

黄土高原地质灾害链发育特征及其分类体系

王新刚¹, 刘凯^{1*}, 黄强兵², 胡胜³, 连宝琴¹, 王道正¹, 薛晨¹

1. 西北大学地质学系, 数字孪生与重大设施灾害防控陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安 710069

2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054

3. 西北大学城市与环境学院, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127

摘要: 近年来, 在全球气候变暖带来强降雨风险的背景下, 黄土高原地质灾害有了新的变化趋势, 常呈链式形态形成黄土地质灾害链, 其往往具有多发性、隐蔽性、灾难性和复杂性等特征, 亟需阐明黄土高原地质灾害链的发育特征, 并对其进行科学系统的分类。本文在广泛查阅和总结黄土高原地区各类地质灾害分类基础上, 通过大量野外调查、无人机航测和室内遥感影像分析等方法对黄土高原地区典型地质灾害链进行了综合分析, 系统性地从灾种、控制性界面、地貌、动力成因、因果关系和形成时代等几个方面对黄土高原地质灾害链进行了归纳, 提出了黄土高原地质灾害链六大类 25 亚种的分类体系, 总结了典型黄土地质灾害链的发育特征和成灾模式, 揭示了典型黄土地质灾害链的链式结构及其彼此间的影响关系。研究可为黄土高原地质灾害链防控治理提供理论借鉴, 有助于对黄土灾害链针对性减灾防灾工作的实施。

关键词: 黄土高原; 灾害链; 发育特征; 分类

中图分类号: P642

收稿日期: 2025-08-04

The development characteristics and classification system of geological disaster chains on the Loess Plateau

Wang Xingang¹, Liu Kai^{1*}, Huang Qiangbing², Hu Sheng³, Lian Baoqin¹, Wang Daozheng¹, Xue Chen¹

1. Digital Twin and Major Facility Disaster Prevention and Control Key Laboratory of Higher Education in Shaanxi Province, Department of Geology, Northwest University, Xi 'an 710069, Shaanxi, China

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi 'an 710054, Shaanxi, China

3. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, School of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi 'an 710127, Shaanxi, China

Abstract: In recent years, against the backdrop of the risk of heavy rainfall brought about by global warming, geological disasters on the Loess Plateau have shown new trends of change. They often form a chain of geological disasters in the loess Plateau in a chain-like form, which frequently possess characteristics such as high frequency, concealment, catastrophic nature and complexity. It is urgent to clarify the development characteristics of the geological disaster chain on the Loess Plateau and classify it scientifically and systematically. Based on extensive research and summary of the classification of various geological disasters in the Loess Plateau region, a

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3008401) 和陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (2024JC-ZDXM-19) 资助

作者简介: 王新刚 (1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害机理与防控研究。ORCID: 0000-0002-1744-8712.

E-mail: xgwang@nwu.edu.cn

通讯作者: 刘凯 (1997-) 男, 博士研究生, 从事黄土地质灾害机理研究。ORCID: 0000-0002-4038-653X. E-mail: lk_nwu@163.com

comprehensive analysis of typical geological disaster chains in the Loess Plateau region was conducted through a large number of field investigations, unmanned aerial vehicle aerial surveys, and indoor remote sensing image analyses. The geological disaster chain of the Loess Plateau was systematically summarized from several aspects such as disaster types, controlling interface, geomorphology, dynamic causes, causal relationships and formation eras. A classification system of six major categories and 25 subspecies of geological disaster chains of the Loess Plateau was proposed. The development characteristics and disaster formation patterns of typical geological disaster chains of loess were summarized. It reveals the chain structure of typical loess geological disaster chains and the influence relationships among them. This research can provide theoretical references for the prevention and control of geological disaster chains in the Loess Plateau, and is conducive to the implementation of targeted disaster reduction and prevention work for the loess disaster chain.

Key words: Loess Plateau; Disaster chain; Developmental characteristics; Classification

0.引言

黄土在世界上分布广泛, 占全球陆地面积的十分之一, 在欧洲、北美、亚洲、南美、北非和南半球的新西兰、澳大利亚等地, 黄土均有分布(Dijkstra et al., 1994; Peng et al., 2018; Li et al., 2020)。中国的黄土高原发育了世界上最典型的黄土地貌, 是世界上最大的黄土堆积区, 也是中华民族的摇篮和古文化的发祥地(李学曾, 1985)。

由于黄土特殊的湿陷性(Derbyshire, 2001; Yao et al., 2020)、水敏性(张茂省等, 2016; Lian et al., 2020)、崩解性(Wang et al., 2019)以及具有大孔隙(Dijkstra et al., 1994)和垂直节理结构(王新刚等, 2013)等特点, 使得黄土高原地区是地貌演化过程最迅速的地区之一(彭建兵等, 2014; Sadeghi et al., 2019), 导致黄土在水力侵蚀作用下极易诱发洞穴、湿陷、滑坡、崩塌、泥石流等自然地质灾害(Peng et al., 2015; Hu et al., 2020)。据统计, 我国约 1/3 的地质灾害集中发生在黄土区(彭建兵等, 2014; 孙萍萍等, 2019), 严重威胁区域内居民的生命安全和经济发展, 如 2011 年西安市白鹿塬由于降雨诱发黄土滑坡造成了 32 人死亡的灾难性事故(Wang et al., 2020)。目前, 黄土高原成为研究黄土地质灾害分布规律、发育模式、成因机制、分类体系以及演化过程的理想场所(Derbyshire, 2001; Sun et al., 2019; Hu et al., 2020; Zhang et al., 2021)。

迄今为止, 学者们对黄土高原的洞穴、湿陷、崩塌、滑坡、泥石流等单一类型的灾害进行了大量有益的研究(Wang et al., 2024), 从调查识别(张茂省等, 2011; 毛正君等, 2023)、监测预警(赵超英等, 2019; 许强等, 2020)、形成机理(李同录等, 2018; 彭建兵等, 2020)、成灾模式(吴玮江

和王念秦, 2002; 王新刚等, 2014)、稳定性分析(殷跃平等, 2004; 王新刚等, 2013)和工程防治(徐张建等, 2007)等方面取得了丰硕的成果。

近年来, 随着高速铁路、高速公路、油气管线、水电工程等重要工程在黄土高原纵横, 为黄土高原区域提供了众多的发展机遇, 同时也带来了众多前所未有的灾变威胁(Juang et al., 2019; Meng et al., 2021; Xu et al., 2024; Zeng et al., 2024)。在这些重大工程建设和全球气候变暖雨带北移带来强降雨风险的背景下(You et al., 2022), 黄土地质灾害有了新的变化趋势, 即以单体灾害的存在形式越来越少, 常呈链式形态发展, 黄土洞穴、湿陷、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害在黄土地区链式转化, 协同发生, 在空间和时间上形成复杂的黄土灾害链(Wang et al., 2024)。相对于单一的黄土地质灾害, 黄土灾害链具有隐蔽性深、破坏性大、影响范围广(Peng et al., 2015)和复杂性强(Zhou et al., 2022)等特点。因此, 黄土灾害链风险防范与单一自然灾害相比往往更加复杂, 需要对其进行深入研究。

对于灾害链的分类体系, 韩金良等(2007)根据地质灾害链的诱发因素以及灾害链的规模对其进行了分类; 钟敦伦等(2013)根据致灾因素将山地灾害链分为地球内营力灾害链、外营力作用灾害链和人为作用灾害链 3 种; 崔鹏和郭剑(2021)将沟谷灾害链分为滑坡灾害链、泥石流灾害链和冰湖灾害链 3 个大类和 11 个小类; 刘传正和王建新(2024)提出了崩塌滑坡泥石流为首环的灾害链的基本认识、分类依据和包括 5 类 21 种的分类体系。综上所述, 前人学者们对于灾害链开展了较为丰富的研究, 然而由于黄土高原特殊的地貌类型以及黄土的特殊性质, 目前关于黄土高原地区灾害链的系统分类还有待进一步归纳。

作为当前黄土地质灾害领域研究的热点（朱兴华等, 2017; 马鹏辉和彭建兵, 2022; 许强等, 2025），黄土灾害链严重影响着黄土高原大规模基础设施的建设与运营。以往学者主要关注单类型黄土灾害，对于黄土灾害链的研究相对比较单一、零散，现有的零散的研究主要集中在：沉降-湿陷-地裂缝-崩滑转化机制的研究（Peng et al., 2016）和滑坡泥流转化机制的研究（Qu et al., 2024; 王新刚等, 2025）等方面，因此关于黄土灾害链系统性的分类研究是极具挑战性的前沿课题。

本文针对黄土高原地区地质灾害链，在前人研

究成果的基础上，开展了大量实地调查，并选取了典型黄土灾害链案例进行剖析，其位置如图 1 所示，通过野外调查、无人机航测和室内遥感影像分析等方法，根据灾害链的各方面特征，系统性地从灾种、控制性界面、地貌、动力成因、因果关系和形成时代等几个方面，提出了黄土高原地质灾害链六大类 25 亚种的分类体系，总结了典型黄土地质灾害链的发育特征和成灾模式，分析了典型灾害链的链式结构及其彼此间的影响关系。研究可为黄土高原地质灾害链的韧性防控对策提供理论借鉴，以期保障黄土高原大规模基础设施的建设与运营。

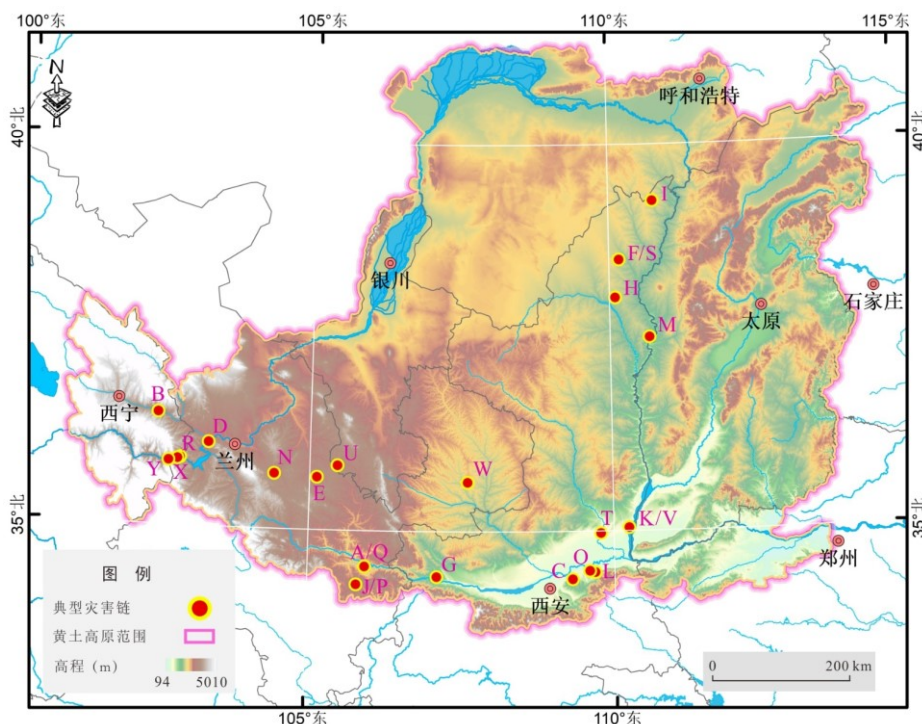


图 1 黄土高原典型灾害链案例分布

Fig. 1 Distribution of typical disaster chain cases on the Loess Plateau

1.灾种分类

黄土单一地质灾害类型多样，目前黄土常见的单一灾种地质灾害有滑坡、崩塌、泥流、地面沉降、塌陷、地裂缝和湿陷（马鹏辉, 2020）。黄土高原地质灾害链链式结构中涉及到多灾种的演变，从而导致灾害类型具有一定复杂性，根据灾害链演化过程中灾种的不同，可以将黄土高原常见的地质灾害链主要分成以下几种：

1.1 崩塌-滑坡-泥流灾害链

该灾害链在灾种上经历了崩塌、滑坡和泥流的演变，典型案例为天水市大沟村黄土灾害链（图 2）。此灾害链的发育特征如下，沟道上游坡体黄土中发

育大量节理裂隙，在降雨和风化作用等影响下形成崩塌（图 2a），崩塌堆积体呈松散状，2013 年 7 月 21 日，在降雨条件下沟道上游堆积体失稳产生滑坡，随着沟道两侧雨水汇集，滑坡发生后迅速碎屑化进而转为泥流，进而形成链式灾害，灾害链体积约为 $1.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，堆积在沟口并摧毁了大沟村十多间居民房屋（Peng et al., 2015）。

此类灾害链的成灾模式为：暴雨入渗→坡顶产生裂缝→坡顶土体崩塌→堆积于坡体；堆积体饱和→沿滑动面滑动→滑坡体进入沟谷；沟谷水流裹挟滑坡碎屑→汇流形成黄土泥流（图 2b）。该灾害链发育于黄土梁地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：崩塌产生的碎屑物堆积于坡体上部，形

成“加载”效应，改变了应力分布，使斜坡稳定性降低，进而引发潜在滑坡，即崩塌对滑坡具有驱动作用；混合滑坡体沿滑动面运动时，与坡面径流混合形成含泥量极高的流体，具备泥流初始条件，即滑坡对泥流具有促进作用；滑坡转化为泥流后，在泥流运动过程中与两侧山体产生碰撞铲刮(图 2b)，导致沟道两侧坡体稳定性减弱，形成更多的滑坡，增加了泥流的物源，即泥流对灾害链具有放大效应。

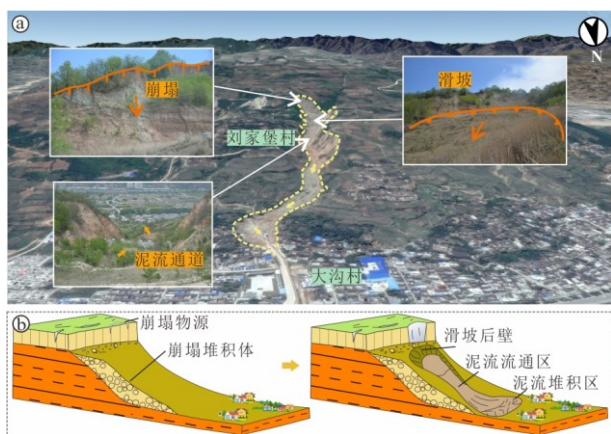


图 2 天水市大沟崩塌-滑坡-泥流灾害链

Fig. 2 The disaster chain of collapse-landslide-mudflow in Dagou, Tianshui City

1.2 塌陷（落水洞）-滑坡-泥流灾害链

该灾害链在灾种上经历了塌陷（落水洞）-滑坡-泥流的演变，典型案例为青海省海东市乐都区灾害链（图 3a）。此灾害链的发育特征如下，在降雨等因素作用下乐都区某沟道两侧的坡体发育大量不同规模的黄土落水洞（图 3b），随着落水洞的不断扩展，坡体逐渐失稳形成滑坡，松散堆积体聚集在沟道之中，在降雨的持续作用下发展为黄土泥流（图 3b），进而形成链式灾害，威胁下部基础设施的安全。

此灾害链的成灾模式为：地表水渗透→土体颗粒被逐渐搬运→形成潜蚀洞穴→发生塌陷（落水洞）；落水洞掏空坡体→导致斜坡失稳滑动→滑坡体进入沟谷；沟谷水流裹挟滑坡碎屑→汇流形成黄土泥流（图 3c）。该灾害链发育于黄土梁峁地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：落水洞形成的垂直陡坎（如塌陷壁）成为滑坡的后缘拉裂带，而落水洞作为集中入渗通道，使地下水向洞穴周边汇聚，导致滑坡滑动带土体持续软化，即塌陷（落水洞）对滑坡具有驱动作用；滑坡体解体后，为泥流提供了更多的固体物质，随着坡面径流的持续进而可能堵塞沟谷形成临时堰塞体，水流积蓄后堰塞体溃决

可诱发突发性泥流，即滑坡对泥流具有促进作用；滑坡转化为泥流后，泥流在沟谷两侧形成新的堆积坡体，若堆积物未固结，在后续降雨中易发生次级滑坡，增加了泥流的物源，即泥流对灾害链具有放大效应。

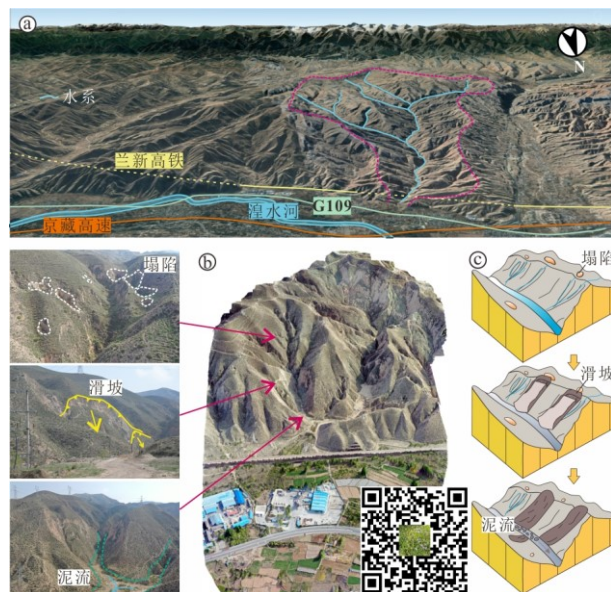


图 3 海东市乐都区塌陷（落水洞）-滑坡-泥流灾害链（扫描二维码可查看灾害链全貌，下同）

Fig. 3 The disaster chain of collapse

(sinkhole)-landslide-mudflow in Ledu District, Haidong City

1.3 滑坡-堰塞湖-溃决灾害链

该灾害链在灾种上经历了滑坡-堰塞湖-溃决的演变，典型案例为西安市临潼区发育的一处灾害链（图 4a）。此灾害链的发育特征如下，沟道两侧黄土滑坡呈带状分布，滑坡发生之后滑坡体堆积于沟道之中，形成滑坡坝（图 4b），滑坡坝阻挡沟道水流形成堰塞湖，当堰塞湖水位超过坝体高度时产生溃决灾害。

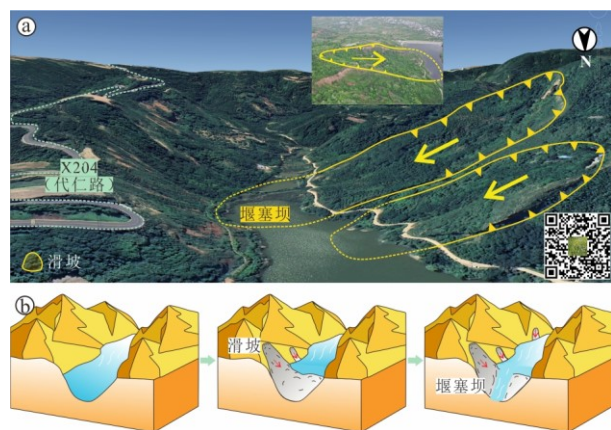


图 4 西安市临潼区滑坡-堰塞湖-溃坝灾害链

Fig. 4 The disaster chain of landslide-barrier lake-dam break in Lintong District, Xi'an City

此灾害链的成灾模式为：暴雨入渗→滑坡堆积体形成；堆积体堵塞河道→形成堰塞坝；上游来水持续汇入→引发管涌、流土→坝体完全溃决→形成突发性洪水。该灾害链发育于黄土梁地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：滑坡体积决定了堰塞坝的高度，滑坡物质粒径影响坝体渗透性；堰塞湖水的深度决定坝体浸润线高度，而蓄水时间延长的将促使黄土软化、自重增加，可能引发滑坡区二次滑动；溃决流量决定下游洪水冲击力（杨泽文等，2025），溃决后湖水势能转化为动能可能会产生涌浪效应，还可能冲刷残留堰塞坝，改变后续滑坡的临空条件，形成新的物源。

1.4 湿陷-地面沉降-地裂缝-崩塌-滑坡-泥流灾害链

该灾害链在灾种上经历了湿陷-地面沉降-地裂缝-崩塌-滑坡-泥流的演变，典型案例为甘肃省永靖县黑方台地区（图 5）。此灾害链的发育特征如下，大面积的引水灌溉导致黄土塬边形成了湿陷，进而引起黄土体内部的入渗潜蚀，随着黄土体内部湿陷的加剧，导致塬边地表出现明显的地面沉降并出现地裂缝，裂缝在地表扩展或在土体内部进一步发育，破坏土体完整性，最终诱发黄土崩塌和滑坡（图 5a）。由于引水灌溉该地区地下水位抬升，在滑坡滑动过程中，土体结构发生破坏，土在剪切变形中孔隙水压力增大，此外黄土塬边崩塌的冲击力也可能在饱和和土中产生较高的孔隙水压力（张帆宇，2011），孔隙水压力的增大降低了土体滑动的剪切阻力，使得黄土滑坡在发生过程中转化为黄土泥流。

此灾害链的成灾模式为：地表水渗透→黄土湿陷→局部地面下沉→形成张性地裂缝→裂缝贯通→坡顶崩塌→崩塌堆积物形成滑坡→黄土泥流产生（图 5b）。该灾害链发育于黄土塬地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：黄土湿陷造成地裂缝的形成后，地表水可沿裂缝快速下渗，加剧黄土湿陷和后续沉降；持续沉降又可能促使新裂缝产生或原有裂缝扩展；滑坡体为黄土泥流提供了链式灾害的物质基础。

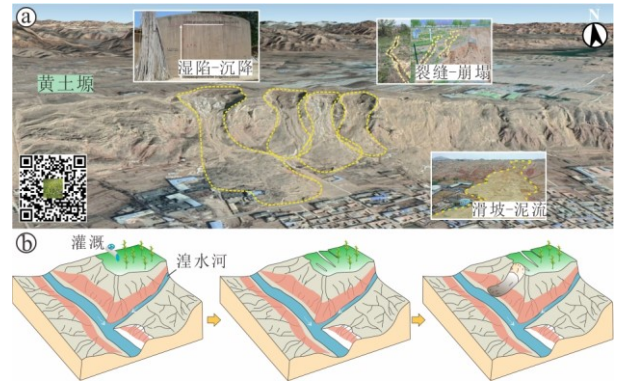


图 5 黑方台湿陷-地面沉降-裂缝-崩塌-滑坡-泥流灾害链

Fig. 5 The disaster chain of wet subsidence-ground settlement-cracks-collapses-landslides-mudflows in the Heifangtai area

1.5 塌陷（落水洞）-崩塌-滑坡-泥流灾害链

该灾害链在灾种上经历了塌陷（落水洞）-崩塌-滑坡-泥流的演变，典型案例为甘肃省白银市会宁县孙家岔沟灾害链（图 6a）。此灾害链的发育特征如下，由图 6b 可以看出，流域内坡体形成了大量塌陷（落水洞），成为雨水入渗的优势通道，导致坡脚处支撑减弱，临空面陡立，从而形成黄土崩塌，随着崩塌源不断向坡体上部发展延伸，坡脚处临空面不断增大，由于卸荷作用形成黄土滑坡，滑坡堆积体堆积于沟道之中，在降雨作用下汇集冲击沟道内黄土松散堆积体从而形成黄土泥流，威胁沟口处厂房、青兰高速和 G312 国道等基础设施的安全。

此灾害链的成灾模式为：地表水渗透→土体颗粒被逐渐搬运→形成潜蚀洞穴→发生塌陷（落水洞）；落水洞掏空坡体→导致斜坡失稳发生崩塌→崩塌堆积沿滑动面滑动→滑坡体进入沟谷；沟谷水流裹挟滑坡碎屑→汇流形成黄土泥流（图 6c）。该灾害链发育于黄土梁峁沟壑地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：塌陷（落水洞）形成的垂直陡坎成为崩塌体的后缘拉裂带，即塌陷（落水洞）对崩塌具有驱动作用；崩塌导致坡体水平向支撑减小产生卸荷效应，进而引发潜在滑坡，即崩塌对滑坡具有驱动作用；此后，滑坡体与坡面径流混合形成含泥量极高的流体，即滑坡对泥流具有促进作用；滑坡转化为泥流后，在泥流运动过程中与两侧山体产生碰撞铲刮，导致沟道两侧坡体稳定性减弱，形成更多的滑坡，增加了泥流的物源（Hu et al., 2020），即泥流对整个灾害链具有放大效应。

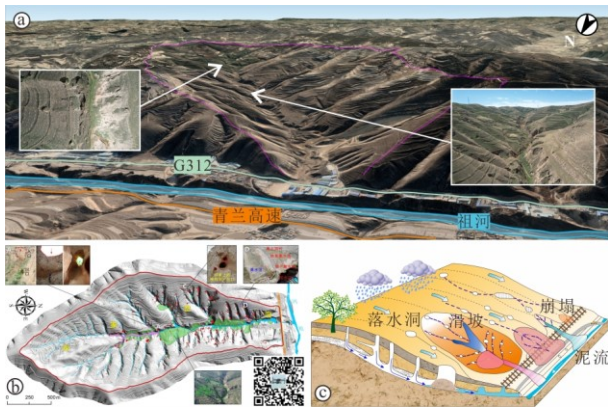


图6 孙家岔沟塌陷(落水洞)-崩塌-滑坡-泥流灾害链

Fig. 6 The disaster chain of collapse

(sinkhole)-collapse-landslide-mudflow in Sunjiachagou area

1.6 塌陷-地裂缝-滑坡-泥流灾害链

在黄土高原地区，煤矿开采会导致地面塌陷，继而可能造成灾害链的发生（李文等，2020；刘凯等，2024），该灾害链在灾种上往往会经历塌陷-地裂缝-滑坡-泥流的演变，典型案例为陕西省榆林市某灾害链（图7）。此灾害链的发育特征如下，煤矿开采后部分范围内由于煤层顶板失去支撑，在上部岩土体重力作用下产生变形，岩层形成冒落带、裂隙带和弯曲带，进而使得岩层上部黄土形成地面塌陷（图7a），随着煤矿开采范围的不断扩大，当地面塌陷扩展延伸至一定范围时形成地裂缝，多组塌陷裂隙发育在降雨作用下发生了滑坡灾害，黄土滑坡发生后，在一定条件下形成了泥流灾害。

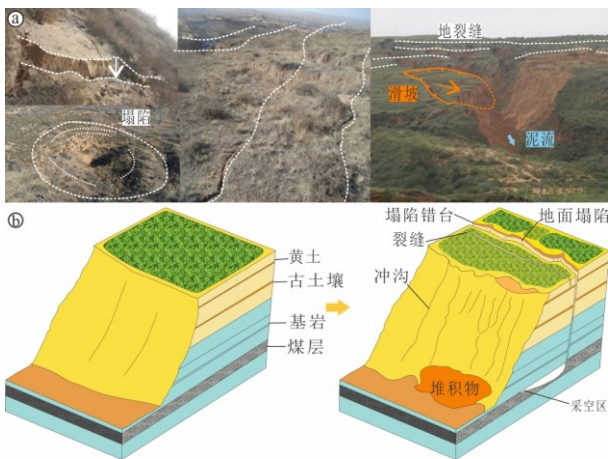


图7 榆林市某塌陷-地裂缝-崩塌-滑坡-泥流灾害链

Fig. 7 A disaster chain of collapse-ground

fissure-collapse-landslide-mudflow in Yulin City

此灾害链的成灾模式为：采空区顶板（黄土层或基岩）垮落→引发地表塌陷→形成张性地裂缝→地裂缝渗水→形成滑坡体→滑坡体进入沟谷→汇流形成黄土泥流（图7b）。该灾害链发育于黄土梁峁

沟壑地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：采矿塌陷诱发了地裂缝，地裂缝促进了滑坡形成，而滑坡为泥流提供了物质基础。

1.7 滑坡-滑坡灾害链

将滑坡发生之后，在滑坡体上再次发生滑坡，称之为滑坡-滑坡灾害链，典型案例为宝鸡市宝陵村黄土滑坡灾害链（图8a）。该灾害点第一次滑坡规模的较大，因此下滑后滑坡体仍保持一定整体性，部分滑体表面仍保持一定平整度（图8b），在首次滑坡发生之后，在滑坡体上再次发生滑动，先期滑坡可能受构造等因素影响，滑动之后坡体改变了原始的地下水排泄条件，后期滑坡受河流侧蚀、降雨和人类工程活动等因素影响发生了第二次滑坡，从而形成滑坡-滑坡灾害链。

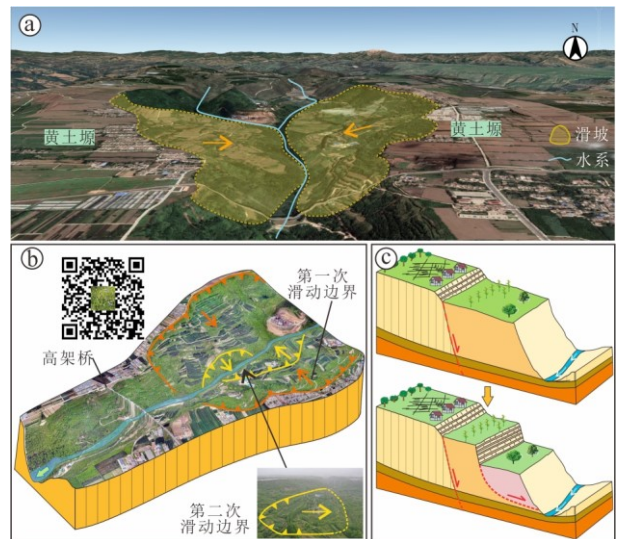


图8 宝陵村滑坡-滑坡灾害链

Fig. 8 The landslide-landslide disaster chain in Baoling

Village

此灾害链的成灾模式为：初始滑坡失稳→物质迁移与地形重塑→水文与应力条件改变→二次滑坡失稳→灾害范围扩大。该灾害链发育于黄土塬地貌区，各链式结构及其彼此间的影响关系为：滑坡-滑坡灾害链的滑动面为不同时期形成的，滑坡之间存在因果效应（唐辉明等，2022），初次滑坡发生后，土体结构被扰动，黄土趋于松散，地形发生变化，土体更容易受降雨、人类活动等条件影响从而更容易再次发生滑坡（图8c），导致灾害范围扩大。

2.控制性界面分类

2.1 黄土层内灾害链

黄土层内灾害链主要是指灾害的形成和演化都发育在黄土地层内的链式灾害，其灾害链的物源组

成为黄土。由于黄土具有显著的水敏性(张茂省等, 2016), 此类灾害链大多由降水等因素诱发形成。典型案例为陕西省榆林市榆阳区石窑坪村黄土层内灾害链, 如图 9 所示, 此灾害链的发育特征如下, 陡立的黄土坡体中发育大量的黄土节理裂隙(图 9a), 在降雨和开挖等因素作用下首先产生了小规模崩塌, 崩塌体呈松散状堆积于沟道中, 在降雨作用下堆积体形成了黄土泥石流(图 9b)。

黄土层内灾害链多发于夏季汛期, 且具有明显的放大效应(朱兴华等, 2017), 即多次的小规模崩塌堆积在强降雨作用下容易形成较大规模的黄土泥石流。野外调研发现黄土层内灾害链的链式结构以初始损伤触发(湿陷/崩塌)→层内结构破坏(地裂缝扩展/孔隙水压力升高)→应力失衡加剧(附加荷载/滑带软化)→二次灾害发生(滑坡/泥石流)→灾害范围放大(多层联动/侵蚀加剧)为成灾模式主线(图 9c), 链式结构以“初始触发-过程演化-灾害联动-效应放大”为逻辑主线, 各灾害链环节通过物质迁移、能量传递和应力重分布形成紧密的因果关联, 通过灾害的空间扩展和时间延续造成灾害效应放大。

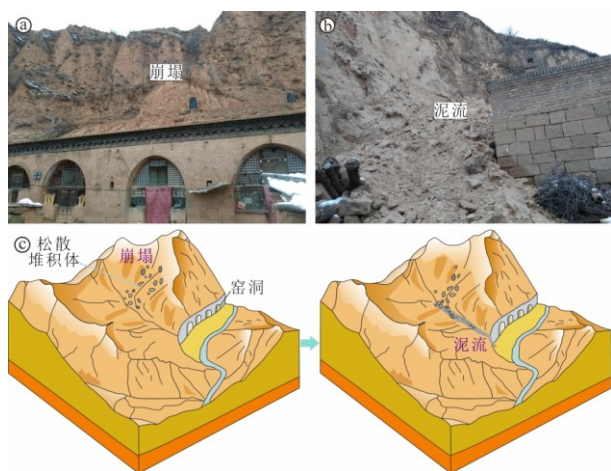


图 9 黄土层内灾害链

Fig. 9 Disaster chains within the loess layer

2.2 黄土-基岩接触面灾害链

黄土-基岩接触面灾害链是指灾害发生在黄土和基岩接触面地层中的链式灾害。黄土高原地区黄土-基岩滑坡广泛发育(王新刚等, 2021), 其滑动面多为二元体的接触面, 沿其下伏的基岩倾斜面(与坡向一致)分布, 由于黄土-基岩斜坡的特殊结构, 在黄土基岩地区同样存在灾害链。图 10 所示是位于陕西省榆林市府谷县的一处典型黄土-基岩层灾害链。该坡体上部沟道发生滑坡, 滑面位于黄土-基岩接触面(图 10a), 主要诱发因素为降雨, 坡体下部

为基岩, 上部水分入渗后在黄土基岩界面处汇集, 诱发了黄土滑坡, 当黄土滑坡发生后, 松散滑坡体堆积于沟道之中, 在降雨汇水作用下形成泥石流, 威胁下方道路和运煤车辆安全。

此类灾害链成灾模式以“雨水入渗→界面软化→顺层滑动→滑坡启动→泥流转化”为主线, 常形成跨尺度、多类型的灾害系统。各链式结构及其彼此间的影响关系为: 基岩顶面形成天然隔水层, 导致黄土层地下水沿接触面横向径流, 形成饱水带, 进而导致接触面土体软化、微滑移, 从而导致上部坡体发生黄土滑坡, 黄土滑坡体在运动过程因基岩层临空面的陡立地形而破碎、与地表水混合, 最终形成黄土泥石流(图 10b)。

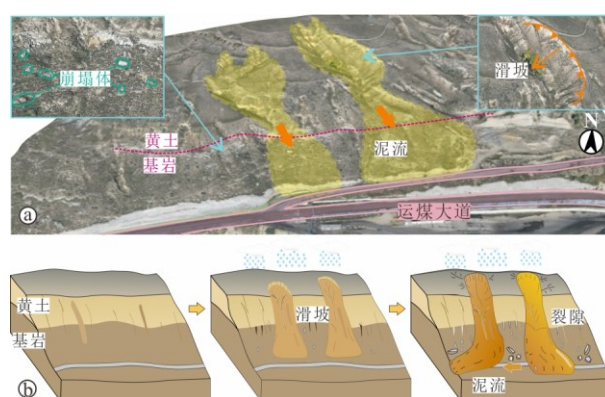


图 10 黄土-基岩接触面灾害链

Fig. 10 Disaster chain at the contact surface between loess and bedrock

2.3 黄土-基岩切层灾害链

黄土-基岩切层灾害链是指黄土层和基岩层发生变形破坏后形成的地质灾害链, 其物源组成主要为黄土、基岩以及基岩破碎风化后的物质。典型的黄土-基岩切层灾害链为甘肃天水娘娘坝镇中寨村滑坡-泥石流灾害链(图 11a), 滑坡滑面滑面呈折线型, 滑面穿过黄土层和粉砂质板岩地层(图 11b)。

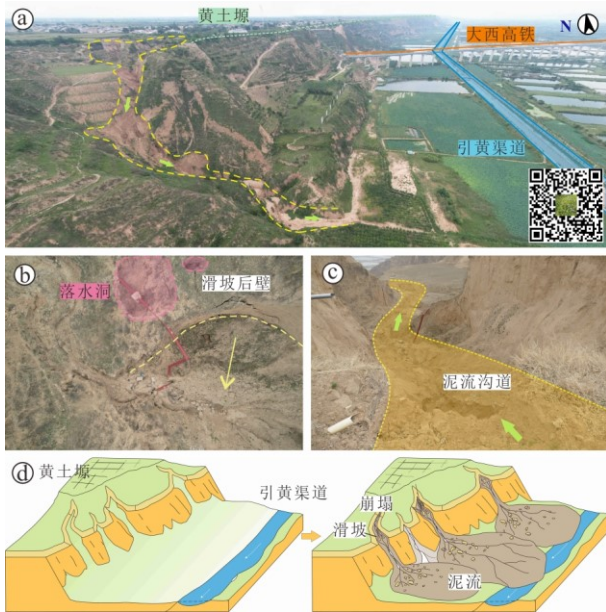


图 13 合阳县北郭村黄土塬岸-塬带灾害链

Fig. 13 The disaster chain of the loess tableland shore-tableland zone in Beiguo Village, Heyang County

3.2 梁头-梁身灾害链

黄土梁是黄土高原典型的线性地貌，梁头以风化剥蚀为主；梁身受重力和水力双重作用。其灾害链往往具备“梁头-梁体-沟道”的垂向联动，与塬岸灾害链的平面扩展模式形成差异。图 14 所示为陕西省渭南市华州区瓜坡镇的一处典型黄土梁头-梁身灾害链，该处黄土梁呈南北走向，降雨时沟道上游水源和坡面汇水自黄土梁底由南向北流，沿黄土梁发育呈带状的滑坡群，如图 14a 所示，滑坡体堆积于黄土梁形成的沟道中，在降雨的激发下形成黄土泥流（图 14b），当滑坡在沟道中形成滑坡坝时，会阻塞地表径流形成堰塞湖（图 14b）。

黄土梁的不同位置发育的地质灾害模式不同，在梁头坡体在一定程度下可能形成崩塌→滑坡灾害链，而在梁身处可能形成滑坡→泥流灾害链、滑坡→堰塞湖灾害链和沟道淤塞→地下水壅积→梁身失稳链等组合形式。各链式结构及其彼此间的影响关系因有类似见第一节各灾种分类所述。

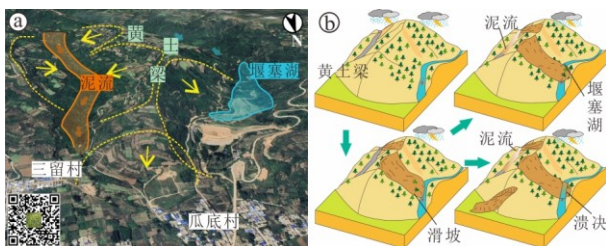


图 14 渭南市瓜坡镇黄土梁头-梁身灾害链

Fig. 14 The disaster chain of loess ridge in Guapo Town,

3.3 崩顶-崩身-崩底灾害链

黄土崩是黄土高原特有的穹状或馒头状孤立丘陵，其“崩顶-崩身-崩底”地形差异显著（崩底多为沟谷），加之黄土本身具有垂直节理发育、湿陷性强等特性，易在内外动力（降雨、人类活动等）触发下形成“崩顶启动-崩身放大-崩底堆积”灾害链。图 15 所示为陕西省榆林市吴堡县的一处崩顶-崩底灾害链，青银高速从黄土崩穿过，黄土崩南部坡面有大量居民房屋，其下部为公路和河沟，由于坡体开挖修建房屋、公路等人类活动影响，在降雨作用下黄土崩南侧发生滑坡（图 15a），滑坡形成之后原状黄土趋于松散，原有凸形坡面转化成凹形坡面，在夏季强降雨作用下水分在凹陷处汇集，在地表径流冲刷作用下进而形成黄土泥流（图 15b）。最终堆积于沟底河道中（图 15c），当黄土崩滑坡体规模较大时，滑坡体堆积到河道中，可能会导致堰塞湖现象。

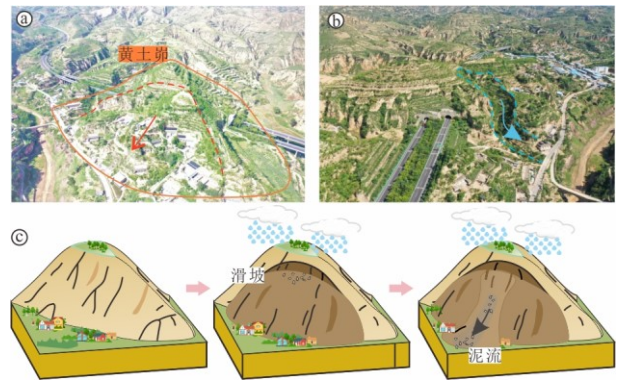


图 15 吴堡县黄土崩顶-崩身-崩底灾害链

Fig. 15 The disaster chain of the top, body and bottom of the loess mounds in Wubu County

此类灾害链的成灾模式为：崩顶的地表侵蚀（面蚀、细沟和切沟等）、浅层滑塌→崩身的崩塌、滑坡→崩底的泥石流、沟谷侵蚀、堆积扇掩埋等组合形式。各链式结构及其彼此间的影响关系为：崩顶为灾害链的“物质源与启动环”，崩身为灾害链的“能量释放与规模放大环”，崩底为灾害链的“堆积与次生扰动环”；崩顶通过“物质+水动力”启动崩身，崩身通过“规模+势能”驱动崩底，形成“源-汇-积”的单向链条，崩底通过“侵蚀+高差”反促崩身，崩身通过“临空面+卸荷应力”反促崩顶，形成下游掏蚀上游“崩身失稳→崩底侵蚀→崩身更失稳”的闭环，这种动态关系使得单一灾害（如一次

强降雨引发的崩顶侵蚀)可能通过链条放大为跨尺度灾害(如崩底大规模泥石流)。

3.4 河谷阶地灾害链

黄土高原地区发育大量河谷阶地,黄土高原河谷阶地是河流长期侵蚀-堆积作用形成的阶梯状地貌,其独特的黄土物质特性(湿陷性、垂直节理发育)、陡峭的地形高差及复杂的水动力条件,使得各类地质灾害易形成“链式反应”。图16所示为甘肃省定西市安定区发育的一处黄土河谷阶地地质灾害链,河谷南侧为连霍高速,北侧为G312国道,阶地上发育大量黄土落水洞,在降雨等作用下落水洞逐渐诱发滑坡,导致连霍高速地基悬空(图16a),滑坡发生后在沟道中形成泥石流(图16b),对下游桥墩的安全造成影响,威胁高速公路正常运营。

此类灾害链的成灾模式可归纳为:高阶地初始失稳(崩塌/滑坡)→松散物质的“二次搬运”(溜滑/坡面泥石流)→河道响应(淤塞/堰塞)→低阶地与河岸破坏(坍塌/次生滑坡)。各链式结构通过高阶地初始失稳(物质启动)、松散物质二次搬运(物质传递)、河道响应(物质入河)、低阶地与河岸破坏(终端放大)四个环节形成紧密的关联影响。

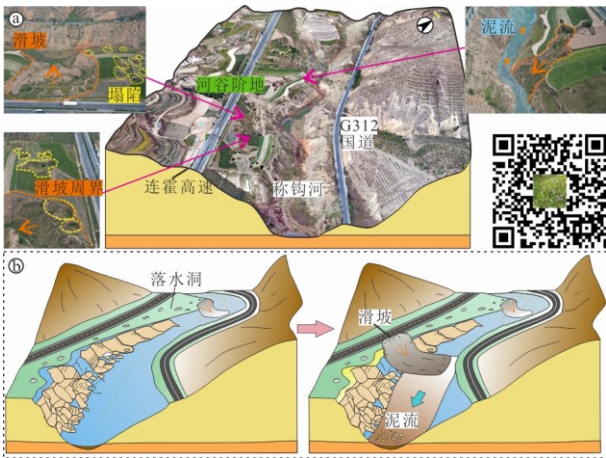


图16 甘肃称沟河黄土河谷阶地型灾害链

Fig. 16 River valley terrace type loess disaster chain in Chenggou river of Gansu province

3.5 塬-沟交汇灾害链

黄土塬-沟交汇带是黄土高原特有的地貌过渡区——黄土塬(地势相对平坦的台地)与深切沟谷(切割塬面的侵蚀地貌)在此剧烈交汇,交汇区往往地形高差大、坡度陡,加之黄土体结构疏松且垂直节理发育,叠加降水集中、植被稀疏等特点,极易形成多灾种相继或同步发生的灾害链。图17a所示为陕西省渭南市临渭区的一处典型塬-沟交汇灾害链,塬面地形平坦,降雨时塬面地表水流从沟道

排泄,沟道两侧发育黄土滑坡群,滑坡呈带状分布,当地村居民房屋修建在老滑坡体上(图17b),沟道内南高北低,沟口处为陇海铁路的树园站,黄土滑体堆积于沟道之中,阻塞了沟道中径流排泄和两侧坡体的地下水排泄,从而形成堰塞湖(图17b和图17c)。

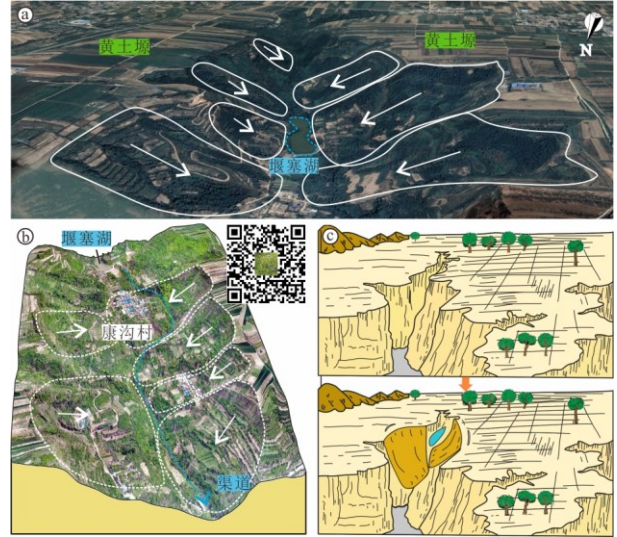


图17 渭南市临渭区黄土塬-沟交汇灾害链

Fig. 17 The disaster chain at the intersection of Loess tableland and gully in Linwei District, Weinan City

此类灾害链成灾模式可概括为:“塬边侵蚀与小型失稳→大规模失稳与松散物质富集→泥石流与沟道阻塞→堰塞湖溃决与洪水冲刷”的链式递进过程。各链式结构及其彼此间的影响关系为:塬边崩塌、滑坡产生的松散物质为泥石流提供了充分的物源,泥石流加剧沟谷侵蚀,进一步破坏塬边稳定性,进而引发更多崩塌、滑坡;堰塞湖溃决洪水冲刷下游沟道使沟床降低,进而造成塬边相对高差增大,使得重力作用增强更易发生塬边边坡失稳。

3.6 基岩山地灾害链

黄土区基岩山地是黄土与基岩山体的过渡带,其地貌特征表现为“基岩山体为骨架、黄土层不连续覆盖、沟谷深切”,因基岩与黄土的物质差异、构造活动及外力作用的叠加,易形成多灾种相继发生的灾害链,如本文2.3节中提到的黄土-基岩切层灾害链。

除上述地貌外,黄土高原地区地貌类型还有冲洪积扇和低丘缓谷地貌,这两种地貌中地形高差相对较小,难以形成典型的链式灾害。

4.动力成因分类

在黄土地质灾害链的形成过程中,动力因素是

驱动灾害链式演化的重要因素（马鹏辉和彭建兵，2022），根据黄土地质灾害链的主要动力成因可以将其分为水动力、地震动力、人类动力和复合动力成因四类（Wang et al., 2024）。

4.1 水动力成因灾害链

水动力成因黄土灾害链是指以水流（大气降水、地表水、地下水）为核心驱动力，通过改变黄土体物理力学性质和地表形态，引发一系列连锁式灾害的成灾过程，其中降雨和灌溉是常见的水动力因素，此类典型灾害链的发育特性如图 2 天水市大沟村黄土灾害链和图 5 甘肃黑方台黄土灾害链所示，灾害链的具体情况如前文所述，此处不再赘述。

此类灾害链的成灾模式可以归纳为：水动力输入（降水/地表水/地下水）→黄土体弱化（崩解/湿陷/强度降低）→初始灾害（侵蚀/滑塌/塌陷）→物源与环境改变（泥沙堆积/沟道堵塞）→次生灾害（滑坡/泥石流/堰塞湖溃决）→多灾叠加破坏（范围扩大/强度升级）。水动力成因黄土灾害链的链式结构可划分为初始驱动环节（降雨、灌溉）、原发性灾害环节（黄土湿陷与地表变形、小型崩塌/浅层滑坡、沟谷侵蚀与面蚀）、继发性灾害环节（中深层滑坡/滑塌、泥石流、堰塞湖与溃决洪水）及终末影响环节（下游淹没与冲刷、次生地质灾害再触发），各环节通过物质、能量或环境条件的改变相互触发、强化，形成完整的灾害链。

4.2 地震动力成因灾害链

地震动力成因黄土灾害链是指以地震震动（地震波能量）为核心驱动力，通过改变黄土体的结构稳定性（如颗粒骨架破坏、孔隙水压力骤升），引发一系列相互关联、逐级放大的灾害过程。黄土高原东临华北地震带，西接西域地震带，南北向地震带横切高原，自新生代以来地震活跃（曹银真，1985），常引起各种块体运动，诱发地震动力成因灾害链（李智超等，2025）。黄土具有较强的水敏性和动力易损性，黄土高原地区发生过多起因地震造成的地质灾害（许强等，2025），例如 1920 年海原大地震造成的石碑塬滑坡和党家岔滑坡，在甘肃岷县 2013 年 6.6 级地震诱发了永光村黄土滑坡-泥石流灾害链（王国亚等，2019；吴志坚等，2019）。图 18a 为 2023 年发生的积石山 6.2 级地震诱发黄土滑坡-泥石流灾害链，在地震动力作用下台塬底部饱水黄土层液化，黄土滑体从不同方向液化启动，向滑源区中部汇集形成滑坡并转化为泥石流（许强等，2025），泥石流最远运动距离为 3.0 km（图 18bc），灾害链造成 13

人遇难，95 间民房破坏，19 条道路中断。

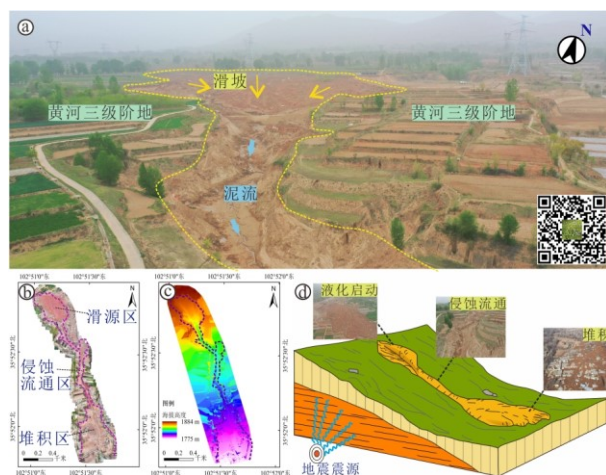


图 18 地震动力成因灾害链

Fig. 18 Seismic dynamic cause type disaster chain

黄土地震动力成因灾害链呈现“地震能量输入→黄土结构破坏→灾害触发→后续动力（余震、降雨）触发继发性灾害→灾害空间扩散与叠加”的递进特征（图 18d），核心是地震动力对黄土特殊物理力学性质（多孔隙、欠固结、易液化）的强烈扰动，以及后续次生作用的叠加放大。

4.3 人类动力成因灾害链

人类动力成因黄土灾害链是指由人类工程活动（如开挖、填筑、灌溉、开采、机车振动等）打破黄土区原有地质平衡，引发初始灾害后，通过地形重塑、水文条件改变或物质补给等方式，触发次生灾害的连锁反应过程。

人类动力成因灾害链常见的成灾模式有：工程开挖引发的“边坡失稳→堵河→洪水”链（图 15）、过度灌溉引发的“湿陷→崩滑→泥石流”链（图 5）、矿产采空引发的“塌陷→地裂缝→复合灾害”链等（图 7）。此类灾害链的核心是人类活动作为“初始扰动源”，通过改变黄土的力学性质、水文状态或地形条件，激活黄土的脆弱性（如湿陷性、垂直节理发育、抗剪强度低等），进而形成多环节灾害链条，其特殊性在于：人类活动的“可控性”与“累积性”（如长期灌溉的缓慢影响和开挖的瞬时影响等），使得灾害链的初始环节具有明确的人为触发点，且次生灾害的强度与人类活动的规模（如开挖深度、灌溉量）直接相关。

4.4 复合动力成因灾害链

复合动力成因黄土灾害链是指两种或多种动力（自然动力如地震、水动力；人类动力如工程开挖、资源开发、机车振动、灌溉等）通过协同、叠加或

触发作用，共同驱动黄土灾害发生发展，并形成多环节、多灾种连续演化的黄土链式灾害。图 19a 所示是陕西渭南蒲城的一个典型复合动力成因黄土灾害链（Wang et al., 2024），108 国道从坡面穿过（图 19b），灾害链发生之后坡脚处北洛河形成堰塞湖（图 19c），该处灾害链按灾种分类属于塌陷（落水洞）-崩塌-滑坡-堰塞湖（图 19d），灾害链的孕灾影响因素可被归纳为：黄土性质、极端降雨、灌溉、不合理的开挖、未及时完工的排水渠道、路基的长期汽车振动，其中极端降雨是灾害链的主要诱发因素。

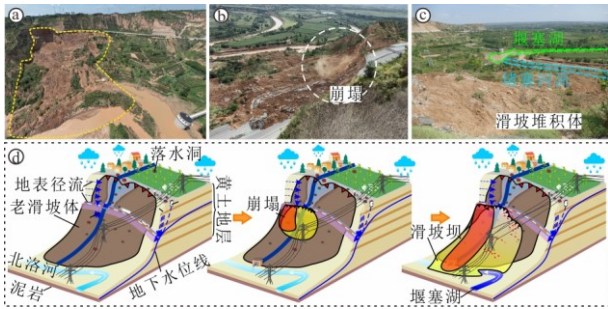


图 19 复合动力成因灾害链（据 Wang et al.(2024)）

Fig. 19 Complex dynamic cause type disaster chain

复合动力的组合形式多样，按动力性质可分为三大类：自然-自然复合（如水动力+地震动力）、自然-人类复合（如水动力+人类动力、地震动力+人类动力）、多动力协同复合（如水+地震+人类活动），其核心特征是“动力耦合-介质响应-灾害级联”的非线性放大效应，即在复合动力作用下会因黄土介质的脆弱性（湿陷性、低抗剪性、节理发育）被显著强化，复合动力作用的结合突破了黄土的稳定阈值，引发更复杂、更具破坏性的链式灾害成灾模式。

5.因果关系分类

5.1 伴生地质灾害链

伴生黄土地质灾害链是指在特定地质环境中，两种或多种黄土地质灾害（如滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝等）在时空上伴随发生，灾种之间同时发生或相隔时间较短，通过物质、能量或环境条件的传递形成的链式灾害系统。伴生地质灾害链隐蔽性强，危害性大且威胁范围广。例如 1920 年海原 8.5 级大地震诱发了大量的滑坡、泥石流、堰塞湖、地裂缝和地面沉降等地质灾害（图 20），形成了区域性的破坏。



图 20 海原大地震伴生黄土灾害链

Fig. 20 The loess disaster chain associated with the Haiyuan Earthquake

伴生黄土地质灾害链的成灾模式核心是：孕灾环境共性+触发条件关联+灾害间相互驱动。其本质是黄土区“脆弱地质系统”在扰动下的多灾种协同响应，具有“时空关联紧密、灾害类型多样、破坏强度叠加”的特点。

5.2 派生地质灾害链

派生黄土地质灾害链是指以某一种黄土地质灾害为初始源头，通过物质迁移、能量传递或环境条件改变，“主动派生”出一系列次生灾害，形成“初始灾害→派生动力→次生灾害→再派生灾害”的单向或多向因果链条。其核心特征是灾害间存在明确的“母灾-子灾”派生关系，而非简单的时空伴生，初始灾害是后续灾害的直接诱因，次生灾害的发生依赖于初始灾害提供的物质、能量或环境扰动，其典型案例如图 13 所示的黄土崩塌-滑坡-泥石流灾害链。

派生黄土地质灾害链的成灾模式以某一初始黄土地质灾害为起点，通过物质迁移、能量传递或环境扰动，逐步“派生”出一系列次生灾害的完整过程与规律，核心体现为“初始触发→动力传递→次生响应→链式放大”的有序演化逻辑。其成灾模式分析需结合黄土的特殊属性、初始灾害的动力特征及次生灾害的响应机制。

6.时代分类

参考关于滑坡等地质灾害的时代分类（徐邦栋，2001；王恭先等，2004），本文按照灾害链发生的

时代，将黄土灾害链分为现代灾害链、老灾害链和古灾害链，以期有助于理解灾害链的年代分类，以及它们在稳定性和潜在活动性方面的差异。

6.1 现代灾害链

近百年来，人类工程活动加剧，气候变化显著，自然灾害也随之频繁发生（安芷生等，2025），在此背景下地质灾害往往向链式结构发展，现代灾害链是指近一百年有仪器记录（卫星、雨量站和地震仪）以来的可以观测到明显变形破坏迹象的地质灾害链。由于科学技术的发展，对于现代灾害链往往有相对精确的数据记录，其灾害链的发生过程和成因机制较为明确。现代灾害链主要特征是“自然-人为高度耦合、多灾种快速联动、与基础设施深度绑定”。相较于历史时期，现代黄土灾害链呈现出四个新特性：突发性与连锁性增强、与基础设施的“绑定性”强、人为因素的“主导性”强、致灾机制的“复杂性”强，其与城市化、重大工程、生态保护等现代社会发展需求深度交织。图 21 所示为位于甘肃省庆阳市董志塬的一处正在发生变形破坏的黄土灾害链，近些年来塬边坡面形成大量不同规模的黄土塌陷（落水洞），落水洞发育到一定程度时在降雨诱发作用下产生大量浅层滑坡，由于塬面地形平坦，大量水汇集于塬边沟道中，冲刷滑坡松散堆积体形成黄土泥石流，造成黄土塌陷（落水洞）-滑坡-泥石流灾害链（图 21），威胁塬上居民房屋和工业基础设施。

从成灾模式上来看，现代黄土灾害链已从历史上的“单一诱因-单一灾种”灾害模式，演变为“多诱因-多灾种-多环节”的复合链式反应，主要类型有：极端降雨驱动的“滑坡→泥石流→堰塞湖→洪水”链、工程扰动驱动的“切坡→崩塌→地裂缝→工程失稳”链、能源开发驱动的“采矿塌陷→地裂缝→滑坡→泥石流”链、冻融-降雨复合驱动的“冻融裂隙→浅层滑坡→坡面泥石流”链等。

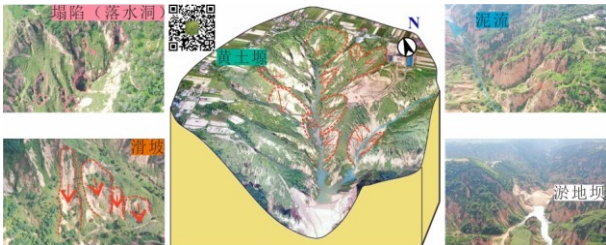


图 21 庆阳董志塬现代灾害链

Fig. 21 Modern disaster chain in Dongzhi tableland

Qingyang city

6.2 老灾害链

老灾害链是指发生在全新世以来（距今约 11700 年），但现已停止活动的地质灾害链。这类灾害在人类历史时期可能曾经活动过，对当时的地貌和人类活动等可能产生过影响，但在现代已没有明显的活动迹象。史书中曾记载了在黄土高原地区发育了大量老灾害链（费杰等，2019），老灾害链的研究可对分析现代灾害链的时间效应以及地貌过程具有重要意义。其典型案例如：《新唐书中》曾记载：“永昌中，华州赤水南岸大山，昼日忽风昏，有声隐隐如雷，顷之渐移东数百步，拥赤水，压张村民三十余家，山高二百余丈，水深三十丈，坡上草木宛然”，即公元 689 年，在陕西华县地区由滑坡引起赤水堰塞湖，形成黄土滑坡-堰塞湖-溃决灾害链。距今 3650~2750 a 前后的喇家遗址老灾害链，也是一个典型案例（图 22）。

老灾害链的成灾模式可概括为：第四纪黄土与切割地形（河谷、陡坡）构成物质基础，构造地震与冰期-间冰期气候波动（极端降水、冰川消融）为核心触发力，通过“滑坡→堰塞湖→洪水”、“冰川消融→泥石流→淤积”等区域尺度链式过程，最终实现地表形态重塑与生态系统调整。其与古灾害链的核心差异在于：时间尺度缩短至千年级、成灾范围限于区域（而非全球）、气候驱动作用显著增强；与现代灾害链的差异则在于：完全无人活动干预，链式过程更依赖自然动力的“自我反馈”。

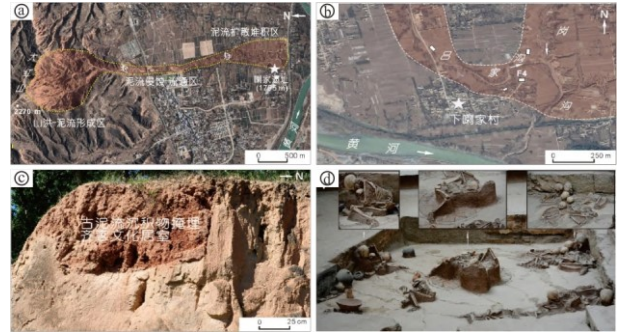


图 22 喇家遗址老灾害链，据（张玉柱等，2024）

Fig. 22 The old disaster chain at the Lajia Ruins

6.3 古灾害链

古灾害链是指发生在全新世（11700 年前至今）以前的地质灾害链，它们在现代已相对稳定，古灾害链的变形破坏面通常已经基本固化，因此其危险性与现代灾害链相比要弱，但仍然有可能再次变形。古灾害链的发生对于地貌重塑具有重要影响，典型古灾害链如图 23 所示，戈龙布古滑坡位于黄河上游积石峡地区，距离积石峡水电站约 20 km，滑坡最早发生于晚更新世（殷志强等，2021），滑坡高速

下滑之后堵塞黄河形成堰塞湖（图 23a），滑坡堰塞坝主要岩性为砂砾岩，稳定性较高，滑坡坝溃决后导致黄河改道（周洪福等，2009），目前滑体分别位于黄河的左岸和右岸，可见残留的堰塞坝堆积体，堰塞坝上游湖相沉积地层层理发育（图 23b），该处灾害链属于典型的滑坡-堰塞湖古灾害链。

古灾害链由于发生时间距离现在较远，如图 23c 所示的发生于距今 8 万年左右的黄河上游德恒隆-锁子巨型滑坡-堰塞湖灾害链（郭小花等，2015），只能通过分析地质遗迹来进行研究，其成灾模式深刻受制于古地质环境（如古板块格局、古气候、古地貌），具有“时间尺度宏大、触发能量超强、灾种关联复杂、成灾规模巨烈”的特点。

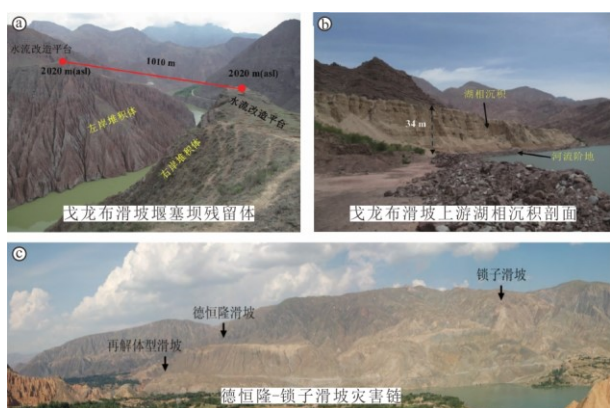


图 23 典型古灾害链

Fig. 23 Typical ancient disaster chain

7.讨论

黄土高原灾害链具有复杂性高、隐蔽性强和危害性大等特点，对黄土高原地区基础设施造成重大威胁（Wang et al., 2024），尤其是近些年来随着黄土高原降雨带北移带来暴雨风险加剧和高强度人类工程扰动共同作用的大背景下（范文等，2025；王新刚等，2025），开展黄土地质灾害链的系统研究对于黄土高原地区经济高质量发展具有重大意义（马鹏辉和彭建兵，2022；许强等，2025）。

在野外调研、广泛查阅和总结黄土高原地区各类地质灾害分类基础上，将黄土灾害链分为六大类 25 亚种，见图 24 所示，各类灾害链对应的位置已在图 1 中标出。根据灾种将灾害链分为崩塌-滑坡-泥石流灾害链、塌陷-滑坡-泥石流灾害链、滑坡-堰塞湖-溃决灾害链、湿陷-地面沉降-地裂缝-崩塌-滑坡-泥石流灾害链、塌陷-崩塌-滑坡-泥石流灾害链、塌陷-地裂缝-滑坡-泥石流灾害链和滑坡-滑坡灾害链；根据灾害链的控制性界面将灾害链分为黄土层内灾害链、黄土-基岩接触面灾害链和黄土-基岩切层灾害链；根据地貌将其分为塬岸塬带灾害链、梁头-梁身灾害链、峁顶-峁底灾害链、河谷阶地灾害链、塬沟交汇灾害链和基岩山地灾害链；按照主要动力成因将其分类为水动力成因灾害链、地震动力成因灾害链、人类动力成因灾害链和复合动力成因灾害链；按照因果关系将其分类为伴生地质灾害链和派生地质灾害链；按时代将其分类为现代灾害链、老灾害链和古灾害链。

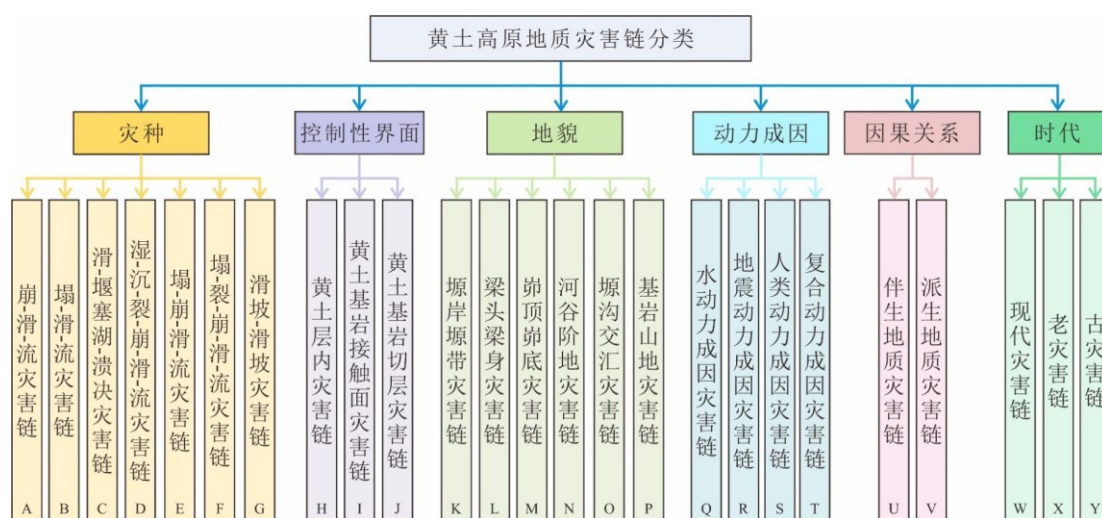


图 24 黄土高原地质灾害链分类（备注：图中 A-Y 对应的灾害点位置见图 1）

Fig. 24 Classification of geological disaster chains on the Loess Plateau

本文对黄土高原大量典型地质灾害链案例进行了分析，发现黄土高原灾害链转化的关键因素在于

物质和能量的传递与转化,在传递和转化过程中由一种灾害引发另一种灾害需要一定的触发条件,达到该临界点时产生链式反应,而驱动黄土灾害链发生的主要致灾因素包括黄土性质与结构面、地质构造、地形地貌、气象水文、地震、植被覆盖和人类工程活动等(彭建兵等,2020)。研究所提出的黄土高原地质灾害链的分类体系(图24),有助于明确各类灾害链的形成和演化过程,有利于灾害链精准识别、监测预警和工程治理等减灾工作的实施,研究成果亦可针对性地用于实现黄土灾害链“源头削链-过程断链-末端消链”的全过程防控。

本文中关于黄土地质灾害链的分类研究还有很多不足之处,由于黄土高原各类灾害链的特征差异较大,还需要进行进一步的细化完善。所提出的分类体系中部分灾害链有分类上的交集,不显见的灾害链尚未归纳,多环节灾害链的各类交叉组合形式也待进一步科学分析(史培军等,2014;刘传正和王建新,2024),因此对黄土高原灾害链还需深入研究,以应对当前城市化进程、重大工程建设和全球气候变暖雨带北移等对黄土高原减灾防灾工作的影响,这需要广大从事地质灾害理论研究的学者未来共同努力探究。

8. 结论

本文在广泛查阅和总结黄土高原地区各类地质灾害分类基础上,通过大量野外调查、无人机航测和室内遥感影像分析方法对黄土高原地区典型地质灾害链进行了综合分析,主要得到以下结论:

(1)从灾种、控制性界面、地貌、动力成因、因果关系和形成时代等几个方面对黄土高原地质灾害链进行了归纳,提出了黄土高原地质灾害链六大类25亚种的分类体系。

(2)总结了典型黄土地质灾害链的发育特征和成灾模式,揭示了典型黄土地质灾害链的链式结构及其彼此间的影响关系,研究可为黄土高原地质灾害链防控治理提供理论借鉴。

(3)黄土高原灾害链转化的关键因素在于物质和能量的传递与转化,而驱动黄土灾害链发生的主要致灾因素包括黄土性质与结构面、地质构造、地形地貌、气象水文、地震、植被覆盖和人类工程活动等。

(4)所提出的黄土高原地质灾害链的分类体系,有助于明确各类灾害链的形成和演化过程,有利于灾害链减灾工作的实施,研究成果亦可针对性地用

于实现黄土灾害链“源头削链-过程断链-末端消链”的全过程防控。

(5)本文中关于黄土地质灾害链的分类研究还有很多不足之处,如部分灾害链有分类上的交集,不显见的灾害链尚未归纳,多环节灾害链的各类交叉组合形式有待进一步科学分析,这需要广大从事地质灾害理论研究的学者,未来共同努力探究。

References

- An, Z. S., Zhou, W. J., Liu, Y. S., et al., 2025. Innovative Pathways and Perspectives for Construction of Ecological Barriers on Loess Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 40(06): 969-979. (in Chinese with English abstract)
- Cao, Y. Z., 1985. Different Types of Loess Area Subject to Gravitational Erosion and Their Geneses. *Soil and Water Conservation in China*, (06): 10-15+65. (in Chinese with English abstract)
- Cui, P., Guo, J., 2021. Evolution Models, Risk Prevention and Control Countermeasures of the Valley Disasterchain. *Advanced Engineering Sciences*, 53(03): 5-18. (in Chinese with English abstract)
- Derbyshire, E., 2001. Geological Hazards in Loess Terrain, with Particular Reference to the Loess Regions of China. *Earth-science Reviews*, 54(1): 231-260.
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00050-2)
- Dijkstra, T. A., Rogers, C. D. F., Smalley, I. J., et al., 1994. The Loess of North-central China: Geotechnical Properties and Their Relation to Slope Stability. *Engineering Geology*, 36(3): 153-171.
[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90001-9)
- Fan, W., Deng, L. S., Yu, B., et al., 2025. Failure Mechanism and Risk Mitigation of Loess Disaster Under Extreme Rainfall. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 47(03): 285-312+282. (in Chinese with English abstract)
- Fei, J., He, H. M., Yang, S., et al., 2019. Landslide Lakes in Shaanxi and Gansu Provinces in the Period between BC 221 and AD 1911. *The Chinese Journal of Geological Hazard and*

- Control*, 30(06): 117-125. (in Chinese with English abstract)
- Guo, X. H., Lu, Y. D., Li, X. L., et al., 2015. Event of Block up of Upper Yellow River by Dehenglong – Suozi Landslides. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 45(06): 1789-1797. (in Chinese with English abstract)
- Han, J. L., Wu, S. R., Wang, H. B., 2007. Preliminary Study on Geological Hazard Chains. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 11-23. (in Chinese with English abstract)
- Hu, S., Qiu, H. J., Wang, N. L., et al., 2020. The Influence of Loess Cave Development upon Landslides and Geomorphologic Evolution: A case Study from the Northwest Loess Plateau, China. *Geomorphology*, 359: 107167. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107167>
- Juang, C.H., Dijkstra, T., Wasowski, J., et al., 2019. Loess Geohazards Research in China: Advances and Challenges for Mega Engineering Projects. *Engineering Geology*, 251: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.01.019>
- Li, T. L., Xi, Y., Hou, X. K., 2018. Mechanism of Surface Water Infiltration Induced Deep Loess Landslide. *Journal of Engineering Geology*, 26(05): 1113-1120. (in Chinese with English abstract)
- Li, W., Wang, D. H., Li, H. J., et al., 2020. Study on Chain Effect and Type of Coal Mine Goafs Instability Disaster. *Coal Science and Technology*, 48(07): 288-295. (in Chinese with English abstract)
- Li, X. Z., 1985. Loess Plateau – the Origin of Chinese Ancient Culture and Cradle of Chinese Nation. *Journal of Northwest University*, 47(02): 92-96. (in Chinese with English abstract)
- Li, Y. R., Shi, W. H., Aydin, A., et al., 2020. Loess Genesis and Worldwide Distribution. *Earth-science Reviews*, 201: 102947. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102947>
- Li, Z. C., Wu, Z. H., Han, S., et al., 2025. Characteristics and Mechanisms of Sand Liquefaction in January 7, 2025 Dingri MS6.8 Earthquake. *Earth Science*, 50(05): 1830-1841. (in Chinese with English abstract)
- Lian, B. Q., Peng, J. B., Zhan, H. B., et al., 2020. Formation Mechanism Analysis of Irrigation-induced Retrogressive Loess Landslides. *Catena*, 195: 104441. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104441>
- Liu, C. Z., Wang, J. X., 2024. Research on Classification of Collapse, Landslide and Debris Flow Disaster Chains. *Journal of Engineering Geology*, 32(05): 1573-1596. (in Chinese with English abstract)
- Liu, K., Wang, X. G., Zhang, P. D., et al., 2024. Development Characteristics and Disaster Modes of Typical Geological Disasters on Loess Plateau in Northern Shaanxi: A Case Study of Yuyang District of Yulin City. *Journal of Natural Disasters*, 33(02): 98-112. (in Chinese with English abstract)
- Ma, P. H., 2020. Study on Evolution Characteristics and Transformation Mechanism of Loess Geohazards Chain (Dissertation). Chang'an University, Xi'an. (in Chinese with English abstract)
- Ma, P. H., Peng, J. B., 2022. On Loess Geohazards Chain (1). *Journal of Natural Disasters*, 31(02): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- Mao, Z. J., Shi, S. J., Wang, G. R., et al., 2023. Identification and Development Characteristics Analysis of Loess Landslide Based on UAV Remote Sensing. *Journal of Catastrophology*, 38(01): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- Meng, Z. J., Ma, P. H., Peng, J. B., 2021. Characteristics of Loess Landslides Triggered by Different Factors in the Chinese Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 18(12): 3218-3229. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6880-6>
- Peng, J. B., Fan, Z. J., Wu, D., et al., 2015. Heavy Rainfall Triggered Loess – mudstone Landslide and Subsequent Debris Flow in Tianshui, China. *Engineering Geology*, 186: 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.015>
- Peng, J. B., Lin, H. Z., Wang, Q. Y., et al., 2014. The Critical Issues and Creative Concepts in

- Mitigation research of Loess Geological Hazards. *Journal of Engineering Geology*, 22(04): 684-691. (in Chinese with English abstract)
- Peng, J. B., Sun, P., Igwe, O., et al., 2018. Loess Caves, a Special Kind of Geo-hazard on Loess Plateau, Northwestern China. *Engineering Geology*, 236: 79-88.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.08.012>
- Peng, J. B., Sun, X. H., Wang, W., et al., 2016. Characteristics of Land Subsidence, Earth Fissures and Related Disaster Chain Effects with Respect to Urban Hazards in Xi'an, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(16): 1190.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-5928-3>
- Peng, J. B., Wang, Q. Y., Zhuang, J. Q., et al., 2020. Dynamic Formation Mechanism of Landslide Disaster on the Loess Plateau. *Journal of Geomechanics*, 26(05): 714-730. (in Chinese with English abstract)
- Qu, J. K., Yang, W. M., Xue, Y. G., et al., 2024. Formation Analysis and Hazard Assessment of the Landslide-debris Flow Disaster Chain in Small Watersheds of the Reservoir Type. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(12): 484.
<https://doi.org/10.1007/s10064-024-03929-x>
- Sadeghi, H., Kiani, M., Sadeghi, M., et al., 2019. Geotechnical Characterization and Collapsibility of a Natural Dispersive Loess. *Engineering Geology*, 250: 89-100.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.01.015>
- Shi, P. J., Lyu, L. L., Wang, M., et al., 2014. Disaster System: Disaster Cluster, Disaster Chain and Disaster Compound. *Journal of Natural Disasters*, 23(06): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- Sun, P. P., Zhang, M. S., Cheng, X. J., et al., 2019. On the Regularity of Geological Hazard on the Loess Plateau in China. *Mountain Research*, 37(05): 737-746. (in Chinese with English abstract)
- Sun, P., Wang, G., Wu, L. Z., et al., 2019. Physical Model Experiments for Shallow Failure in Rainfall-triggered Loess Slope, Northwest China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6): 4363-4382.
<https://doi.org/10.1007/s10064-018-1420-5>
- Tang, H. M., Li, C. D., Gong, W. P., et al., 2022. Fundamental Attribute and Research Approach of Landslide Evolution. *Earth Science*, 47(12): 4596-4608. (in Chinese with English abstract)
- Wang, G. X., Xu, J. L., Liu, G. D., et al., 2004. Landslide science and landslide prevention technology. Beijing: China Railway Publishing House. (in Chinese)
- Wang, G. Y., Ren, L. B., Wu, W. J., et al., 2019. Characteristics and Causes of the Landslide Outbreaking in Yongguangcun, Minxian County, Gansu Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41(02): 392-399. (in Chinese with English abstract)
- Wang, H. J., Sun, P., Zhang, S., et al., 2022. Evolutionary and Dynamic Processes of the Zhongzhai Landslide Reactivated on October 5, 2021, in Niangniangba, Gansu Province, China. *Landslides*, 19(12): 2983-2996.
<https://doi.org/10.1007/s10346-022-01966-9>
- Wang, J. D., Gu, T. F., Zhang, M. S., et al., 2019. Experimental Study of Loess Disintegration Characteristics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(6): 1317-1329.
<https://doi.org/10.1002/esp.4575>
- Wang, X. G., Hu, B., Zhao, Z. H., et al., 2014. Analysis of Collapse Sliding Failure of the Excavation Slope of Joint Type Loess Under the Action of Seepage. *Journal of Natural Disasters*, 23(02): 47-52. (in Chinese with English abstract)
- Wang, X. G., Hu, S., Lian, B. Q., et al., 2024. Formation Mechanism of a Disaster Chain in Loess Plateau: A Case Study of the Pucheng County Disaster Chain on August 10, 2023, in Shaanxi Province, China. *Engineering Geology*, 331: 107463.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107463>
- Wang, X. G., Liu, K., Lian, B. Q., et al., 2021. Recent Advance in Understanding Inducing Factors and Formation Mechanism of Loess-mudstone Landslides. *Journal of Northwest University*

- (*Natural Science Edition*), 51(03): 404-413. (in Chinese with English abstract)
- Wang, X. G., Wang, D. Z., Wang, J. D., et al., 2025. Research Status and Development Trend on the Mechanism of Mudflow Disasters in the Loess Plateau. *Northwest Geology*, 58(02): 1-15+345. (in Chinese with English abstract)
- Wang, X. G., Wang, J. D., Zhan, H. B., et al., 2020. Moisture Content Effect on the Creep Behavior of Loess for the Catastrophic Baqiao Landslide. *Catena*, 187: 104371. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104371>
- Wang, X. G., Yu, H. M., Hu, B., et al., 2013. Impact Analysis of the Joint Control Excavation Loess Slope's Stability under the Influence of Rainfall Infiltration Channe. *Journal of Mountain Science*, 31(04): 413-417. (in Chinese with English abstract)
- Wu, W. J., Wang, N. Q., 2002. Basic Types and Active Features of Loess Landslide. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(02): 38-42. (in Chinese with English abstract)
- Wu, Z. J., Chen, Y. J., Wang, Q., et al., 2019. Disaster-causing Mechanism of Yongguang Landslide Under Minxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquak. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41(S2): 165-168. (in Chinese with English abstract)
- Xu, B. D., 2001. Landslide Analysis and Prevention. Beijing: China Railway Publishing House. (in Chinese)
- Xu, J. S., Sui, W. H., An, H. B., et al., 2024. Characteristics and Mechanism of Loess Surface Disasters under Coal-mining: a Case Study in Lvliang, China. *All Earth*, 36(1): 1-10. <https://doi.org/10.1080/27669645.2024.2373549>
- Xu, Q., Peng, D. L., Fan, X. M., et al., 2025. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Town Flowslide Triggered by Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(02): 207-222. (in Chinese with English abstract)
- Xu, Q., Peng, D. L., He, C. Y., et al., 2020. Theory and Method of Monitoring and Early Warning for Sudden Loess Landslide — A Case Study at Heifangtai Terrace. *Journal of Engineering Geology*, 28(01): 111-121. (in Chinese with English abstract)
- Xu, Z. J., Lin, Z. G., Zhang, M. S., 2007. Loess in China and Loess Landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(07): 1297-1312. (in Chinese with English abstract)
- Yang, Z. W., Wu, B. B., Liu, W. M., et al., 2025. Progress in Erosion Mechanism and Geomorphological Effects of High-Energy Outburst Flood. *Earth Science*, 50(02): 718-736. (in Chinese with English abstract)
- Yao, Z. H., Chen, Z. H., Fang, X. W., et al., 2020. Elastoplastic Damage Seepage – consolidation Coupled Model of Unsaturated Undisturbed Loess and Its Application. *Acta Geotechnica*, 15(6): 1637-1653. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00873-z>
- Yin, Y. P., Zhang, Z. C., Li, Z. H., et al., 2004. Occurrence and Hazard Assessment on Loess Landslide of Gaolanshan in Lanzhou. *Quaternary Sciences*, 24(03): 302-310. (in Chinese with English abstract)
- Yin, Z. Q., Wei, G., Qin, X. G., et al., 2021. Research Progress on Landslides and Dammed Lakes in the Upper Reaches of the Yellow River, Northeastern Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers*, 28(02): 46-57. (in Chinese with English abstract)
- You, Q. L., Jiang, Z. H., Yue, X., et al., 2022. Recent Frontiers of Climate Changes in East Asia at Global Warming of 1.5 ° C and 2 ° C. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1): 80. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00303-0>
- Zeng, R. Q., Zhang, Z. L., Zhao, S. F., et al., 2024. Effects of Human and Tectonic Activities on Groundwater in the Upper Yellow River Terraces of the Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 645: 132279. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132279>
- Zhang, F. Y., 2011. Shear Behavior of Loess and Loess Landslides (Dissertation). Lanzhou

- University, Lanzhou. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, F. Y., Peng, J. B., Wu, X. G., et al., 2021. A Catastrophic Flowslide That Overrides a Liquefied Substrate: The 1983 Saleshan Landslide in China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(10): 2060-2078. <https://doi.org/10.1002/esp.5144>
- Zhang, M. S., Hu, W., Sun, P. P., et al., 2016. Advances and Prospects of Water Sensitivity of Loess and the Induced Loess Landslides. *Journal of Earth Environment*, 7(04): 323-334. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, M. S., Li, L., Tang, Y. M., et al., 2011. Risk Management Based Landslide Investigation and Mapping in Loess Area. *Journal of Engineering Geology*, 19(01): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, Y. Z., Shen, M. J., Guo, Y. Q., et al., 2024. The Mudflow Disaster Induced by the Ms 6.2-Magnitude Jishishan Earthquake Reproduces the Prehistorical Catastrophes in the Lajia Ruins. *Chinese Science Bulletin*, 69(10): 1320-1326. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, C. Y., Liu, X. J., Zhang, Q., et al., 2019. Research on Loess Landslide Identification, Monitoring and Failure Mode with InSAR Technique in Heifangtai, Gansu. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(07): 996-1007. (in Chinese with English abstract)
- Zhong, D. L., Xie, H., Wei, F. Q., et al., 2013. Discussion on Mountain Hazards Chain. *Journal of Mountain Science*, 31(03): 314-326. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, H. F., Wei, Y. T., Nie, D. X., 2009. Formation Mechanism of High-speed Gelongbu Landslide and Associated Blockage of Upper Reach Yellow River. *Journal of Engineering Geology*, 17(04): 483-488. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, W. Q., Qiu, H. J., Wang, L. Y., et al., 2022. Combining Rainfall-induced Shallow Landslides and Subsequent Debris Flows for Hazard Chain Prediction. *Catena*, 213: 106199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106199>
- Zhu, X. H., Peng, J. B., Tong, X., et al., 2017. Preliminary Research on Geological Disaster Chains in Loess Area. *Journal of Engineering Geology*, 25(01): 117-122. (in Chinese with English abstract)
- ### 中文参考文献
- 安芷生, 周卫健, 刘彦随, 等, 2025. 黄土高原生态屏障建设的创新路径与展望. 中国科学院院刊, 40(06): 969-979.
- 曹银真, 1985. 黄土地区重力侵蚀的类型和成因. 中国水土保持, (06): 10-15+65.
- 崔鹏, 郭剑, 2021. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策. 工程科学与技术, 53(03): 5-18.
- 范文, 邓龙胜, 于渤, 等, 2025. 极端降雨下黄土体灾变机制与滑坡风险防控. 地球科学与环境学报, 47(03): 285-312+282.
- 费杰, 何洪鸣, 杨帅, 等, 2019. 公元前 221 年—公元 1911 年陕甘地区堰塞湖成因浅析. 中国地质灾害与防治学报, 30(06): 117-125.
- 郭小花, 卢玉东, 李小林, 等, 2015. 黄河上游德恒隆-锁子滑坡堵塞黄河事件. 吉林大学学报(地球科学版), 45(06): 1789-1797.
- 韩金良, 吴树仁, 汪华斌, 2007. 地质灾害链. 地学前缘, 14(6): 11-23.
- 李同录, 习羽, 侯晓坤, 2018. 水致黄土深层滑坡灾变机理. 工程地质学报, 26(05): 1113-1120.
- 李文, 王东昊, 李宏杰, 等, 2020. 煤矿采空区失稳灾害链式效应与链式类型研究. 煤炭科学技术, 48(07): 288-295.
- 李学曾, 1985. 黄土高原是中华民族摇篮和古文化的发祥地. 西北大学学报, 47(02): 92-96.
- 李智超, 吴中海, 韩帅, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日定日 M_S6.8 级地震砂土液化特征及成因机制. 地球科学, 50(05): 1830-1841.
- 刘传正, 王建新, 2024. 崩塌滑坡泥石流灾害链分类研究. 工程地质学报, 32(05): 1573-1596.
- 刘凯, 王新刚, 张培栋, 等, 2024. 陕北黄土高原典型地质灾害发育特征及成灾模式研究——以榆林市榆阳区为例. 自然灾害学报, 33(02): 98-112.
- 马鹏辉, 2020. 黄土地质灾害链链生演化特征及机制研究 (博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 马鹏辉, 彭建兵, 2022. 论黄土地质灾害链(一). 自然灾害学报, 31(02): 1-11.

- 毛正君, 石硕杰, 王贵荣, 等, 2023. 基于无人机遥感的区域黄土滑坡识别及发育特征分析. 灾害学, 38(01): 63-71.
- 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等, 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路. 工程地质学报, 22(04): 684-691.
- 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等, 2020. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制. 地质力学学报, 26(05): 714-730.
- 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等, 2014. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇. 自然灾害学报, 23(06): 1-12.
- 孙萍萍, 张茂省, 程秀娟, 等, 2019. 黄土高原地质灾害发生规律. 山地学报, 37(05): 737-746.
- 唐辉明, 李长冬, 龚文平, 等, 2022. 滑坡演化的基本属性与研究途径. 地球科学, 47(12): 4596-4608.
- 王恭先, 徐峻岭, 刘光代, 等, 2004. 滑坡学与滑坡防治技术. 北京: 中国铁道出版社.
- 王国亚, 任路滨, 吴玮江, 等, 2019. 甘肃岷县永光村滑坡特征及其成因研究. 冰川冻土, 41(02): 392-399.
- 王新刚, 胡斌, 赵治海, 等, 2014. 渗流作用下节理型黄土开挖边坡塌滑破坏分析. 自然灾害学报, 23(02): 47-52.
- 王新刚, 刘凯, 连宝琴, 等, 2021. 黄土-泥岩滑坡诱发因素及形成机理研究进展. 西北大学学报(自然科学版), 51(03): 404-413.
- 王新刚, 王道正, 王家鼎, 等, 2025. 黄土高原泥流灾变机理研究进展与发展趋势. 西北地质, 58(02): 1-15+345.
- 王新刚, 余宏明, 胡斌, 等, 2013. 节理控制的降雨入渗通道对黄土开挖边坡稳定性的影响. 山地学报, 31(04): 413-417.
- 吴玮江, 王念秦, 2002. 黄土滑坡的基本类型与活动特征. 中国地质灾害与防治学报, 13(02): 38-42.
- 吴志坚, 陈豫津, 王谦, 等, 2019. 岷县漳县 6.6 级地震永光村滑坡致灾机制分析. 岩土工程学报, 41(S2): 165-168.
- 徐邦栋, 2001. 滑坡分析与防治. 北京: 中国铁道出版社.
- 徐张建, 林在贯, 张茂省, 2007. 中国黄土与黄土滑坡. 岩石力学与工程学报, 26(07): 1297-1312.
- 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等, 2025. 甘肃积石山 Ms 6.2 地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理. 武汉大学学报(信息科学版), 50(02): 207-222.
- 许强, 彭大雷, 何朝阳, 等, 2020. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究——以甘肃黑方台为例. 工程地质学报, 28(01): 111-121.
- 杨泽文, 吴兵兵, 刘维明, 等, 2025. 高能溃决洪水侵蚀机理与地貌效应研究进展. 地球科学, 50(02): 718-736.
- 殷跃平, 张作辰, 黎志恒, 等, 2004. 兰州皋兰山黄土滑坡特征及灾度评估研究. 第四纪研究, 24(03): 302-310.
- 殷志强, 魏刚, 秦小光, 等, 2021. 青藏高原东北缘黄河上游滑坡与堰塞湖研究进展. 地学前缘, 28(02): 46-57.
- 张帆宇, 2011. 黄土的剪切行为和黄土滑坡 (博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等, 2016. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望. 地球环境学报, 7(04): 323-334.
- 张茂省, 李林, 唐亚明, 等, 2011. 基于风险理念的黄土滑坡调查与编图研究. 工程地质学报, 19(01): 43-51.
- 张玉柱, 沈铭健, 郭永强, 等, 2024. 积石山 Ms 6.2 级地震诱发的次生泥流灾害再现喇家遗址史前灾难场景. 科学通报, 69(10): 1320-1326.
- 赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等, 2019. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究. 武汉大学学报(信息科学版), 44(07): 996-1007.
- 钟敦伦, 谢洪, 韦方强, 等, 2013. 论山地灾害链. 山地学报, 31(03): 314-326.
- 周洪福, 韦玉婷, 聂德新, 2009. 黄河上游戈龙布滑坡高速下滑成因机制及堵江分析. 工程地质学报, 17(04): 483-488.
- 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等, 2017. 黄土地区地质灾害链研究初探. 工程地质学报, 25(01): 117-122.