

川藏公路二郎山 1 号大型坡体病害 演变与治理研究*

张晓燕

(四川省交通厅, 成都 610041)

摘要 川藏公路横穿我国西部两大地貌单元及其过渡地带, 其间所遇的一些坡体病害具高寒冷、高海拔的环境特色和规模巨大、性质复杂的特点, 而且常常多位一体, 成群出现. 这些组合的坡体病害, 不仅不能用其中任何一种来反映发育特征, 而且其发展也同其他事物一样经历着从发育、成长到灭亡, 循环往复的演变过程. 从代表性坡体病害——川藏公路二郎山 1 号坡体病害的机理分析出发, 分别通过地质力学模型试验、数值计算、立体原位测试等多种手段模拟、研究并通过实际工程结构调控了这一大型坡体病害发育末期的演变. 从中得知, 这类坡体病害具备更优势的地质背景和条件; 不同病害形式间的作用比单一影响因素的作用更可怕; 除绕避方案外, 只有用结构与病害体协调作用的综合先进方法才是治愈该类病害的有效手段.

关键词 大型坡体病害 演变 多位一体 结构调控

在川藏公路上, 分布着许多特殊的山地灾害群^[1], 如以滑坡为主, 泥石流塌方为辅的川藏公路 102 号滑坡群; 以塌方为主, 滑坡泥石流为辅的川藏公路拉鲁坍塌病害群和以滑坡为主, 错落坍塌为辅的川藏公路二郎山大型滑坡群等. 这些山地灾害群, 共有的特点是规模巨大、性质复杂^[2]、受雨水和河流切割影响严重^[3], 多数发育在雪线附近而且成群出现. 对此我们称为特大型坡体病害群.

在特大型坡体病害群中, 不仅有滑坡^[4]、崩塌、错落和泥石流^[2,5]等多种山地灾害, 而且每种灾害类型中往往不只一种, 常有集滑坡、崩塌、溜坍及坡面泥石流等多种灾害于一体的颇具代表性的独立病害体, 这种有组合又相对独立的病害就是本文重点探讨的大型坡体病害.

2003-08-11 收稿, 2003-12-23 收修改稿

* 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-323)资助

大型坡体病害中的各类灾害,在同一母体中,彼此依托,相互作用,互为诱因,共同发展.大型坡体病害,如同其他大多数事物一样经历着从发育、成长到灭亡,循环往复的演变过程.深入研究这一演变过程的规律,解决川藏公路交通大动脉的阻塞,是西部交通建设中急需解决^[3]的技术难题.二郎山 1 号坡体病害就是其中规模突出且具代表性的一个.本文以此研究为例,探求大型坡体病害的演变规律.

二郎山 1 号坡体病害是在原巨型错落体中发育而成的,属于滑坡为主的病害体,其次在东段公路内侧有一段岩崩体,在公路外侧病害体中部附近有一段坍塌区,就主病害体滑坡而言,分东、西两条,上下三级,浅、中、深层 4 层滑面.

二郎山 1 号坡体病害发生的机理^[6]首先是其具备优势的工程地质条件.北西和南东走向的构造带分别决定了坡体物质病害的后缘和侧界,倾角为 20°左右的构造面构成了坡体病害的底界^[7]. S_{21} 泥岩构成的坡体软弱而破碎^[8].加上 1997 年 7 月特大暴雨浸泡坡体和软化滑面,以及龙胆溪泥石流流的冲刷作用等等,共同促使了这一大型坡体病害的复活.

鉴于二郎山 1 号大型坡体病害的特殊复杂性,交通部将此列为重大的西部科研项目¹⁾进行研究,而且作为当时交通部最大的灾害工程项目进行整治.本文再现了课题研究中首先从病害的发生机理认识出发,分别通过地质力学模型试验、数值计算、立体原位测试等多种手段模拟,研究这一大型坡体病害发育末期的演变规律.并根据研究成果进行工程结构优化设计,最终达到合理控制病害的过程.

文中提出了坡体病害间相互作用的问题,而且研究认为,它比单一影响因素作用更具破坏优势.

1 室内模拟 1 号坡体病害的演变过程

选定 1 号坡体病害有代表性的主断面作为室内模拟试验的原型.以 2000 年 7 月勘察时的状态为初始状态,制作几何相似系数 $C_l = 50 : 1$ 的室内试验模型,追溯并重现坡体病害发生、发展的过程.根据过去、现在和将来可能出现的情况,设计两种状态、3 种工况.

状态 1 是工程实施前的自然坡体状态,重现随外界条件(3 种工况)的改变,研究坡体病害发生机理和发展趋势.状态 1 的 3 种工况分别为:工况一,分两次向滑带注水,模拟雨水入渗软化滑带;工况二,开挖部分河床和坡脚,模拟泥石流及龙胆溪水对坡脚的冲刷;工况三,继续向滑带注水,模拟坡体病害向恶化方向

1) 中铁西北科学研究院,四川省交通厅公路局.川藏公路前龙段滑坡机理及整治技术研究.专题研究报告,第一卷至第六卷.2002

发展.

状态 2 是研究施加治理工程措施后, 在以上 3 种工况下滑体的稳定性、工程效果及其应力、变形情况.

模型试验中, 坡体材料、结构的原型和模型的容重相似比, 分别取 $C_r = 1$ 和 $C_r = 1.56$. 锚索的相似条件以其弹性模量的相似比 $C_E = 14.3$ 来控制; 其他各相似系数的关系如下:

$$C_E = C_\sigma = C_T = C_r \cdot C_l, \quad C_\varepsilon = C_\mu = 1,$$

式中 C 的下标 $E, \sigma, T, r, l, \varepsilon, \mu$ 分别为弹模、应力、强度、容重、尺寸、应变及泊松比.

1.1 状态 1

图 1 表示同一水平面上两测点 H9 和 H10(靠近滑面的点), 在 3 种工况下的位移曲线.

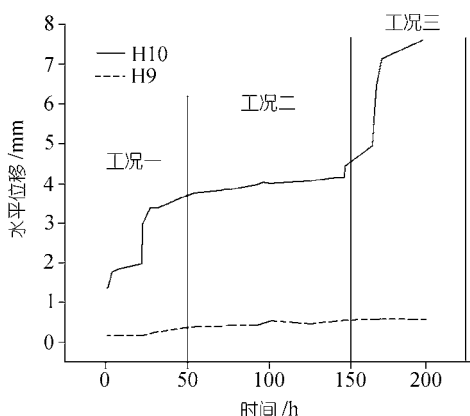


图 1 H9, H10 两测点在 3 种工况下的位移曲线

从图 1 中可以看出, 坡体的水平位移随工况的变化呈现出增加的趋势, 同一水平截面上测点的水平位移越靠近坡面处位移越大, 位移变形主要发生于浅层风化岩体和中层滑带以上的区域内. 活动体牵动部分相对位移最大.

工况一、三的位移增长较大, 说明降雨对边坡的稳定破坏起了关键的作用, 而泥石流的冲刷对坡体状态进一步恶化起到了促进作用, 而且有滞后和加剧变形的特征.

实际坡体失稳过程中, 上述现象是交替作用, 共同引发了坡体的大规模失稳.

1.2 状态 2

抗滑桩和锚索框架是对坡体病害采取的主要抗滑工程. 自从设置了抗滑工程后即使在最不利的工况三的情况, 位移也显著变小, 尤其在桩的有效范围内, 效果更加明显. 主要变形区已由原来的整个坡体转化为桩前没有实施工程的外边坡上, 由此引起的松弛区范围也明显减小, 滑带位移也是如此(见图 2). 表明抗滑结构有效地抑制了坡体变形, 对坡体病害的稳定起到了积极的作用.

2 1 号坡体病害演变过程的数值计算

仍以二郎山 1 号坡体病害主断面为原型, 依次对坡体病害的演变过程以及

此有关的塑性区的发展、结构内力的变化进行数值计算^[8].

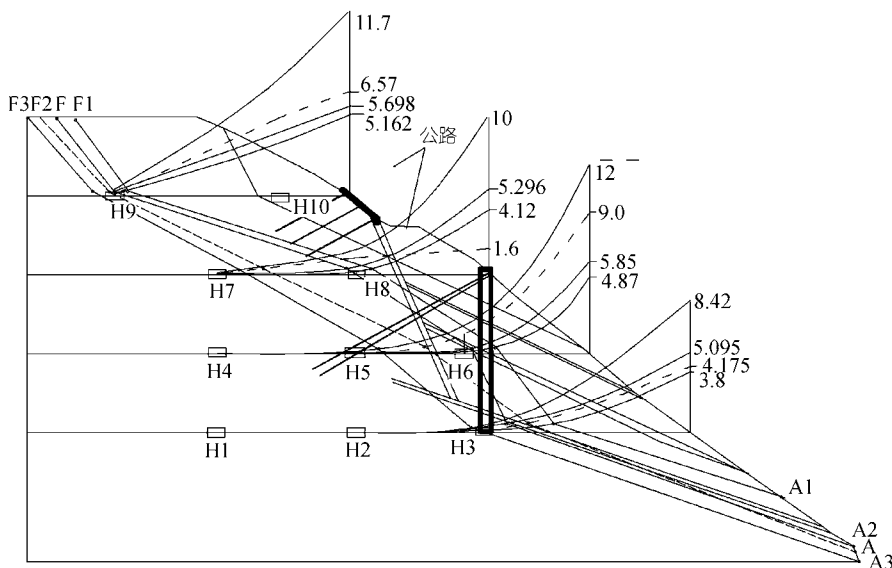


图 2 状态 1 和状态 2 中工况三的坡面位移

边坡在自然状态下与加支挡结构后的坡体水平位移对比; ——坡体在自然状态下的水平位移曲线, 包括工况一、二、三; — —加支挡结构后与自然状态下工况三等价的曲线及松弛区分界线 AF; A1-F1, A2-F2, A3-F3 分别是工况一、二、三的松弛区有界线. 图中单位除特别注明外以 mm 计

程序计算中, 无论是岩块材料还是软弱夹层材料, 岩土体的本构关系均采用 Drucker-Prager 屈服准则, 此屈服准则对 Mohr-Coulomb 准则给予近似, 并对 Von Mises 屈服准则予以修正. 其屈服面不随材料的逐渐屈服而改变, 因此没有强化准则, 然而其屈服强度随着侧限压力(静水压力)的增加而相应增加, 其塑性行为被假定为理想弹塑性. 其等效应力 σ_e 的表达式为

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}},$$

其中, $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ 为平均应力或静水压力, $\{S\}$ 为应力偏量, β 为材料常数, $[M]$ 为 Mises 屈服准则中的 $[M]$.

经过修正后的 Mises 屈服准则, 考虑了静水应力分量的影响, 静水应力(侧限压力)越高, 则屈服强度越大. 材料 β 的表达式为

$$\beta = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)},$$

其中 ϕ 为内摩擦角. 材料的屈服参数定义为

$$\sigma_y = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)},$$

其中 C 为黏聚力. 屈服准则的表达式为

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0.$$

当材料的参数 β 和 σ_y 给定后, 其屈服面为一圆锥面, 此圆锥面是六角形的摩尔-库伦屈服面的外切锥面.

有限元计算模型中大部分区域的岩体采用四节点四边形单元来模拟, 其位移模式为双线性位移模式, 并且相邻单元公共节点上有相同的位移值, 从而保证了两个相邻单元在其公共边界上位移的连续性. 对于交界处极不规则区域岩体采用的六节点三角形单元, 位移函数取完全的二次多项式, 单元边界上位移按二次抛物线分布, 3 个公共节点保证了相邻单元位移的连续性.

从两种状态数值计算结果的图 3 和图 4 显示: (1) 坡体变形的部位主要集中于公路附近及其下部, 位移矢量的方向从上至下由斜向坡面逐渐转变为顺滑带指向坡面. 在状态 1 下的工况二和工况三中, 深层滑带水平位移增加速率较快; 坡体塑性区经历了一个逐渐发展扩大的过程, 岩体的破坏首先始于表面松散层、

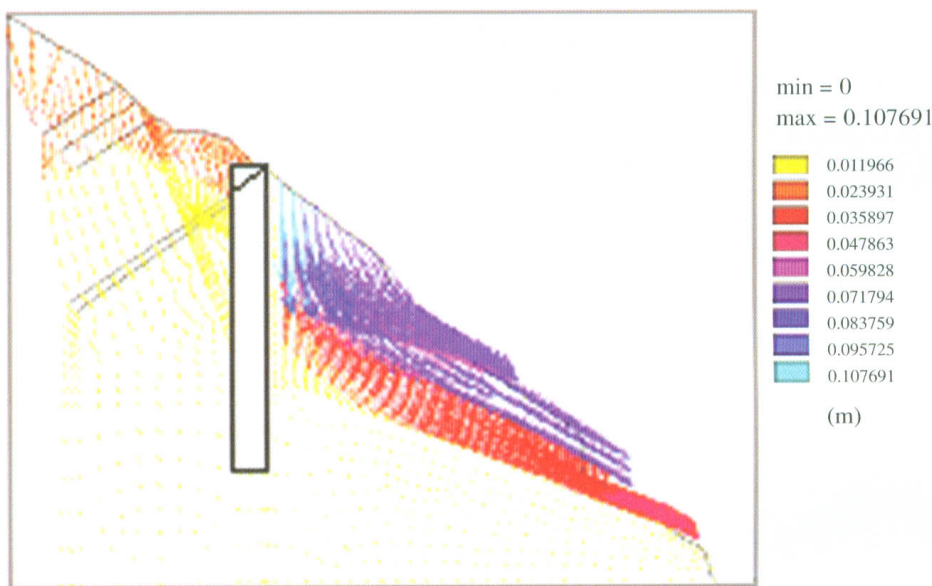


图 3 状态 1 中工况一下的位移矢量放大图

竖向滑动并由浅层、中层滑带向深层滑带发展. (2) 图 4 中抗滑结构的设置使变形、破坏部位发生转移, 平面上, 主要变形区转至桩外侧. 立面上从浅层滑带到深层滑带的滑移依次减小. 塑性区首先出现在滑带及桩侧岩体, 桩后岩体的塑性区基本维持在工况一的水平. (3) 两种状态下的坡体变形、位移情况告诉我们, 抗滑结构既有效地阻止了上部岩体对下部岩体的推压作用, 也切断了下部岩体对上部岩体的牵引作用, 对稳定坡体十分有利; 从状态 2 中岩体塑性区的发展变化规律来看, 状态 1 中大量塑性单元出现在桩后岩体中, 而在状态 2 中没有出现这种迹象, 这表明抗滑桩内侧岩体受力状态比较理想. 可见, 合理的工程结构是人为调控坡体演变有效而理想的方法.

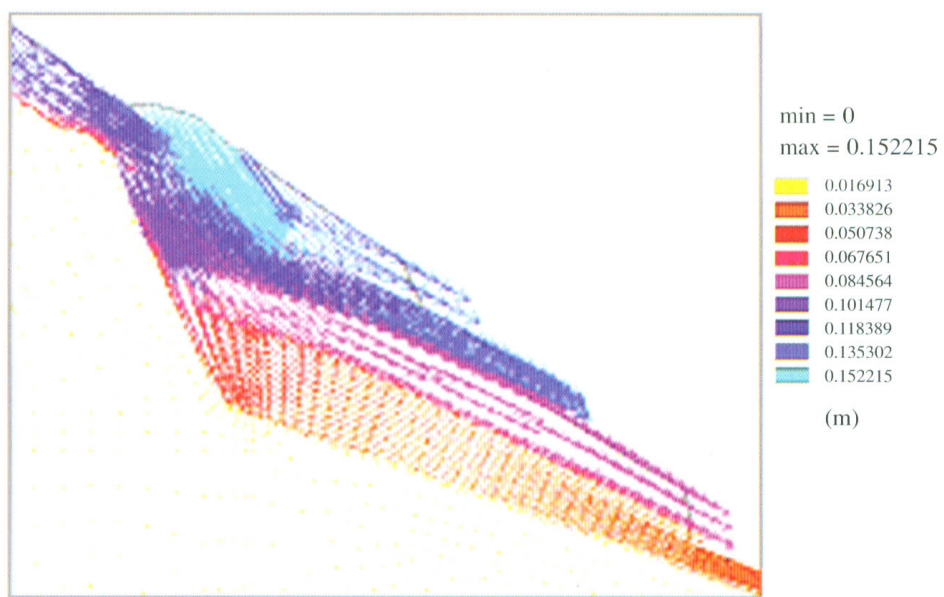


图 4 状态 2 中工况三下的位移矢量放大图

3 1 号坡体病害演变的原位测试

二郎山 1 号坡体病害的研究非常需要了解实际演变规律, 为此专门建立了大规模立体原位监测系统, 该系统包括锚索抗滑桩全长土压力、结构主筋应力、锚索预应力、抗滑桩全长位移、框架结构受力以及地表位移等全方位现场原位监测^[8](表 1).

表 1 20 号锚索抗滑桩锚索力(kN)及剩余百分比

日期	1 号锚索张力	2 号锚索张力	3 号锚索张力	4 号锚索张力	平均百分比
2001-12-24	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	100.00
2002-02-23	1003.00	1000.80	976.00	1062.00	84.20
2002-09-28	992.81	1018.04	953.18	999.15	82.57

监测发现 1 号坡体病害自 1997 年 7 月 3 日开始复活, 其西条坡体病害近 200 m 范围整体下沉 1.68 m, 1998 年再次开始活动. 仅深部滑面位移自 1998 年 4 月至 10 月就达 100 mm, 到 11 月已达 232 mm, 其中的有些监测孔因位移过大而先后在滑带处被剪断.

从各种位移监测资料看(参见图 5), 1 号坡体病害发展变化过程规律性很好, 极具代表性, 特别是施工前后反应非常敏感. 这种规律性集中体现在: 施工前后变形由快向慢的转变, 工程区内外和雨旱季由大到小的变化; 而且总体上体现多滑带发育、阶段性变化和牵引式运动三大特征.

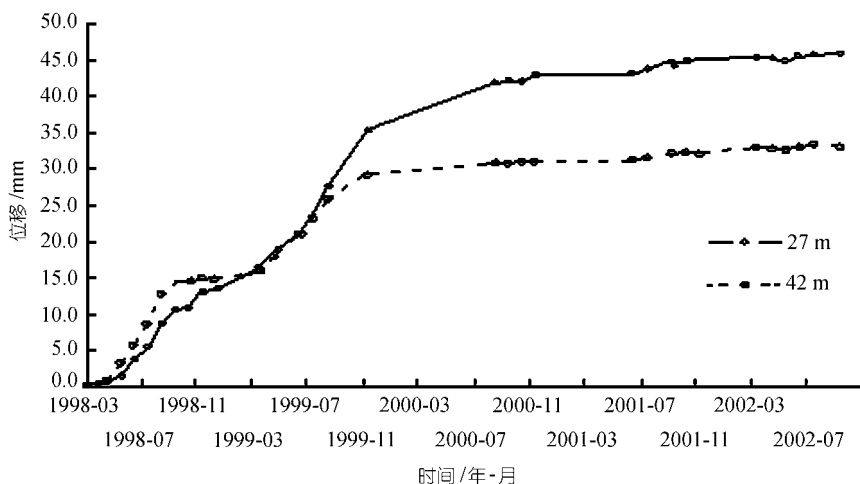


图 5 ZK9-2 深部位移监测孔时间-位移曲线

从变形阶段看: 坡体病害于 1997 年 7~9 月和 1998 年 7~10 月, 经历了两个快速变形期; 1999 年变形相对较缓(原因一是该年雨量相对较小, 二是部分整治工程已实施); 2000 年继续变形, 但当 2002 年坡体病害主体工程实施并完工后, 各种变形开始减速以至逐渐消失.

4 治理措施及其响应

1 号坡体病害至 2000 年底, 滑面已近贯通, 公路交通基本中断, 大规模滑动随时都有可能发生. 公路部门积极采取合理工程措施后, 对病害的发展起到了强有力的控制作用, 最终避免了大型坡体灾害的发生. 图 6 展现了锚索抗滑桩在坡体病害作用下的响应.

对这一大型坡体病害所采用的工程措施除一般的排水工程、抗滑工程及支挡工程外, 还根据河岸冲刷的特点采用河岸防护工程, 根据滑体在各个部位的不同厚度, 分别采用预应力锚索桩、锚索框架、锚墩等锚固工程, 根据坡面坍塌落石

采用护坡及挂网喷浆工程, 根据坡面松散采用锚杆及骨架护坡工程, 根据路面坍塌情况采用桩间墙组合工程, 根据滑坡深部含水丰富, 采用深层斜孔排水工程, 还有桩底锚杆等共计 15 类工程措施 24 种工程类型. 它们组成了统一的立体防治体系^[9].

由图 6 可以看出: (1) 坡体变形部位不只一层, 体现多层滑面特征; (2) 抗滑桩正在发挥作用, 且随着时间推移而更加明显; (3) 目前抗滑桩受力远未达到设计能力.

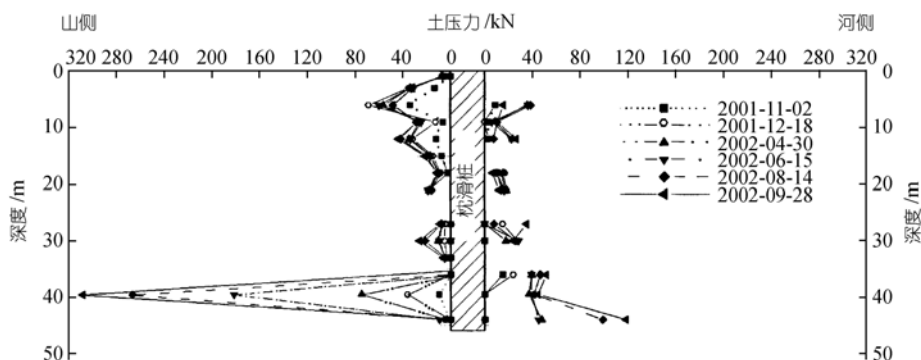


图 6 8 号抗滑桩土压力分布图

5 结论与建议

(i) 大型坡体病害的发育是有一定的演变期, 处于末期阶段的各种迹象尤为明显, 具一定的活体发育特征, 有很好的演变规律.

(ii) 大型坡体病害, 往往发育于人为扰动小、高海拔、高寒冷地区, 自风化属性明显, 发育比较成熟, 敏感性很强, 随时都有失稳爆发的可能.

(iii) 坡体物质松散, 变形由浅入深, 没有固定的滑面, 拖带性扩展是该类特大型坡体病害的主要演变特征之一.

(iv) 融雪、降雨与河流切割是大型坡体病害的主要激发条件, 而病害间的作用如错落体本身的活动、坡面泥石流和龙胆溪泥石流的冲刷作用更加具体和重要, 因而进一步引起更大规模的坡体病害; 这是本文强调的病害间作用为“强化作用”的概念.

(v) 从数值计算结果看, 拉应力区的发展是渐进的, 设置了支挡结构后, 原来出现于桩后岩体中的大量的塑性单元消失, 代之以桩前岩体的屈服, 且屈服区域随着工况的变化而保持不变, 没有扩大, 说明桩有效阻隔了坡体前部岩体的变形对桩后岩体的带动作用.

(vi) 研究表明, 工况三是大型坡体病害体的最不利工况, 水对病害体是极为不利的, 应引起足够重视.

(vii) 立体综合工程措施(如预应力锚索抗滑桩、锚索框架、深部排水工程和坡脚挡墙等)是调控坡体演变的有效而理想的方法。

参 考 文 献

- 1 潘卫东, 陈正林. 地理信息系统在地质灾害防灾减灾中的应用. 见: 文集编委会主编. 兰州滑坡泥石流学术研讨会文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. 229~232
- 2 朱天惠, 译. 泥石流滑坡及其防治. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1988. 3
- 3 钟祥浩. 西藏自治区农牧业和农牧业经济结构战略性调整探讨. 山地学报, 2003, 21(1): 9~15
- 4 Zaruba Q, Mencl V. Landslides and Their Control. Amsterdam: Elsevier, 1982. 54~57
- 5 李树德. 中国滑坡、泥石流的时空分布特点. 水土保持研究, 1999, 6(4): 33~37
- 6 Wang Quancai. An analysis of effect factors of landslide. Proceedings of the 1994 International Workshop and Field Investigation on Geological Disaster. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1996. 65~68
- 7 郑明新, 徐传宝, 蔡熙甘, 等. 京九线赣南段滑坡类型及其成因分析. 见: 文集编委会主编. 兰州滑坡泥石流学术研讨会文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. 106~110
- 8 徐邦栋. 滑坡稳定性判断的理论和方法. 见: 文集编委会主编. 兰州滑坡泥石流学术研讨会文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. 9~25
- 9 谢高地. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. 山地研究, 2003, 21(1): 50~55