

Discussion on the Influence of Hydraulic Erosion on the Formation of Shallow Landslide on the Loess Plateau

Tongfang Li¹, Aidi Huo^{1*}, Yan Liang², Siyu Gao¹, Sijia He¹, Cheng Jin¹, Yicheng Duan¹

¹School of Water and Environmental, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: *2497519444@qq.com

Received: May 29th, 2020; accepted: Jun. 11th, 2020; published: Jun. 18th, 2020

Abstract

The serious hydraulic erosion in the Loess Plateau has induced the occurrence of landslide disasters. Therefore, the study of hydraulic erosion is of great significance to the prevention and control of landslide disasters in the Loess Plateau. Based on the field investigation of Dongzhi plateau, a typical loess plateau area, the influence of hydraulic erosion on the formation of shallow landslide on loess plateau is analyzed. Hydraulic erosion induced by shallow landslides includes surface water erosion and groundwater erosion. Surface water erosion is characterized by water erosion at the foot of the slope, forming a valley surface, reducing the anti-sliding force of the slope. Groundwater erosion is due to the rise and infiltration of groundwater to reduce the strength of slope soil, and in the process of groundwater decline, resulting in permeability, breaking the original stress balance state and reducing the stability of the slope. It is expected that the GeoWEPP model can be used to predict soil erosion, predict the development degree of landslide and enhance the prevention and control of shallow landslide.

Keywords

Loess Plateau, Landslide, Hydraulic Erosion, GeoWEPP Model

浅谈水力侵蚀对黄土高原浅层滑坡形成的影响

李同方¹, 霍艾迪^{1*}, 梁燕², 高思宇¹, 何思佳¹, 金诚¹, 段羿呈¹

¹长安大学水利与环境学院, 陕西 西安

²长安大学公路学院, 陕西 西安

Email: *2497519444@qq.com

*通讯作者。

摘要

黄土高原地区水力侵蚀严重，诱发了滑坡灾害的发生，因此研究水力侵蚀对黄土高原滑坡灾害的防控具有重要意义。通过对典型的黄土塬区——董志塬进行实地调研，分析了水力侵蚀对黄土高原浅层滑坡形成的影响。诱发浅层滑坡的水力侵蚀包括地表水侵蚀和地下水侵蚀，地表水侵蚀表现为水流冲蚀边坡坡脚，形成凌空面，减小了坡体的抗滑力，而地下水侵蚀是由于地下水上升、浸润减小了边坡土体的强度，而在地下水下降过程中，产生渗透力，打破了原来受力的平衡状态，降低了边坡稳定性。期望通过GeoWEPP模型预测土壤侵蚀状况，推测滑坡发展程度，增强对浅层滑坡的防控。

关键词

黄土高原，滑坡，水力侵蚀，GeoWEPP模型

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

黄土台塬是黄土高原中最为宝贵的宜农、宜居的土地资源，但疏松的土质、脆弱的生态环境致使水土流失严重，塬面日益萎缩，人们的生命财产安全受到严重威胁。关于黄土地区的水土流失问题，我国乃至全世界的学者都已经进行了长期的研究。严宝文等通过对黄土高原水蚀沟谷发育阶段的研究，建立了侵蚀模型[1]，Ionita I等提出监测侵蚀产生的方法[2]，王光谦等通过对影响侵蚀产生因素的研究，提出了黄土高原沟壑重力侵蚀的理论模型[3]，为黄土高原水土流失的防治提供了有力的理论帮助。

常见的黄土高原土壤侵蚀类型主要为重力侵蚀和水力侵蚀。两者往往共同作用形成各种灾害，滑坡便是其中的主要形式之一。浅层滑坡具有单次滑塌量小、发生频率大、分布范围广等特点[4]，对黄土高原的水土保持工作威胁极大。而在滑坡的形成过程中，水力侵蚀往往起着至关重要的作用。许多学者做了众多与水力侵蚀相关的研究，孙海妹等通过实验提出了饱和黄土液化标准[5]，罗文强等进行了地下水对边坡稳定性动态影响的研究[6]，为明确水力侵蚀对黄土滑坡形成的影响做出了重要贡献。

对于浅层滑坡的防治，现有的方法多为修筑挡土墙，利用抗滑桩、锚索加固等，虽然见效快，短期效果显著，但很多工程在完成后，水力侵蚀这一重要诱因依然存在。本文通过对董志塬的沟道进行调查研究，从地表水侵蚀和地下水侵蚀两个方面阐述了水力侵蚀降低边坡稳定性，进而容易诱发浅层滑坡的过程，并提出相关措施降低水力侵蚀的影响，为黄土塬区固沟保塬工程提供参考。

2. 研究区域

董志塬位于甘肃省庆阳市中南部(106°14'~108°42'E, 34°50'~37°19'N)，是世界第一大塬。属黄土高原、陇东高原的一部分，也是黄土高原最大的一块塬面，处于中国地形的第二阶梯上，海拔约881~1540米。董志塬植被覆盖率不足25%，以人工造林为主，水土流失较为严重，年产沙量0.17亿吨，年径流量0.77亿m³，水土流失涉及超过170条小流域，面积占总土地面积的96%以上。塬面土壤以黄绵土为主，该类

土壤是由黄土母质经直接耕种形成的一种幼年土壤，主要由 0.25 mm 以下颗粒组成，细砂粒和粉粒约占总质量的 60%，土质疏松，剖面发育不明显，透水性良好[7]。但由于母质为黄土性物质，疏松多孔，在剧烈的侵蚀作用下，其成土速度远落后于侵蚀过程。董志塬原来南北最长处 110 公里，东西最宽处 50 公里，近年来随着沟谷发展，东西平均宽度只有 18 公里，塬面面积损失近 3/4。

3. 水力侵蚀对黄土高原浅层滑坡形成的影响

黄土浅层滑坡的形成是一个内因与外因共同作用的复杂过程。内在因素主要有坡体结构、地形、土体理化性质及地质条件等，外在因素主要有降雨作用、人类工程活动(包括开挖、加载、破坏植被等)等。黄土产生于第四纪时期，是干旱和半干旱条件下形成的一种特殊沉积物，其颗粒组成不同于同时期的其他沉积物，是一种具有水敏性的特殊土[8]，因此水的作用对于黄土边坡稳定性的影响尤为重要，在浅层滑坡的形成过程中起着主要作用。对浅层滑坡的形成而言，动水作用是最重要的诱因，包括地表水作用、地下水作用以及地表-地下水共同作用。

诱发浅层滑坡的水力侵蚀主要有地表水侵蚀、地下水侵蚀。而频繁的降雨是触发滑坡的最主要诱导因素[9]，诱发边坡失稳破坏。在各种侵蚀类型中降雨都有极为重要的促进作用[10] [11] [12] [13]。

3.1. 地表水侵蚀

地表水侵蚀以河流的下切作用影响最为严重。降雨经汇流过程汇集于沟道形成河流，促使沟头与塬面接触处出现片状侵蚀，推动了溯源侵蚀的发展。同时河流在流动过程中对沟道有很强的下切作用，导致土体原来的受力平衡被破坏。

对滑动坡体进行受力分析，如图 1，其中 G 为坡体所受重力， F 为抗剪切力， R_1 、 R_2 为坡体所受支持力， N 为相邻坡体对其产生的推力。当汇集于坡脚的径流下切沟道时，对坡体产生支持力 R_1 的土体部分流失，并形成凌空面，坡体原来的受力平衡被破坏，随着下切深度的增加，凌空面面积增大， R_1 逐渐减小，坡体下滑的可能性逐渐增大。

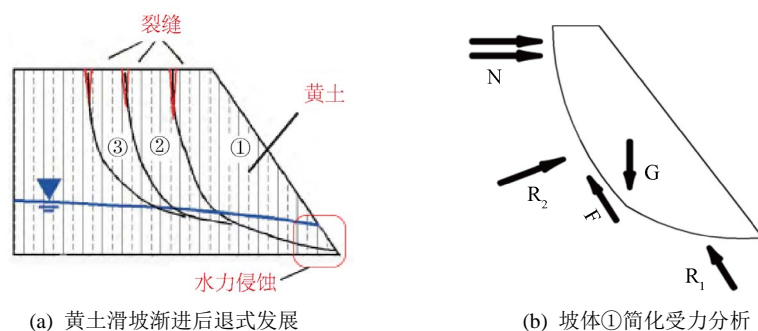


Figure 1. Indications of gravity, supporting force and shear resistance of slope
图 1. 坡体所受重力、支持力和抗剪切力示意图

随着水流下切的加深，坡脚凌空面逐渐增大，在重力作用下，往往出现崩塌，或者滑坡。在河流下切的同时伴随着水土的流失，因此泥沙的流失量对滑坡有重要的影响。通过 GeoWEPP 模型可以预测水土侵蚀状况，从而推测滑坡的产生。

3.2. 地下水侵蚀

影响地下水运动分布的因素繁多，坡体内地下水的分布和活动规律非常复杂，因此地下水侵蚀是较为复杂的，其诱因包括地下水位上涨与回落、地下水的渗透流动等。

在持续强降雨后,地表水沿优势通道补给地下水,导致地下水位上升(见图2)。当土体含水率较低时,间隙中的弱结合水不能包裹土粒,出现水-气-土粒三相界面,此时土粒间存在基质吸力(见图3(a))。地下水位上升引起土体中的空隙被水填充,原来的三相结构被破坏,基质吸力消失(见图3(b)),之后以饱和黄土软弱层形成→自重作用下发生蠕动液化→坡顶拉裂缝产生→大规模的自重加载导致坡体变形加剧这一过程不断发展,最终导致黄土滑坡发生。



Figure 2. Phenomenon due to rising groundwater level
图2. 因地下水位上升出现的现象

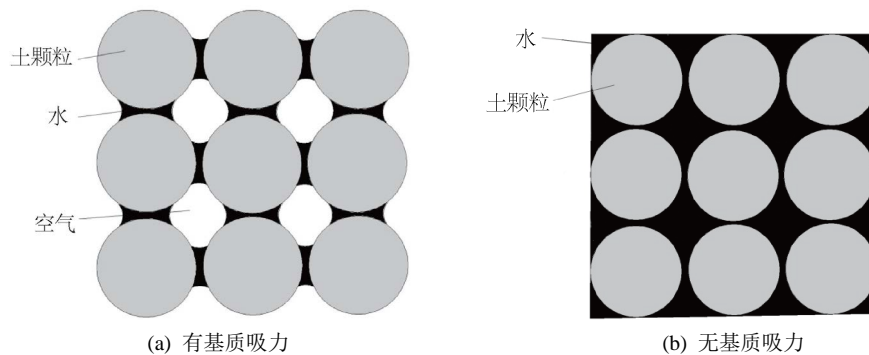


Figure 3. The relationships between the matric suction and composite structure of particle, pore and air (Xing Xianli, 2014)
图3. 土粒、水、气组合结构和基质吸力的关系(邢鲜丽, 2014)

由于土层持水能力的不同以及土体渗透系数的差异,地下水位回落时,土体释水压密,原本由土颗粒接触面和孔隙水共同承担的荷载将由土体单独承担,土体颗粒间的有效应力迅速增大,导致坡体的局部坡面沉降,沉降区域四周出现陡壁和破裂面,形成潜在的滑坡边界且极易发展成为滑坡。

地表水对地下水的均匀补给导致地下水面起伏不平,水位的高差形成水头差,为地下水的渗透流动提供动力。由于黄土内部发育着大量垂直节理、洞穴或者裂缝,黄土内的渗流有不同的形式,一类是通过土体内的裂缝或落水洞等优势通道快速流动,另一类是通过黄土基质进行渗透流动。前者会导致裂缝不断发展,降低坡体的整体性;后者会在渗流的同时对土体有一个渗透力,破坏坡体的受力平衡,降低坡体的稳定性。

4. 展望

水力侵蚀对黄土高原浅层滑坡的形成有多方面影响,而对灾害的防控需要进行综合考虑,因此建立数值模型进行模拟可以极大地减少人力物力的消耗。

对沟头侵蚀所采取的工程治理措施中如果不科学或不合理,可能诱发次生地质灾害。通过野外实地考察发现,尤其是大部分位于村庄和城镇等人口集中地区的抢救性沟头,均不同程度的成为当地居民的污水排放口。这些沟头采用填埋和实施护坡工程等方法阻止沟头前进。受填埋工程和居民日常生活行为的影响,增加了沟头填埋工程带来重大次生地质灾害问题的复杂性和特殊性。利用 ArcGIS 空间分析功能处理土壤类型、DEM 等数据,再利用 GeoWEPP 模型进行引起水土流失的自然过程、土壤侵蚀随时间和空间的变化、泥沙在坡地以及流域中的运移状态等方面的模拟,预测沟头填埋工程的实施效果,在此基础上预测分析黄土塬区沟头的发展情况,可为固沟保塬工程提供参考。

在建立数值模型进行效果预测的同时,总结已实施工程经验,提出以下建议以降低水力侵蚀所造成的影响:

1) 在进行沟头填埋工程后形成的坡体内提前布设辐射井,辐射井端加设过滤层,并在坡底建造蓄水池,利用虹吸将坡内水分排至蓄水池,可以大大减弱因黄土横向渗透性差而产生的水力侵蚀,同时蓄水池中的水可以用于生产所需;

2) 在护坡工程中,应尤其注重坡脚的防护,在坡脚修建防护墙或者铺盖,能够大大提高坡脚的抗冲能力,防止凌空面的形成,维持坡体的受力平衡状态。

5. 结论

诱发浅层滑坡的水力侵蚀包括地表水侵蚀和地下水侵蚀。地表水侵蚀表现为水流对坡脚的冲蚀形成凌空面,直接减小了抗滑力。地下水侵蚀则表现为地下水位上涨与回落、地下水的渗透流动等变化在土体内产生渗透力并降低了土体的抗剪强度,导致边坡稳定性降低,从而诱发浅层滑坡的形成。

项目基金

大学生创新创业训练计划项目(编号: S201910710237); 陕西省重点研发计划项目(编号: 2020SF-424)。

参考文献

- [1] 严宝文, 王涛, 马耀光. 黄土高原水蚀沟谷发育阶段研究[J]. 人民黄河, 2004, 26(6): 16-18.
- [2] Ionita, I., Niacsu, L., Petrovici, G. and Blebea-Apostu, A.M. (2015) Gully Development in Eastern Romania: A Case Study from Falcu Hills. *Natural Hazards*, **79**, 113-138. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1732-8>
- [3] 王光谦, 薛海, 李铁键. 黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(4): 335-344.
- [4] 李宁, 许建聪, 钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 209-214.
- [5] 孙海妹, 王兰民, 王平. 饱和黄土液化标准实验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 199-203.
- [6] 罗文强, 晏同珍. 降雨及地下水对边坡稳定性动态影响的初步研究[J]. 地质科技情报, 1995, 14(4): 77-81.
- [7] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 36-45.
- [8] 潘俊义, 王志军, 杜志伟, 等. 降雨作用下黄土边坡稳定与预警[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 10-22.
- [9] Van Asch, Th.W.J., Buma, J. and Van Beek, L.P.H. (1999) A View on Some Hydrological Triggering Systems in Landslides. *Geomorphology*, **30**, 25-32. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00042-2)
- [10] Huo, A.D., Yang, L., Peng, J.B., Cheng, Y.X. and Jiang, C. (2020) Spatial Characteristics of the Rainfall Induced Landslides in the Chinese Loess Plateau. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **2020**, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1728517>
- [11] Huo, A.D., Wang, X.F., Liang, Y., Jiang, C. and Zheng, X.L. (2019) Integrated Numerical Model for Irrigated Area Water Resources Management. *Journal of Water and Climate Change*, jwc2019042. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.042>
- [12] Huo, A.D., Huang, Z.K., Cheng, Y.X. and Van Liew, M.W. (2020) Comparison of Two Different Approaches for Sensitivity Analysis in Heihe River Basin (China). *Water Supply*, **20**, 319-327. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.159>

- [13] Huo, A., Dang, J., Song, J.X., Chen, X.H. and Mao, H.R. (2016) Simulation Modeling for Water Governance in Basins Based on Surface Water and Groundwater. *Agricultural Water Management*, **174**, 22-29.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.027>