

渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响

廖红建¹, 高石夯¹, 盛 谦², 许志平¹

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 430071, 武汉)

摘要: 针对水利工程中复杂的库岸工程地质条件,以及库水位的变化对库岸边坡的稳定性会产生各种不利影响的实际,对不同渗透系数土质边坡在库水位下降速率变化下的稳定性进行了数值计算和分析,计算了在库水位下降期间,不同渗透系数滑坡体的稳定性受库水位下降速率影响的变化规律.结合库水位下降期间不同渗透系数滑坡体的渗流场,对滑坡体的稳定性进行了数值计算分析,得到了库区降水速率和渗透系数与边坡稳定性之间的关系.结果表明:对于同种材料的滑坡体,降水速率越快,滑坡体达到最低安全系数所需的时间就越短,且水位下降到同一位置时,降水速率越快,库岸的安全系数就越低,越可能发生滑坡;相同渗透系数的滑坡体在不同降水速率下其稳定性的变化曲线都是相似的.

关键词: 库水位;边坡;稳定性;渗透系数

中图分类号: O346; TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0088-05

Influence of Permeability Coefficient and Reservoir Water Level Variation on Slope Stability

Liao Hongjian¹, Gao Shihang¹, Sheng Qian², Xu Zhiping¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Considering the complicated geological conditions of reservoir banks in hydraulic projects and the adverse influence upon the slope stability due to the variable reservoir water level, the stability of soil slope with different permeability coefficients under different drawdown velocities of water level was numerically computed and analyzed. The continuous variation of slope stability with different permeability coefficients during the water level drawdown period was obtained. Combining the seepage field of the slide mass with different permeability coefficients during the water level drawdown period, the slope stability was investigated, and the relationships of the drawdown velocity and permeability coefficient with the slope stability were obtained. For the slope mass of same materials, the faster the water level draws down, the shorter the time to reach the minimum safety factor is. Moreover, at the same drawdown height of water level, the faster the water level draws down, the lower the safety factor of reservoir bank is to evoke a possible landslide. The stability curves of slope masses with same permeability coefficient are similar under different drawdown velocities.

Keywords: reservoir water level; slope; stability; permeability coefficient

随着我国水利水电事业的快速发展,库岸稳定性问题的研究越来越引起工程技术人员的重视.由

于水库库岸滑坡集普遍性、危害性和特殊性于一体,因此其稳定性研究对确保水电工程建设的顺利进行

收稿日期: 2005-05-26. 作者简介: 廖红建 (1962~),女,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50379043);中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室基金资助项目 (Z110302).

及其正常运营具有重大意义^[1,2]. 国内外对滑坡的调查结果表明,在库水位快速下降时往往会引起迎水坡面的滑坡,除非在水位下降过程中,边坡内的孔隙压力能和外部降水一样快速消失,否则坡体内将受到高剪切力而有滑坡的危险^[3]. 日本学者经过对水库滑坡的分析及实测研究认为,浸水、库水位急剧降低和降雨是水库滑坡形成的主要因素^[4].

我国河北省的岳城水库蓄水后,曾在1968年和1974年由于库水位降落而在坝中段和南段各发生259 m和210 m长的大滑坡^[5]. 现在正在建设的长江三峡水库是一个狭长的河道型水库,建成后采用“冬蓄夏泄”的水位调度方式,水位调幅变化可达30 m. 水库自低水位蓄至正常蓄水位,然后自正常蓄水位放空至低水位,这种变化将直接干扰两岸渗流场. 如果库水位快速降落,两岸地下水位回升之后来不及同库水位同步降落,高、低水位之间的水体所产生的向坡体外的渗透压力将成为对滑坡体的稳定性极为不利的因素,是水电事业中不容忽视的安全问题.

本文针对库区水位发生变化的实际,及其对库岸边坡的稳定性可能造成的影响,对具有不同渗透系数材料的滑坡体,进行了在不同库水位下降速率下的稳定性计算分析,计算了在库水位下降期间,不同渗透系数滑坡体的稳定性随不同库水位下降速率的变化情况,得到了库区降水速率和渗透系数与边坡稳定性之间的对应关系,以期为库区边坡稳定性的研究提供参考.

1 计算理论

1.1 渗流计算基本理论

根据连续性假设,dt时间内单元体的体积变化必等于同一时间内单元体的水量变化,结合达西定律,可得地下水运动的连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为总水头; k_x 为 x 方向的渗透系数; k_y 为 y 方向的渗透系数; Q 为施加的边界流量; t 为时间; Θ 为水的体积分数 ($\Theta = V_w / V$, V_w 为在水流过土体时驻留在土体结构中的水的体积, V 为土体的总体积), 当土的饱和度为 100 % 的时候, Θ 就等于土的孔隙率.

体积水含量 Θ 的变化取决于应力状态和土体的性质. 在渗流计算中,通常假定总应力不变,孔隙气压力也保持不变,则 Θ 的变化主要取决于孔隙水

压力的改变. 它们之间的关系可表示为^[6]

$$\partial \Theta = m_w \partial u_w \quad (2)$$

式中: m_w 是体积水含量驻留曲线的斜率; u_w 为孔隙水压力.

总水头 H 可以定义为

$$H = u_w / \gamma_w + y \quad (3)$$

式中: γ_w 为水的重度; y 为高程.

将式(3)代入式(2),可得

$$\partial \Theta = m_w \gamma_w \partial (H - y) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),可以得到非稳定渗流情况下的控制方程(高程是常数, $\partial y = 0$)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

进一步应用伽辽金方法,可将微分形式表示的控制方程(5)化为有限元方程. 对于瞬态分析,有限元解是时间的函数,时间积分可由有限差分逼近方案执行,从而可得出有限差分形式表示的有限元方程^[7],使用向后差分法可得到瞬态有限元渗流控制方程的简洁形式

$$(\Delta t K + M) H_1 = \Delta t Q_1 + M H_0 \quad (6)$$

式中: Δt 为时间增量; K 为单元特征矩阵; M 为单元质量矩阵; H_1 为时间增量末的水头值; Q_1 为时间增量末的结点流量; H_0 为时间增量初的水头值. 用高斯消去法求解有限元方程,即可得到每个结点的水头值.

1.2 稳定性计算理论及思路

在边坡渗流稳定性计算中,采用极限平衡法中的摩根斯坦-普赖斯方法^[8]. 该法假设条间正应力和剪应力之间有一个相对于滑坡体横坐标的函数关系. 本文选用的是一个半正弦函数,恰好满足滑坡体左右边界条间力为 0 的条件.

在运用 Geo-Slope 软件进行计算的过程中,将动态的渗流场与极限平衡分析结合起来考虑. 首先在 Seep 程序中进行暂态渗流问题的分析,得到各个不同时间下渗流场的水头分布,然后将渗流场中的水头值输入到边坡稳定计算的 Slope 程序中,再用条分法计算滑动体的稳定系数,便可将动态的渗流场与极限平衡分析结合起来.

2 渗流计算模型及参数确定

2.1 渗流计算模型的建立

为了分析库水位的变动对滑坡体稳定性的影响,本文设计库水位从 175 m 下降到 85 m,落差为 90 m,且分别假定在 3、6 和 9 个月期间下降,即降水

速率分别为 1、0.5 和 0.33 m/d 的若干种工况,以此来分析不同库水位下降速率对具有不同渗透系数的边坡稳定性的影响。

场地渗流计算模型采取如图 1 所示的计算剖面^[9,10]和有限元网格划分。图中边界处的空心圆表示外界水利边界条件,在本文的计算中,即为给定的 3 种不同库水位下降速率的情况。其他未作说明的边界定义为不透水边界。

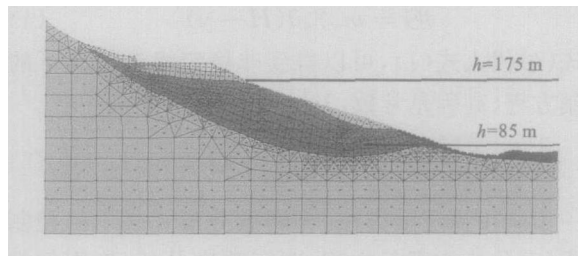


图 1 渗流计算剖面及有限元网格划分示意图

2.2 渗透系数确定

在渗流计算过程中,渗透系数(水力传导率)是表征土体导水能力的重要参数。由于用实验手段获得土的渗透系数比获得土水特征曲线要复杂得多,因此通常采用土水特征曲线来预测渗透系数。

本文首先根据实用土木工程标准规范中岩土体的渗透等级分类^[11],选择岩土体材料的渗透性为中等、弱、微、极微 4 种情况,然后采用标准砂、砂、细砂、淤泥 4 种基本的土水特征曲线,确定了表 1 所示的 16 种渗透系数,并进行了数值模拟计算,以此反映不同渗透系数边坡的稳定性。

表 1 计算选取的渗透系数

土名	渗透系数 $k/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			
标准砂	7.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.0×10^{-4}
砂	7.5×10^{-5}	5.4×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.0×10^{-5}
细砂	7.5×10^{-6}	4.3×10^{-6}	2.5×10^{-6}	1.0×10^{-6}
淤泥	7.5×10^{-7}	5.0×10^{-7}	2.5×10^{-7}	1.0×10^{-7}

3 数值计算与分析

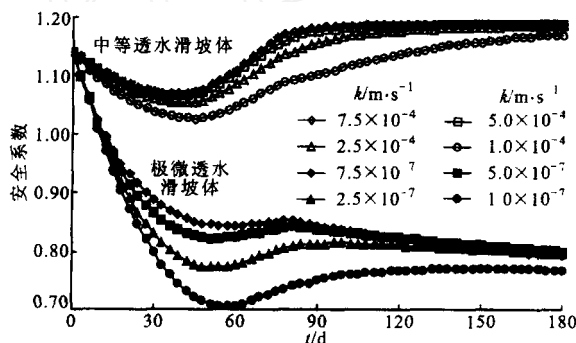
计算中假定每一种算例下滑坡体的渗透系数相同,渗流场的计算步长为 12 h,计算时间分别为 6 个月、12 个月和 24 个月,对 16 种不同渗透系数、在 3 种库水位下降速率(共 48 种渗流场)下的滑坡体进行了稳定性分析。

3.1 不同降水速率下的边坡稳定性

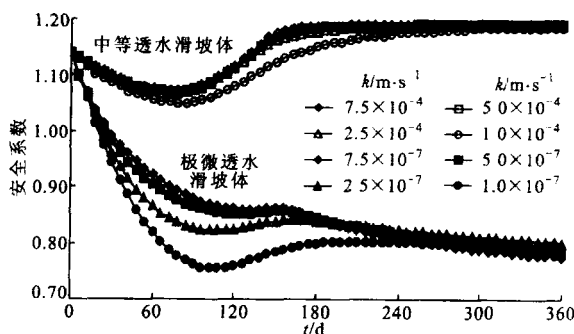
对中等、弱、微和极微透水 4 种边坡,计算了其在降水速率 v 分别为 1、0.5 和 0.33 m/d 三种情况

下的稳定性,并进行了比较分析,发现弱透水和微透水边坡所得的计算结果介于中等和极微透水边坡的计算结果之间。为清晰起见,在图 2 中只作出了中等和极微透水的计算结果。

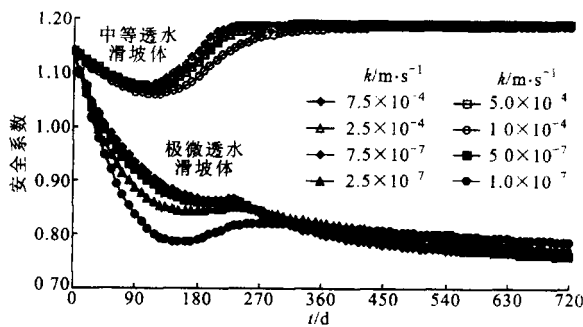
由图 2 的计算结果可见,对于中等透水滑坡体,其安全系数的变化为随着库水位的下降起初有减小趋势,当达到一定值时安全系数又增大,然后逐渐趋于平稳,接近某一定值。渗透系数越大,滑坡体的安全系数在下降后上升得就越快;降水速率越大,滑坡体达到最低安全系数所需的时间就越短。另外,对于中等透水滑坡体,在不同的降水速率下,安全系数都比较接近且大于 1.0,可见中等透水材料的库岸边坡稳定性较好,受水位变化的影响不大。



(a) $v = 1 \text{ m/d}$



(b) $v = 0.5 \text{ m/d}$



(c) $v = 0.33 \text{ m/d}$

图 2 水位下降时间与安全系数的关系

对于极微透水滑坡体,安全系数的变化为随着库水位的下降安全系数迅速下降,到最低点后变化曲线稍有上升但多数随即下降,变得平坦,并且彼此越来越接近.降水速率越大,滑坡体达到最低安全系数所需的时间就越短.安全系数随时间推移呈现整体下降趋势且下降较快,但降到最低点之后变化幅度趋缓.就整体而言,极微透水滑坡体的安全系数下降幅度很大,有发生滑坡的较大隐患.由此可见,对于渗透系数大的库岸边坡,库水位下降时坡体内的水能够很快得以排出,孔隙水压力能较快被消除,故安全系数下降的幅度不大.相反,如果边坡的渗透系数较小,库水位下降时坡体内的水在短时间内不能排出,则孔隙水压力会在坡体内产生高剪切力而导致滑坡的产生.因此,库水位下降时,需特别注意渗透系数较小材料构成的边坡的稳定性.

为了进一步分析在降水速率相同时,不同渗透系数对安全系数影响的规律性,取 v 为 0.5 m/d 时的计算结果进行分析,如图 3 所示,其他情况与之类似.由图 3 可知,在 v 为 0.5 m/d 时,对于不同渗透系数材料的滑坡体,在库水位下降到相同的位置时,安全系数随渗透系数的减小而降低,即随着渗透性由强到弱,安全系数呈下降趋势.

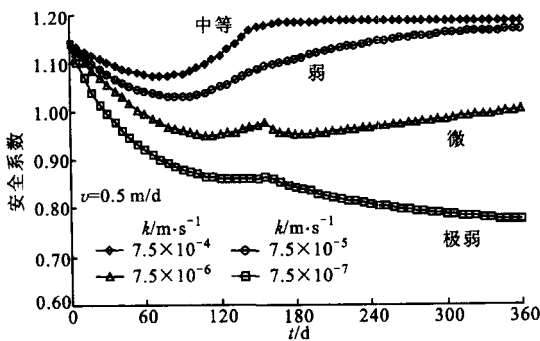
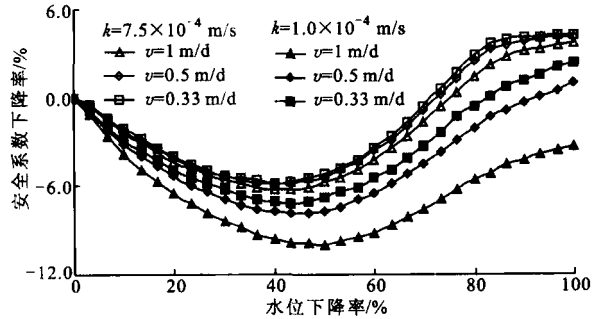


图 3 渗透系数对安全系数的影响

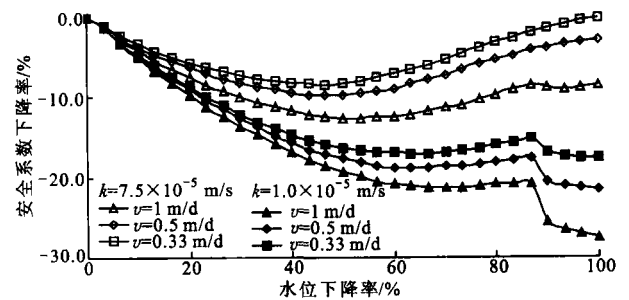
3.2 库水位下降率与安全系数下降率的关系

对于同种材料的滑坡体,进一步比较了在不同渗透系数下库水位下降率(库水位下降的高度占总下降高度的百分比)对滑坡体稳定性的影响,并进行了稳定性分析计算,结果如图 4 所示.图中显示了标准砂、砂、细砂和淤泥 4 种材料的滑坡体在不同渗透系数和不同降水速率时,计算所得的安全系数下降率(安全系数的变化相对于起始安全系数的百分比)与库水位下降率的关系.在对标准砂的计算中,选择了 7.5×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 2.5×10^{-4} 和 $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 四种渗透系数.由于 $k = 7.5 \times 10^{-4}$ 与 $k = 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、 $k = 2.5 \times 10^{-4}$ 与 $k = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 在不同降水

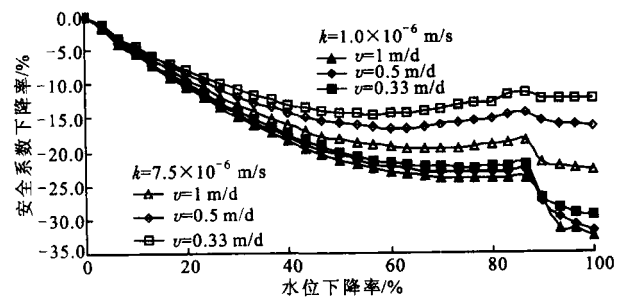
速率下得出的曲线很接近,故为清晰起见,图中只绘出了 $k = 7.5 \times 10^{-4}$ 和 $k = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 时的计算结果.同样,对于其他 3 种材料,为了清楚起见也只绘出了渗透系数为最大值和最小值时的计算结果.



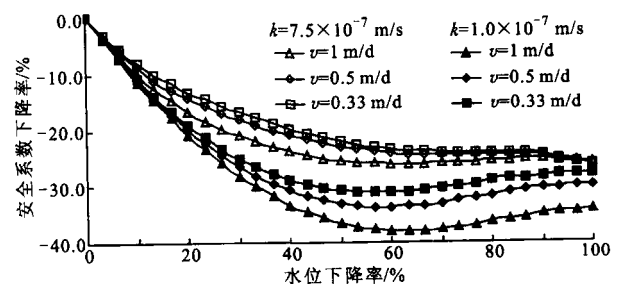
(a) 标准砂



(b) 砂



(c) 细砂



(d) 淤泥

图 4 库水位下降率与安全系数下降率的关系

由图 4 可见,在库水位下降阶段,滑坡体稳定性的变化趋势与其渗透系数密切相关,相对而言,降水速率则对稳定性的变化影响较小.不同渗透等级的

滑坡体的稳定性表现不尽相同,而同种渗透等级的滑坡体的稳定性变化趋势则基本接近,且相同渗透系数的滑坡体在不同降水速率下其稳定性的变化曲线都是相似的.从标准砂到淤泥,当库水位下降到相同位置时,随着滑坡体材料渗透系数的减小,其安全系数的下降率增大.

另外,由计算结果可知,最小安全系数(即最危险的水力条件)发生在库水位下降期间,而不是在最高库水位或者最低库水位处,这与朱冬林等^[12]的计算结果是一致的.渗透系数越小的滑坡体到达最小安全系数的时间越长.

为进一步研究安全系数与降水速率的关系,又整理出了库水位分别下降20%、50%和80%时,不同渗透系数的滑坡体的安全系数随降水速率变化的曲线,如图5所示.分析各曲线可知,水位下降到相同位置时:对于不同材料的滑坡体,渗透系数越小,则安全系数越低;曲线整体是下降的趋势,即降水速率越高,则库岸的安全系数越低,越可能发生滑坡.

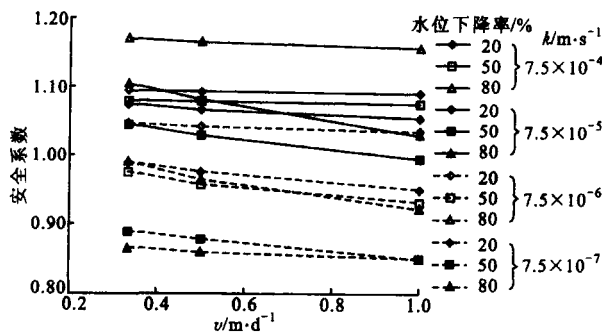


图5 安全系数与降水速率的关系

4 结论

(1) 中等透水滑坡体的安全系数随着库水位的下降起初有减小的趋势,当达到一定值后又增大,然后慢慢趋于平稳,接近某一定值.在不同的降水速率下,安全系数彼此比较接近且大于1.0.极微透水滑坡体的安全系数随着库水位的下降而迅速下降,到最低点后稍有上升,但多数随即平缓下降.就整体而言,极微透水滑坡体的安全系数下降幅度很大.对于不同材料的滑坡体,当水位下降到相同位置时,渗透系数越小,则安全系数越低.

(2) 最小安全系数(即最危险的水力条件)发生在库水位下降期间,而不是在最高库水位或者最低库水位处.对于同种材料的滑坡体,降水速率越高,滑坡体达到最小安全系数所需的时间就越短,且水

位下降到同一位置时,降水速率越高,库岸的安全系数就越低,越可能发生滑坡,说明在水库进行降水时应尽量延长降水的时间,避免水位的突降.

(3) 滑坡体稳定性的变化趋势与其渗透系数密切相关.不同渗透等级的滑坡体的稳定性表现不尽相同,而同种渗透等级的滑坡体的稳定性变化趋势则基本接近,且相同渗透系数的滑坡体在不同降水速率下其稳定性的变化曲线都是相似的.从标准砂到淤泥,当库水位下降到相同位置时,随着滑坡体材料渗透系数的减小,安全系数的下降率增大.

综上所述,由于实际工程所处地质环境的多样性,应针对不同渗透系数的滑坡体,在出现不同情况的库水位变化时采取相应的防治措施.

参考文献:

- [1] 崔政权, 李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [3] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slope [J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.
- [4] 中村浩之. 论水库滑坡[J]. 王恭先, 译. 水土保持通报, 1990, 10(1): 53-64.
- [5] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖貽, 等. 渗流数值计算与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1981.
- [6] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [7] Segerlind L J. Applied finite element analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1984.
- [8] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surface [J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.
- [9] 长江勘测规划设计研究院. 三峡工程库区奉节县新城城区护岸工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究院, 2000.
- [10] 长江水利委员会综合勘测局. 长江三峡工程库区奉节县白衣庵滑坡治理规划阶段工程地质勘察报告[R]. 武汉: 长江水利委员会综合勘测局, 1999.
- [11] 王颖波. 实用土木工程标准规范[Z]. 西安: 地图出版社, 2001.
- [12] 朱冬林, 任光明, 聂德新, 等. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质, 2002(3): 6-9.

(编辑 葛赵青)