

胜利煤田东二号露天煤矿南帮红层滑坡机制分析

樊智勇¹, 周 杨¹, 刘晓宇¹, 李世海¹, 张 信²

(1. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;
2. 内蒙古大唐国际锡林浩特矿业有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要: 研究胜利东二号露天煤矿南帮红层边坡系列滑坡的下滑机制。采用地质勘探的方法, 确定南帮边坡的断层分布和地层特性; 通过现场踏勘和 4 次无人机航拍图的对比, 从现象上分析了滑坡各个区域的变形破坏特点; 利用 GPS 监测设备所获得的数据, 定量分析 2 次巨型滑坡的变形特征; 结合钻孔信息, 分析得到变形区滑动面的位置。在对南帮边坡地层结构和水的作用的概化基础上, 利用物理模型试验对其破坏演化机制进行定性探索。研究表明, 南帮边坡坡脚 F68 断层的隔水特性, 砂泥岩互层的变形差异, 以及大量分布的、抗剪强度很低的弱层是造成系列滑坡的主要地质因素, 降雨强度的增长加剧了边坡的变形。砂岩、泥岩分属于硬岩和软岩, 且泥岩遇水易软化; 砂泥岩层的差异变形造成砂岩陡倾节理张开扩大, 地表水较易入渗; 同时由于地下水在 F68 断层处无法消散, 从而造成坡脚的溃烂破坏和坡面裂缝带的形成。在暴雨条件下, 雨水下渗软化弱层, 在弱层上存在较高渗透水压力, 坡体后缘裂缝带内形成静水压力, 这些因素导致边坡发生多级“平推式”滑坡。

关键词: 边坡工程; 露天煤矿; 模型试验; 演化机制

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 2-4063-10

Analysis of landslide mechanisms of the southern red bed slope in the No.2 opencast coal mine in eastern Shengli coal field

FAN Zhiyong¹, ZHOU Yang¹, LIU Xiaoyu¹, LI Shihai¹, ZHANG Xin²

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Inner Mongolia Datang International Xilinhaote Mining Co., Ltd., Xilinhaote, Inner Mongolia 026000, China)

Abstract: Sliding mechanisms have been studied for the series of the landslides of the southern red bed slope in the No.2 opencast coal mine in eastern Shengli coal field. The geological exploration is used to determine the distribution of the faults and the properties of the strata. By field survey and comparison of the four images photographed by an unmanned aerial vehicle, the deformation and failure characteristics of every landslide area are analyzed phenomenally. Using the monitoring data of the GPS, the deformation characteristics of the two large landslides are analyzed quantitatively. Combined with boreholes' information, the slip face of the deforming area is obtained. Based on the generalization of the stratum structure and the effect of water, a physical model experiment is made to qualitatively explore the failure evolution mechanisms of the southern red bed landslide. The research shows that, the watertight property of the F68 fault, the different deformation between the sandstone layers and mudstone layers and the distribution of lots of weak layers with low shear strength in the southern slope

收稿日期: 2016-07-11; **修回日期:** 2016-11-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB250903); 中国科学院战略性先导科技专项(B类 XDB10030303)

Supported by National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2015CB250903) and Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(Grant No. Class B XDB10030303)

作者简介: 樊智勇(1990-), 男, 2012年毕业于武汉科技大学工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程模型试验及数值计算等方面的研究工作。E-mail: fzyzysq@163.com。通讯作者: 李世海(1958-), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: shli@imech.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0837

are the primary geological factors resulting in the series of the landslides, the increase of the rainfall intensity aggravates the deformation of the southern slope. In fact, Sandstone and mudstone belong to hard rock and soft rock respectively, and the mudstone softens easily when encountering water; because of the different deformation of sandstone and mudstone, the steep joints in the sandstone become open and then the surface water infiltrates easier; besides, the groundwater cannot dissipate in the F68 fault. All of the above reasons cause the ulceration at the toe of the slope and the formation of the fracture zones on the surface of the slope. Under the condition of the rainstorm, plenty of rainwater infiltrates and softens the weak layers, the higher seepage water pressure exists in the weak layers and the hydrostatic pressure forms in the fracture zones, consequently leading to the multistage “horizontal-pushing-type” landslides.

Key words: slope engineering; opencast coal mine; model experiment; evolution mechanisms

1 引言

红层是外观以红色为主色调的中、新生代碎屑沉积岩层,以陆相沉积为主,岩性以砾岩、砂岩、泥岩为主,岩性组合多以砂泥岩互层为特征^[1]。我国除台湾省外,其他省市均有红层分布,其总面积约为 826 389 km²,约占全国陆地总面积的 8.61%,南、北方红层分别占全国红层总面积的 60%和 40%^[2]。红层软岩地区是滑坡等各类地质灾害的多发区,红层软岩地区公路等工程建设项目边坡开挖后,各类边坡岩体塌滑灾害问题非常突出^[3]。

针对红层边坡工程,国内外学者开展了大量的研究工作。胡厚田和赵晓彦^[4]研究了我国红层边坡岩体结构类型,根据红层边坡岩体的结构状态,岩性组合特征,岩层产状与坡面产状的关系,结构面的发育情况及其与坡面的关系,以及上覆堆积土边坡岩体的坡顶线形状和岩土组合特征,把红层边坡划分为 13 个类型和亚类。吉随旺等^[5]研究了川中红色砂泥岩的岩石力学特性。张永安等^[6]研究了红层泥岩的水岩作用特征,定性分析了水岩作用对边坡稳定性的影响。程强等^[7-8]总结了近水平红层边坡变形破坏模式,分析了这类边坡变形破坏机制。胡斌和黄润秋^[9]结合地质调查,研究了红层地区软硬互层公路边坡的崩塌机制,认为软硬岩体差异风化导致下部软岩部位形成凹腔是边坡发生崩塌的主要原因。赵建昌等^[10]利用有限元数值方法,分析了红层路堑高边坡在不同开挖坡比下应力场的分布变化。向章波等^[11]以饱和-非饱和渗流理论为基础,使用 Slide 软件模拟了降雨强度对红层边坡稳定性的影响。然而,目前对红层边坡滑坡模式的研究不够系统,对该类边坡破坏机制的认识也有待深入。

本文以胜利东二号露天煤矿南帮红层边坡为研究对象,结合南帮边坡地质勘探资料、现场调查结

果,采用无人机航拍技术、GPS 监测技术、物理模型试验方法,分析了南帮红层边坡的变形破坏特征和影响因素,从而进一步对该边坡的滑坡模式和下滑机制进行了研究,为该边坡的治理提供参考依据。

2 工程地质概况

2.1 地质构造

胜利东二号露天煤矿位于内蒙古自治区锡林郭勒盟,露天矿西南边界拐点距锡林浩特市 10 km,呈 NE-SW 走向的不规则四边形^[12](见图 1)。



图 1 胜利东二号矿露天煤矿地理位置

Fig.1 Geographical position of the No.2 opencast coal mine in the eastern Shengli coal field

图 2 所示为采煤境界里的断层分布形态和南帮红层边坡滑坡范围。胜利向斜轴部经过胜利东二号露天煤矿境界中部偏北位置,境界内有大小断层 9 条,且均为正断层,走向多为 N60 E。滑坡区位于境界南帮,该位置断层比较密集,其中 F68 断层穿过滑坡区域,走向与滑体运移方向近似垂直,是影响南帮边坡稳定性的重要因素。F68 断层断距 54 ~ 210 m,倾角 54°~67°,断层泥主要由石英、高岭石、伊利石等矿物构成,透水性差。

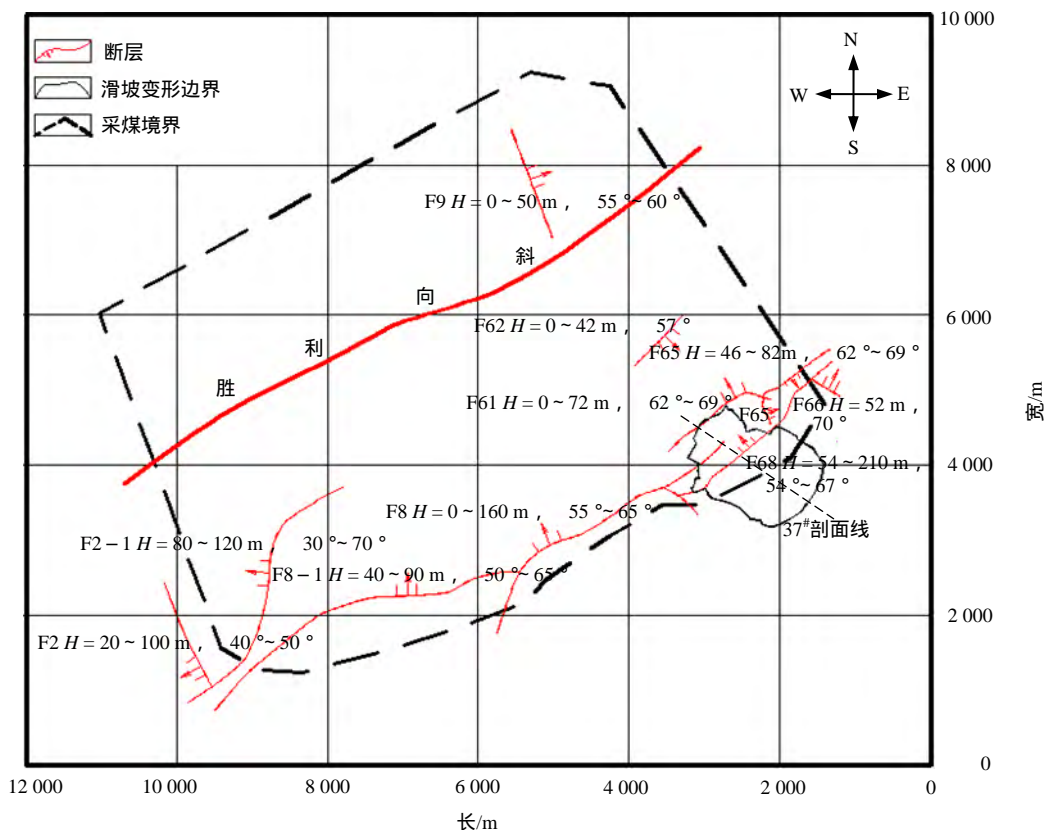


图 2 胜利东二号露天煤矿构造纲要图

Fig.2 Structure outline of the No.2 opencast coal mine in the eastern Shengli coal field

2.2 地层岩性及力学特性

南帮边坡滑坡变形区轴线从地表排土场延至矿坑底部采煤作业区，高程范围为 860 ~ 1 100 m，滑体运移方向基本朝向 N56°W，原始边坡倾角 18°左右。如图 3 所示，该区域地层结构自上而下为：

(1) 松散排弃物(loose dumped materials, LDM)

主要由掘场剥离物——黄土、砂岩、泥岩、砂泥岩等混合物构成，块度大小不均，排列无序，平均厚度 75 m。

(2) 第四系(Q)

岩性主要为浅黄 ~ 灰黄色砂砾，粗、中、细粉砂，亚黏土，亚砂土和覆盖土，为原始地表土体，平均厚度 37 m。

(3) 新生界第三系上新统(N₂)

冲洪积的灰绿色砂砾岩、砂岩，棕红色、灰白 ~ 灰绿色黏土。砂砾岩、细粉砂泥岩多为半胶结、松散状，风干后易碎，水浸后呈流砂状，黏土中含钙质结核，平均厚度 45 m。

(4) 中生界白垩系下统巴彦花群胜利组(K_{1bsh})

该地层被 F68 断层分割为上、下盘。上盘以煤层为主，上覆砂质泥岩，岩层倾角 10°左右，煤层之间赋存有弱层。下盘以泥岩为主，砂岩占少数，

存在形式为泥岩、砂岩互层，其间夹有炭质泥岩和薄煤层，且有多组弱层分布其中，岩层倾角 6°左右。该段地层以 11 号煤层底板为界限，平均厚度 355 m，是构成南帮红层边坡的主要地层。

图 3 给出了南帮边坡剖面图(图 1 中的 37#剖面)。根据钻孔取样后直剪试验的结果可知，南帮边坡各地层岩体力学参数的统计平均值如表 1 所示。松散体的黏聚力只有 5.6 kPa，几乎没有黏结强度。弱层的黏聚力为 14.3 kPa，内摩擦角为 15.7°，抗剪强度很低。6 煤层的黏聚力 413.7 kPa，内摩擦角 21.8°，强度最高。

2.3 水文气候特征

南帮边坡排土场和第四系松散岩类主要接受汇水区内大气降水的渗入补给；第三系砂岩层中赋存孔隙、裂隙潜水含水层；白垩系河湖相煤层中的裂隙及砂岩、砂砾岩中赋存承压含水层。

该边坡位于中温带干旱半干旱大陆性气候区，冬季严寒漫长，夏季温凉短促，春秋干燥多风。多年平均降雨量 287.2 mm，年最大降雨量 561.4 mm，最小 121.1 mm，6 ~ 8 月降雨总量占全年降雨量的 70%；多年平均蒸发量为 1 850 mm；多年平均气温为 1.7℃，最高气温 38.3℃，最低气温 -42.4℃^[13]。

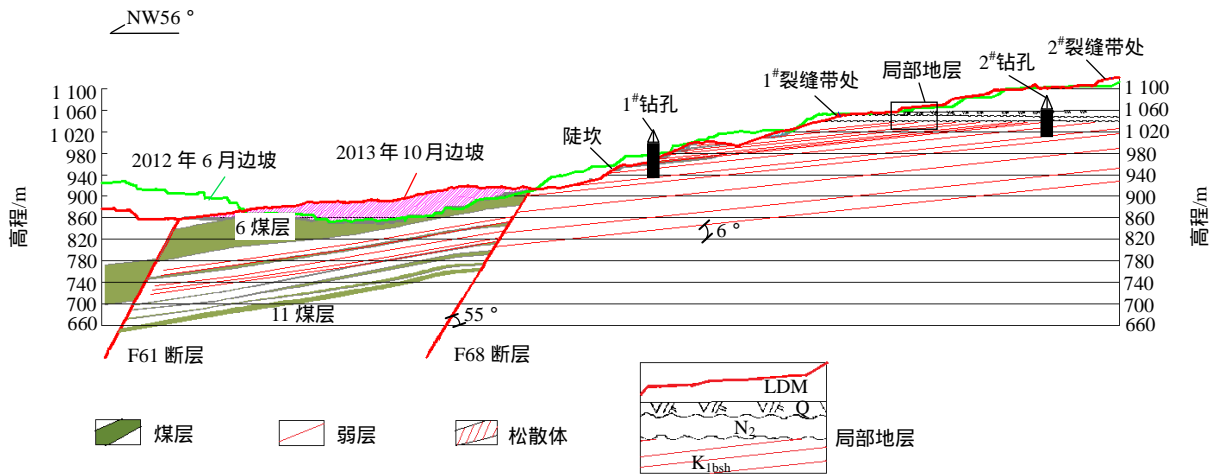


图 3 南帮边坡剖面图(图 1 中的 37#剖面)

Fig.3 Strata for the 37th profile of the southern slope

表 1 各地层抗剪强度

Table 1 The shear strength of each stratum

地层岩体	密度/(g · cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
松散排弃物	16.5	21.5	31.1
第四系	18.5	20.0	33.3
第三系	18.5	77.4	21.0
白垩系(泥岩)	22.0	102.9	23.4
白垩系(粉砂岩)	21.6	148.3	25.1
白垩系(粗砂岩)	22.0	172.5	24.3
白垩系(6 煤层)	13.1	413.7	21.8
弱层	20.7	14.3	15.7
松散体	17.2	5.6	32.6



图 4 南帮边坡剪切变形

Fig.4 The shear deformation of the southern slope

表 2 南帮系列滑坡

Table 2 Series of landslides of the southern slope

编号	滑坡发生时间	高程位置/ m	EW 长×SN 长/ (m×m)	体积/(10 ⁴ m ³)
1	20110516	960	280×110	20
2	20110822	912 ~ 948	320×180	120
3	20111006	924	250×100	15
4	20111107	912 ~ 984	150×200	40
5	20120728	860 ~ 900	400×350	60
6	20120816	912 ~ 1040	800×500	2 000
7	20130816	940 ~ 1130	1620×1800	8 500

3 滑坡变形破坏特征

3.1 滑坡过程及航拍分析

南帮红层滑坡由一系列不同规模大小的滑坡组成。自 2011 年初有明显变形以来,南帮边坡总共发生 10 多次滑坡,且滑坡变形持续时间较长,目前该边坡仍然处于变形之中。

2011 年 2 月初,南帮边坡 900 m 高程采煤平盘沿煤层底板的弱层剪出,最大剪出位移约 0.2 m,剪出边沿长度约 130 m(见图 4)。

此次变形之后,南帮边坡发生了 7 次较大规模的滑坡,具体见表 2。

南帮边坡 2011 年底先后形成圆弧形 1#和 2#沉降裂缝带;2012 年 7 月 28 日,矿区遭遇 60 a 一遇的暴雨,8 月 16 日,以 1#裂缝带为后缘,南帮边坡发生 2 000 万 m³ 规模的滑坡;2013 年 8 月 16 日,同样受降雨影响,坡体以 2#裂缝带为后缘发生剧烈

下挫,2#裂缝带处土体垂直沉降 5 ~ 18 m(见图 5)。在滑坡期间,现场采取了压脚清帮的治理措施。

2011 年 11 月、2012 年 10 月现场分别在南帮实施清帮压脚治理措施,但治理效果不佳。如图 6 所示,在 924 m 高程位置,压脚工程从东西方向往中部进行,但经过多次尝试,均未能实现压脚平盘向中部的合拢,大量压脚物料塌陷运移至煤坑底部。



图 5 2#裂缝带土体沉降

Fig.5 Settlement of the soil near the fracture zone #2

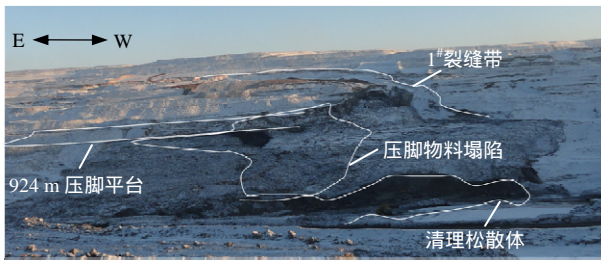


图 6 2012 年末南帮滑坡整体图

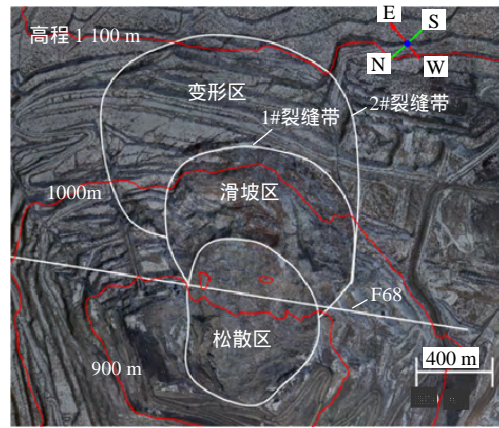
Fig.6 Southern landslide in the end of 2012

由于南帮红层滑坡范围巨大，现场踏勘和收集的资料无法从整体上获得滑坡的变形情况。无人机是一种新工具，能够越过山川河流阻隔，通过摄影、摄像或其他遥感手段获取灾情^[14]。

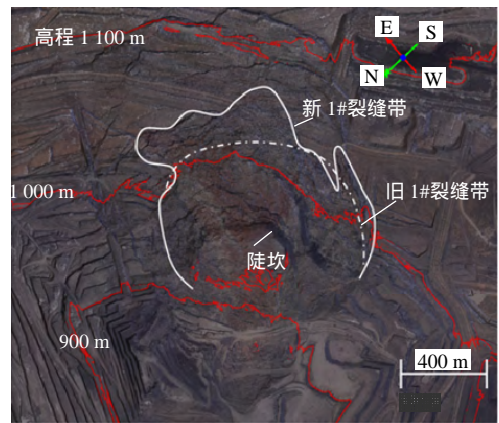
图 7 为 2014 年南帮边坡 4 次无人机航拍图，为了便于分析，把南帮边坡变形破坏区域划分为松散区，滑坡区和变形区。松散区为坡体下滑形成的松散体，该区主要发生缓慢的蠕滑变形；滑坡区为坡体滑离后的区域，其后缘为 1#裂缝带，该区坡体以运动性破坏为主；变形区坡体产生明显位移但尚未滑离边坡，该区表面分布大量裂缝，其后缘为 2#沉降裂缝带。图 7(a)，(b) 航拍图相隔 3 个月，坡体陡坎位置红色黏土剥落，1#裂缝带附近土体分解溃烂下滑，旧 1#裂缝带向南扩展到新的位置。约半个月后，如图 7(c) 所示，变形区局部裂缝宽度扩大；陡坎附近土体剥落，同时松散区土体向前运移，使得陡坎变得更加陡峭。2 个月后，如图 7(d) 所示，变形区内的裂缝更加密集，土体分解裂成更小的块体，但整体仍然未形成运动性破坏；松散区土体运移明显，前缘土体覆盖清理区，已至矿坑底部。

3.2 近水平松散区蠕滑运移

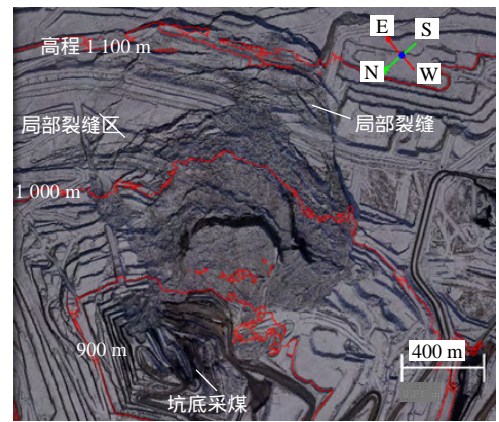
滑坡区下滑的土体覆盖采煤区域，形成松散区。松散区坡角约为 3.4°，坡面近似水平，但松散滑体仍然能够不断向北运移。如图 8(a) 所示，在松散区清理滑体，2 个月后，清理区域又被运移的松散体



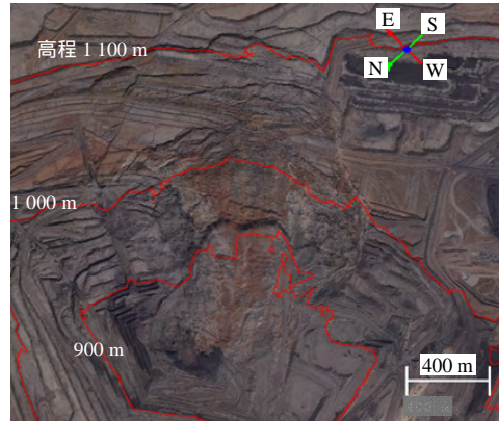
(a) 2013 年 11 月 14 日



(b) 2014 年 2 月 15 日



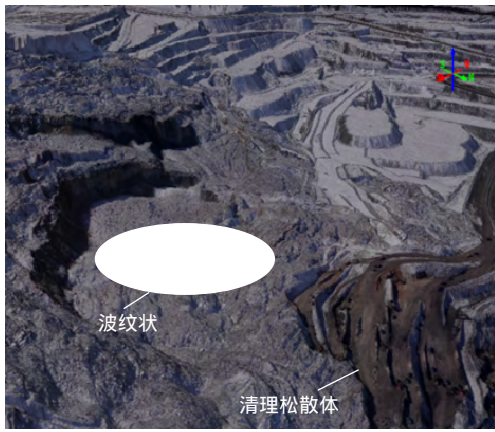
(c) 2014 年 2 月 27 日



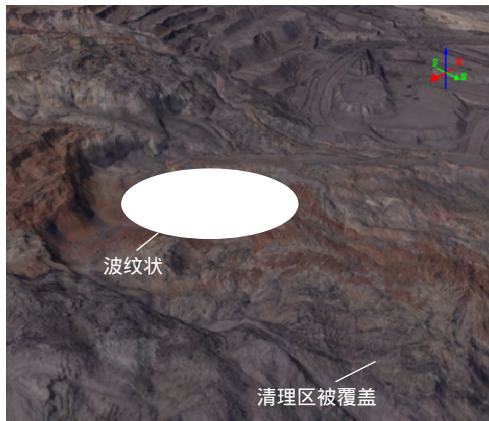
(d) 2014 年 4 月 26 日

图 7 南帮滑坡航拍图

Fig.7 Aerial maps of the southern landslide



(a) 2014 年 2 月 27 日



(b) 2014 年 4 月 26 日

图 8 松散体运移

Fig.8 Movement of the loose slide mass

覆盖(见图 8(b))。松散体前缘运移距离约 350 m，平均每天运移 6 m 左右。由图 7(c)，(d)的 900 m 高程线闭合范围对比可知，松散体运移后，松散区高程降低，后缘下降大约 10 m。此外，松散体表面呈起伏的波纹状，具有蠕滑的特征。

2014 年 3 月，现场将清理的部分松散滑体运往该区西部，通过车辆碾压形成一条宽约 30 m 的道路，一直碾压到陡坎附近(见图 9)，道路表面出现裂缝，部分路段沉降破坏，道路土体运移方向跟松散体运移方向一致。

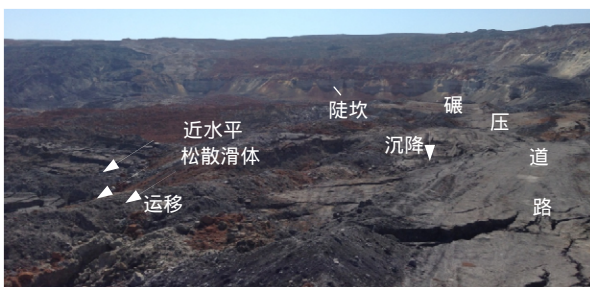


图 9 松散体西部碾压道路破坏

Fig.9 Failure of rolled road in the west of the loose mass

3.3 巨型滑坡 GPS 监测数据分析

全球定位系统 GPS(Global Position System)，以其连续、实时、高精度、全天候测量和自动化程度高等优点，在工程及灾害监测中的应用越来越广^[15]。

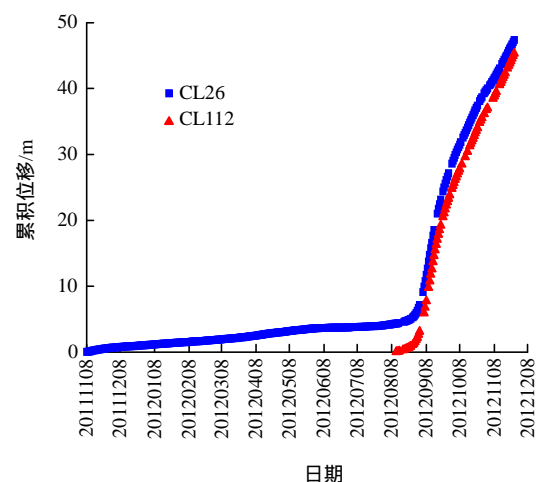
南帮红层边坡设置了大量的 GPS 监测点，其中 10 个监测点的位置如图 10 所示。图 11 为 2012 年“8·16”滑坡期间，滑坡区监测点的累积位移曲线和速度曲线。位移曲线表明，CL26，CL112 监测点土体变形具有同步性，可知这一区域附近的土体是整体下滑的。2012 年 8 月之前，滑坡区长期处于缓慢蠕滑阶段，蠕滑速度 0~0.05 m/d。之后受暴雨影响，土体下滑速度迅速剧增，9 月 8 日，最大滑移速度 1.1 m/d。随着土体下滑位移的增加，其滑动速度降低，最终在 0.3 m/d 左右波动，CL26 监测点累积滑动位移 47 m。



图 10 监测点分布情况

Fig.10 Distribution of the monitoring points

2013 年“8·16”滑坡，变形区监测点的位移和速度曲线如图 12 所示。各监测点的位移变化情况与



(a) 累积位移-时间

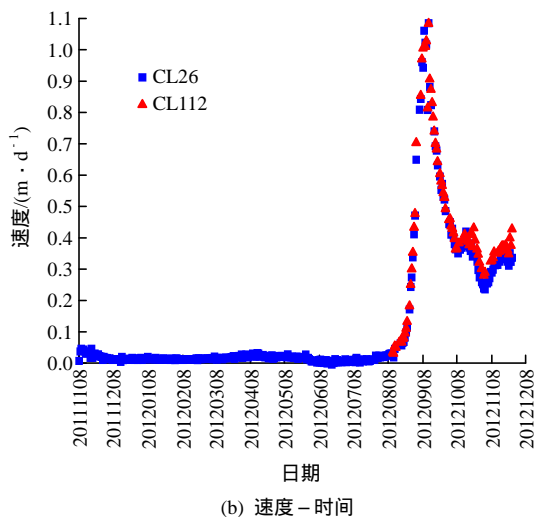


图 11 2012 年大滑坡监测点位移、速度-时间曲线
Fig.11 Displacement-time and speed-time curves of the monitoring points of the large landslide in 2012

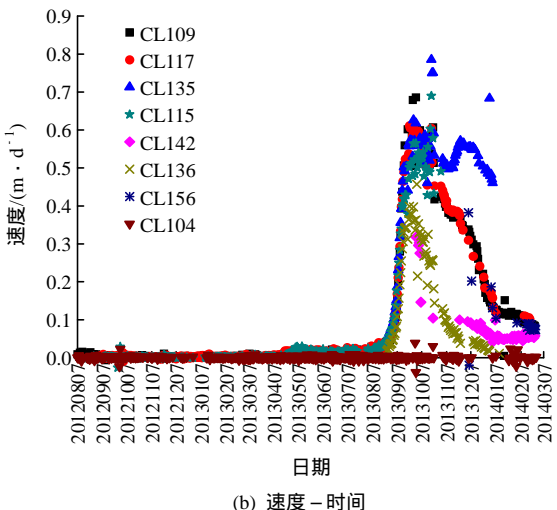
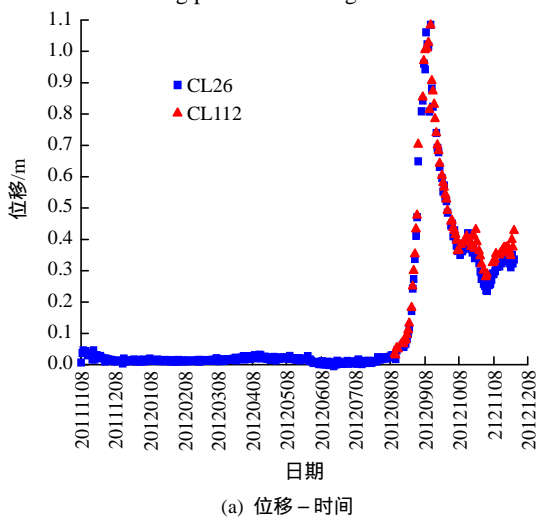


图 12 2013 年大滑坡监测点位移、速度曲线
Fig.12 Displacement-time and speed-time curves of the monitoring points of the large landslide in 2013

2012 年滑坡类似，坡体前期变形主要以蠕滑为主，在降雨作用下，变形速度剧增。此外，2013 年 9 ~

11 月，变形区前缘监测点 CL109，CL117，CL135 和 CL115 几乎匀速同步变形，多数时间变形速率 0.5 ~ 0.6 m/d，并且变形区这一区域变形量最大，截止 2014 年 3 月份，CL135 监测点最大累积位移已达 64 m；2#裂缝带附近监测点 CL142，CL136 和 CL156 变形相对较小，这些监测点累积位移量只有 10 ~ 20 m；变形区之外，CL104 监测点基本没有变形。从速度曲线分析，2013 年 11 月 7 日 ~ 2014 年 1 月 7 日，变形区前缘变形速度逐渐下降，但平均变形速度较大，这与图 7(a)，(b) 两次航拍的宏观变形特征一致，即变形区前缘土体溃烂下滑，1#裂缝带向南扩展；最终除 CL135 监测点外，其他监测点变形速度为 0 ~ 0.1 m/d。

4 变形区滑动面的位置

图 13 所示为 1#和 2#钻孔的柱状图，钻孔位置如图 3 所示。两钻孔的岩芯采取率变化范围为 92% ~ 100%，钻探质量较高。通过比较两钻孔各层岩芯的 RQD 数值可知，1#钻孔的煤层岩石质量最差，RQD = 30% ~ 60%，所处高程范围 954.37 ~ 962.67 m；对于 2#钻孔，高程范围 1 018.90 ~ 1 021.40 m 内的细砂岩岩石质量最差，RQD = 60%。由图 3 可知，弱层分布由疏变密的区域经过这两个岩石质量最差的高程位置，此区域弱层抗剪强度最低，是变形区可能的滑动面。

另外，4 张航拍图表明，变形区前缘平整表面分解碎裂，陡坎上覆土体剥落，但陡坎本身没有向前滑动，可以判断滑动面应该在陡坎上表面处。综上所述，变形区是以陡坎上表面处为前缘，以 2#沉降裂缝带为后缘滑动的，二者之间的弱层即为变形区的滑动面。

5 滑坡物理模型试验

滑坡模型试验是对滑坡进行研究的有效手段之一，在滑坡研究领域中也越来越显示出重要的作用^[16]。胜利东二号露天煤矿南帮红层边坡地质构造复杂，滑坡规模巨大，长期的现场勘查分析比较困难。模型试验的目的在于模拟南帮红层边坡在预期主控因素作用下的破坏演化过程，并与现场主要滑坡过程对比分析，从定性的角度探索南帮红层边坡的破坏模式，不是严格意义上的相似模型试验。试验以南

地层	岩芯	岩性	层底高程/m	RQD/%	岩芯采取率/%
K _{1bsh}		砂质泥岩	977.47	90	100
		细砂岩	974.87	80	93
		泥岩	972.57	90	100
		炭质泥岩	971.97	80	100
		泥岩	967.37	92	100
		中砂岩	965.97	100	93
		泥岩	962.67	95	97
		煤	961.57	50	100
		砂质泥岩	960.67	85	100
		煤	959.47	30	100
		泥岩	958.17	90	92
		煤	955.57	60	100
		泥岩	954.77	90	100
		煤	954.37	50	100
		泥岩	948.27	91	100
		粉砂岩	946.67	95	100
		泥岩	943.57	90	100
		粉砂岩	942.77	95	100
	泥岩	936.28	92	100	

(a) 1#钻孔

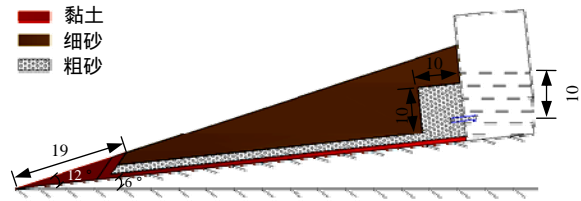
地层	岩芯	岩性	层底高程/m	RQD/%	岩芯采取率/%
Q		砂土	1 058.80	5	99
		泥岩	1 043.50	100	100
		细砂岩	1 042.00	80	93
		泥岩	1 041.50	95	100
		细砂岩	1 040.7	65	94
		泥岩	1 039.00	95	100
		粉砂岩	1 037.70	80	100
N ₂		砂质泥岩	1 036.40	90	100
		细砂岩	1 035.20	80	92
K _{1bsh}		泥岩	1 026.90	95	98
		细砂岩	1 023.70	65	94
		泥岩	1 021.40	100	100
		细砂岩	1 018.90	60	100
		泥岩	1 016.30	95	100
		粉砂岩	1 015.80	95	100
	细砂岩	1 015.40	100	100	
	泥岩	1 014.48	100	100	

(b) 2#钻孔

图 13 37#剖面的钻孔柱状图

Fig.13 Borehole diagrams of the profile #37

帮边坡 37#剖面为对象，将边坡地质因素和地下水情况进行概化，建立尺寸比例为 1 : 605 的试验模型，如图 14 所示。



(a) 剖面图(单位: cm)



(b) 实物图

图 14 南帮滑坡物理模型

Fig.14 The experimental model of the landslide

5.1 试验方案设计

(1) 南帮边坡主要地质因素概化。首先，根据南帮红层边坡砂泥岩地层结构，在试验边坡中设计 3 种土层，即粗砂层、细砂层、黏土层。其中，粗砂层代表白垩系地层中的砂岩透水层，厚度 2 cm；细砂层代表弱层之上的地层，采用透水性相对较弱的细砂模拟；黏土层透水性最弱，目的是为了消除坡底的边界效应，厚度 1 cm。其次，依照南帮边坡的岩层倾角及边坡倾角，将试验边坡中的土层倾角设定为 6°，边坡角设定为 18°，坡体后缘高 21 cm。最后，坡脚用黏土来制作，与细砂坡体形成隔水断层，用以模拟 F68 断层的隔水性，断层倾角 55°。坡脚处开设一个缺口，用来表示实际坡体在坡脚处采煤开挖出来的临空面。

(2) 降雨因素概化。在模拟降雨入渗后，南帮边坡内部水的渗流、汇集的演化过程时，忽略降雨入渗土体这一过程。在坡体后缘放置一个水箱，在水箱靠近底部的侧面中部开一个 6 cm×3 cm 的矩形口，把一个同样截面大小、腔中充满粗砂的导水管插入矩形口中，连接水箱和粗砂。矩形口附近的一大块粗砂用来把水导入到坡体中。试验土均为散状土，表 3 给出了所用土体的具体参数。

表 3 试验土体参数

Table 3 Soil parameters in the experiment

土体种类	密度/ (kg · m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	渗透系数/ (m · s ⁻¹)
黏土	1 450	0	31.2	3.69×10 ⁻¹⁰
细砂	1 390	0	25.5	3.12×10 ⁻⁵
粗砂	1 210	0	40.6	2.01×10 ⁻³

5.2 试验过程分析

(1) 坡脚破坏特征。从图 15(a)，(b)可以看出，

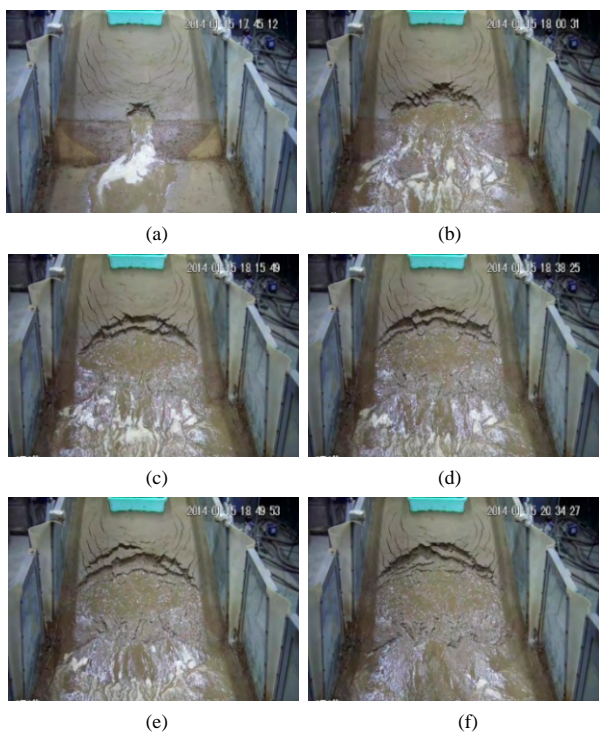


图 15 试验坡体变形破坏过程

Fig.15 Failure process of the experimental slope

缺口处黏土和细砂被水软化后呈流状滑下，之后有大量明水急剧涌出，并冲刷临空面附近的土体。“隔水断层”附近土体呈块状不断陷落，呈现出碎化破坏的特点。这与实际南帮滑坡在压脚治理时，F68 断层附近土体不断塌陷的破坏特点相符。

(2) 多级破坏模式。图 15(c)试验阶段，坡体表面出现圆弧形下挫裂缝带，下挫土体底部被粗砂含水层软化成稀泥，稀泥带动上部土体下滑，形成滑坡。图 15(d), (e), (f)各发生一次滑坡，过程与图 15(c)相同，整个滑坡呈现出多级后退的破坏模式。从南帮边坡滑坡历程可知，7 次主要的滑坡也具有多级下滑的特征，尤其第 6, 7 两次滑坡分别是以 1#和 2#裂缝带为后缘的两级大规模滑坡。从试验现象和南帮红层边坡的滑坡特征对比分析可知，试验是再现了南帮滑坡的部分过程；试验表明，地下水对砂泥岩层的软化是坡体失稳的主要原因，在实际治理该类滑坡时，应重点做好防水排水措施。

6 南帮滑坡的演化机制

通过对南帮边坡地质因素、变形破坏特点以及物理模型试验分析可知，F68 断层、砂泥岩互层的地质结构和降雨的影响是造成南帮红层边坡滑坡的主要原因。

(1) 初期破坏过程

南帮边坡中存在较多弱层，白垩系地层主要由泥岩砂岩互层构成。泥岩透水性弱，强度低，浸水易软化，而砂岩则相反，透水性强，属硬岩。如图 16 所示，将现场所采泥岩浸入水中，几小时后，泥岩软化分解，力学强度完全丧失。在坑底采煤开挖卸荷和坡体应力作用下，砂泥岩层产生差异变形，促进上部砂岩陡倾节理张开，其陡倾节理更易于地表水的下渗，从而软化泥岩，砂岩弱层成为储水层，砂泥岩差异变形进一步发展。F68 断层的隔水特性使其附近聚集较高压力的承压水，进而坡脚土体强度劣化、发生溃烂破坏。而后，承压水压力释放，含水泥状物料涌出，临空面土体不断塌陷、碎化，1#和 2#“圈椅状”裂缝带形成。



图 16 泥岩浸水后分解

Fig.16 The mudstone disintegrates after being soaked in water

(2) 暴雨引发大型滑坡

1#和 2#裂缝带为地表水提供了储存空间和运输通道，在暴雨作用下，雨水充填裂缝带形成充水压力，并在裂缝带底部沿着弱层汇集、流动。坡面其他裂隙入渗和孔隙渗流加剧了这种作用，从而泥岩软化，弱层强度大大减小，且该层面存在孔隙水压力，同时降雨增加坡体自重。在上述条件下，坡体很容易沿弱层水平推出，从而形成平推式滑坡，其破坏界面为后缘的裂缝带和弱层层面。以 2013 年雨季为例，图 17 为矿区降雨情况和各个区平均下

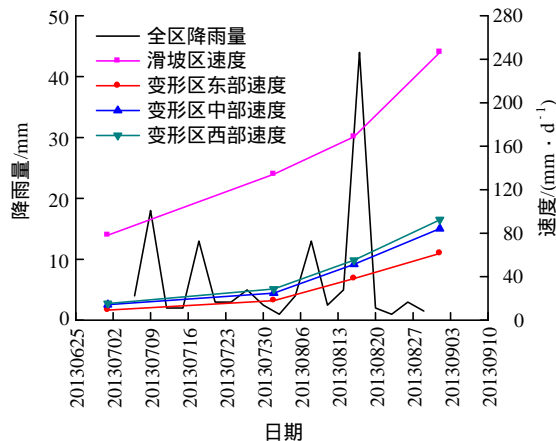


图 17 2013 年 7, 8 月份采场降雨量及各区域变形速度关系

Fig.17 Relationship between the rainfall and the speed of every region in July and August in 2013

滑速度曲线, 8 月 16 日, 矿区降雨量达到最大 45 mm, 各个区的平均变形速度均有较大增幅, 尤其滑坡区的速度增长最剧烈, 增幅达 80 mm/d, 此次暴雨导致滑坡区土体滑离边坡, 大型滑坡发生。

7 结 论

(1) 从南帮红层边坡的滑坡历史来看, 该边坡的破坏由多个不同规模的单个滑坡组成; 松散区的蠕滑变形是滑体的二次运移。

(2) 根据南帮红层边坡钻孔信息, 弱层分布以及航拍图的综合分析可知, 变形区滑动面位于陡坎上表面的弱层上。

(3) 模型试验探索了南帮红层滑坡的破坏模式。结果表明, 试验坡体的多级破坏定性反映了南帮滑坡的部分过程; 在治理该类滑坡时, 要重点做好防水排水措施。

(4) 南帮红层边坡为砂泥岩互层坡体, 泥岩遇水软化, 砂泥岩差异变形促进地表水入渗, F68 断层的隔水性使坡脚形成承压水, 导致坡脚强度劣化, 溃烂破坏。这是南帮边坡初次滑坡的根本原因。随着南帮边坡变形破坏和降雨入渗的相互促进, 边坡发生多次滑坡。

参考文献(References):

- [1] 程 强, 寇小兵, 黄绍彬, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34-40.(CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in china[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34-40.(in Chinese))
- [2] 郭永春, 谢 强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67-71.(GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(6): 67-71.(in Chinese))
- [3] 程 强. 红层软岩开挖边坡致灾机制及防治技术研究[博士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2008.(CHENG Qiang. Study on hazard mechanism and prevention technology of cutting slope in red beds soft rock[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.(in Chinese))
- [4] 胡厚田, 赵晓彦. 中国红层边坡岩体结构类型的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 689-694.(HU Houtian, ZHAO Xiaoyan. Studies on rockmass structure in slope of red bed in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 689-694.(in Chinese))
- [5] 吉随旺, 张倬元, 邓荣贵, 等. 川中红色砂泥岩岩石力学特性研究[J]. 地质灾害与环境, 2000, 11(1): 72-74.(JI Suiwang, ZHANG Zhuoyuan, DENG Rongui, et al. On the rock mechanic properties of mudstones and sandstones in the middle part of Sichuan Red Basin[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(1): 72-74.(in Chinese))
- [6] 张永安, 李 峰, 陈 军. 红层泥岩水岩作用特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 22-26.(ZHANG Yong'an, LI Feng, CHEN Jun. Analysis of the interaction between mudstone and water[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 22-26.(in Chinese))
- [7] 程 强, 周永江, 黄绍彬. 近水平红层开挖边坡变形破坏特征[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 311-1 314.(CHENG Qiang, ZHOU Yongjiang, HUANG Shaobin. Distortion and failure character of excavation slope in approximate level red beds[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1 311-1 314.(in Chinese))
- [8] 耿兴福, 苗天德. 近水平层状红层软岩滑坡成因机制研究[J]. 地质灾害与环境, 2014, 25(1): 9-12.(GENG Xingfu, MIAO Tiande. Formation mechanism of red soft bedded mudstone landslides[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2014, 25(1): 9-12.(in Chinese))
- [9] 胡 斌, 黄润秋. 软硬岩互层边坡崩塌机制及治理对策研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 200-205.(HU Bin, HUANG Runqiu. Collapse mechanism and treatment measures of slopes with inter beddings of soft and hard rocks[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 200-205.(in Chinese))
- [10] 赵建昌, 李永和, 吉随旺. 缓倾角红层路堑高边坡应力状态与防护研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5 751-5 755.(ZHAO Jianchang, LI Yonghe, JI Suiwang. Study on stress state and protection of excavated cutting of high slope in gently inclined red beds[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 751-5 755.(in Chinese))
- [11] 向章波, 张家铭, 周晓宇, 等. 基于 Slide 的某红层路堑边坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 90-95.(XIANG Zhangbo, ZHANG Jiaming, ZHOU Xiaoyu, et al. The slope stability analysis of red bed based on Slide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 90-95.(in Chinese))
- [12] 姜连军. 大唐国际胜利东二号露天煤矿采场边坡稳定性分析[硕士学位论文][D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2009.(JIANG Lianjun. The slope stability analysis of the second coal open-pits in Shengli east of Datang international[M. S. Thesis][D]. Liaoning: Liaoning technical university, 2009.(in Chinese))
- [13] 春 风, 李春兰, 包玉海. 近 57 年锡林浩特市气温与降水量变化的小波分析[J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学版, 2013, 42(1): 47-52.(CHUN Feng, LI Chunlan, BAO Yuhai. The wavelet analysis of average temperature and precipitation in Xilinhot during 57 years[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science, 2013, 42(1): 47-52.(in Chinese))
- [14] 陆博迪, 孟迪文, 陆 鸣, 等. 无人机在重大自然灾害中的应用与探讨[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 122-126.(LU Bodi, MENG Diwen, LU Ming, et al. Applications and discussions of the unmanned aerial vehicle in serious natural disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 122-126.(in Chinese))
- [15] 肖 鸾, 胡友健, 王晓华. GPS 技术在变形监测中的应用综述[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(2): 160-165.(XIAO Luan, HU Youjian, WANG Xiaohua. Overview of the application of GPS in deformation monitoring[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(2): 160-165.(in Chinese))
- [16] 石崇喜, 黄 英, 甄 祯, 等. 滑坡模型试验研究现状[J]. 云南水利发电, 2011, 27(5): 7-10.(SHI Chongxi, HUANG Ying, ZHEN Zhen, et al. The research situation of the landslide model experiment[J]. Yunnan Water Power, 2011, 27(5): 7-10.(in Chinese))