

doi: 10.3799/dqkx.2010.016

泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征

许 领¹, 戴福初¹, 闵 弘², 邝国麟³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071

3. 香港大学土木工程系, 香港

摘要: 1976 年泾阳南塬大面积提水灌溉以来, 沿泾河右岸发育 27 处, 50 余起黄土层内滑坡, 造成严重的经济损失和人员伤亡, 使得台塬面积不断缩小, 水土流失加剧。通过对南塬黄土滑坡多次野外考察和滑坡测量, 研究了泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征。依据滑坡发生力学机制对南塬黄土滑坡进行了分类, 包括黄土流滑、黄土滑动和黄土崩塌。南塬黄土滑坡具有高陡的后壁, 后缘裂缝普遍发育, 具有演化性与群体性分布特征。其中裂缝发育及高陡的滑坡后壁是造成滑坡演化的重要因素, 裂缝的发育还是滑坡群体性分布的内在动力机制。

关键词: 黄土滑坡; 滑坡类型; 发育特征; 泾阳南塬。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2010)01-0155-06

收稿日期: 2009-07-10

Loess Landslide Types and Topographic Features at South Jingyang Plateau, China

XU Ling¹, DAI Fu-chu¹, MIN Hong², Kwong, A. K. L.³

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

3. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

Abstract: The South Jingyang plateau, which has a total area of 70 km², is located in Shaanxi Province, China. Groundwater table in this loess plateau has been significantly raised since 1976 when the loess cover began to be artificially irrigated. Up to now, more than 50 landslide events at 27 sites have occurred not only resulting in large economic loss and numerous deaths but also exacerbating water and soil erosion that reduced plateau area badly. After field visits and landslide measurement at South Jingyang plateau, the following types of loess landslides there can be recognized on the basis of the initiative mechanisms: loess flow slide, loess slide and loess fall. We also analyzed the mechanisms of terrain-edge cracks and steep scarp and their relations with group-distribution and retrogressive occurrences of loess landslide. The mechanism of the long runout loess landslide has also been discussed.

Key words: loess landslide; landslide types; landslide features; South Jingyang plateau.

泾阳南塬位于陕西省泾阳县城南泾河右岸, 是关中盆地渭北黄土台塬的组成部分。南塬横跨太平、蒋刘、高庄 3 个行政乡, 东西长达 27.1 km, 塬区面积约 70 km², 塬面开阔, 高程 420~490 m, 台塬高差 40~90 m, 直接与泾河 2 级阶地相接。自 1976 年泾阳南塬大面积引水灌溉(土渠、漫灌方式)以来, 黄土滑坡频发, 造成严重的经济损失和人员伤亡。根据最新调查统计, 研究区发生黄土滑坡 27 处, 共计 50 余

起(个别滑坡群作 1 处统计)(图 1)。

1 黄土滑坡类型

1.1 流滑

流滑为南塬黄土滑坡的主要类型(图 2a), 占研究区滑坡总数的 42%(图 3a)。流滑型黄土滑坡剪出口较低, 多位于地下水位抬升造成的塬边黄土饱水

基金项目: 香港研究资助局项目(No. RGC-HK U7176/05E)。

作者简介: 许领(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事黄土滑坡机理及防治技术研究。E-mail: suyu820@163.com



图 1 泾阳南塬黄土滑坡灾害分布图

Fig. 1 Distribution of loess landslides at South Jingyang plateau

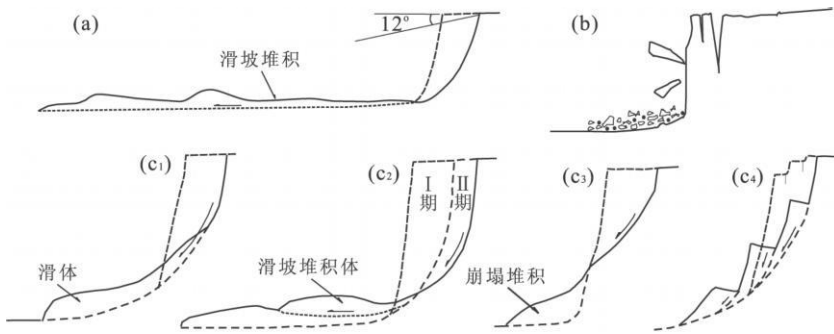


图 2 黄土滑坡类型

Fig. 2 Failure modes of loess landslides

a. 黄土流滑; b. 黄土崩塌; c. 黄土滑动

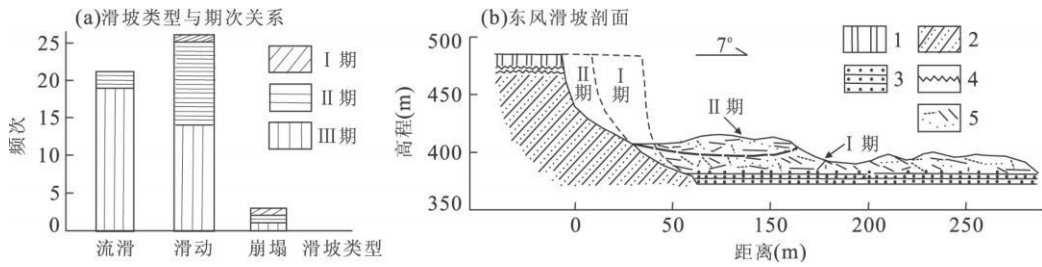


图 3 东风滑坡剖面及实测地形

Fig. 3 Profile of Dongfeng loess landslide and topographic 3D scene

1. 马兰黄土; 2. 离石黄土; 3. 阶地砂卵石层; 4. 古土壤; 5. 滑坡堆积体

带. 此类黄土滑坡发生机制与底部饱和黄土静态液化有关. 金艳丽和戴福初(2007)基于 CSD 饱和黄土增湿试验对其静态液化机制进行了探讨. Hutchinson(1988)较早论述了黄土流滑破坏类型, 国内学者王家鼎等(1992)亦进行了研究. 从黄土滑坡演化的角度, 该类型滑坡主要为第一期滑坡, 如图 3a 所示. 研究区流滑滑距为 122~368 m, α (angle of reach) 在 12° 左右(Corominas, 1996), 这与 Sassa(1984)和 Higher and Valle(1980)等对类似滑坡统计角度一致. 由于阶地平坦开阔, 该类滑坡具有高速远程的特

点, 破坏力强.

图 3b 为泾阳南塬东风滑坡实测剖面. 该处前后发生 2 次滑坡, 分别发生于 2003 年 7 月和 2004 年 3 月. 首次滑坡滑距为 267.4 m, 东西宽约 500 m, 滑动体积约 $164 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属于典型的远程流滑, 该滑坡运动时具有较好的整体性, 坡体无剧烈的翻滚.

1.2 滑动

滑动发生机制是剪应力达到土体最大抗剪强度而发生的一类破坏. 此类滑坡剪出口较高, 处于非饱和黄土层内, 为农田灌溉等地表水入渗造成的非饱

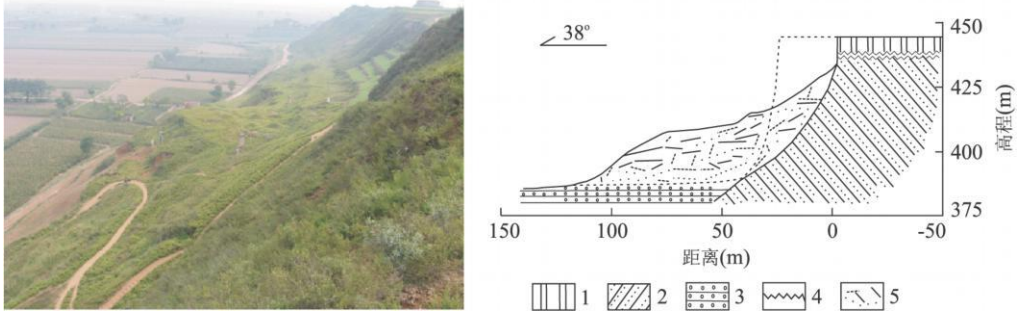


图 4 大堡子滑动

Fig. 4 Dabaozi loess slide

1. 马兰黄土; 2. 离石黄土; 3. 阶地砂卵石层; 4. 古土壤; 5. 滑坡堆积体



图 5 3 类典型黄土滑坡

Fig. 5 Three types of loess landslides

a. 寨头滑坡; b. 多滑面滑动; c. 黄土崩塌

和黄土基质吸力(抗剪强度)降低所致. 从滑坡演化的角度来看, 滑动主要为第 2 期、3 期滑坡, 局部地段由于地下水位埋深大而表现为 1 期滑坡(图 3a). 根据滑动、运动方式的不同, 滑动具有 4 种形式, 如图 2c₁ ~ 2c₄ 所示.

图 2c₁ 为研究区典型的滑动破坏, 滑体并未完全脱离初始滑面, 滑坡舌位于塬边坡脚附近, 呈鼓张状. 图 4 分别为大堡子黄土滑动及其实测剖面. 该类型滑坡主要发生于地下水位较深、塬边高差较大的地段, 如太平镇张湾村以西以及蒋刘乡东风村附近.

图 2c₂ 为早期流滑的 2 期滑动滑坡, 该类滑坡滑动后在前期滑坡堆积体上继续短距离运动, 如东风 2 期滑动滑坡(图 3b)及蒋刘 3 期滑坡(图 8)等.

图 2c₃ 为滑动剪出口位置较高, 以至滑动以后, 滑体脱落并在坡脚形成堆积, 图 5a 为寨头村此类型滑动.

图 2c₄ 为多滑面滑动, 该类滑坡多发生于滑坡演化强烈的塬边地段, 如太平乡寨头村附近. 此类型滑坡主要是由塬边多级裂缝发展而来(图 5b).

1.3 崩塌

黄土崩塌没有滑动面, 主要由节理或者裂缝发

展而来(图 2b). 区内多为小型崩塌, 规模不大、危害较小. 滑坡调查时仅对规模较大的崩塌进行了统计, 从而造成研究区崩塌数量较少(图 3a). 图 5c 为蒋刘村附近一起较大的崩塌.

2 黄土滑坡发育特征

泾阳南塬黄土滑坡滑后地貌特征明显, 滑坡后壁高陡, 滑坡堆积体周界清晰, 多呈“舌”状平铺于泾河阶地之上. 滑坡前缘垄岗状地形明显, 高差 3 ~ 6m. 滑坡期次关系在地貌上有清晰的表现, 后期滑坡堆叠于前期滑坡体上, 形成台阶状. 个别滑坡后缘洼地常年积水, 芦苇丛生, 如蒋刘滑坡积水洼地水面距顶原 46 m (高出阶地 16 m). 2007 年 1 月份的考察, 正值冬小麦灌溉季节, 坡脚处多有渗水, 黄土滑坡威胁依然存在. 下面从滑坡后壁特征、塬边地裂缝、滑坡演化与滑坡群等方面对研究区黄土滑坡发育特征进行分析.

2.1 滑坡后壁特征

黄土滑坡通常具有高陡后壁, 对于一定规模的黄土层内滑坡尤为明显. 滑坡后壁顶部为一陡坎, 且

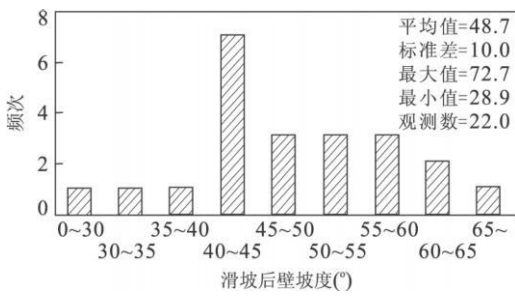


图 6 滑坡后壁坡度统计直方图

Fig. 6 Slope angle distribution of landslide backscarp

整体坡度较大(许领和戴福初, 2008). 对泾阳南塬黄土滑坡调查中, 特别注意了陡坎高度与马兰黄土厚度的测量. 统计分析(双样本异方差 *t* 检验, 通过 0.05 显著水平)表明: 滑坡后壁陡坎受马兰黄土垂直节理控制.

图 6 为滑坡后壁坡度统计直方图. 考虑到统计数据多为近期滑坡后壁坡度(从演化的角度, 坡度变缓)以及崩塌堆积等使得坡度偏小, 研究区滑坡后壁平均坡度在 50° 左右, 而早期流滑型黄土滑坡(从演化的角度, 为第 1 期的远程黄土滑坡)要大于 50°, 甚至在 60° 以上.

2.2 裂缝发育特征

泾阳南塬 27.1 km 的塬边发育有 28 条地裂缝, 总延展长度为 1 424 m (裂缝延展长度为其两端点连线的直线距离). 裂缝呈弧形, 总体平行塬边展布, 贯通性较好. 研究区裂缝分布很不均匀, 主要集中于滑坡发育较强烈的地段, 如太平镇寨头村以及东风村等. 裂缝距塬边距多为 2 ~ 14 m, 最大一条为

18.7 m; 裂缝延展长度主要集中在 10 ~ 70 m 之间, 最长一条为 208 m. 塬边裂缝多已张开, 垂直错动, 裂缝活动性强.

对裂缝发育形态进行了素描, 如图 7 所示, 其发育模式可分为“U”模式、“W”模式和“Z”模式. “U”模式是发生在滑坡后缘的一种裂缝模式, 该模式可能由于前期滑坡滑动对于后壁的一种牵引拉张或者卸荷作用而产生. 因此, 由该裂缝模式演化而成的滑坡规模较前期滑坡要小. “W”模式为两处“凹”地形或者两处滑坡之间凸出部分, 研究区该模式裂缝占大多数, 其破坏机制可能是底部首先破坏、发展引起地表拉张裂缝, 一般可以发展为规模较大的滑坡. “Z”模式多为塬边的自然不规则形态或者一边为天然塬边, 一边为滑坡后缘的组合形态, 前者可能因节理拉张而形成黄土崩塌掉块, 后者一般可以延展上百米, 发展为更大规模的滑坡.

2.3 滑坡演化与滑坡群

泾阳南塬黄土滑坡具有演化特征, 即在时间尺度上发生过滑坡的地方再次发生滑坡. 如图 2 所示, 研究区流滑、滑动和崩塌类型在滑坡期次上的差别也正是滑坡演化的一种反映. 调查统计表明, 研究区有 38% 的滑坡点发生演化, 其中发生 3 期滑坡的滑坡点占研究区滑坡点的 13%. 黄土滑坡演化以蒋刘滑坡最为典型, 在短短的 7 ~ 8 年中, 在原地就滑了 3 次(图 8).

勒泽先和韩庆宪(1989)根据对黄土滑坡大量区域性考察, 认为黄土滑坡具有群体性发育特征. 调查表明, 泾阳南塬黄土滑坡亦具有此特征, 太平乡寨头

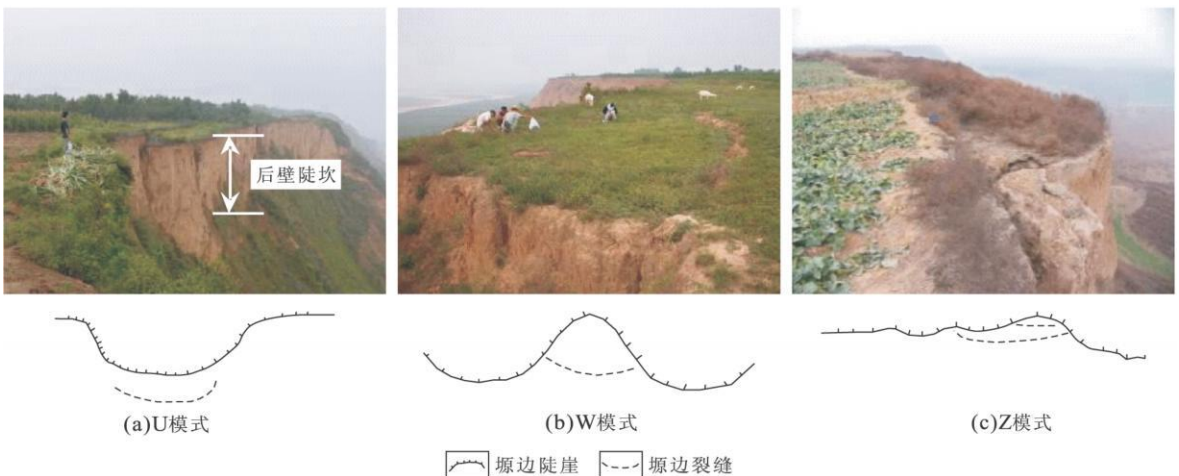


图 7 塬边地裂缝发育模式

Fig. 7 Developing modes of terrain-edge cracks

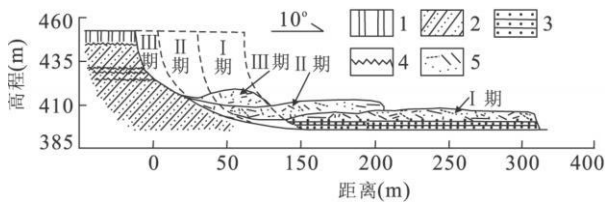


图8 蒋刘滑坡剖面

Fig. 8 Profile of Jiangliu loess landslide

1. 马兰黄土; 2. 离石黄土; 3. 阶地砂卵石层; 4. 古土壤; 5. 滑坡堆积体

村滑坡群特征尤为典型, 关于黄土滑坡群的成因后面将作进一步的讨论。

3 问题讨论

3.1 地裂缝成因机制与黄土滑坡群

吴玮江和王念秦(2005)认为前期滑坡对节理的牵引、拉张可造成滑后塬边裂缝。王家鼎和刘悦(1999)根据裂缝多位于湿陷坑边缘, 认为裂缝可由湿陷坑发展而来。也有研究者认为, 塬边裂缝是地表水沿黄土节理入渗发展而造成的一种黄土湿陷裂缝(赵尚学等, 1995)。上述分歧的原因在于目前对裂缝发育模式没有进行专门的归类 and 区别。因此, 如图7所示裂缝分类模式, 可避免出现将裂缝成因机制单一化的研究思路。基于不同的裂缝发育模式, 开展针对性的研究工作应成为今后裂缝成因机制研究的重点。

黄土滑坡群形成机制研究还停留在对滑坡“群体性”特征的描述上, 作者认为塬边地裂缝发育对其形成机制具有重要意义。随着个体滑坡的发生及其所处塬边滑坡演化, 一方面造成塬边地质条件的改变, 使得向着有利于滑坡发生的方向发展, 一方面造成塬边裂缝发育。而塬边裂缝的发育(尤其是“W”模式裂缝, 占裂缝总数的50%)为滑坡横向扩展提供了重要动力机制, 最终导致黄土滑坡集中分布, 形成黄土滑坡群。

3.2 滑坡后壁与滑坡演化

滑坡高陡的后壁有利于滑动势能的快速释放, 形成高速滑坡(吴玮江和王念秦, 2005), 而研究区滑坡后壁坡度在 50° 左右, 早期的滑坡后壁坡度可能在 60° 以上, 高陡的后壁无疑是后期滑坡发生的重要原因。滑坡后壁为凹向黄土塬的弧形, 能够汇集塬边地下水, 加大径流强度。调查发现, 滑坡后壁多有泉水出露。因此, 滑坡高陡的后壁以及滑坡后缘形态对地下水径流的加强是黄土滑坡演化的重要机制。

滑坡演化实际上是滑坡活动强度逐渐衰减的过程, 反映的是随着塬边地形地貌条件的改变, 滑坡趋于平衡的一种走势。滑坡演化何时能够达到平衡, 既是个理论问题又是个非常现实的问题。除了从上述角度(高陡后壁和地下水以及地裂缝)探寻黄土滑坡演化机制外, 还要考虑到前期滑坡堆积体, 后期滑坡临空条件的改变以及剪出口抬高等在黄土滑坡演化分析中的角色转变和意义。

3.3 黄土滑坡机理

土的力学性质决定于其应力路径(Dai *et al.*, 1999)。金艳丽和戴福初(2007)开展了基于饱和黄土的CSD 应力路径试验, 研究了南塬黄土流滑发生机理, 认为此类黄土滑坡机制为排水剪切—导致不排水破坏—静态液化的滑坡发生机制。实际上, 黄土滑坡酝酿的初始状态为非饱和状态, 尤其对于滑动型滑坡。因此, 开展非饱和—饱和的全过程CSD 增湿试验应成为南塬滑坡研究的重点。

如前文所述, 黄土流滑滑距坡度 α 在 12° 左右, 远低于饱和黄土内摩擦角(30° 左右)。以上两点初步表明流滑滑动过程中发生了液化。南塬黄土滑坡启动后, 在泾河阶地上滑动, 除黄土自身可以发生滑动液化外, 阶地二元结构也具有液化能力, 因此, 该滑动面孔压产生、消散模式较为复杂, 为典型的双液化层模式。

References

- Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 260–271. doi: 10.1139/cgj-33-2-260
- Dai, F. C., 1997. Engineering behavior of a volcanic-derived soil and rainfall-induced slide-debris flows. Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese).
- Dai, F. C., Lee, C. F., Wang, S. J., 1999. Analysis of rainfall-introduced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island Hong Kong. *Engineering Geology*, 51: 179–190. doi: 10.1016/S0013-7952(98)00047-7
- Higher, W. H., Valle, R. P., 1980. The liquefaction of different mine tailings under stress-controlled loading. *Engineering Geology*, 16: 147–150. doi: 10.1016/0013-7952(80)90014-9
- Hutchinson, J. N., 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. 5th International Symposium on Landslides Lausanne Switzerland 1: 3–35.
- Jin, Y. L., Dai, F. C., 2007. The mechanism of irrigation-

- induced landslides of loess. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(10): 1493—1499 (in Chinese with English abstract).
- Le, Z. X., Han, Q. X., 1989. Group-distribution features of loess plateau. In: 1987 National Landslide Technicality Symposium. Sichuan Publish House of Sciences & Technology, Chengdu, 123—128 (in Chinese).
- Sassa, K., 1984. The mechanism starting liquefied landslides and debris flows. Proceeding 4th International Symposium on Landslides 349—354.
- Wang, J. D., 1992. A mechanism of high-speed loess landslides—saturation loess creeping liquefaction. *Geological Review*, 38(6): 532—539 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. D., Liu, Y., 1999. A further study on the mechanism of highspeed loess landslides in state creeping and sliding liquefaction. *Journal of Northwest University*, 29(1): 79—82 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W. J., Wang, N. Q., 2005. Landslide hazards in Gansu. Lanzhou University Press, Lanzhou (in Chinese).
- Xu, L., Dai, F. C., 2008. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang plateau. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 5: 28—32 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. X., Li, H. L., Ma, D. T., 1995. Study on the landslides at the edge of loess terrace in Yangguoxia reservoir region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 15(1): 19—23 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 金艳丽, 戴福初, 2007. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究. *岩土工程学报*, 29(10): 1493—1499.
- 勒泽先, 韩庆宪, 1989. 黄土高原滑坡分布的“群体性”. 见: 1987年全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集, 成都: 四川科学技术出版社, 123—128.
- 王家鼎, 1992. 高速黄土滑坡的一种机理—饱和黄土蠕动液化. *地质论评*, 38(6): 532—539.
- 王家鼎, 刘悦, 1999. 高速黄土滑坡蠕、滑动液化机理的进一步研究. *西北大学学报(自然科学版)*, 29(1): 79—82.
- 吴玮江, 王念秦, 2005. 甘肃滑坡灾害. 兰州: 兰州大学出版社.
- 许领, 戴福初, 2008. 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析. *水文地质工程地质*, (5): 28—32.
- 赵尚学, 李鸿琏, 马东涛, 1995. 盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究. *水土保持通报*, 15(1): 19—23.