

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0036

邓茂林,易庆林,卢书强,等.三峡库区靠椅状土质滑坡变形规律及机理[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):135-143,151. DENG M L, YI Q L, LU S Q, et al. Study on the deformation law and mechanism of chair-shaped soil landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 135-143, 151. (in Chinese)

# 三峡库区靠椅状土质滑坡变形规律及机理

——以秭归八字门滑坡为例

邓茂林<sup>1,2,3</sup>, 易庆林<sup>1,2,3</sup>, 卢书强<sup>1,2,3</sup>, 韩蓓<sup>1,2,3</sup>

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**三峡水库蓄水以来,不少滑坡监测位移一时间曲线呈阶跃变化,导致稳定状态识别难度较大,严重影响滑坡预警预报,靠椅状土质滑坡尤为明显。以八字门滑坡为例,通过多次野外地质调查、长期现场巡查、10多年的GPS位移监测数据、2年多全自动监测数据等,较深入研究了该滑坡在库水涨落及降雨条件下的变形规律。结果表明,库水位下降期间,特别是库水位下降15 m以后,由160 m下降至145 m,滑坡体变形存在20 d左右的滞后,滑坡变形曲线出现突跃,日位移量达1.5~2.2 mm。一次降雨量在80 mm以上会明显诱发坡体加速。库水位上升期间,库水位在175 m左右时,月位移量出现5~10 mm负值。一次降雨量在150 mm左右未能诱发坡体加速;但一次降雨量在200 mm以上,滑坡体位移速度明显加大。滑坡体在降雨量诱发后,位移加速后在降雨结束后持续5~7 d恢复正常水平。在周期性降雨和库水位涨落的循环作用下,滑坡体反复受到“推一拉”作用,导致滑坡的位移一时间曲线呈阶跃特征。靠椅状土质滑坡为一类特殊的滑坡,库水位升降是八字门滑坡目前变形的主要因素,而降雨对滑坡变形起到了促进作用。受靠椅状等坡体结构特征制约,在库水位升降作用下坡体会反复变形,但难以发生快速的整体破坏。

**关键词:**靠椅状土质滑坡;台阶状变形;八字门滑坡;库水位升降;变形规律

中图分类号:P642 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on the deformation law and mechanism of chair-shaped soil landslide in Three Gorges Reservoir area ——Taking the landslide of Baguamen in Zigui as an example

DENG Maolin<sup>1,2,3</sup>, YI Qinglin<sup>1,2,3</sup>, LU Shuqiang<sup>1,2,3</sup>, HAN Bei<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. National Field Scientific Observation and Research Station of the Three Gorges Landslide of the Yangtze River, Hubei Province, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

收稿日期:2019-04-22 修回日期:2019-08-30 网络出版时间:2019-09-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190906.0940.006.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504803);国家青年科学基金(41502291;41602301);防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2018KJZ03);三峡库区地质灾害教育部重点实验室基金(2017KDZ07);湖北省自然科学基金(2018CFB654)

作者简介:邓茂林(1980—),男,四川达州人,讲师,博士,主要从事地质灾害预测与防治方面的教学与研究。E-mail:dm1top@163.com

通信作者:卢书强(1973—),男,河南人,副教授,博士,主要从事地质工程方面的教学与研究。E-mail:Lsq2197@163.com

**Abstract:** Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir, the displacement-time curve of many landslides has shown a step change, which makes it difficult to identify the steady state and seriously affects the landslide early warning and prediction. The chair-shaped soil landslide is particularly obvious. Taking the Bazimen landslide as an example, this paper studied the landslide in the reservoir water through multiple field geological surveys, long-term on-site inspections, GPS displacement monitoring data obtained for more than 10 years and additional 2 years of fully automatic monitoring data. Deformation law under fluctuations and rainfall conditions were studied in depth. The results showed that during the decline of reservoir water level, especially after the water level dropped by 15 m, it decreased from 160 m to 145 m, and the landslide body deformation would have a lag of about 20 d. The landslide deformation curve suddenly jumped and the daily displacement reached 1.5 mm to 2.2 mm. When the rainfall occurred more than 80 mm it obviously induced the acceleration of the slope. During the escalation of the reservoir water level, the reservoir water level was around 175 m and the monthly displacement have a negative value of 5 to 10 mm. When rainfall was about 100 mm, it failed to induce the acceleration of the slope. But once the rainfall was above 200 mm, the displacement speed of the landslide body increased significantly. After the rainfall was induced, the landslide body accelerated to a normal level after 5-7 days of rain. Under the cyclical action of periodic rainfall and reservoir water level fluctuation, the landslide body was repeatedly subjected to the "push-pull" effect, resulting in the step-time curve of the landslide's displacement-time curve. The chair-like soil landslide was a special type of landslide. The increased and decrease of the reservoir water level was the main factor of the current deformation of the Bazimen landslide, and the rainfall has promoted the deformation of the landslide. Restricted by the structural characteristics of the chair and other slopes, the slope would be repeatedly deformed under the elevation of the reservoir water level, but it was difficult to cause rapid overall damage.

**Key words:** chair-like soil landslide; a stepped pattern displacements; Bazimen landslide; reservoir water level rise and fall; law of deformation

水库滑坡变形破坏是大坝建设并因蓄水诱发的一种地质灾害<sup>[1]</sup>。国内外许多学者对水库诱发的岸坡(滑坡)进行了深入研究。三峡工程建成后,针对2003年7月发生在秭归县沙镇溪镇的千将坪滑坡,汪发武<sup>[2]</sup>研究了其基本特征、形成机理,肖诗荣<sup>[3]</sup>对该滑坡的地质力学模式进行了深入分析。时卫民等<sup>[4]</sup>对库水位下降情况下滑坡的稳定性分析,认为在库水位下降过程中,坡体下1/3处为最危险的水位,稳定系数最小。刘才华等<sup>[5]</sup>指出水库蓄水初期,孔隙水压力使边坡稳定性降低,滑动面强度参数弱化,可能导致滑坡。李松林等<sup>[6]</sup>对库水位升降作用下不同滑面形态老滑坡响应规律进行了深入研究。三峡库区不少滑坡每年随着库水位升降而发生变形,比如:树坪滑坡<sup>[7]</sup>、白水河滑坡<sup>[8]</sup>、八字门滑坡<sup>[9-10]</sup>、白家包滑坡<sup>[11-12]</sup>等,随着库水位升降每年都发生变形,累计位移曲线呈“台阶”状发展。位移曲线是判断滑坡的发展及稳定状态的重要依据;滑坡呈“台阶”状的累计位移曲线,让人们对于滑坡发展趋势的预判、稳定性判断和预警感到十分困惑、甚至出现误判。

三峡库区有一类滑坡剖面形态成“靠椅状”土质滑坡,前缓后陡,滑床为斜内倾基岩,滑面为基覆界面交界面。滑坡变形量较大、裂缝展布圈闭状态,滑坡宏观变形为疑似“临滑”迹象,三峡库区秭归县白

家包滑坡和八字门为这类靠椅状滑坡典型代表。作者参加“三峡库区秭归县地质灾害监测预警工程”项目多年,在三峡库首区(秭归县)进行了大量野外调查工作,也获得了该滑坡10多年人工监测数据和2年多的全自动位移监测数据。结合长期的监测数据和现场野外巡查,分析八字门滑坡为代表的靠椅状土质滑坡的变形特征,阐述库水、降雨对滑坡变形的影响,揭示八字门滑坡变形的诱发机制<sup>[13]</sup>,为这类滑坡的预警预报提供理论基础和技术支撑。

## 1 八字门滑坡概况

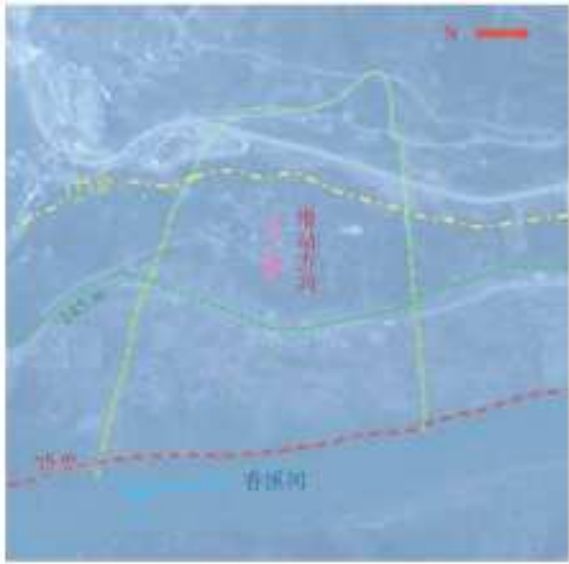
八字门滑坡位于三峡库区湖北省秭归县归州镇,长江北岸支流香溪河右岸近河口处<sup>[14]</sup>。香溪河近南北走向,与长江近于直交,三峡水库已淹没滑坡体前缘65~145 m段,见图1和图2。

滑坡体呈撮箕状,分布高程139~280 m(原始下部分布高程为55 m,2003年6月三峡水库蓄水至135~139 m,淹没滑体下部)西高东低,向东倾斜,滑体地面坡度 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,呈阶梯状起伏<sup>[15]</sup>。滑坡体有二级平台,即前缘平台和后缘平台,分布高程分别为139~165 m和220~230 m,滑坡体南北两侧及后缘边界为岩土接触面,前缘临空面为长江支流香溪河,水上部分滑坡体长380 m,宽100~500 m,厚10~35 m,体积约400万 $\text{m}^3$ <sup>[15]</sup>,见图1。剖面形态

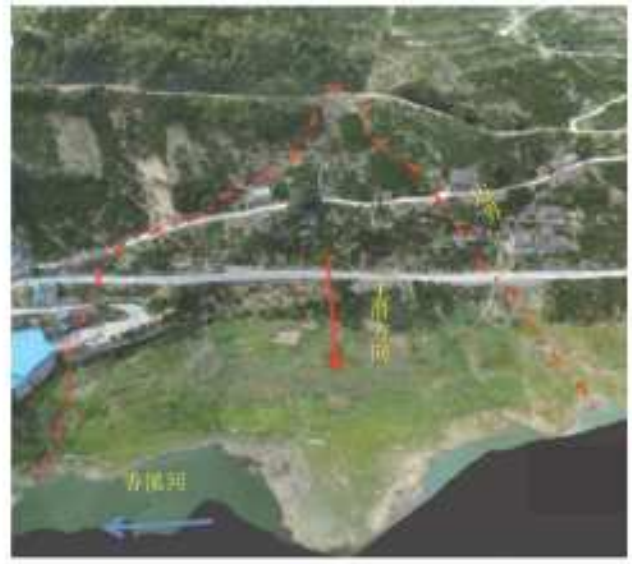
为靠椅状土质滑坡,见图 2。

滑坡体发育于侏罗系香溪组(J<sub>1x</sub>)紫红色石英砂岩、页岩、棕色砂岩及燧石砾石组成的逆向斜坡

中,该岩层构成滑体滑床,岩层产状 292°∠29°。据文献[16-17],八字门滑坡滑带、滑体及滑床的重度、密度、渗透系数及抗剪强度等参数,见表 1。



(a) 八字门滑坡蓄水前Google影像(2003年1月)



(b) 八字门滑坡蓄水后三维无人机影像图(2018年8月)

图 1 八字门滑坡全貌影像

Fig. 1 Image of the Bazimen landslide

表 1 八字门滑坡物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of Bazimen landslide

指标名称	滑带	滑体		滑床
		粉质黏土夹碎石	碎石土	
天然含水量/%	18.7	18.4		
重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	天然	19.88	19.23	19.38
	饱和	20.43	20.09	20.21
比重	2.73	2.71		
孔隙比	0.6	0.65		
渗透系数	/(10 <sup>-6</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	2.8	31.6	52.7
	/(m·d <sup>-1</sup> )	0.002 4	0.027 3	0.045 5
非饱和快剪	内聚力/kPa	17.6	25	21
	内摩擦角/°	17	19	30
残余剪	内聚力/kPa	14.89		
	内摩擦角/°	12.30		
抗压强度	天然/MPa			17.3
	饱水/MPa			14.5

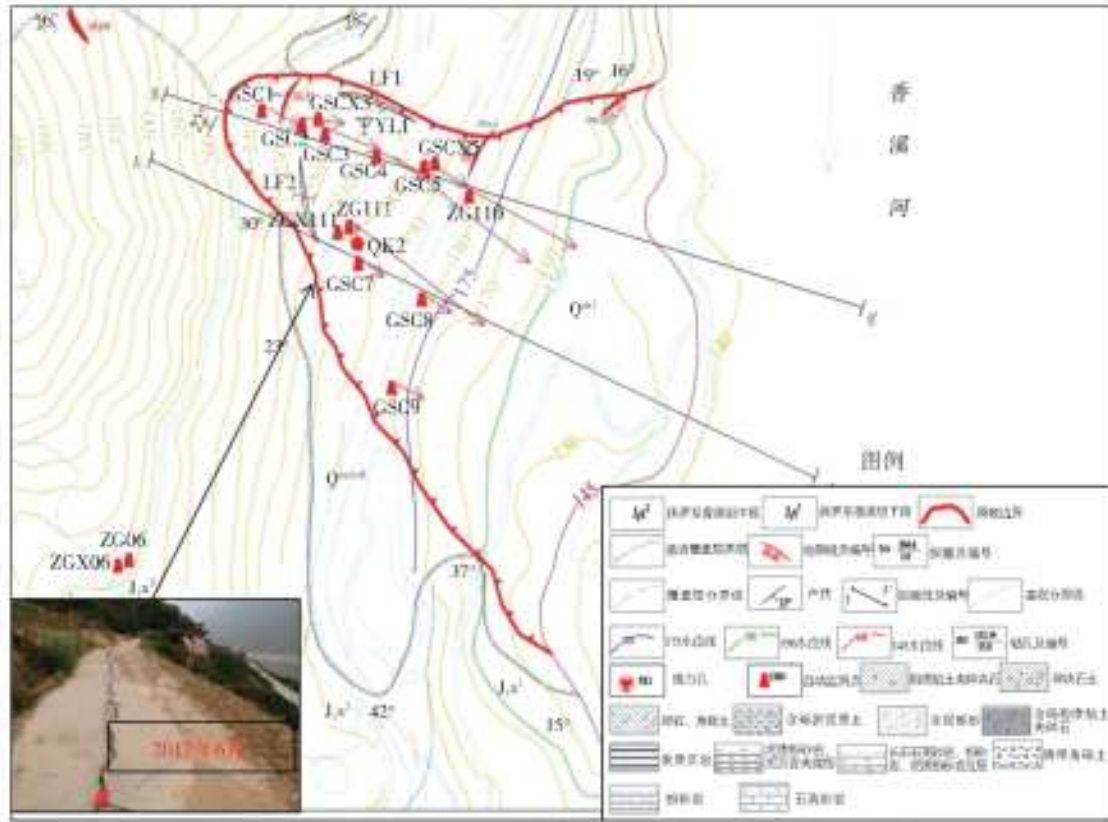
## 2 现场宏观巡查与监测系统

现场调查研究是工程地质问题分析和评价的基础和起点<sup>[16-17]</sup>。受“三峡库区秭归县地质灾害监测预警工程”项目支持,近 10 年每月都会到滑坡现场进行变形宏观巡查和调查访问,滑坡体 1982 年复活,在高程 80~125 m 处发育 4 条长 60~80 m、近平行于香溪河的裂缝,其变形部位已淹没于库水位以下<sup>[14]</sup>。1983 年再次出现裂缝,1987 年长江洪峰

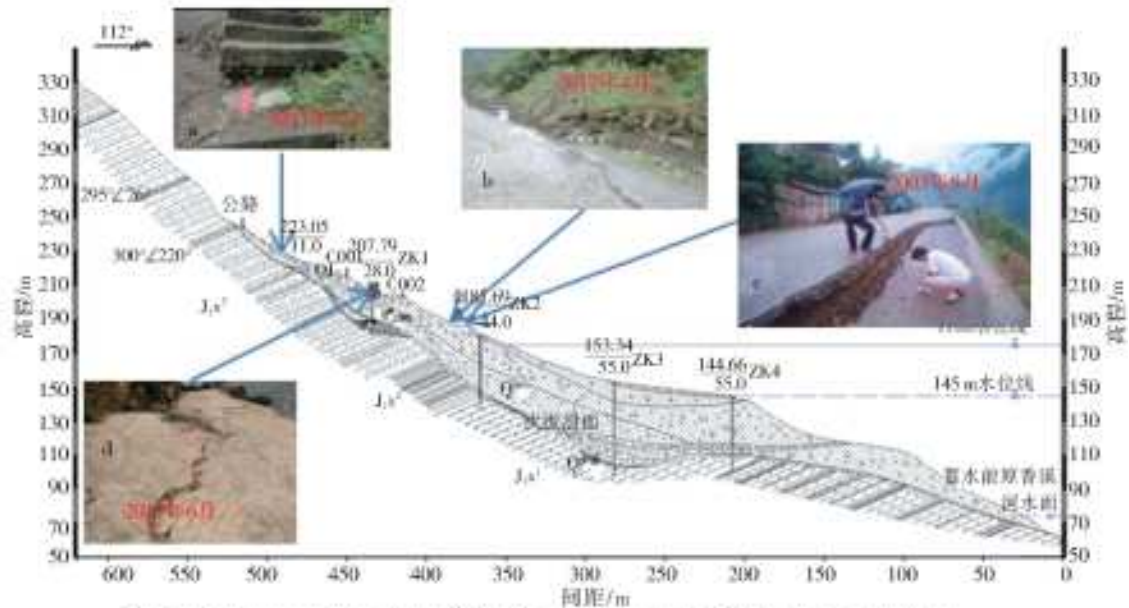
期间,在 155 m 处建筑物被撕裂,公路变形<sup>[14]</sup>。2003 年 6 月三峡大坝蓄水以来,八字门滑坡变形一直持续不止,主要发生在 2003 年 7 月、2005 年 7 月至 10 月、2009 年 6 月、2010 年 6 月和 7 月、2011 年 7 月、2012 年 6 月、2013 年 6 月、2014 年 7 月、2015 年 6 月,裂缝主要展布于公路、后缘、滑坡两侧和消落带等位置。三峡大坝蓄水后,八字门滑坡每年出现较大变形主要集中在 6 月、7 月,也就是库水位下降过程的中后期。

为了全面掌握八字门滑坡变形及研究变形机制,在滑坡体上建立了监测系统,见图 2。八字门滑坡属于三峡库区二期专业监测灾害点,八字门滑坡上布置了 10 个 GPS 变形监测点,滑体外围布设 2 个基准点。八字门滑坡现有 ZG110、ZG111 及 GSC1、GSC2、GSC3、GSC4、GSC5、GSC7、GSC8、GSC9 共 10 个 GPS 监测点,其中 ZG110、

ZG111 为 2003 年开始监测,其余的监测点均从 2013 年 9 月开始监测。在 4 个 GPS 监测点处分别布设测斜、地下水位监测孔各 3 个。2016 年在滑坡体上布置了 CX003、CX005 和 ZG111 等 3 个全自动地表位移监测仪,已从 2016 年 4 月开始运行并获取数据。



(A) 工程地质平面图及监测布置: 左下角小图为滑坡右侧边界裂缝



a. 后部拉断的小道; b. 公路内侧西土坎倾倒、垮塌; c. 公路拉裂、下沉(2007); d. 中上部公路拉裂

(B) 工程地质剖面图及监测布置剖面

图 2 工程地质平、剖面图及监测布置

Fig. 2 Engineering geological level, profile and monitoring layout

### 3 监测数据分析

#### 3.1 GPS 监测结果分析

三峡水库自 2003 年水位蓄水到 135 m,2006 年蓄水到 156 m,2008 年蓄水到 175 m 以后,库水位每年在 145~175 m 升降,见图 2。随着库水位的升降,八字门滑坡变形对库水位升降产生了明显的响应。本文以监测点 ZG110、ZG111 为例对八字门滑坡变形规律进行分析。

通过图 3 和监测数据可知,在每年 5—7 月,三峡库水位已经下降 15 m 以后,由 160 m 下降至 145 m,滑坡变形曲线出现突跃,滑坡月位移量为 20~150 mm,大部分 50 mm 左右,为一年中最大值,充分表现出典型“阶跃”型的动态变形特性。而在每年 8 月份到第 2 年 4 月份期间,月位移量基本都在 10 mm 以下,滑坡的变形曲线变得平缓;在 11 月至第 2 年 2 月(集中在 1、2 月),库水位为 175 m 左右时,位移变形曲线出现轻微下滑,月位移

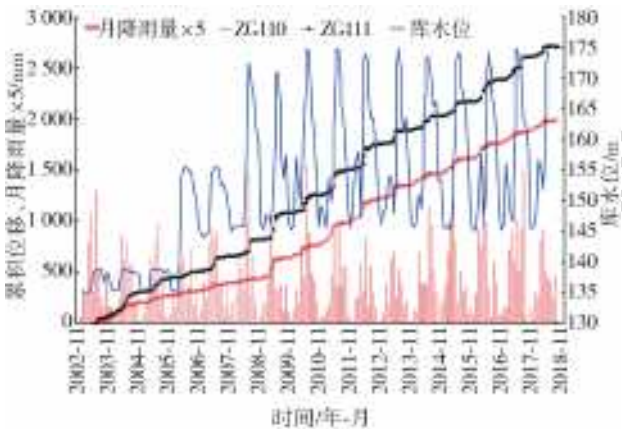


图 3 监测点累积位移—库水位—降雨量曲线 (2003年7月—2018年12月)

Fig. 3 Cumulative displacement of monitoring points-Reservoir water level-rainfall coupling curve



图 4 监测年度位移—降雨量变化曲线 (2003年7月—2017年12月)

Fig. 4 Monitoring annual displacement-rainfall curve

量为 0~20 mm 负值。据图 4—图 6 和监测数据可知,2009 年库水位首次蓄水到 175 m 后,6 月、7 月出现了自监测以来的最大的位移阶跃,月位移激增了 70~130 mm,合计为增加 150~220 mm。

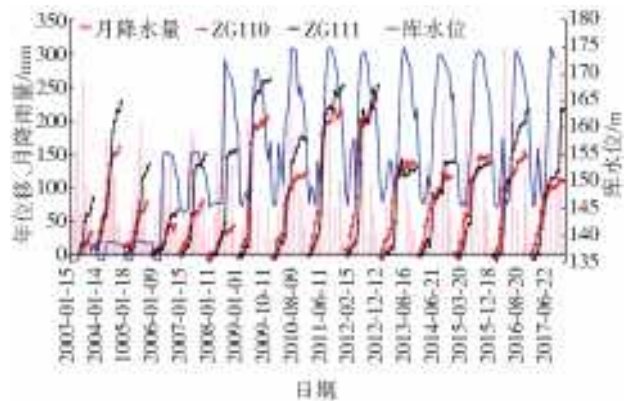


图 5 监测库水位—降雨量—年度位移变化曲线 (2003年7月—2018年12月)

Fig. 5 Monitoring annual displacement-reservoir water level-rainfall curve

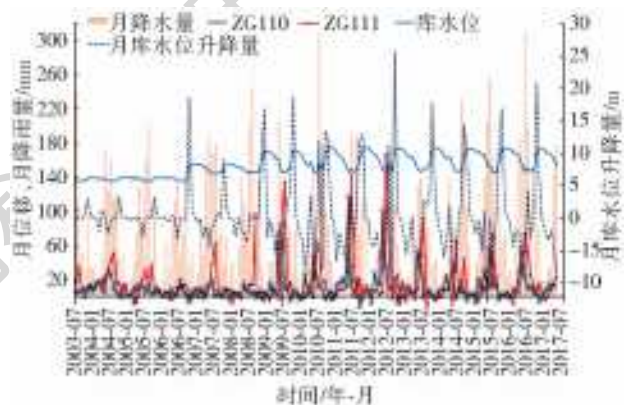


图 6 监测点月位移—库水位—降雨量曲线 (2003年7月—2017年7月)

Fig. 6 Monthly displacement-reservoir water level-rainfall curve

#### 3.2 全自动监测仪监测结果

八字门滑坡全自动位移监测点 ZGX111、GSCX3 和 GSCX5 自 2016 年 5 月 15 日到 2018 年 12 月 15 日累计位移持续增加,分别为 890.3、620.4 和 590.4 mm,自动监测点 GSCX3 位置更靠近滑坡边界,位移量明显偏大,见图 7;为了与全自动监测位移作对比,选取相同时间段(2016 年 5 月 15 日到 2018 年 12 月 15 日)对应位置的人工 GPS 监测点 ZG111、CX003 和 CX005 的位移分别为 530.24、596.52 和 559.34 mm,与自动 GPS 监测数据基本一致,说明监测数据是准确的。

从图 7(b)和原数据中可以得知,八字门滑坡在 2016、2017 和 2018 年都出现了明显位移的“跃阶”。为了更准确的分析库水位对滑坡变形的影响,选取 2017 年 10 月 20 日至 2018 年 10 月 20 日期间作为一个库水位升降水文年进行分析,这个

水文年降雨较少,期间自动监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 总位移分别为 163.9、134.5 和 128.9 mm。将完整的库水位升降水文年划分为①高水位运营期、②库水位下降期、③低水位运营期、④库水位上升期等 4 个阶段。在①阶段高水位运营期,在 2017 年 11 月 2 日—2017 年 11 月 30 日,库水位上升后库水位基本达最大值附近期间,自动监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 位移分别为 -2.3、-2.8 和 -2.9 mm,位移明显的向坡体内移动,上升期间的库水位形成的水头将滑坡体

向内推,形成较小的位移,见图 7(b)中①对应的位置。向坡体内的位移现象在历年的人工监测中也有明显的体现。在②阶段库水位下降期(2018 年 1 月 10 日至 2018 年 6 月 12 日),位移有较明显的变化是在 2018 年 2 月 21 日至 2018 年 3 月 14 日期间的 21 d 内,库水位由 168.41 m 下降到 163.5 m,自动监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 位移分别 17.5、20.0 和 17.9 mm,位移量达每天 1 mm 左右,库水位下降速率为 0.1 m/d 下降了约 4.5 m 后发生。

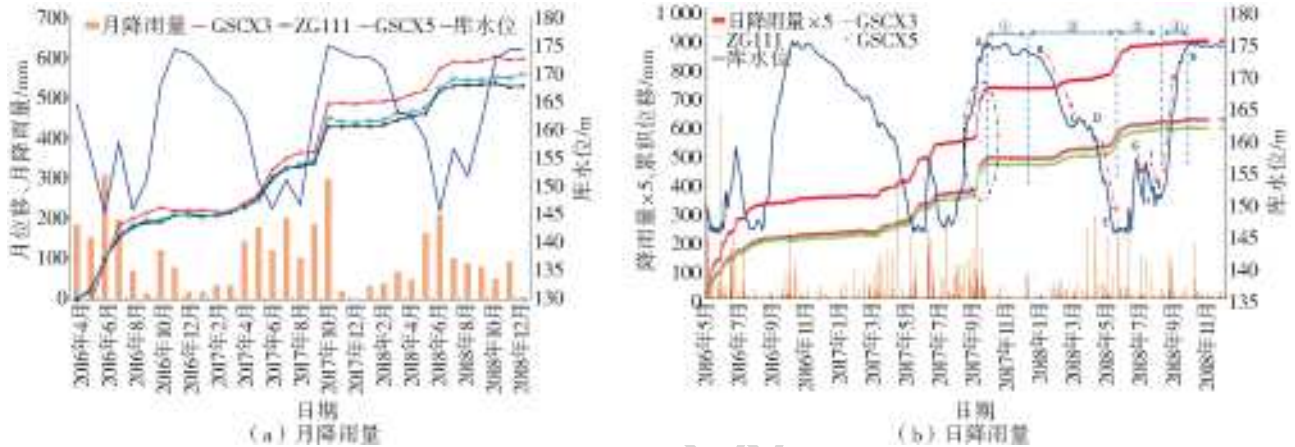


图 7 累计位移—库水位—降雨量曲线(2016 年 5 月 15 日—2018 年 12 月 27 日)

Fig. 7 displacement-library water level-rainfall curve

在②阶段库水位下降期 D→E(即 2018 年 5 月 4 日至 2018 年 6 月 8 日),库水位的下降速率明显增大到 0.39 m/d,对应的位移加速在 22 d 后启动(2018 年 5 月 26 日),这种位移的加速在库水位达最低值后还持续了 29 d(即 2018 年 7 月 10 日)结束。在 2018 年 5 月 26 日至 2018 年 7 月 10 日期间的 46 d 内,自动监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 位移分别为 99.6、72.9 和 71.2 mm,平均位移达 1.55~2.17 mm/d。由此可以看出,库水位下降的速率对滑坡变形的位移速率成明显的正相关。

在③阶段的低水位运营期间,也出现了两次库水位下降,在图 7(b)-③中 G→H(2018 年 7 月 21 日至 2018 年 8 月 2 日)的 13 d 期间,库水位由 156.50 m 到 150.80 m 下降了 5.96 m,自动监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 位移增量仅为 2.10、1.80 和 0.80 mm,日平均速率为 0.16、0.14 和 0.06 mm/d,未形成明显的位移。在 I→J(2018 年 8 月 8 日至 2018 年 8 月 2 日)期间的 17 d,库水位由 156.13 m 到 149.34 m 下降了 6.79 m,自动监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 位移增量仅为 3.50、4.60 和 4.10 mm,日平均速率为 0.19、0.26 和 0.23 mm/d,未形成明显的位移跃阶。究其原因,两次库水位下

降后,库水位都有及时的上升,滑坡体未来得及应力调整,没有形成变形跃阶,见图 7(b)。

在④阶段库水位上升期, J→K(2018 年 8 月 25 日至 2018 年 10 月 31 日)期间的 68 d,库水位由 150.06 m 上升到 174.95 m,上升了 24.89 m,监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 位移增量仅为 8.60、10.90 和 5.90 mm,平均位移速率为 0.13、0.16 和 0.09 mm,未形成明显的位移跃阶,见图 8。

由图 9 及原数据得知,在 2017 年 3 月 30 日至 2017 年 4 月 12 日的 12 d 时间段内,合计降雨量为 95.3 mm,最大日降雨量为 2018 年 4 月 9 日的 30.8 mm,在第 2 天形成明显的位移跃阶,监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 日位移量分别由原来的 0.70、0.70 和 0.90 mm 增加到 5.50、3.50 和 3.90 mm,位移速率逐渐减小,在第 6 天后恢复正常。2017 年 5 月 11 日降雨量为 82.00 mm,第二天也形成明显的位移跃阶,监测点 GSCX3、ZGX111 和 GSCX5 日位移量分别由原来的 0.00、-0.20 和 -0.20 mm 增加到 3.80、2.00 和 2.00 mm,位移速率逐渐减小,在第 7 天后恢复正常,见图 8。在库水位上升期间,2017 年 8 月 23 日至 2017 年 9 月 3 日降雨量合计为 100.80 mm,库水位由 146.92 m 上升到 151.35 m,滑坡体未出现明显的位移跃阶。在

2017年9月18日至2017年10月15日的28 d时间段内,库水位由162.88 m上升到174.08 m,合计降雨量为315.2.3 mm,最大日降雨量为2017年10月2日的64.4 mm,最大日位移为27.10 mm,合计位移为175.7 mm,见图8。滑坡体位移跃阶在2017年9月29日启动,这次降雨量110.6 mm时,监测点GSCX3、ZGX111和GSCX5日位移量达2.20、1.30和1.10 mm。究其原因,在7~20 d前(2017年8月23日至2017年9月10日),形成的142 mm的持续降雨和后面降雨的叠加,滑坡体位移跃阶启动。在库水位低位运营期(2018年5月26日至2018年7月10日)的46 d内,期间的最大日位移量为7.10、4.20和4.20 mm,成为一年中的位移量和位移速率最大的时间段,2018年5月30日和2018年5月31日降雨量分别为42.8和4.6 mm,两天降雨量合计为47.4 mm,未明显的诱发坡体位移加速,见图8。2018年6月18日和2018年6月19日降雨量分别

为55.4和38.4 mm,两天降雨量合计为93.8 mm,滑坡体位移速率由原来的1 mm/d增加到降雨后的第2天5 mm/d左右。

#### 4 八字门滑坡变形机理分析

通过以上的描述和分析,可以将八字门滑坡变形机制概括为以下几个方面。

##### 4.1 坡体结构和岩土特性是滑坡变形的基础

从坡体剖面结构角度分析,八字门滑坡纵剖面中部平缓上下较陡,为比较典型的靠椅状,消落带在滑坡坡面线陡缓交界处,见图2。土质古滑坡容易受到库水位或降雨的影响,而产生变形甚至破坏;但靠椅状土质滑坡中部的平缓段上覆土体对坡体起到了阻滑作用。八字门滑坡滑面上前部倾角为 $9^{\circ}\sim 17^{\circ}$ ,中部剖面倾角为 $-5^{\circ}$ 左右,对坡体起到了较明显的阻抗效果,后部倾角约为 $30^{\circ}\sim 49^{\circ}$ 为下滑段,见图2。

滑体物质为含砾石黏土,渗透性较差。当三峡水库蓄水时,水向坡体内渗透,库水位与滑坡体地下水水位形成负落差,反压坡体,有利于滑坡体稳定<sup>[18]</sup>。而当水库退水时,地下水向水库排水,由于坡体渗透性差,地下水排除缓慢,形成地下水与库水位的水头差,动水压力指向坡体外<sup>[18]</sup>。特别是在水位下降速度较大时,坡体内地下水位与库水位之间的落差达到最大,动水压力达到最强,从而引起滑坡一年中最为明显的位移变形<sup>[18]</sup>。因此,八字门滑坡总体上表现出弱透水滞后型滑坡的变形特征。

##### 4.2 库水位升降是八字门滑坡变形直接因素

库水位升降将直接导致岸坡地下水动力场的变化,三峡水库的蓄水采取陡升缓降。库水位的下降是许多库岸滑坡诱发的重要原因。库水位下降对坡体容重影响见图10,八字门滑坡的中部平缓段大部分在145 m以下,八字门滑坡滑带、滑体(粉质黏土夹碎石、碎石土)、滑床的渗透系数分别为0.002 4、0.027 3、0.045 5和0.067 2 m/d,八字门滑坡的渗透系数原小于库水位的升降速率。时卫民等<sup>[4]</sup>认为库水位下降时,影响坡体稳定的综合参数是 $\lambda$ , $\lambda$ 与坡体的渗透系数 $K$ 、给水度 $\mu$ 、库水下降速度 $V$ 、含水层厚度 $h_m$ 和下降高度 $h_t$ 有关。 $\lambda$ 越大,对坡体稳定越不利。在库水位下降过程中,水向坡体外渗透速率小于库水位的下降,产生动水压力效应,坡体在库水位下降期间产生明显变形。

在库水位上升期间,因八字门滑坡的坡体为含碎石黏土,渗透性较差。形成向坡内的水头差,反压

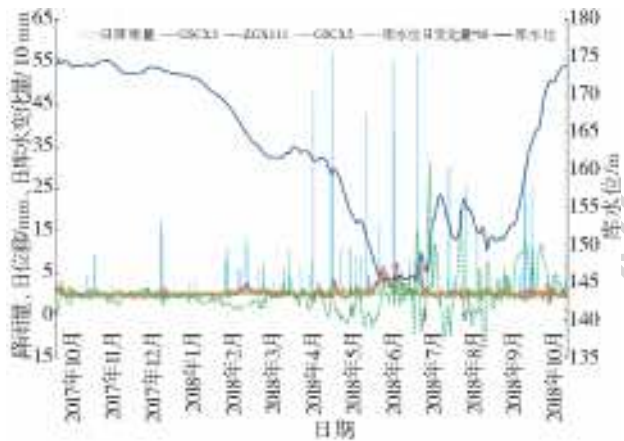


图8 全自动监测点日位移-库水位(日库水位升降)-日降雨量曲线(2017年10月20日—2018年10月20日)  
Fig. 8 Fully automatic monitoring point daily displacement-reservoir water level (day reservoir water level rise and fall)-daily rainfall curve

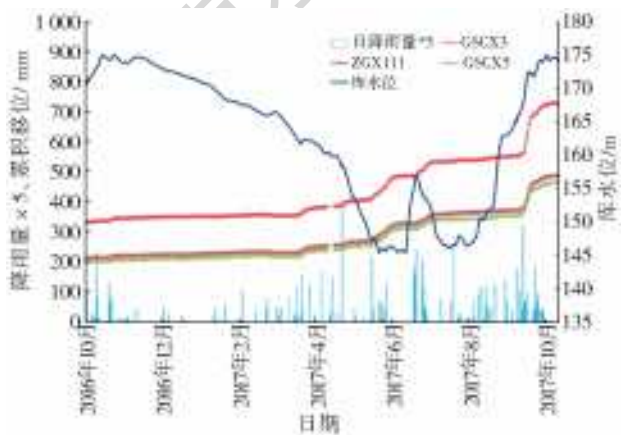


图9 自动监测点时间/位移-库水位-日降雨量曲线(2016年10月20日—2017年10月30日)

Fig. 9 Automatic monitoring point time/displacement-reservoir water level-daily rainfall curve

坡体,有利于滑坡体稳定;监测曲线每年 11 月到第 2 年 2 月每月监测点 5~10 mm 向坡内运动。

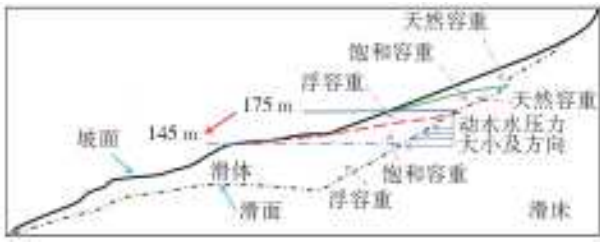


图 10 库水位下降过程中动水压力示意及容重变化

Fig. 10 Hydrodynamic pressure and volume change diagram during the process of reservoir water drop

### 4.3 大气降雨对滑坡变形的助推作用

滑坡变形主要发生在每年的降雨集中汛期(即 4 月—9 月),表现为位移速率峰值段与降雨量集中段、降雨强度峰值段在时间上较为吻合,尤其是 6、7 月份滑坡位移变形最大的时段,通常都伴随着集中和强度大的降雨过程。八字门滑坡变形与暴雨发生在时间上有吻合,但并非强相关。从图 3 和相关数据可以得到,2007 年 6 月、2008 年 7 月、2011 年 6 月滑坡位移变形量和速率达到该年度的最大值,而对应这三个时间段也的确出现了暴雨;2009 年 6 月、2012 年 6 月出现了监测过程中最大的两次较大的位移变形,但这两个时段并未出现暴雨。库水位上升期间,滑坡变形对降雨的敏感程度明显小于对库水上升的影响,比如 2014 年 8 月 31 日至 9 月 2 日的持续强降雨,滑坡并没有出现大的变形。

## 5 结 论

通过大量的野外地质调查和详细的地质勘查报告等,提出了在库水为升降及降雨作用下发生小变形的靠椅状土质滑坡类型,补充了滑坡的分类,为这类滑坡机理研究提供了基础。通过数据分析发现以八字门为典型代表的靠椅状土质滑坡,存在累计位移阶状特征,还出现了坡体向山体上移动现象。

(1)三峡库区秭归八字门滑坡剖面形态为“靠椅状”土质滑坡,变形具有明显的台阶状特征。滑坡变形对降雨、库水位升降的响应具有明显滞后效应。坡体结构和岩土体特性是滑坡变形的基础,库水位升降是八字门滑坡变形的主导因素,降雨对滑坡变形起到了一定的助推作用。

(2)库水位的下降速率明显大于八字门滑坡的渗透速度,产生的较大水头差,对坡体产生拉应力,从而坡体变形出现“跃阶”现象;在库水位上升的中后期,水位差产生向坡内的推力,出现了滑坡向滑坡滑移反方向移动的现象。八字门滑坡在每年 5—7

月,三峡库水位已经下降 15 m 以后,库水位降到 160 m 左右,由 160 m 下降至 145 m,滑坡变形曲线出现突跃,滑坡体的日位移量达到 1.5~2.2 mm/d,充分表现出典型的“阶跃”型的动态变形特性。库水位下降诱发滑坡体变形存在 20 d 左右的滞后。库水位上升期间,八字门滑坡在每年 8 月份到第二年 4 月份期间,滑坡的变形曲线确趋于平缓,位移形成平台,滑坡体的日位移量仅为 0.01~0.03 mm/d;特别是在 11 月至第二年 2 月(集中在 1、2 月),库水位在 175 m 左右时,变形曲线出现下滑现象,月位移量出现 5~10 mm 负值(即滑坡体向坡内移动)。

(3)降雨也会对靠椅状土质滑坡形成一定的影响。在库水位下降期间,一次降雨量在 80 mm 以上会明显加速滑坡体的位移速率,滑坡体变形速率的增加与降雨量有较明显的相关性。在库水位上升期间,一次降雨量在 100 mm 左右也难以引起滑坡体的位移产生明显加速;但一次降雨量在 200 mm 以上,滑坡体产生了明显的位移加速。滑坡体在降雨量达到阈值的第二天启动变形加速,位移加速后在降雨结束后持续 5~7 d 恢复正常位移速率。

因此,八字门滑坡为库水作用下的古滑坡复活,在周期性降雨和库水位涨落的循环作用下,滑坡体反复受到“推—拉”作用,导致滑坡的位移—时间曲线呈现台阶状阶跃特征。总体来说,库水位升降是八字门滑坡目前小变形的主要因素,而降雨促进了滑坡变形进一步发展。受靠椅状等坡体结构特征制约,在库水位升降作用下坡体会反复变形,但难以发生快速的整体破坏。

### 参考文献(References):

- [1] 魏进兵,邓建辉,高春玉,等.三峡库区泄滩滑坡非饱和渗流分析及渗透系数反演[J].岩土力学,2008,29(8):2262-2266. (WEI J B, DENG J H, GAO C Y, et al. Unsaturated seepage analysis and back analysis of permeability coefficient for Xietan landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2262-2266. (in Chinese)). DOI:10.16285/j.rsm.2008.08.017.
- [2] WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T, et al. The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2004, 1(2): 157-162. DOI: https://doi.org/10.1007/s10346-004-0020-6.
- [3] 肖诗荣,刘德富,胡志宇.三峡库区千将坪滑坡地质力学模型研究[J].岩土力学,2007,28(7):1459-1464. (XIAO S R, LIU D F, HU Z Y. Study on geomechanical model of Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7):



- 1459-1464. (in Chinese) ). DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2007.07.033.
- [4] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报,2004,3(3):76-80. (SHI W M,ZHENG Y R. Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,3(3):76-80. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2004.03.013.
- [5] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):769-773. (LIU C H,CHEN C X,FENG X T. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(5):769-773. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2005.05.018.
- [6] 李松林,许强,汤明高,等. 库水位升降作用下不同滑面形态老滑坡响应规律[J]. 工程地质学报,2017,25(3):841-852. (LI S L,XU Q,TANG M G,et al. Response patterns of old landslides with different slipsurface shapes triggered by fluctuation of reservoir water level[J]. Journal of Engineering Geology,2017,25(3):841-852. (in Chinese)) DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.032.
- [7] 卢书强,易庆林,易武,等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学,2014,35(4):1123-1130,1202. (LU S Q,YI Q L,YI W,et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(4):1123-1130,1202. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2014.04.013.
- [8] DU J,YIN K L,S. LACASSE. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides,2012,10(2):203-218. DOI:org/10.1007/s10346-012-0326-8.
- [9] 黄波林,陈小婷,彭轩明,等. 三峡库区香溪河段典型滑坡变形特征分析[J]. 水文地质工程地质,2007(4):10-12,30. (HUANG B L,CHEN X T,PEN X M,et al. Deformation characteristic analysis of representative landslides in Xiangxi River valley in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2007(4):10-12,30. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-3665.2007.04.004.
- [10] 张桂荣,程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学,2011(S1):476-482. (ZHANG G R,CHENG W. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water lever fluctuations and rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics,2011(S1):476-482. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2011.s1.052.
- [11] 卢书强,易庆林,易武,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(3):144-149. (LU S Q,YI Q L,YI W,et al. Characteristics and mechanism of dynamic deformation of Bai jia bao landslide with stepwise in Three Gorges Reservoir area [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology,2016(3):144-149. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.03.025.
- [12] 张华伟,王世梅,霍志涛,等. 白家包滑坡变形监测分析[J]. 人民长江,2006(4):95-97. (ZHANG H W,WANG S M,HUO Z T,et al. Study on deformation monitoring of Baijialao Landslide[J]. Yangtze River,2006(4):95-97. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-4179.2006.04.037.
- [13] 黄达,顾东明,陈智强,等. 三峡库区塔坪 H2 古滑坡台阶状复活变形的库水-降雨耦合作用机制. 岩土工程学报,2017,39(12):2203-2211. (HUANG D,GU D M,CHEN Z Q,et al. Hybrid effects of rainfall and reservoir level fluctuation on old Taping H2 landslide in Wushan County in Three Gorges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(12):2203-2211. (in Chinese)) DOI:10.11779/CJGE201712008.
- [14] 贺可强,王荣鲁,李新志,等. 堆积层滑坡的地下水加载卸载动力作用规律及其位移动力学预测. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1644-1651. (HE K Q,WANG R L,LI X Z,et al. Load-unload dynamic law of groundwater level and dynamic displacement prediction of debris landslide —A case study of bazimen landslide in Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(8):1644-1651. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2008.08.014.
- [15] 方景成,邓华锋,肖瑶,等. 库水和降雨联合作用下岸坡稳定影响因素敏感性分析. 水利水电技术,2017,48(3):146-152. (FANG J C,DENG H F,XIAO Y,et al. Sensitivity analysis on bank-slope stability impacting factors under joint-effect of reservoir water and drain fall[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(3):146-152,157. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2017.03.026.
- [16] 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院. 三峡库区三期地质灾害防治秭归县归州镇八字门滑坡勘查报告[R]. 宜昌:湖北省地质灾害防治工程勘察设计院,2005. (Institute of Reconnaissance Design on Geo-disaster Preventing and Controlling in Hubei Province. The third period of geo-disasters preventing and controlling on the Three Gorges Reservoir region—investigation report on Bazimen landslide on Guizhou Town,Zigui County[R]. Yichang:Institute of Reconnaissance Design on Geo-disaster Preventing and Controlling in Hubei Province,2005. (in Chinese))

(下转第 151 页)

- [13] GB 15618-1995,土壤环境质量标准[S]. (GB 15618-1995, National Standard for Soil Environmental Quality[S]. (in Chinese))
- [14] 许永东,寇莹. 土壤及植物中硒形态的迁移规律[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(11): 63-65. (XU Y D, YAN Y. The migration law of selenium forms in soils and plants[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 63-65. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3601. 2017. 11. 017.
- [15] 宋玉婷,雷泞菲. 我国土壤镉污染的现状与修复措施[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 79-83. (SONG Y T, LEI Y F. Current status and remediation measures of soil cadmium pollution in China [J]. Journal of Xichang College(Natural Science Edition), 2018, 32(3): 79-83. (in Chinese)) DOI: 10. 16104/j. issn. 1673-1891. 2018. 03. 018.
- [16] 崔东,闫俊杰,王楠,等. 伊犁河谷煤矿开采对土壤重金属污染、养分及酶活性的影响[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2018, 52(3): 416-423. (CUI D, YAN J J, WANG N, et al. Effects of mining in Yili River Valley on heavy metal pollution, nutrient and enzyme activities in soil[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Science), 2018, 52(3): 416-423. (in Chinese)) DOI: 10. 19603/j. cnki. 1000-1190. 2018. 03. 019.
- [17] 徐玉霞,汪庆华,彭围凯,等. 宝鸡市麟游县煤矿区周边农田土壤重金属污染安全评价[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3): 145-150. (XU Y X, WANG Q H, PENG Y K, et al. Safety assessment of heavy metal pollution in farmland soil around Linyou County, Baoji City[J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(3): 145-150. (in Chinese)) DOI: 10. 16803/j. cnki. issn. 1004-6216. 2017. 03. 026.
- [18] 郑海峰. 土壤中的锰及其在土壤-蔬菜系统中转移的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010. (ZHENG H F. Manganese in soil and its transfer in soil-vegetable system[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese))
- [19] 张丹,陈红,高庭艳,等. 山区生态果园建设对土壤铁锰铜锌含量的影响[J]. 西南农业学报, 2009, 22(02): 385-388. (ZHANG D, CHEN H, GAO T Y, et al. Effects of ecological orchard construction on iron, manganese, copper and zinc contents in mountainous areas[J]. Southwest Agricultural Journal, 2009, 22(02): 385-388. (in Chinese)) DOI: 10. 16213/j. cnki. scjas. 2009. 02. 054.
- [20] 李刚. 黄河下峪口段表层土壤 pH、Eh 分布及其主要影响因素[J]. 土壤科学, 2018, 6(1): 27-33. (LI G. The Distribution of pH and Eh in the Surface Soil of the Lower Yellow River and Its Main Influencing Factors [J]. Soil Science, 2018, 6(1): 27-33 (in Chinese)) DOI: 10. 12677/hjss. 2018. 61004.
- [21] 李春亮. 甘肃省武威地区多目标区域地球化学特征及土壤环境质量评估[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. (LI C L. Multi-target regional geochemical characteristics and soil environmental quality assessment in wuwei, gansu province[D]. Beijing: China university of geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese))

(上接第 143 页)

- [17] 三峡大学(湖北省岩崩滑坡研究所). 三峡库区秭归县地质灾害监测预警工程专业监测年报(2003-2018) [R]. 宜昌: 三峡大学(湖北省岩崩滑坡研究所), 20019. (Research Institute of Collapses and Landslide in Hubei Province. Specialized monitor bulletin of geodisaster warning project in the Three Gorges Reservoir region(2003-2005)[R]. Yichang: Research Institute of Collapses and Landslide in Hubei Province, 2018. (in Chinese))
- [18] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 3版,北京:地质出版社,2009:367-380. (ZHANG Z Y, WANG S T, WANG L S, et al. Principles of engineering geology[M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 367-380. (in Chinese))
- [19] 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 Q, TANG M G, XU K X, 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)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-6915. 2008. 06. 003.
- [20] 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. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 1-7. (PENG L, NIU R Q. Deformation Characteristics and Influencing 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)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-8035. 2011. 04. 001.