

# 黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析

杨吉山<sup>1</sup>, 姚文艺<sup>1</sup>, 马三保<sup>2</sup>, 马胜平<sup>2</sup>, 申震洲<sup>1</sup>

(1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 黄河上中游管理局, 西安 710021)

**摘要:** 小型重力侵蚀是黄土高原沟壑区流域产沙的重要来源。影响小型重力侵蚀的因素很多, 根据野外实际观测, 研究和讨论了沟道发展阶段、沟坡坡度、土体风化、土体蠕动、植被发育、降雨等因素对小型重力侵蚀的影响。结果表明: 沟坡土体的风化和蠕动是小型重力侵蚀的重要影响因素, 沟坡坡度是决定小型重力侵蚀特点和强度的主要限制性因素, 降雨是小型重力侵蚀的重要触发因素, 植被的发育对小型的重力侵蚀有比较明显的抑制作用。

**关键词:** 黄土高原沟壑区; 重力侵蚀; 影响因素

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0005-04

## Analysis on the Small Gravitational Erosion Factors in Gully Region of the Loess Plateau

YANG Ji-shan<sup>1</sup>, YAO Wen-yi<sup>1</sup>, MA San-bao<sup>2</sup>, MA Sheng-ping<sup>2</sup>, SHEN Zhen-zhou<sup>1</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Upper and Middle Yellow River Bureau, YRCC, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Small gravitational erosion is a very important agent for sediment yield in the gully region of the Loess Plateau. There are many influence factors for the generation of the gravitational erosion. Based on field observation, some factors, such as development stages of the channel, degree of the slope, weathering grade and creeping of the regolith, vegetation, rain and so on, are discussed in this paper. We concluded that weathering grade and creeping of the regolith are important influence factors for the small gravitational erosion. Slope degree is controlling factors which determines the intensity and scale of the small gravitational erosion. Rain is important triggering factor for the occurrence of small gravitational erosion. And the development of the vegetation can restrain occurrence of the small gravitation erosion to some extent.

**Key words:** gully region of the Loess Plateau; gravitational erosion; influence factor

### 1 黄土高原重力侵蚀概况

重力侵蚀是指岩体或土体在重力作用下失去平衡而发生位移的过程<sup>[1]</sup>。黄土高原地区重力侵蚀类型多样, 主要有滑坡、滑塌、崩塌、泻溜等<sup>[2-3]</sup>。滑坡、滑塌、崩塌都是土体(或岩体)在重力作用下剪切力超过了抗剪力的结果, 其主要区别在于滑动体运动的特点不同。滑坡体内部质点的相对位置没有发生明显错乱, 滑塌则是下滑土体发生了破碎甚至翻转的现象, 崩塌是土体在重力作用下向下倾倒的现象。一般条件下发生滑坡、滑塌和崩塌的坡面坡度依次增大。泻溜是坡面表层土体在风化作用下破碎后滑落或滚落的现象, 是坡面土体风化剥蚀的过程<sup>[4]</sup>。

重力侵蚀与水力侵蚀的偶合作用是黄土高原地区土壤侵蚀的主要动力<sup>[5]</sup>。黄河水利委员会在南小河沟、吕二沟、韭园沟的调查表明: 重力侵蚀产沙可分别占流域土壤侵蚀量的 57.5%、68.0% 和 20.2%<sup>[6]</sup>。蒋德麒等 1966 年对典型小流域的分析结果为, 在黄土高原丘陵沟壑区, 重力侵蚀占流域侵蚀产沙量的 20%~25%, 在高原沟壑区占 58% 左右<sup>[7]</sup>。重力侵蚀在黄土高原小流域土壤侵蚀量中占有相当大的比例, 但目前对重力侵蚀的研究还相对薄弱, 对重力侵蚀的研究是建立黄土高原地区物理成因产沙模型亟待解决问题之一<sup>[8]</sup>。

黄土高原重力侵蚀的规模差别很大, 如厚层滑坡的深度可达数十米, 而小型的滑坡深度只有几十厘米

收稿日期: 2010-05-04

资助项目: 黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(HKY-JBYW-2009-1); 治黄专项基金(黄水保[2006]51)

作者简介: 杨吉山(1969-), 男, 河南开封人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持工作。E-mail: yang\_ji\_shan@163.com

米,甚至更小。从产沙的角度看,由于大型重力侵蚀发生的频率很低,并且大型重力侵蚀往往只改变坡面的坡度,侵蚀堆积体往往对流域产沙的意义不大;而小型重力侵蚀由于发生频率高,对流域产沙的作用很大<sup>[9]</sup>。朱同新<sup>[3]</sup>、刘秉正<sup>[5]</sup>等学者野外调查结果表明,黄土高原地区重力侵蚀以小型的滑塌、崩塌和泻溜为主要类型,而大、中型滑坡居于相对次要地位。我们在野外的实地观测表明,在黄土高原沟壑区风化的沟坡上,小型重力侵蚀是普遍发育的重力侵蚀现象,对流域产沙有重要的影响。所以,本文以野外实际观测为基础,从侵蚀产沙的角度,主要阐述和讨论在沟坡上发生频率比较高的小型重力侵蚀的自然影响因素。

## 2 小型重力侵蚀影响因素分析

重力侵蚀是地貌演化的重要营力,重力侵蚀在沟道的发展过程中发挥着重要作用。从大尺度上看,地质、地貌和气候条件等因素决定了一个区域重力侵蚀发生的特点。黄土高原地区在第四纪强烈的抬升,使沟道不断下切侵蚀,也增强了重力侵蚀的发生的动力<sup>[10]</sup>。从气候和地带性方面看,黄土高原所处的半干旱地区,由于多暴雨、地形破碎、沟壑密度大,是重力侵蚀比较活跃的地带。而从短时间尺度看,沟道地貌发育的阶段性和沟坡土体风化程度、应力作用、植被发育情况、降雨等都是影响重力侵蚀的重要因素。随着黄土高原地区植被逐渐有所恢复,沟道泥沙供给量减小,流水对沟谷的侵蚀力增强,重力侵蚀现象将更加明显,成为塑造流域地貌和流域产沙的重要动力<sup>[11]</sup>。

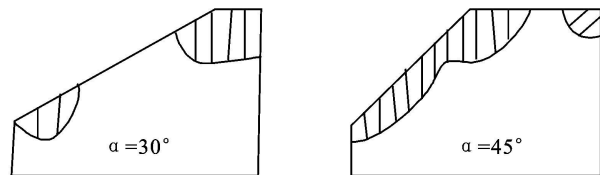


图 1 斜坡张应力分布与沟坡坡度( $\alpha$ )关系(据文献[14])

在陕北黄土沟壑区的实地观测表明,小型重力侵蚀主要发生在坡度大于  $55^\circ$  的坡面上,在坡度较小的沟坡上重力侵蚀发生的频率比较低。2009 年 7—8 月间两次降雨后,我们在桥沟测量和统计了不同坡度条件下沟坡小型重力侵蚀发生的频率分布(图 2),重力侵蚀发生的频率以平均单位沟坡面积上发生的次数来表示。可以看出,重力侵蚀发生的频率随着沟坡坡度的增加而迅速增大,当沟坡坡度达到  $70^\circ$  以上时,重力侵蚀发生频率比较大,二者之间呈比较明显的幂函数关系。

### 2.1 沟道发展阶段及沟坡坡度

实体模型研究表明:沟壑的发展过程首先是沟道长度和下切侵蚀的快速发展,然后是沟道以展宽侵蚀为主的发展阶段<sup>[12]</sup>。前一个阶段相当于切沟形成过程的时期,由于沟坡坡度很大,重力侵蚀发生的几率和规模都比较大,是沟道重力侵蚀最活跃的时期;而后一个阶段相当于冲沟和干沟阶段,随着沟坡坡度减小,重力侵蚀发生的频率和规模相对较小。蔡强国<sup>[10]</sup>、刘秉正<sup>[5]</sup>等学者研究指出,切沟、冲沟阶段重力侵蚀在流域产沙中所占的比例比较大。我们在陕北地区的实地观测也表明,大型切沟由于沟坡的坡度陡峭,沟床宽度狭窄,沟坡直接受到流水侵蚀作用,往往造成上部土体的坍塌,重力侵蚀最活跃;沟道发育相对成熟后,沟坡坡度变得相对和缓,重力侵蚀发生的几率和规模都较小。

在发育相对较成熟的沟道中,沟坡坡度是影响重力侵蚀的控制因素。王军、倪晋仁<sup>[13]</sup>、刘秉正<sup>[5]</sup>等学者指出,黄土内摩擦角在  $25^\circ$  左右,所以坡度大于  $30^\circ$  时重力侵蚀才会比较明显。朱同新<sup>[3]</sup>在晋西黄土丘陵区小流域调查的结果表明:滑坡在坡度小于  $40^\circ$  时很少发生,崩塌在坡度小于  $70^\circ$  沟坡上发生的概率很低。根据岩体力学理论,任何斜坡都处于一定历史条件下的地应力环境中,在沟坡形成的过程中,坡体的质点向斜坡方向移动,临空面附近常常形成应力集中。特别是黄土高原新构造运动比较强烈,往往存在较大的水平构造残余应力,沟坡坡度增大时,坡肩及坡面张力带的范围扩大(图 1),坡脚和坡肩部位一般张性裂隙较密集,有利于土体风化及土体结构的破坏,是重力侵蚀的多发部位。

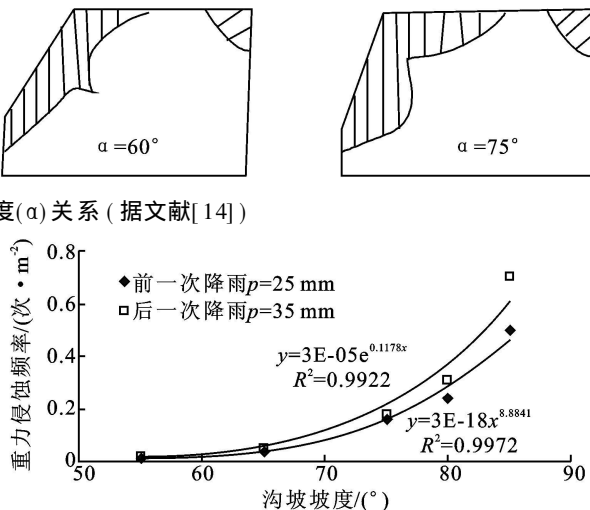


图 2 小型重力侵蚀发频率与沟坡坡度的关系

沟坡坡度对重力侵蚀发生的规模也有显著的影响。用单次重力侵蚀体的体积表示重力侵蚀的规模,

根据实测数据得到的二者关系如图 3 所示。可见沟坡坡度越小重力侵蚀规模相对越大, 虽然图中点据比较散乱, 但二者之间仍然呈现出幂函数关系的趋势。当沟坡坡度大于  $70^{\circ}$  时, 重力侵蚀发生的频率大, 但重力侵蚀体的体积很小。

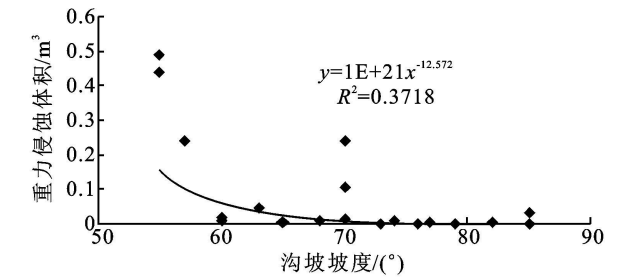


图 3 小型重力侵蚀体积与沟坡坡度的关系

2.2 土体风化和蠕动作用

土体的风化过程包括物理风化和化学风化。风化导致土体结构的破坏, 为重力侵蚀的产生创造了条件。沟坡土体表层一般存在一定厚度的风化层, 风化层的发育程度与坡面的稳定性有比较显著的关系, 根据风化的厚度和风化程度可以评估坡面的稳定性<sup>[15-16]</sup>。Jonathan<sup>[17]</sup>认为土体风化速度与包括重力侵蚀在内的剥蚀速度的对比关系是坡面稳定的控制因素。我们在野外的观测表明, 小型重力侵蚀与坡面土体风化程度有比较密切的关系, 土体风化是小型重力侵蚀的基础, 主要表现在: 首先, 沟坡土体风化层深度越大、风化程度越深, 重力侵蚀发生的规模和频率越大; 其次, 沟坡上发生的小型重力侵蚀深度一般不超过土体风化层的深度。土坡风化层的蠕动是沟坡演化的基本机制之一<sup>[18]</sup>。岩土体破坏机理的研究表明, 变形和岩土体结构的破坏是一个连续的发展过程, 在风化疏松的土质斜坡中, 表层蠕动是非常显著的<sup>[19]</sup>。定量测量显示, 沟坡土体风化层蠕动的速度大约为每年零点几毫米至几毫米<sup>[20-21]</sup>。沟坡表层风化土体在重力为主的应力的长期作用下, 向临空方向缓慢变形形成“剪变带”, 在坡面表层土体形成裂缝, 并在大致平行于最大剪应力迹线的方向形成潜在的滑动面(图 4)。

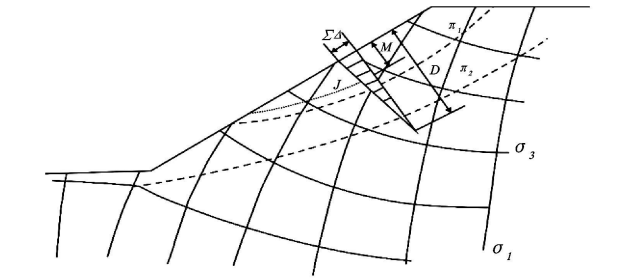


图 4 沟坡的蠕变与滑动面

$\sigma_1, \sigma_3$ ——主应力迹线;  $J$ ——可能滑动面;  $\pi_1, \pi_2$ ——最大剪应力迹线;  
 $\Sigma \Delta$ ——坡面变形量;  $D$ ——坡面剪变带厚度;  $M$ ——坡面风化带厚度

我们在野外调查中发现, 在沟坡土体中存在较密集的结合面。这些结合面可分为两组: 一组为垂直于坡面的风化裂缝; 另一组为由于应力释放和土体蠕动所形成的节理面, 一般与坡面有一个很小的夹角, 与图 1 中所示的最大剪切迹线平行。小型的滑坡、滑塌等重力侵蚀往往就是在这些裂缝和节理面的基础上发生的。

2.3 植被的影响

植被对重力侵蚀有显著的影响。综考会<sup>[23]</sup>在皇甫川流域的研究表明: 重力侵蚀总量与植被覆盖度有较好的负相关关系。据刘秉正、吴发启<sup>[5]</sup>在泥河沟的观测, 当植被盖度在 30% 以上时, 基本能够控制泻溜侵蚀的发生。笔者观测认为, 沟坡上植被的发育对小型重力侵蚀有比较明显的遏制作用。其作用主要表现在: (1) 植被的发育增加了坡面土壤的渗透性和坡面的糙率, 增加了雨水下渗量, 显著地减少了坡面径流。根据笔者在桥沟小流域的观测, 由于植被的恢复, 中等强度的降雨在桥沟小流域几乎不能产生坡面径流。(2) 沟坡微地形转折处在张应力和风化作用下往往产生密集的裂缝, 在静水压力和流水冲刷作用下, 是重力侵蚀集中发生的部位。植被在坡面上覆盖了一层富含枯枝落叶的松软土层, 并且植被有减轻土壤层蠕动的作用<sup>[24]</sup>, 因而大大减轻了裂缝的产生, 对小型重力侵蚀的发生有明显的抑制作用。由于植被根系主要分布于沟坡土体比较浅的深度以内, 随着深度增加植物根系在土体中的密度逐渐降低, 所以植被对小型重力侵蚀发生的抑制作用比较明显, 而对大型重力侵蚀的抑制作用较小。但孙尚海等<sup>[25]</sup>认为, 由于根系的根劈作用及增加土体的透水性的作用, 植被对重力侵蚀也可能具有促进作用。也有观测表明, 植被能够加速坡面风化层的形成, 从而增加浅层滑坡的发生频率<sup>[24]</sup>。总之, 关于植被对重力侵蚀影响的研究还很不够。

2.4 降雨的影响

降雨和径流对重力侵蚀的影响一直受到研究者的重视, 但一般重点研究沟道内流水对重力侵蚀的影响<sup>[5, 25-26]</sup>。野外观测表明, 降雨量和降雨强度对沟坡小型重力侵蚀有重要的影响, 是最重要的触发因素。小型重力侵蚀主要发生在降雨持续一段时间后的时间内, 降雨量越大, 持续时间越长, 小型重力侵蚀发生的几率越大。另外, 小型重力侵蚀发生深度一般与降雨深度大致相当。这主要是由于, 雨水入渗增加滑动体的重量, 降低了滑动面的粘聚力和摩擦力, 并且促进了土体的蠕动作用<sup>[21]</sup>, 为重力侵蚀的发生提供了条件。从图 2 统计数据也表现出了降雨量对小型重力侵蚀的

影响, 35 mm 降雨量的条件下发生重力侵蚀的频率明显高于降雨量 25 mm 条件下重力侵蚀发生的频率。

另外, 根据我们实地测量, 发生重力侵蚀的土体的体积含水量一般为 18% ~ 20%。由于沟坡坡度影响降雨量在沟坡上的分布, 在相同降雨量条件下, 坡度越大沟坡面受水面积越小, 雨水下渗深度越浅, 所以小型重力侵蚀的规模也较小; 沟坡坡度越大雨水下渗深度大, 发生小型重力侵蚀的规模相对较大, 但发生频率较低。

### 3 结论

黄土高原沟壑区由于地形破碎、风化侵蚀严重, 是重力侵蚀十分严重的区域。从侵蚀产沙的角度看, 发生在沟坡上的小型重力侵蚀类型, 如小型的滑坡、滑塌、崩塌、泻溜等由于发生的范围广、频率高, 是流域侵蚀产沙的主要途径, 必须加强这方面的研究。

影响小型重力侵蚀的因素很多, 包括黄土的岩性、土体结构(如节理面等)、地貌特点、降雨、土体风化、植被、人类活动等, 重力侵蚀的发生取决于各因素之间的相互作用和转换关系。在这些因素中, 沟坡土体的风化和蠕动等是小型重力侵蚀发生的重要影响因素, 沟坡坡度是小型重力侵蚀的最重要的限制性因素, 决定着重力侵蚀的特点及强度, 降雨是小型重力侵蚀重要的触发因素, 植被的发育对小型重力侵蚀有比较明显的抑制作用。

#### 参考文献:

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 100-103.
- [2] 曹银真. 黄土地区重力侵蚀的类型和成因[J]. 中国水土保持, 1985(6): 8-13.
- [3] 朱同新. 黄土地区重力侵蚀发生的内部条件及地貌临界分析[C]//陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989: 100-110.
- [4] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 41-43.
- [5] 刘秉正, 吴发启. 黄土塬区沟谷侵蚀与发展[J]. 西北林学院学报, 1993, 8(2): 7-15.
- [6] 黄河水利委员会, 黄河中游治理局. 黄河水土保持志[M]. 郑州: 河南人民出版社, 1993: 57.
- [7] 黄河水利委员会, 水利科学研究院. 黄河科学研究所志[M]. 郑州: 河南人民出版社, 1998: 96-97.
- [8] 汤立群. 物理成因产沙模型研究中亟待解决的几个问题[J]. 泥沙研究, 1999(5): 22-28.
- [9] 蔡强国. 沟道流域泥沙输移比计算与输沙规律[M]//陈浩. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究. 北京: 气象出版社, 1993: 224.
- [10] 李裕元, 王力, 邵明安. 新构造运动对黄土高原土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 76-78, 85.
- [11] 松永光平, 甘枝茂. 黄土高原重力侵蚀的地质地貌因素分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 55-57.
- [12] 马卡韦耶夫 Н И, 恰洛夫 Р С. 侵蚀过程[M]. 徐锐, 王基柱, 王佩莫, 等译. 郑州: 水电部黄河水利委员会水土保持处编印, 1985: 100-103.
- [13] 王军, 倪晋仁, 杨小毛. 重力地貌过程研究的理论与方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(1): 240-251.
- [14] 凌贤长. 岩体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 127-133.
- [15] Iida T. A probability model of slope failure and hillslope development[J]. Trans. Jpn. Geomorph, 1993, 14(1): 17-31.
- [16] Iida T. A probability model of slope failure based on soil depth distribution Trans[J]. Jpn. Geomorph, 1996, 17(2): 69-88.
- [17] Jonathan D, Phillips. Weathering instability and landscape evolution[J]. Geomorphology, 2005, 67: 255-272.
- [18] Davis W M. Rock floors in arid and in humid climates[J]. J. Geol., 1930, 38: 1-27.
- [19] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 8.
- [20] Matsuoka N. Continuous recording of frost heave and creep on a Japanese alpine slope[J]. Arctic and Alpine Research, 1994, 26(3): 245-254.
- [21] Sasaki Y, Fujii A, Asai K. Soil creep process and its role in debris slide generation-field measurements on the north side of Tsukuba Mountain in Japan[J]. Engineering Geology, 2000, 56: 163-183.
- [22] Záruba Q, Mencl V. Landslides and Their Control[M]. New York: Elsevier, 1969.
- [23] 中国科学院, 国家计划委员会自然资源综合考察委员会. 黄土高原地区资源与环境遥感系列图说明书[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [24] Jahn A. The soil creep of slopes in different altitudinal and ecological zones of Sudeten Mountains[J]. Geogr. Ann., 1989, 71: 161-170.
- [25] 孙尚海, 张淑芝. 中沟流域的重力侵蚀及其防治[J]. 中国水土保持, 1995(9): 25-27, 50.
- [26] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 28-34.