数降低约 12%。工程开挖后，天然工况下安全系数为 1.13，暴雨工况下降为 0.98，安全系数降低约 13%；地震工况下安全系数为 1.06，安全系数降低约 6%。工程治理后，天然工况下安全系数为 1.66，暴雨工况下为 1.48，安全系数下降约 11%；地震工况下安全系数为 1.59，安全系数下降约 4%。暴雨使安全系数降低 11%~13%，地震使安全系数降低 2%~12%，说明暴雨和地震也对滑坡稳定性有影响，暴雨对滑坡稳定性的影响更为显著。水能软化岩体，使岩体强度降低；其次，岩体裂隙中的水产生的动水压力及静水压力都不利于滑坡稳定。需要特别指出的是，K208 滑坡区域处于高寒地区，地下水的反复冻融会使岩体裂隙扩张，导致地表水下渗加强，加剧了水对滑坡稳定的不利影响。

4 结 语

K208 滑坡是修建公路时切坡不当，加上地下水的作用而导致的古滑坡复活。不合理的工程开挖对滑坡稳定性影响很大，暴雨和地震对滑坡稳定性影响明显，暴雨影响尤为明显。川藏铁路规划区滑坡和高边坡众多，工程施工时，应注意边坡开挖的合理性以及支护加固的及时性。同时，应设置良好的排水系统以减小水的危害，保障边坡的稳定。

参考文献:

[1] 姜泽凡. 川藏公路沿线地质灾害及其形成条件与整治对策[J]. 四川地质学报, 1996(3): 244-249.

[2] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.

[3] 杨晓松, 王友成, 张斌. 公路施工导致的古滑坡复活实例分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 43-46, 78.

[4] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39-61.

[5] 徐道一, 孙文鹏. 歹字型构造体系在地震预测中的应用[J]. 地质力学学报, 2011, 17(1): 64-73.

[6] 郑延中. 谈谈青藏滇歹字型构造体系头部的几个问题[J]. 青海地质, 1978(3): 31-33.

[7] 韩磊, 黄洁, 范敏, 等. 四川省甘孜地区地质环境的遥感特征分析[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 470-473.

[8] 熊探宇, 姚鑫, 张永双. 鲜水河断裂带全新世活动性研究进展综述[J]. 地质力学学报, 2010, 16(2): 176-188.

[9] DUNCAN M J. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996,

122(7): 577-596.

- [10] 李红, 宫必宁, 陈琰. 有限元强度折减法边坡失稳判据[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 79-82.
- [11] MANZARI M T, NOUR M A. Significance of Soil Dilatancy in Slope Stability Analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(1): 75-80.
- [12] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1-8.

- [13] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407-411.
- [14] 王栋, 年廷凯, 陈煜森. 边坡稳定有限元分析中的三个问题[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2309-2313, 2318.
- [15] 邓建辉, 张嘉翔, 闵弘, 等. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法: 加固安全系数计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 871-875.

(责任编辑 杨 健)

(上接第7页)的影响是一个整体性累积演变的过程。清江流域因其小流域特性而出现生态环境修复能力不足的问题, 渐进的梯级开发必然导致环境的脆弱化。因此, 在清江流域开发过程中, 要充分考虑小流域的特质, 通过工程措施、生物措施和综合管理措施的系统优化, 有效保护流域环境, 促进流域生态系统的平衡发展。

参考文献:

- [1] 李绍才, 孙海龙, 龙凤. 水能梯级开发生态影响评价[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 李帅. 天全河流域梯级开发对环境的累积影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.

- [3] 范继辉. 梯级水库群调度模拟及其对河流生态环境的影响[D]. 成都: 中国科学院研究生院(成都山地灾害与环境研究所), 2007.
- [4] 李亚农. 流域梯级开发对环境的影响[J]. 水电站设计, 1997, 13(3): 20-25.
- [5] 薛联青, 赵学民, 崔广柏. 利用GIS与遥感技术进行流域梯级开发的环境影响评估[J]. 水利水电技术, 2001, 32(5): 40-43.
- [6] 刘世锦. 加快西部水电开发[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [7] 吴涤宇, 陈晓龙. 我国水电开发生态补偿机制研究[J]. 东北水利水电, 2007, 25(5): 60-63.
- [8] 李颖, 陈林生. 美国田纳西河流域的开发对我国区域政策的启示[J]. 四川大学学报, 2003, 128(5): 27-29.

(责任编辑 杨 健)

(上接第11页)多, 还包括人为扰动, 气温等, 因此为了得出更为准确的评价结果, 应该在可能的情况下选择更为全面的评价指标体系。

参考文献:

- [1] 张永波, 时红, 王玉和. 地下水环境保护与污染控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 1-2.
- [2] 巩奕成, 张永祥, 丁飞, 等. 基于萤火虫算法的投影寻踪地下水水质评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 566-572.
- [3] 陈永灿, 陈燕, 郑敬云, 等. 概率神经网络水质评价模型及其对三峡近坝水域的水质评价分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 7-12.
- [4] 门宝辉, 梁川. 基于变异系数权重的水质评价属性识别模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(10): 1373-1375.
- [5] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061.
- [6] 徐红敏, 杨天行. 基于支持向量机分类算法的湖泊水质评价研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(4): 570-573.
- [7] 邱林, 唐红强, 陈海涛, 等. 集对分析法在地下水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2007(1): 13-15.
- [8] 刘章军, 叶燎原. 模糊概率模型及其在地下水水质评价中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(3): 286-293.
- [9] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552-556.
- [10] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环

境科学学报, 2001, 21(4): 431-434.

- [11] 汤洁, 李艳梅, 卞建民. 物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005(5): 1-5.
- [12] 陈守煜, 于雪峰. 相对隶属度理论及其在地下水水质评价中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2003, 22(5): 691-694.
- [13] 陈东景, 马安青, 徐中民, 等. 因子分析法在水质评价中的应用[J]. 水文, 2002, 22(3): 29-31.
- [14] 刘小楠, 崔巍. 主成分分析法在汾河水水质评价中的应用[J]. 中国给水排水, 2009, 25(18): 105-108.
- [15] 陈守煜, 郭瑜. 水质综合评价的模糊可变集合方法[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 19-22.
- [16] 谷朝君, 潘颖. 内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题[J]. 环境保护科学, 2010, 28(109): 45-47.
- [17] 王迎超, 尚岳全, 孙红月, 等. 基于功效系数法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 529-534.
- [18] 王迎超, 孙红月, 尚岳全, 等. 功效系数法在隧道围岩失稳风险预警中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3679-3684.
- [19] LEI P, CHANG X L, XIAO F, et al. Study on early warning index of spatial deformation for high concrete dam[J]. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 1607-1614.

(责任编辑 陈 萍)