

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

成玉祥, 张卜平, 唐亚明

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

CHENG Yuxiang, ZHANG Buping, and TANG Yaming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析](#)

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

王玉川, 郭其峰, 周延国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 17–23

[广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析](#)

Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City
韩庆定, 罗锡宜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 56–64

[三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析](#)

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region
蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36–42

[黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律](#)

Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground
于永堂, 郑建国, 张继文, 刘智 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 85–92

[三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析](#)

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24–32

[基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析](#)

Analysis of development characteristics of high-elevationchain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation

李军, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 42–50



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-10](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-10)

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

成玉祥^{1,2}, 张卜平¹, 唐亚明³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 溯源侵蚀是黄土丘陵区最强烈的动力地质作用。常导致沟头后退、坡脚掏蚀, 进而引发崩塌灾害。文章通过对研究区崩塌灾害的统计分析, 厘定出溯源侵蚀作用引发崩塌的典型类型为拉裂-倾倒型。该类型崩塌具有后壁陡直、粗糙、规模大、分布广、危害范围广, 潜在危险性大等特点。分析认为溯源侵蚀引发拉裂-倾倒型崩塌是水力侵蚀和重力侵蚀耦合作用的结果。该类型崩塌的形成, 主要是由于斜坡在地表水力侵蚀和重力作用下, 坡体内拉应力分布区、剪应力分布区和强烈水力侵蚀区三个区发生了转化, 经历了斜坡应力重新分布、拉应力的增大与范围扩大, 剪应力状态改变与范围集中、坡顶拉张与孔隙水压力耦合作用下的崩塌体倾倒破坏三个阶段。控制和影响拉裂-倾倒型黄土崩塌稳定性主要因素包括: 斜坡几何特征、土体物理力学参数及裂隙中的静水压力。随着土体含水率的上升, 坡顶拉张裂缝深度加深, 侵蚀凹槽深度加深, 崩塌体稳定性逐渐降低。

关键词: 溯源侵蚀; 黄土崩塌; 拉裂-倾倒型; 形成机制; 三区三阶段

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)05-0086-06

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

CHENG Yuxiang^{1,2}, ZHANG Buping¹, TANG Yaming³

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Tracing erosion is the strongest dynamic geological action in loess hilly areas. It often causes the head of the ditch to retreat and the toe of the slope to be eroded, which in turn leads to collapse. Based on the statistical analysis of collapse disasters in the study area, this paper determines that the typical type of collapse caused by the traceable erosion effect is tension-toppling type. This type of collapse is characterized by steep back wall, rough wall, large scale, widespread, wide damaging range, and high potential risk. The formation of this type of collapse is mainly due to the transformation of the three areas in horizontal direction such as the tensile stress distribution area, the shear stress distribution area and the strong hydraulic erosion area under the action of surface water erosion and gravity. the collapse of slope undergone three stages: the increase and scope expansion of the tensile stress, the change of the shear stress state and the concentration of the scope, and the collapse of the collapsed body under the coupling action of the slope top tension and pore water pressure. The stability analysis can be carried out by the moment balance method. The three factors that affect the stability of the tension-toppling loess collapse include: slope geometric characteristics, soil physical and mechanical parameters and water pressure in the cracks. Theoretical analysis illustrates that with the increase of soil moisture content, the depth of tensile cracks on the top of the slope deepens, the depth of erosion

收稿日期: 2020-10-13; 修订日期: 2020-11-18

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190642)

第一作者: 成玉祥(1978-), 男, 博士, 副教授, 从事黄土水力侵蚀与地质灾害方面的研究。E-mail: Chengyx@chd.edu.cn

通讯作者: 张卜平(1993-), 男, 博士生, 从事黄土地质灾害形成机理方面的研究。E-mail: 670814538@qq.com

grooves deepens, and the collapse stability coefficient gradually decreases.

Keywords: headward erosion; loess fall; fracturing-topping type; formation mechanism; three zones and three stage

0 引言

我国陕北黄土丘陵地区地貌类型复杂,梁峁遍布,地形坡度大。该地区地表披覆的砂黄土粒间联结弱,土体结构松散,物理力学性质差,对水异常敏感^[1]。加之该地区年降雨量虽少但是多集中在雨季,且多以暴雨形式出现,造成黄土丘陵区水力侵蚀异常强烈。而沟头溯源侵蚀又为侵蚀速度最快的侵蚀作用^[2]。在长期溯源侵蚀作用下,完整的坡面不断被切割变得沟壑纵横,往往伴随着各类地质灾害^[3-4]。黄土崩塌即为溯源侵蚀过程中发生的主要地质灾害类别之一,严重威胁区内人民群众的财产及人身安全^[5]。因此,研究溯源侵蚀引发黄土崩塌的发育特征和成因机理对黄土高原地区防灾减灾具有重要的科学和社会价值。

多位学者从影响因素、基本特征、沟头崩塌形成机理等方面对沟头溯源侵蚀作用进行了研究。陈绍宇等^[6]认为溯源侵蚀的影响因素有降雨、地形、岩土性质、土地利用。车小力^[7]调查发现活动黄土沟头处拥有跌水陡坎,沟壁垂直陡峭、多裂缝,沟头底部下切、沟壁掏空严重,沟底有明显的水流痕迹和较新的崩塌沉积物,沟头附近多陷穴。史倩华等^[8]通过试验分析了董志塬沟头溯源侵蚀的演化过程,认为孔隙水压力的升高是造成溯源侵蚀崩塌的重要原因。可见黄土地区沟头溯源侵蚀研究还停留在定性的基本特征总结和影响因素分析层面,未能充分考虑溯源侵蚀作用的灾害效应,因此亟需进行灾害力学成因机制分析研究。而在黄土崩塌形成机制方面也鲜有学者考虑到地表径流的冲刷作用^[9-11],因此也未能揭示溯源侵蚀过程中水力重力耦合驱动力作用下崩塌灾害形成机制^[12-14]。而云南元谋干热河谷地区溯源侵蚀作用的灾害效应研究较为深入,充分考虑了地表径流的冲刷作用,揭示了水力侵蚀重力侵蚀耦合驱动力作用下沟头失稳机制,这对黄土地区沟头溯源侵蚀致塌机制具有重要的借鉴意义^[15-18]。

综上所述,黄土溯源侵蚀过程的影响因素众多,形成机制复杂。由于沟头溯源侵蚀作用是重力侵蚀与水力侵蚀复合驱动的结果,因此溯源侵蚀引发崩塌的成灾机理比常见崩塌更为复杂,而现有研究成果较少涉及到此类崩塌的形成机制、稳定性评价研究。本文以野外地质调查为基础,通过总结溯源侵蚀引发黄土崩塌灾害的基本特征和发育规律,揭示溯源侵蚀引发黄土崩塌的形成机制,探讨了影响该类崩塌稳定性的主要影响因

素,研究成果可为揭示水致黄土崩塌灾害成因机理和黄土崩塌灾害防治提供理论参考。

1 研究区崩塌灾害发育特征

研究区位于陕西省榆林市东南部绥德、吴堡两县(图1)。属于中温带亚干旱区,为大陆性季风气候。区内降水量年内分配极不均匀,主要集中在7、8、9三个月,且多以暴雨形式为主。三个月的多年平均降水量为268.3 mm,占全年降水量的61%。区内北部和西部属黄土梁峁区,东部和南部黄河沿岸黄土丘陵区,中部多为南北走向的黄土梁状残塬地,梁峁起伏、支离破碎,沟壑密度3.03~5.00 km/km²。区内广泛分布第四系松散堆积层,厚度在2~90 m,按形成时代和成因,主要包括马兰黄土(Q₃)和离石黄土(Q₂)。松散的黄土、破碎的地形和集中的降雨为该地区地质灾害的形成创造了条件。

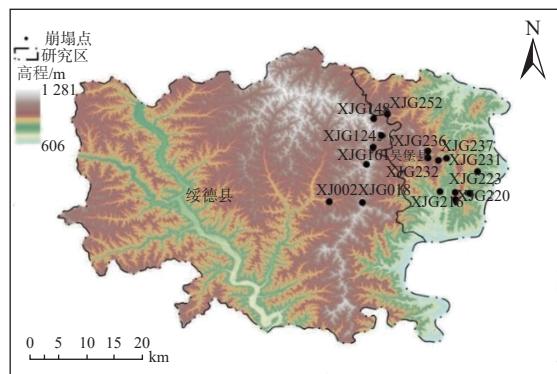


图1 研究区崩塌灾害分布简图
Fig. 1 Distribution diagram of loess falls in the study area

研究区内现场调查共发现127处崩塌灾害,其中由溯源侵蚀引发的典型黄土崩塌灾害共16处,占总数的12.6%。溯源侵蚀引发黄土崩塌基本特征如表1所示。

总体来看,溯源侵蚀引发黄土崩塌数量不多,但是规模较大;主要分布在黄土残塬边缘及黄土冲沟的沟头部位;崩塌的岩土体主要为Q₃黄土和Q₂黄土,且以Q₃黄土为主。从已经发生崩塌的崩塌体特征来看,该类型崩塌最显著的特点是崩塌体整体以坡脚为支点,向临空方向发生旋转性倾倒(图2)。有些崩塌体甚至保持了基本的完整性。崩塌后壁粗糙陡直,擦痕不发育,具有拉张破坏的基本特征(图3),后壁上部具有明显的流水痕迹,坡顶分布有走向与坡沿近平行的拉张裂缝(图2,图4)。从崩塌周围尚未发生破坏的崩塌来看,坡顶沟

表 1 溯源侵蚀引发典型黄土崩塌基本特征表

Table 1 Basic characteristics of typical loess falls caused by headward erosion

点号	名称	崩塌类型	高/m	宽/m	厚/m	地层岩性
XJG002	霍白湾村崩塌	淘蚀垮落	13	30	6	Q ₃ 黄土
XJG018	焉头村崩塌	拉裂倾倒	11	45	2	Q ₂ 黄土
XJG118	梨树塔村崩塌	拉裂倾倒	25	40	4	Q ₃ 黄土
XJG121	后坪村崩塌	拉裂倾倒	10	25	3	Q ₃ 黄土
XJG148	白家山村崩塌	淘蚀垮落	9	10	3	Q ₃ 黄土
XJG161	寺焉村以北崩塌	淘蚀垮落	12	20	3	Q ₃ 黄土
XJG200	畔畔山村崩塌	淘蚀垮落	22	13	3	Q ₃ +Q ₂ 黄土
XJG208	马家渠村崩塌	淘蚀垮落	31	30	5	Q ₃ +Q ₂ 黄土
XJG216	后焉村公路崩塌	拉裂倾倒	41	15	10	Q ₃ 黄土
XJG220	李家坬下山村崩塌	淘蚀垮落	33	10	3	Q ₃ 黄土
XJG223	尚家坬村崩塌	拉裂倾倒	24	10	3	Q ₃ +Q ₂ 黄土
XJG231	冯家坬村崩塌	淘蚀垮落	31	45	12	Q ₃ 黄土
XJG232	田家坬村公路崩塌	拉裂倾倒	37	30	10	Q ₃ 黄土
XJG236	深砭墕村公路崩塌	拉裂倾倒	23	35	5	Q ₃ 黄土
XJG237	车家坬村西崩塌	拉裂倾倒	23	34	5	Q ₃ 黄土
XJG252	深砭墕村东崩塌	拉裂倾倒	15	20	3	Q ₃ 黄土

注: 表中崩塌高、宽为崩塌后壁实测数据, 厚度为估算或者实测裂缝距沟边距离。



图 2 崩塌后缘拉张裂缝

Fig. 2 Tension fractures at the edge of loess falls



图 3 崩塌后壁

Fig. 3 Back wall of loess falls

壁垂直节理裂隙发育, 并伴有落水洞。坡脚大多受沟道水流的侵蚀作用, 坡脚陡立, 甚至出现反倾的侵蚀凹槽。坡脚的土体受水的浸润作用, 含水量较高。

由此可见, 水力侵蚀改造了斜坡的形态, 进而影响了坡体内的应力分布状态。重力作用为崩塌的破坏提供了主要的源动力。拉裂倾倒型崩塌是地表水力侵蚀和重力共同作用下形成的。另外短时强降雨形成的孔隙水压力也是不容忽视的影响因素, 由此可见, 该类型崩塌形成机制复杂。

2 拉裂-倾倒型崩塌形成机制

天然黄土斜坡在其漫长的形成过程中, 形成典型的

“V”字型沟谷, 坡体内的应力分布与坡体强度达到平衡状态, 谷坡和沟头能够保证基本稳定见图 5(a)。

在黄土梁峁区, 黄土沟头是地表水流侵蚀作用最为强烈的地段, 一方面是由于沟头地形的突变, 为地表水流的加速提供了条件。另一方面, 黄土梁峁的集水作用, 尤其是居民点建设、公路建设使得集水作用更加明显。如遇暴雨在沟头形成了极端的地表径流。高流速、大流量的水流在沟头形成了典型的贴壁流和跌水流, 对坡脚产生强烈侵蚀使得坡度变陡。对谷底产生强烈的下蚀作用导致沟头增高见图 5(b)。地形改变引发坡体内应力状态的改变。坡高增大, 坡度变陡, 坡顶的岩土体向临空方向移动, 坡顶拉应力区范围增大、量值

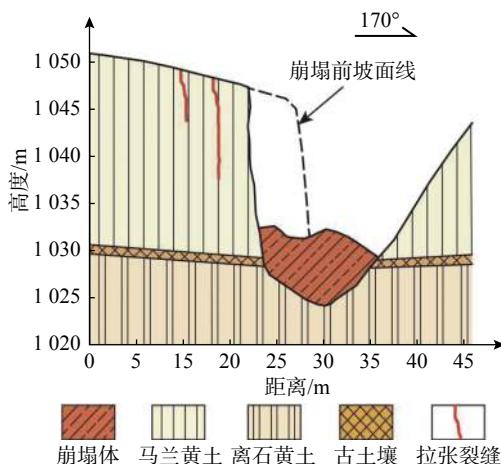


图 4 典型拉裂-倾倒型黄土崩塌剖面示意图

Fig. 4 The cross-section diagram of the typical fracturing-topping and loess soil

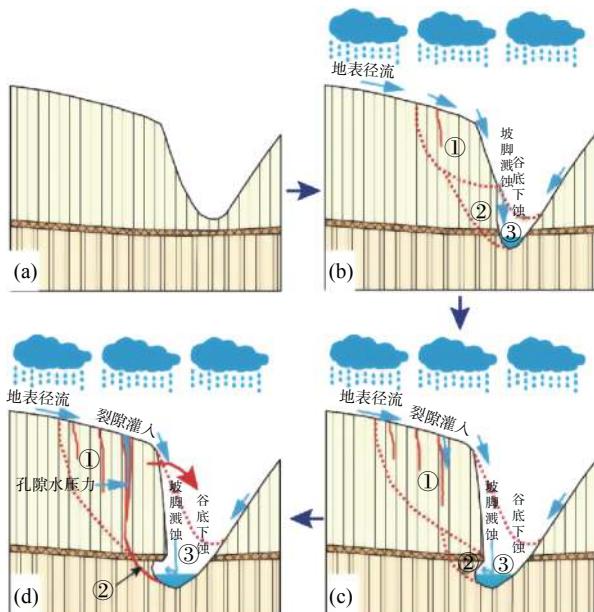


图 5 拉裂-倾倒型崩塌演化过程

Fig. 5 The evolution process of the fracturing-topping and loess soil

增高(①区), 如果拉应力超过抗拉强度, 地表出现拉张裂缝。坡脚主要受坡体重力作用, 为剪应力分布区(②区)。坡脚和谷底为强烈水力侵蚀区(③区)。

随着侵蚀时间的增长, 沟头地形逐渐会变为近直立, 贴壁流的侵蚀作用逐渐减弱, 跌水流的侵蚀作用逐渐增强, 坡脚和谷底为强烈水力侵蚀区逐渐扩大, 跌水流在坡脚的溅蚀作用往往形成凹槽。导致拉应力分布区范围逐渐扩大, 拉张裂缝逐渐增大, 加深。剪应力分布区范围逐渐缩小, 由于反倾地形, 使得剪应力分布区的应力状态有压剪状态转变为拉剪状态见图 5(c)。

当地表水的侵蚀发展到一定程度, 坡顶的拉张裂缝

向下延伸到一定深度。如果崩塌体的重心位于坡脚凹槽的内侧时, 崩塌体尚能保持基本稳定。如果崩塌体的重心位于坡脚凹槽的外侧时, 再加上后缘裂隙中地表水的灌入形成孔隙水压力的水平压力, 将导致崩塌体沿着坡脚凹槽为中心, 发生倾倒破坏。

综上所述, 该类型崩塌的发生是地表水侵蚀和重力作用下, 坡体内拉应力、剪应力分布区和强烈水力侵蚀区三个区发生了转化, 经历了斜坡应力重新分布、拉张应力的增大与范围扩大, 剪应力状态改变与范围集中、坡顶拉张与孔隙水压力耦合作用下的崩塌体倾倒破坏三个阶段。

3 控制和影响拉裂-倾倒型黄土崩塌稳定性的主要因素

学界对于拉裂-倾倒型崩塌稳定性评价研究成果相当丰富^[19–23]。根据溯源侵蚀引发拉裂-倾倒型黄土崩塌的具体特征及“三区三阶段”演化特征, 借鉴前人研究成果, 此类崩塌稳定性可采用力矩法进行粗略评价。根据该类崩塌的具体特征, 建立图 6 所示的拉裂-倾倒型崩塌物理模型图。

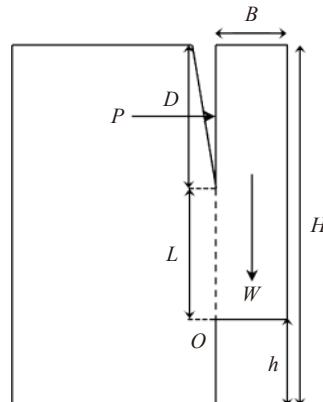


图 6 拉裂-倾倒型崩塌物理模型图

Fig. 6 Physical model diagram of the fracturing-topping and loess soil

如图 6 所示, 取单位宽度坡体进行稳定分析。坡顶拉张裂隙深度为 D , 坡脚掏蚀凹槽高度为 h , 深度为 B , 悬空体拉张裂隙未贯通处长度为 L , 悬空体受重力 W 和静水压力 P 作用, 土的天然密度为 ρ , 土的黏聚力为 c , 水的密度为 ρ_w 。此时, 悬空体所受倾覆力为:

$$W = \rho g(H-h)B \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho_w g D \quad (2)$$

抗倾覆力为土体的水平抗拉力 C :

$$C = c(H - h - D) \quad (3)$$

设悬空土体绕 O 点发生倾覆, 则倾覆力矩为:

$$M_1 = \frac{1}{2}WB = \frac{1}{2}\rho g(H - h)B^2 \quad (4)$$

$$M_2 = P\left(H - h - \frac{2D}{3}\right) = \frac{1}{2}\rho_w gD\left(H - h - \frac{2D}{3}\right) \quad (5)$$

抗倾覆力矩为:

$$M_3 = \frac{1}{2}CL = \frac{1}{2}(H - h - D)C = \frac{1}{2}(H - h - D)^2c \quad (6)$$

由(4)、(5)和(6)式可得拉裂倾倒型崩塌稳定性系数:

$$\begin{aligned} K &= \frac{(H - h - D)^2c}{\rho g(H - h)B^2 + \rho_w g\left(H - h - \frac{2D}{3}\right)D} \\ &= \frac{(H - h - D)^2c}{\gamma(H - h)B^2 + \rho_w g\left(H - h - \frac{2D}{3}\right)D} \end{aligned} \quad (7)$$

根据(7)式, 当崩塌体唯一确定时, 影响其稳定性的主要因素有: 沟头土体的黏聚力 c 和土的天然密度 ρ 。研究表明, 土体的天然重度 γ 又与土的天然含水量 w 和干重度 γ_d 存在下列关系^[24]:

$$\gamma = \rho g = \gamma_d(1 + w) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可以看出, 溯源侵蚀引发拉裂-倾倒型黄土崩塌的稳定性受三大类因素影响和控制: 其一为沟头的几何特征, 包括沟头高度、拉张裂缝的深度及其与坡沿的距离、侵蚀凹槽的深度和高度; 其二为沟头土体的含水率; 其三为拉张裂隙中的静水压力。显然, 随着沟头土体含水率的上升, 稳定性降低; 坡顶拉张裂缝深度越大, 积水越深、侵蚀凹槽高度越高, 深度越深, 沟头越易失稳。

4 结论

(1) 黄土沟头溯源侵蚀作用是引发拉裂-倾倒型崩塌灾害的主要驱动力。该类型崩塌主要分布在黄土残塬边缘及黄土冲沟的沟头部位, 数量不多, 但是规模较大, 潜在危险性大。

(2) 溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型崩塌的形成, 主要是由于斜坡在地表水侵蚀和重力作用下, 坡体内拉应力分布区、剪应力分布区和强烈水力侵蚀区三个区发生了转化。经历了斜坡应力重新分布、拉张应力的增大与范围扩大, 剪应力状态改变与范围集中、坡顶拉张与孔隙水压力耦合作用下的崩塌体倾倒破坏三个阶段。

(3) 控制和影响拉裂-倾倒型黄土崩塌稳定性的因素包括: 斜坡几何特征、土体物理力学参数及拉张裂隙中的静水压力。随着土体含水率的上升, 坡顶拉张裂缝深度加深, 侵蚀凹槽深度加深, 崩塌稳定性逐渐降低。

参考文献 (References) :

- [1] 王永焱, 林在贵, 等. 中国黄土结构特征及物理力学性质 [M]. 科学出版社, 1990. [WANG Yongyan, LIN Zaiguan, et al. Structural characteristics and physical and mechanical properties of loess in China [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)]
- [2] 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115–125. [HAN Peng, NI Jinren, LI Tianhong. Headcut and bank landslip in rill evolution [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2): 115–125. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姚文波. 历史时期董志塬地貌演变过程及其成因[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009. [YAO Wenbo. Evolution and genesis of Dongzhi tableland geomorphology in historical period [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684–691. [PENG Jianbing, LIN Hongzhou, WANG Qiye, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684–691. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 雷祥义. 黄土地质灾害的形成机理与防治对策 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014. [LEI Xiangyi. The cause of formation, prevention and cure of geological disasters of loess [M]. Beijing: Peking University Press, 2014. (in Chinese)]
- [6] 陈绍宇, 许建民, 王文龙, 等. 黄土高塬沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 37–41. [CHEN Shaoyu, XU Jianmin, WANG Wenlong, et al. Erosion features of head-cut and its control measures on Dongzhiyuan of the loess plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 37–41. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 车小力. 黄土高塬沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀分布特征及其演化 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. [CHE Xiaoli. Study of the distribution characteristic and evolution of headward erosion on Dongzhiyuan of loess gully region [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 史清华, 王文龙, 郭明伟, 等. 董志塬沟头溯源侵蚀过程及崩塌中孔隙水压力变化 [J]. 农业工程学报, 2019,

- [35] SHI Qianhua, WANG Wenlong, GUO Mingming, et al. Headcut erosion processes and pore water pressure variation on Dongzhi tableland of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18): 110 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 段钊,赵法锁,陈新建.陕北黄土高原区崩塌发育类型及影响因素分析:以吴起县为例 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(6): 142 – 149. [DUAN Zhao, ZHAO Fasuo, CHEN Xinjian. Types and influencing factors of collapse development in loess plateau region of north Shaanxi: A case study of Wuqi County [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(6): 142 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘飞,李同录.延安地区不同黄土崩塌类型对崩塌贡献率的研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(4): 435 – 440. [LIU Fei, LI Tonglu. Study on the contribution of different loess collapse types to collapse in Yan'an area [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(4): 435 – 440. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 彭军,李翔宇,闫蕊鑫,等.陕北地区黄土崩塌破坏模式分类及防控对策研究 [J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(10): 11 – 16. [PENG Jun, LI Xiangyu, YAN Ruixin, et al. Failure modes classification and countermeasures of loess collapse in northern Shaanxi area [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(10): 11 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 叶万军,杨更社,常中华,等.黄土边坡剥落病害的发育特征及其发育程度评价 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(1): 37 – 42. [YE Wanjun, YANG Gengshe, CHANG Zhonghua, et al. Characteristics of development state of spalling hazard in loess slope and its evaluation method [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(1): 37 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 叶万军,董西好,杨更社,等.倾倒型黄土崩塌稳定性判据及其影响范围研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊2): 242 – 246. [YE Wanjun, DONG Xihao, YANG Gengshe, et al. Stability criterion and influencing zone of loess collapse with toppling style [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(Sup2): 242 – 246. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 叶万军,杨更社,张慧梅,等.拉裂-滑移式黄土崩塌的形成机制及其稳定性研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3563 – 3568. [YE Wanjun, YANG Gengshe, ZHANG Huimei, et al. Research on formation mechanism and stability of tensile cracking-sliding loess collapse [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3563 – 3568. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 南岭.金沙江干热河谷冲沟溯源侵蚀特征与过程规律 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011. [NAN Ling. Characteristics and process patterns of headward erosion of gully in the dry-hot valley of Jinsha river[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈安强.元谋干热河谷主要崩塌类型的形成机制 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012. [CHEN Anqiang. Development mechanism of the main landslip styles in the Yuanmou dry-hot valley[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张宝军.干热河谷冲沟沟头溯源侵蚀过程的动力学机制 [D]. 北京:中国科学院大学, 2017. [ZHANG Baojun. Dynamic mechanism during gully headward erosion process in the dry-hot valley region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张宝军,熊东红,张光辉,等.基于力矩法的元谋干热河谷冲沟沟头土体稳定性模拟与验证 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 133 – 140. [ZHANG Baojun, XIONG Donghong, ZHANG Guanghui, et al. Simulation and verification of overhanging soil layers stability of gully heads in Yuanmou dry-hot valley based on moment method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 133 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 胡厚田.崩塌与落石 [M]. 北京:中国铁道出版社, 1989. [HU Houtian. Collapse and falling rocks [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese)]
- [20] 王根龙,张茂省,苏天明,等.黄土崩塌破坏模式及离散元数值模拟分析 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 541 – 549. [WANG Genlong, ZHANG Maosheng, SU Tianming, et al. Collapse failure modes and dem numerical simulation for loess slopes [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 541 – 549. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王根龙,伍法权,祁生文.悬臂-拉裂式崩塌破坏机制研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊2): 269 – 274. [WANG Genlong, WU Faquan, QI Shengwen. Research on failure mechanisms for cantilever and tension crack-type collapse [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Sup2): 269 – 274. (in Chinese with English abstract)]
- [22] LU Q Z, QIAO J W, PENG J B, et al. A typical Earth fissure resulting from loess collapse on the loess plateau in the Weihe basin, China [J]. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105189.
- [23] CHEN A Q, ZHANG D, PENG H, et al. Experimental study on the development of collapse of overhanging layers of gully in Yuanmou valley, China [J]. *CATENA*, 2013, 109: 177 – 185.
- [24] DONG Y F, WU Y Q, YIN J Y, et al. Investigation of soil shear-strength parameters and prediction of the collapse of gully walls in the black soil region of northeastern China [J]. *Physical Geography*, 2011, 32(2): 161 – 178.