



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.025

卢书强, 张国栋, 易庆林, 等. 三峡库区白家包阶跃型滑坡动态变形特征与机理[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 144-149. LU Shu qiang, ZHANG Guo dong, YI Qing lin, et al. Characteristics and mechanism of dynamic deformation of Baijiabao landslide with stepwise in Three Gorges Reservoir area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 144-149. (in Chinese)

三峡库区白家包阶跃型滑坡动态变形特征与机理

卢书强^{1,2,3}, 张国栋^{1,2,3}, 易庆林^{1,3}, 易武^{1,2}, 黄海峰^{1,2}

- (1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;
2. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;
3. 湖北省地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 三峡库区内许多滑坡受库水位周期性涨落及降雨的影响, 其变形时间曲线呈阶梯状, 滑坡变形呈现出阶跃型动态变形演化特征。为了深入研究阶跃型滑坡的动态变形机理, 评价预测该类型滑坡的稳定性及发展趋势, 本文以白家包滑坡为例, 根据现场地质调查及勘查资料, 充分利用挖掘十多年的监测数据, 分析其动态变形特征、变形机理、影响因素和稳定性, 预测其动态变形发展趋势。结果表明此类滑坡由于渗透性能较差, 当水库退水时, 坡体内地下水向水库排水缓慢, 形成地下水与库水位的正落差, 指向坡体外侧的渗透压力增大, 使得坡体稳定性降低。并且库水位下降速率越大, 滑坡位移速率就越大。

关键词: 阶跃型滑坡; 动态变形; 机理分析; 三峡库区; 白家包滑坡

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)03-0144-06

Characteristics and mechanism of dynamic deformation of Baijiabao landslide with stepwise in Three Gorges Reservoir area

LU Shu qiang^{1,2,3}, ZHANG Guo dong^{1,2,3}, YI Qing lin^{1,3}, YI Wu^{1,2}, HUANG Hai feng^{1,2}

- (1. Collaborative Innovation Center for Geo hazards and Eco Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China;
2. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang 443002, China;
3. Hubei Engineering Research Center of Geological Hazards Prevention, Yichang 443002, China)

Abstract: A stepwise cumulative displacements curve is usually presented for these landslides in the Three Gorges Reservoir, under the condition of reservoir water fluctuation and rainfall, which means the deformation of the landslide in reservoir is a typical stepwise process. In order to understand the dynamic deformation mechanism, stability and deformation trend of stepwise landslides in the Three Gorges Reservoir, taking Baijiabao landslide as an example, this paper used the information of field geological survey and exploration, and monitoring data of more than ten years, analyzed the dynamic deformation characteristics, mechanism, influence factors and stability of Baijiabao landslide in detail, and predicted the deformation trend. The results showed that, due to the poor soil permeability of landslide body, the underground water in landslide could not be discharged in time during the drawdown of reservoir water, so the decline speed of groundwater was much slower than that of reservoir water, and then increasing the seepage force in the landslide body apparently, further reducing landslide stability. In addition, the faster the drawdown rate, the faster the movement of the landslide was.

Key words: stepwise landslide; dynamic deformation; mechanism analysis; Three Gorges Reservoir area; Baijiabao landslide

收稿日期: 2015-12-02 修回日期: 2016-03-10 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1134.016.html>
基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB677)

Fund: Natural Science Foundation of Hubei Province(2014CFB677)

作者简介: 卢书强(1973), 男, 河南洛阳人, 副教授, 从事地质灾害监测预报及防治方面的教学与科研工作。E-mail: Lsq2197@163.com

通讯作者: 张国栋(1968), 男, 河南南阳人, 教授, 从事岩土体稳定方面的教学与科研工作。E-mail: zgd@ctgu.edu.cn

我国三峡库区由于独特的地形地貌及地质环境特征,导致该地区滑坡地质灾害多发。特别是2003年三峡水库蓄水之后,因为水库水位大幅度抬升和周期性变化,改变了库区周边地质环境,使得库区滑坡地质灾害问题变得尤为突出。多年来很多学者深入分析研究了三峡库区的滑坡地质灾害,得到了许多卓越的成就^[1-5]。许强、汤明高等通过对滑坡时空演化规律和预警预报的研究,总结和归纳出滑坡灾害变形破坏的三阶段演化规律^[6],即滑坡的变形通常要经历初始(减速)变形、等速(匀速)变形和加速变形这三个演化阶段后,最后达到滑动破坏。但是由于滑坡是处于地表开放的复杂系统中,在变形演化过程中,会遭受到各种外部因素的影响,因而导致滑坡变形曲线显示出波动和震荡。因此,常见的滑坡变形时间曲线总体趋势是符合三阶段时空演化规律的,但在微观和局部则表现为阶跃型和震荡型^[6]。

阶跃型滑坡主要是由于滑坡在变形演化过程中,遭受到周期性外界因素的影响,如汛期降雨、库水位升降等,其变形时间曲线呈阶梯状,滑坡变形表现出阶跃型演化特征^[7-9]。三峡库区受特殊地质环境和库水位周期性涨落的影响,区内许多滑坡的累积位移-时间曲线为阶梯状,呈现出阶跃型变形演化特征,如白家包滑坡、树坪滑坡、白水河滑坡、卧沙溪滑坡^[10-15]等。

这种具有阶跃型变形特征的滑坡,通常都经历了多次加速变形,其变形速率受库水位、降雨等因素的影响,从而显示出明显的波动特征。这种类型的滑坡在变形演化过程中,当受到库水位、降雨等外界因素作用时,其位移呈陡坎式增大;当外界因素去除后,其位移却较为平稳。为了对此类型滑坡进行准确地预警预报,减小滑坡变形破坏所造成的损失,很有必要对阶跃型滑坡的动态变形特征和机理进行深入分析研究。

1 白家包滑坡地质特征

白家包滑坡位于三峡库区香溪河(长江支流)右岸,距香溪河入江口约2.5 km。滑坡平面形态呈短舌状见图1,后缘以基岩为界,高程约270 m;前缘直抵香溪河,剪出口高程约120 m;滑坡左、右两侧以山脊下部的基岩为界。滑坡的后缘宽度大约为300 m,前缘的宽度大约为500 m,平均宽度大约为400 m,纵向长度大约为550 m,滑坡的面积大约为 $22 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。滑体前缘厚约20~30 m,中部厚约50 m,后缘厚约10~30 m,平均厚度约45 m,滑体体积约 $990 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 75° ,为一深层大型土质滑坡。

根据现场地质调查及勘查资料^[16],白家包滑坡滑体物质主要为灰黄色、褐黄色粉质黏土夹块碎石及碎块石土,其结构较密实。块碎石主要成分为强中风化砂岩、泥岩,含量变化较大,粒径 $0.2 \sim 60 \text{ cm}$ 。滑带土主要为灰黄色夹杂紫红色可塑状的粉质黏土夹碎石角砾,并含有明显磨光的泥岩颗粒,滑面上可见擦痕和滑动镜面,滑带厚度约 0.2 m 。下覆基岩为侏罗系下统长石石英砂岩及泥岩,岩层产状 $25^\circ \angle 30^\circ$,属逆向结构岸坡见图2。

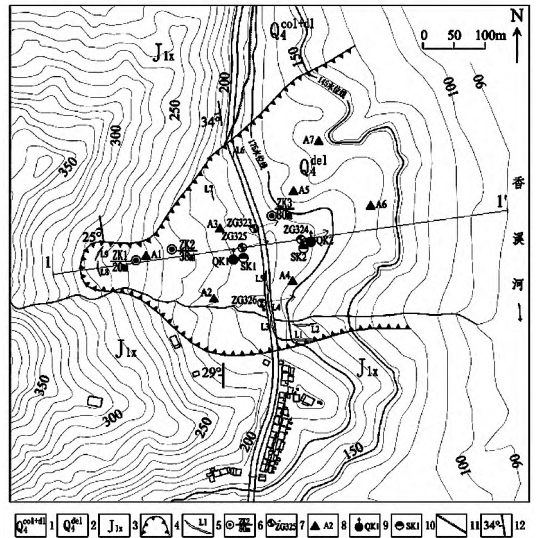


图1 白家包滑坡工程地质平面图
1- 第四系崩坡积物;2- 第四系滑坡堆积物;3- 侏罗系下统香溪组砂泥岩;4- 滑坡边界;5- 地表裂缝及编号;6- 钻孔;7- GPS监测点;8- 全站仪监测点;9- 深部测斜钻孔;10- 地下水位监测孔;11- 覆盖层与基岩的分界线;12- 岩层产状

图1 白家包滑坡工程地质平面图
Fig. 1 Geomorphologic map of Baijiabao landslide

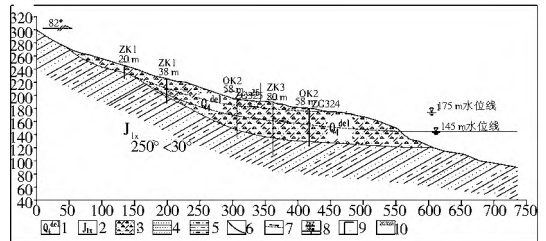


图2 白家包滑坡工程地质剖面图
1- 第四系滑坡堆积物;2- 侏罗系下统香溪组砂泥岩;3- 粉质黏土夹碎石;4- 砂岩;5- 泥岩;6- 滑带;7- 地下水位线及流向;8- 钻孔及编号;9- 深部测斜孔测斜曲线;10- GPS监测点及编号

图2 白家包滑坡工程地质剖面图
Fig. 2 Engineering geological profile of Baijiabao landslide

2 滑坡变形特征分析

2.1 地表变形特征

自从2003年三峡水库水位蓄水到135 m之后,白家包滑坡就一直处于蠕动变形状态。特别是在2006年之后,随着三峡库水位的周期性涨落,滑坡每年都要出现较大变形,表现出阶跃型变形特征。

2003 年 6 月下旬,白家包滑坡南侧边界首先出现走向 100° 的张性裂缝,之后滑坡北侧边界也出现走向 40° 的裂缝。2003 年 7 月下旬持续暴雨之后,白家包滑坡变形加剧,地表出现大规模开裂、下错^[13]。在滑坡后缘与基岩接触部位出现两组较大规模的裂缝:一组走向 40° 的长大张裂缝,长约 40 m、宽 20 cm、错距 25 cm;一组走向 180° 的雁列式羽裂,延伸约 30 m。滑坡体上的房屋及公路上均出现多处裂缝,其中一条裂缝走向约 10° 横穿公路,张开 12 cm,向东南侧下沉约 17 cm。2003 年之后,滑坡变形持续发展,边界裂缝逐渐贯通。特别是 2009 年 5 月下旬,受库水位下降和持续强降雨的影响,滑坡发生剧烈变形,在其右侧形成快速变形区。公路上出现长约 30 m,宽 45 cm,下错 50 cm 的长大拉裂缝 L4(图 3)。



图 3 滑坡中部公路右侧拉裂缝
Fig. 3 The tensile cracks in the road

2.2 滑坡监测数据分析

2.2.1 地表位移全站仪监测

白家包滑坡自 2003 年 6 月 2 日开始采用 GDM600 型全站仪进行地表变形监测^[17],监测点分布见图 1。截止 2005 年 12 月,地表监测时间-水平位移曲线见图 4,各监测点总垂直位移量见表 1。

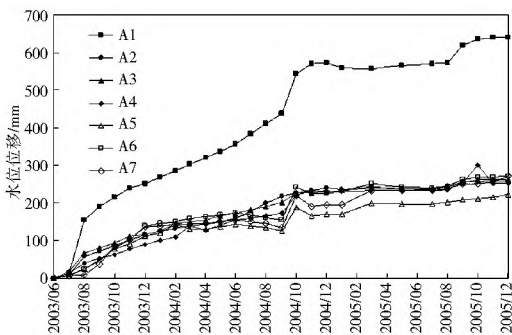


图 4 白家包滑坡地表监测时间-水平位移曲线
Fig. 4 The surface displacement time curves

地表监测数据表明,自 2003 年三峡水库 135 m 蓄水到 2005 年底,白家包滑坡整体一直处于蠕变

形状态,且滑体中后部的变形幅度较大,滑舌部位较小。垂直位移监测值表明 A1- A5 监测点明显下降, A6 监测点上升;且随着监测点高程的降低,垂直位移量逐渐减小。结合滑坡后缘出现的拉张裂缝,表明滑坡开始滑动时的“力源”主要来自于滑体的后部,坡体后部首先滑动,挤压滑体中前部产生变形,最后导致前缘局部隆起^[18],表现出典型的推移式滑坡运动特征。

表 1 各监测点总垂直位移量(2005 年 12 月)

Tab. 1 The total vertical displacement of monitoring sites

监测点	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
垂直位移/mm	-178.6	-135.9	-155.8	-84.9	-76.1	4.6	-29.6

2.2.2 地表位移 GPS 监测

自 2006 年 10 月起,白家包滑坡开始采用 GPS 进行地表位移监测,共建有 4 个 GPS 监测点(图 1)。各监测点时间-位移曲线如图 5。监测曲线表明,白家包滑坡整体一直处于蠕变变形,并表现出典型的“阶跃型”特征。监测曲线在每年的 5-7 月份向上突跃,8 月份到次年的 4 月份趋于平缓,在外型上表现为“阶梯状”。特别是 2009 年 6 月和 2012 年 6 月的“阶跃”最为明显,即滑坡变形最为剧烈。此外,4 个 GPS 监测点的位移具有同步性,但其变化幅度各异,各监测点累积位移量的大小顺序依次为 ZG326、ZG324、ZG325 和 ZG323。并且 4 个 GPS 监测点的位移方向 $73^\circ \sim 80^\circ$,为滑坡的主滑方向,与坡向一致。这说明滑坡体南侧的变形大于北侧,中前部的变形大于后部。对比 2006 年之前的全站仪监测成果,说明白家包滑坡的运动形式开始时是以推移式变形为主,坡体后部变形大于中前部;之后随着库水位周期性的涨落,滑坡体运动转化为牵引式为主。

2.2.3 深部位移钻孔倾斜监测

为查明白家包滑坡的深部位移情况,首先于 2003 年 8 月采用 CX-03D 型钻孔测斜仪对滑坡体上的 ZK1 和 ZK2 进行了深部位移监测^[19,20]。

(1) ZK1 位于滑坡后缘,孔口高程 246.9 m,孔深 20 m,于 2004 年 3 月在孔深约 11 m 处被剪断。

(2) ZK2 位于滑坡中后部,孔口高程 220.6 m,孔深 38 m,于 2004 年 8 月在孔深约 27.5 m 处被剪断,其监测曲线见图 6。经分析自 2003 年 8 月至 2004 年 7 月期间该监测孔在 27.5 m 处,向 $NE52^\circ$ 方向累积变形位移达 60.8 mm,变形速率 0.18 mm/d。说明白家包滑坡一直沿滑带持续蠕变

形。监测曲线发生突变的部位就是滑带的位置,这与勘探钻孔所揭露的滑带位置深度一致(图6)。

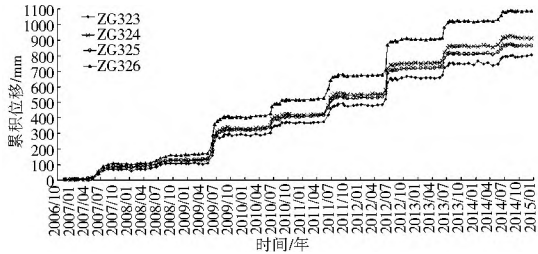


图5 白家包滑坡位移-时间监测曲线

Fig. 5 Accumulative displacement monitoring curves

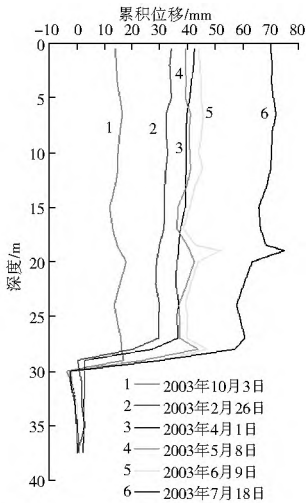


图6 白家包滑坡钻孔ZK2深部位移-时间监测曲线

Fig. 6 Lateral displacement versus depth curves

3 滑坡变形机理分析

根据其地形地貌分析,白家包滑坡属于老滑坡。控制该滑坡形成和发展的内部因素是地形地貌、地层岩性,以及地质构造等工程地质条件。而诱发滑坡复活的外部因素则是三峡库水位的升降以及大气降雨。这些外部的因素诱发并且加速了滑坡的变形与破坏。

白家包滑坡自2003年6月三峡大坝135 m蓄水后开始变形,7月在持续强降雨的作用下变形加剧。这是由于滑坡体物质在蓄水初期饱水后密实,坡体产生沉降,并且水下的坡脚调整,使得滑坡体变形滑动,之后滑坡一直蠕动变形。

2006年10月份之后,白家包滑坡表现出“阶跃”型的动态变形特性。通过图7可知,白家包滑坡的变形与三峡库水位下降这一外部因素具有很强的正相关关系。即在每年的5~7月份期间,三峡库水位从160 m下降至145 m,滑坡变形曲线出现突跃;而在每年8月份到第二年的4月份期间,滑坡的变形曲线确趋于平缓,充分表现出典型的“阶跃”型的

动态变形特性。

图8表示了白家包滑坡的变形速率与三峡水库水位升降速率两者之间的相互关系。由图可知,自2007年开始,特别是在2009年到2014年期间,在每年的6月中旬,三峡水库水位平均下降速率达到了最大(0.3~0.5 m/d)。而在此时间段内,白家包滑坡的变形速率也达到了最大。例如在2012年6月20日,滑坡的变形速率达到了5.89 mm/d。在每年的9~10月份期间,虽然三峡水库水位的上升速率达到了最大值(0.5~0.6 m/d),但是滑坡的变形速率却很小。这充分说明了三峡水库水位的下降这一外部因素对白水河滑坡的变形影响比较大,并且三峡水库水位下降的速率越大,白家包滑坡的变形速率也就越大。

综合上述分析,白家包滑坡由于其滑坡体的物质成分主要为含砾黏性土,它的渗透性能比较差。当三峡水库蓄水的时候,地下水向滑坡体内的渗透比较缓慢,这样三峡库水位与滑坡体内地下水位之间就形成了负的落差,对坡脚形成反压作用,就有利于滑坡体的稳定。而当三峡水库退水的时候,地下水就向水库排水,但由于滑坡体的渗透性能比较差,地下水排水的过程就比较缓慢,就形成了地下水与库水位的正落差,渗透压力指向坡体外侧,不利于坡体稳定。特别是在三峡库水位下降速率比较大的时候,滑坡就表现出了“弱透水-滞后型”的滑坡变形特性,在监测曲线上就显示出典型的“阶跃型”特征。

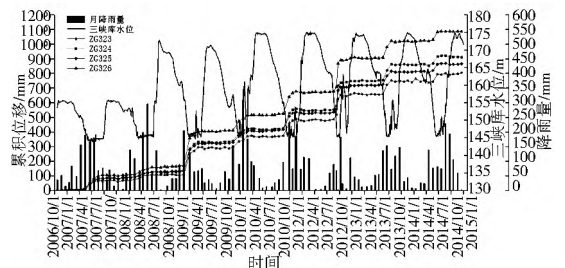


图7 滑坡位移-库水位-降雨量的相互关系曲线

Fig. 7 The correlation curves of accumulative displacement, rainfall and reservoir water level

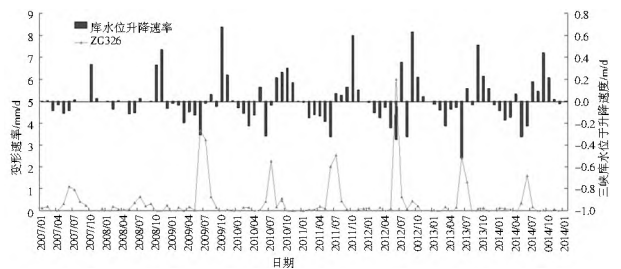


图8 滑坡变形速率-库水位升降速率相互关系

Fig. 8 The correlation curves of displacement rate and reservoir water level change rate

另外, 大气降雨这一外部因素对白家包滑坡的变形也有影响。当大气降雨渗入到滑坡体之后, 滑坡体的自重增大, 孔隙渗透压力也增加, 滑带土会被软化, 抗剪强度降低, 使得滑坡体稳定性降低。图 7 显示出滑坡变形与降雨量之间的相关关系, 说明滑坡变形与大气降雨之间也存在明显的正相关关系。

综合分析表明, 库水位下降对白家包滑坡的稳定性产生了重要影响, 大气降雨也有一定的影响。并且在三峡水库水位下降的过程之中, 如果出现较大的大气降雨, 滑坡的稳定性会受到更加不利的影响, 滑坡将会加剧变形。

依据白家包滑坡十多年的专业监测成果, 通过其动态变形特征及变形机理的分析可知, 白家包滑坡稳定性较差, 且滑坡的边界裂缝已基本贯通, 在库水下降和强降雨的双重作用下, 滑坡将会产生大规模的滑动变形破坏。

4 结论

滑坡在变形演化过程中, 由于遭受到库水位升降、汛期降雨等周期性外界因素的影响, 其变形时间曲线呈阶梯状, 滑坡变形表现出“阶跃型”动态演化特征。阶跃型滑坡岩土体渗透性能较差, 当水库退水时, 坡体内地下水向水库排水缓慢, 滞后于水库水位下降, 坡体内形成较高的渗透水力压力, 使得坡体稳定性急剧降低, 滑坡将会发生很大的变形。因而在每年三峡水库水位下降期间, 库区范围内的很多滑坡的变形就会剧烈增大, 表现出阶跃型动态变形演化特征。白家包滑坡就是典型的阶跃型滑坡, 具有汛期变形剧增, 非汛期变形减缓的动态变形特征。

因此, 根据地质调查、勘探, 以及丰富的滑坡专业监测资料, 通过地质分析, 阐明了阶跃型滑坡的动态变形特征和机理, 对于该类型滑坡变形破坏的预测预报, 具有重要的理论和现实意义。

参考文献(References):

- [1] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 长江三峡库区地质灾害成因与评价研究[M]. 北京: 地质出版社, 2007. (LIU Chuanzheng, LIU Yanhui, WEN Mingsheng, et al. Study and evaluation on the causes of geological hazard in the Three Gorges Reservoir area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [2] 殷跃平, 吴树仁, 等. 滑坡监测预警与应急防治技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (YIN Yueping, WU Shuren, et al. Study on the monitoring and predicting and Emergency control technology of landslide [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 易武, 孟召平, 易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (YI Wu, MENG Zhangping, YI Qinglin. Theory and method of landslide stability prediction in the Three Gorges Reservoir area [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [4] 王尚庆, 陆付民, 徐进军. 三峡库区崩塌滑坡监测预警与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (WANG Shangqing, LU Furmin, XU Jirun. The Monitoring Prewarning and Project about Collapse Landslide in Three Gorges Reservoir Region [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [5] 王孔伟, 李建林. 三峡库区构造与地质灾害关系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012. (WANG Kongwei, LIN Jianglin. The relations on the Three Gorges Reservoir structure and geologic hazard [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese))
- [6] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112. (XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space time evolution laws and early warning prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1104-1112. (in Chinese))
- [7] 李德营. 三峡库区具台阶状位移特征的滑坡预测预报研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. (LI Deying. Prediction study of landslides with step like deformation in the Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese))
- [8] 李德营, 殷坤龙. 三峡库区滑坡台阶状位移趋势预测的警戒速度方法[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 98-101. (LI Deying, YIN Kunlong. Alert velocity method for landslides with step like deformation in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 98-101. (in Chinese))
- [9] 汤罗圣, 殷坤龙, 杜鹃. 阶跃型位移特征滑坡时间预测预报研究[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 106-110. (TANG Lusheng, YIN Kunlong, DU Juan. Time prediction for landslides with step style displacement characteristic [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(4): 106-110. (in Chinese))
- [10] 彭令, 牛瑞卿. 三峡库区白家包滑坡变形特征与影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 1-7. (PENG Ling, NIU Ruiqing. Analysis on deformation characteristics and influential factors of Baijiabao landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 1-7. (in Chinese))
- [11] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机理分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1123-1130. (LU Shuqiang, YI Qinglin, YI Wu, et al. Analysis on deformation and failure mechanism of Shuping landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1123-1130. (in Chinese))
- [12] WANG, Farwu, ZHANG Yeming, HUO, Zhitao, et al. Movement of the Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China [J]. Landslides, 2008, 5: 321-329.

- [13] LI De ying, YIN Kur long, Chin Leo. Analysis of Baishuihe landslide influenced by the effects of reservoir water and rair fall[J]. Environ Earth Sci, 2010, 60: 677-687.
- [14] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 库水下降作用下滑坡动态变形机理分析-以三峡库区白水河滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 869-875. (LU Shu qiang, YI Qing lin, YI Wu, et al. Study on dynamic deformation mechanism of landslide in drawdown of reservoir water level-take baishuihe landslide in Three Gorges Reservoir Area for example[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 869-875. (in Chinese))
- [15] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区卧沙溪滑坡变形失稳机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 21-25. (LU Shu qiang, YI Qing lin, YI Wu, et al. Analysis on deformation and failure mechanism of Woshaxi landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 21-25. (in Chinese))
- [16] 三峡大学土木与建筑学院. 三峡库区秭归县典型滑坡专业监测预警成果报告[R]. 宜昌: 三峡大学土木与建筑学院, 2014. (College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University. Research report on professional monitoring and early-warning of typical landslide in Zigui County in the Three Gorges Reservoir Area[R]. Yichang: College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, 2015. (in Chinese))
- [17] 黄波林, 陈小婷. 香溪河流域白家堡滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 938-942. (HUANG Bo lin, CHEN Xiaoting. Deformation failure mechanism of Baijiaobao landslide in Xiangxi River Valley[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 938-942. (in Chinese))
- [18] 陈小婷, 黄润秋. 湖北省香溪河流域白家堡滑坡稳定性分析与评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 29-33. (CHEN Xiaoting, HUANG Run qiu. Stability analysis of Baijiabao Landslide in Xiangxi River Valley, Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 29-33. (in Chinese))
- [19] 陈小婷, 黄波林. 香溪河流域白家堡滑坡变形监测初步分析[J]. 华南地质与矿产, 2004, 20(3): 55-58. (CHEN Xiaoting, HUANG Bo lin. Monitoring and deformation analysis of Baijiaobao landslide in Xiangxi river valley[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2004, 20(3): 55-58. (in Chinese))
- [8] 刘海峰, 易鸣, 谢建波, 等. 南水北调中线强膨胀土微观结构特征及工程特性[J]. 人民长江, 2014, 45(6): 67-70. (LIU Hair feng, YI Ming, XIE Jian bo, et al. Microstructure and properties of strong expansive soil in South to North Water Transfers Project[J]. Yangtze River, 2014, 45(6): 67-70. (in Chinese))
- [9] 陈宇龙. 云南膨胀土的微观结构特征[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增1): 334-339. (CHEN Yu long. Microstructure of expansive soil from Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(sup 1): 334-339. (in Chinese))
- [10] 赵彤, 崔可锐, 周阳. 安徽省膨胀土的中微观结构研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(7): 831-834. (ZHAO Tong, CUI Ke rui, ZHOU Yang. Research on meso structure and micro structure of expansive soil in Anhui Province[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2014, 37(7): 831-834. (in Chinese))
- [11] 朱豪, 王柳江, 刘斯宏, 等. 南阳膨胀土膨胀力特性试验[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 11-14. (ZHU Hao, WANG Liu jiang, LIU Si hong, et al. Experimental Study of the swelling force of Nanyang expansive soils[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 11-14. (in Chinese))
- [12] 瞿剑华. 南水北调东线徐州段泵站膨胀土地基工程性质研究[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(5): 18-20. (ZI Jian hua. Expansive foundation of the pumping station at Xuzhou section in the South to North Water Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(5): 18-20. (in Chinese))
- [13] 董忠萍, 黄定强, 刘家明, 等. 引江济汉工程渠道膨胀土分类及工程处理[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 14-18. (DONG Zhong ping, HUANG Ding qiang, LIU Jia ming, et al. Classification and engineering treatment of expansive soil in the channels of the Yangtze River Hanjiang River Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 14-18. (in Chinese))
- [14] 何运龙, 刘晓琪, 郗国增, 等. 河北磁县膨胀岩(土)现场鉴别方法[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 198-200+137. (HE Yu long, LIU Xiao qi, XI Guo zeng, et al. Research on field identification method of swelling rock (soil) in Ci County of Hebei[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 198-200+137. (in Chinese))
- [15] 李东森, 夏熙临, 陈丛丛, 等. 石灰、水泥及砂改性膨胀土工程特性的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 25-27+46. (LI Dong sen, XIA Xi lin, CHEN Cong cong, et al. Experimental Study on engineering characteristics of expansive soils modified with lime, cement and sand[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 25-27+46. (in Chinese))
- [16] 肖杰, 王保田, 孙衣春, 等. 水泥石灰复合改良膨胀土试验[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 9-13. (XIAO Jie, WANG Bao tian, SUN Yi chun, et al. Experimental study on the stabilized lime cement expansive soils[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 9-13. (in Chinese))
- [17] 李红炉, 徐秋达. 水泥改性膨胀土干密度与自由膨胀率试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 216-219. (CHEN Hong lu, XU Qiu da. Experimental study on dry density and free swelling ratio of cement treated expansive soil[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 216-219. (in Chinese))

(上接第 114 页)