

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.265>



新近系黄土-红层滑坡典型控滑斜坡结构及其致灾机理:综述与展望

李坤^{1,2,3}, 孙萍^{1,2*}, 王浩杰^{1,2}, 张帅^{1,2}, 李冉^{1,2}, 桑康云^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
2. 自然资源部陕西宝鸡地质灾害野外科学观测研究站, 陕西宝鸡 721001
3. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川成都 610218

摘要: 新近系黄土-红层滑坡是黄土高原地区最具代表性且备受关注的灾害类型, 其灾变机理已成为工程地质领域亟待突破的前沿科学命题. 以新近系黄土-红层滑坡控滑结构为切入点, 从地层结构和控滑地质界面两个层面系统梳理了斜坡地质结构类型及其赋存特征, 阐述了结构面在滑坡形成过程中的边界约束、水力传导与力学弱化三重控滑效应, 归纳了基于结构控滑特征的滑坡类型与灾变模式, 分析了基于控滑结构作用效应的滑坡形成演化机制, 并根据当前研究现状, 凝练出 4 个亟待解决的核心问题: ①如何定量表征地质营力与结构面演化过程的时空耦合效应? ②控滑结构如何通过跨尺度能量传递与损伤累积诱发斜坡失稳? ③控滑结构关键物理力学指标在何种临界状态下触发滑坡灾变? ④如何构建融合控滑结构与滑坡运动关联机制的滑坡多场耦合数值模型? 针对上述科学问题, 建议未来应重点开展以下研究方向: 多场耦合作用下控滑结构动态演化过程及机理、基于水-岩相互作用的红层结构面力学劣化机制、黄土-红层滑坡结构控滑临界状态与判据、基于结构控滑效应的黄土-红层滑坡运动演化模型.

关键词: 黄土高原; 新近系黄土-红层; 滑坡; 结构面; 控滑结构.

中图分类号: P642.2

文章编号: 1000-2383(2026)02-578-24

收稿日期: 2025-05-11

Typical Slope Structures and Their Sliding Control Mechanisms of Neogene Loess-Red Bed Landslides: A Review and Prospects

Li Kun^{1,2,3}, Sun Ping^{1,2*}, Wang Haojie^{1,2}, Zhang Shuai^{1,2}, Li Ran^{1,2}, Sang Kangyun^{1,2}

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
2. Observation and Research Station of Geological Disaster in Baoji, Shaanxi Province, Ministry of Natural Resources, Baoji 721001, China
3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610218, China

Abstract: Neogene loess-red bed landslides are the most typical and concerning disaster in the Loess Plateau. Their failure mechanisms have become a frontier scientific challenge in the field of engineering geology that requires urgent breakthroughs. This study adopts landslide-controlling slope structures as the analytical framework to systematically examine geological structure types

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007002)、国家自然科学基金资助项目(Nos. 42130720; 42293352, 42293350; 42307267).

作者简介: 李坤 (1989-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事地质灾害动力学机理研究. ORCID: 0000-0002-3245-1362. E-mail: lik914@163.com

* **通讯作者:** 孙萍, ORCID: 0000-0001-8876-0167. E-mail: sunpingcgs@foxmail.com

引用格式: 李坤, 孙萍, 王浩杰, 张帅, 李冉, 桑康云, 2026. 新近系黄土-红层滑坡典型控滑斜坡结构及其致灾机理: 综述与展望. 地球科学, 51(2): 578-601.

Citation: Li Kun, Sun Ping, Wang Haojie, Zhang Shuai, Li Ran, Sang Kangyun, 2026. Typical Slope Structures and Their Sliding Control Mechanisms of Neogene Loess-Red Bed Landslides: A Review and Prospects. *Earth Science*, 51(2): 578-601.

and occurrence characteristics of loess-red bed slopes from two perspectives: stratigraphic structures and geological interfaces. It elaborates on the triple control effects of structural planes in landslide formation-boundary confinement, hydraulic channelization, and mechanical weakening and summarizes landslide types and corresponding failure modes based on structure control effects. The evolutionary mechanisms of landslides under the influence of slope-control structures are comprehensively analyzed. Based on the current state of research, four critical issues are identified: ① How to quantify the spatiotemporal coupling effects between geodynamic forces and the evolution of structural planes? ② How slope structures induce slope instability via cross-scale energy transfer and damage accumulation? ③ At what critical state of key physical-mechanical parameters do controlling structures trigger slope failures? ④ How to develop multi-field coupled numerical models integrating structural control mechanisms with landslide kinematic linkages? To address these challenges, this study proposes prioritized research directions, which include dynamic evolution processes and governing mechanisms of sliding-control structures under multi-field coupling effects, mechanical deterioration mechanisms of red bed structure planes driven by water-rock interactions, critical state thresholds and diagnostic criteria for structure control in loess-red beds landslides, kinematic evolution modeling of loess-red bed landslides incorporating structure control effects.

Key words: Loess Plateau; Neogene loess-red beds; landslide; structural plane; sliding-control structure.

0 引言

我国黄土高原地区广泛分布的新近系红层(Neogene Red bed/Red clay)是一套以陆相沉积为主、以红色为主色调的碎屑岩地层(图1),其主要岩性组成为泥岩,同时包含粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩等多种岩性,因成岩度较低,且富含黏土质矿物,遇水易发生膨胀、崩解、泥化和软化,因此是一种典型的“易滑地层”(吴玮江和王念秦, 2002; Zhang *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2018). 在西北黄土高原地区,新近系红层上部通常为厚层黄土覆盖,构成上覆黄土—下伏红层的“双层异质”结构(吴玮江等, 2014; Sun *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020). 鉴于这一典型结构特性,西北红层一般被归为埋藏型红层,区别于西南山地地区广泛分布的半裸型红层和东南盆地地区常见的裸露型红层(郭永春等, 2007; 周翠英等, 2023). 为此,若无特别说明,本文统一采用“黄土—红层”或“新近系黄土—红层”的表述方式,以反映该区域红层的典型赋存特征.

黄土—红层斜坡物质差异显著、结构层次丰富,在内外动力作用下极易发生变形破坏,是黄土高原地区滑坡灾害的核心孕灾体(曲永新等, 1999). 早期研究中,黄土因其工程地质特性差、节理裂隙发育程度高,普遍被视为黄土高原滑坡的主控地层. 然而,随着勘测技术的进步和理论认识的不断深化,越来越多的研究表明,该区域内大中型及巨型滑坡多孕育于新近系红层之中(曲永新等, 1999; 石菊松等, 2013; Liang *et al.*, 2022),因其滑面埋藏深度大、变形过程缓慢,易造成滑坡范围和

规模的误判(吴玮江等, 2014; 王新刚等, 2021). 在黄土高原地区,黄土—红层滑坡群发特征显著,形成了宝鸡—天水、陇西—临夏、兰州—西宁等多个群发带,具有发生频率高、成灾规模大、影响范围广、成生过程隐蔽等显著特点,造成当地大量人员伤亡和重大经济损失. 例如,1983年3月7日发生于甘肃省东乡县的灾难性滑坡事件——洒勒山滑坡,失稳岩土体自高程2 283 m的山脊高速下滑,垂直下落约200 m,水平运动距离超过1 km,形成体积约 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的巨量滑坡堆积,导致坡脚下3个村庄被毁,237人死亡(Zhang *et al.*, 2002). 1718年6月19日,甘肃通渭发生7.5级地震,引发通渭、甘谷一带约300余处大规模山体滑坡,其中,最具灾难性的滑坡事件发生于甘谷县磐安镇(原永宁镇)北山,体积约 $6.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的滑坡堆积体掩埋了古永宁镇,伤亡人数达3万余人(陈永明等, 2005);近年来,该滑坡屡屡复活,造成盘山公路路基多处损毁,周边居民房屋局部开裂,且对山下途经的陇海铁路线构成严重威胁(Sun *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2024). 2019年9月14日,甘肃省通渭县常河镇发生大规模山体滑坡,约 $7.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的老滑坡堆积体沿既有滑面整体蠕滑,导致部分公路路段损毁、多座房屋开裂、一座大桥垮塌(图2a~2c),受灾群众达2 900余人,造成直接经济损失逾2 000万元(Wang *et al.*, 2020). 2022年9月15日发生于青海省西宁市城北区的九家湾滑坡,体积约 $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的失稳岩土体快速滑落,水平运动约445 m,致使兰新高铁二十里铺特大桥桥墩倾倒,桥面发生弯折破坏(图2d, 2e),兰新客运专线青海段被迫停运(Wang *et al.*, 2023).

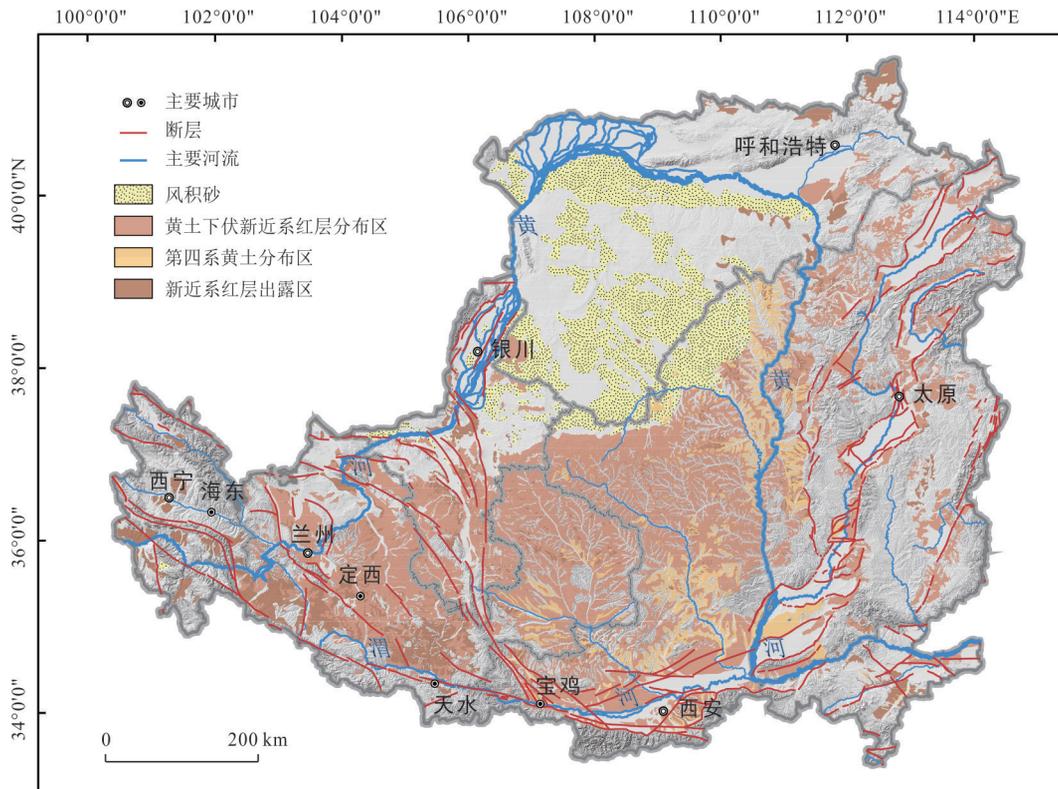


图 1 黄土高原新近系红层分布

Fig.1 Distribution of Neogene red beds in the Loess Plateau

对于黄土—红层滑坡,降雨、地震、人类活动等是其直接的诱发因子,长期以来,相关研究多集中于水文条件变化、地震动力响应及人为扰动等外部触发机制。然而,这些外部因素之所以能够诱发滑坡,其根本原因在于斜坡岩土体物理力学性质的弱化及其内部结构面的扩展—贯通。在黄土—红层斜坡中普遍发育多种类型的结构面,这些地质界面的成因、规模、形态各异,是在漫长地质历史过程中形成的、由建造及后期改造综合作用的产物(胡厚田和赵晓彦,2006)。结构面的存在一方面导致了岩土体的不连续性、非均质性和各向异性,另一方面也构成了斜坡与外部环境之间物质与能量交换的优势通道(胡海涛等,1965;Zhou *et al.*, 2019;辛鹏等,2020;王少凯,2020),从而成为控制斜坡稳定性的关键因素(曲永新等,1999)。在持续的外界作用下,结构面在时间和空间上处于动态变化过程中,其不断的生成和扩张导致部分斜坡岩土体逐渐与母体分离,从而形成滑坡。由不同类型结构面组合而成的结构体控制着滑坡的发育类型及规模(Peng *et al.*, 2019);同时,受不同结构面控制的滑坡也表现为不同的失稳变形过程、运动形式及演化特征(许领等,2008a,Zhang *et al.*, 2020)。这些控滑

结构构成了大型黄土—红层滑坡的重要物质基础,是连接内外动力地质作用与滑坡形成演化过程的桥梁和纽带。从本质上看,控滑结构在各种外界因素作用下所产生的物质组成、结构特征及物理力学性质变化正是滑坡从变形、失稳至最终破坏全过程的内在映射。因此,着眼于滑坡关键控滑结构,研究各类斜坡结构、地质界面与滑坡形成演化的关联机制,是从源头上解决新近系黄土—红层滑坡灾害动力学机理这一重大前沿性科学问题的关键所在。

近年来,在全球气候变化、强震频发、人类活动加剧的背景下,地质灾害的活跃程度呈现逐年增长的态势,以新近系大型黄土—红层滑坡为代表的重大地质灾害已然成为制约西北地区经济社会发展、重大工程及城镇化建设的重要因素。由于黄土—红层滑坡岩土体性质的特殊性、控滑因子的多样性、启动及运动过程的复杂性,目前对于其灾变的内在物理力学过程尚不明晰,而与滑坡控滑结构特征及机制的相关研究,不可避免的涉及到控滑结构的准确识别和划分、结构面向滑面的转化条件及机理、控滑结构与滑坡形成演化过程的关系等多方面的具体问题。这些问题的解决,为突破重大滑坡灾害致灾机理理论瓶颈、构建完善的灾害风险防控技术



图2 黄土-红层滑坡典型案例及其灾害特征

Fig.2 Typical loess-red bed landslides and their disaster characteristics

a~c. 甘肃省通渭县常河滑坡及其造成的桥梁、公路损毁(照片引自 Wang *et al.*, 2020); d, e. 青海省西宁市九家湾滑坡及其导致的桥墩倾倒塌坏(照片引自 Wang *et al.*, 2023)

方法提供了重要契机。随着“一带一路”倡议的实施,黄土高原地区红层重大地质灾害防控面临前所未有的挑战,在此背景下,新近系黄土-红层滑坡逐渐成为工程地质领域的研究热点,与之相关的研究成果也日益丰富。本文聚焦黄土-红层滑坡关键控滑结构,以现阶段的相关研究成果为基础,结合作者前期调查研究工作,从斜坡地质结构类型及特征、斜坡结构控滑效应及滑坡模式、基于结构控滑效应的滑坡形成演化机理3个方面展开论述,在此基础上提出了黄土-红层滑坡控滑斜坡结构及滑坡机理研究所涉及的关键科学问题及下一步研究方向。

1 黄土-红层斜坡地质结构类型及特征

1.1 典型黄土-红层斜坡结构及易滑地层

黄土高原地处青藏高原东北缘与华北地块的过渡带,新生代以来,受构造隆升、季风-干旱气候

旋回及外动力侵蚀作用等多重因素影响,形成了独特的山地-丘陵复合地貌。区内广泛发育的断裂带、褶皱构造,以及差异风化作用的产物,共同塑造了复杂多样的斜坡地质结构体系。在这些斜坡结构中,黄土作为主要的地表覆盖层和易滑地层,长期受到广泛关注和深入研究。一些学者基于大量实地调查研究,重点对黄土斜坡的地质结构类型进行了划分(雷祥义, 2006; 彭建兵等, 2020; 王少凯, 2020),其中,不同斜坡结构的差异性主要体现在黄土下伏层的岩性组成方面。在黄土高原地区广泛发育的滑坡中,以黄土和红层为主要构成的斜坡不仅是滑坡形成的主要物质基础,也是滑坡过程中各种结构面萌生和扩展的载体,其结构类型主要包括4种:黄土斜坡、黄土-红层斜坡、黄土-阶地砂砾石层-红层斜坡、黄土-红层-基岩斜坡(图3)。需要说明的是,此处的“基岩”特指地表以下已完全固结成岩的地层,以区别于主要呈半固结状态的新近系红层。

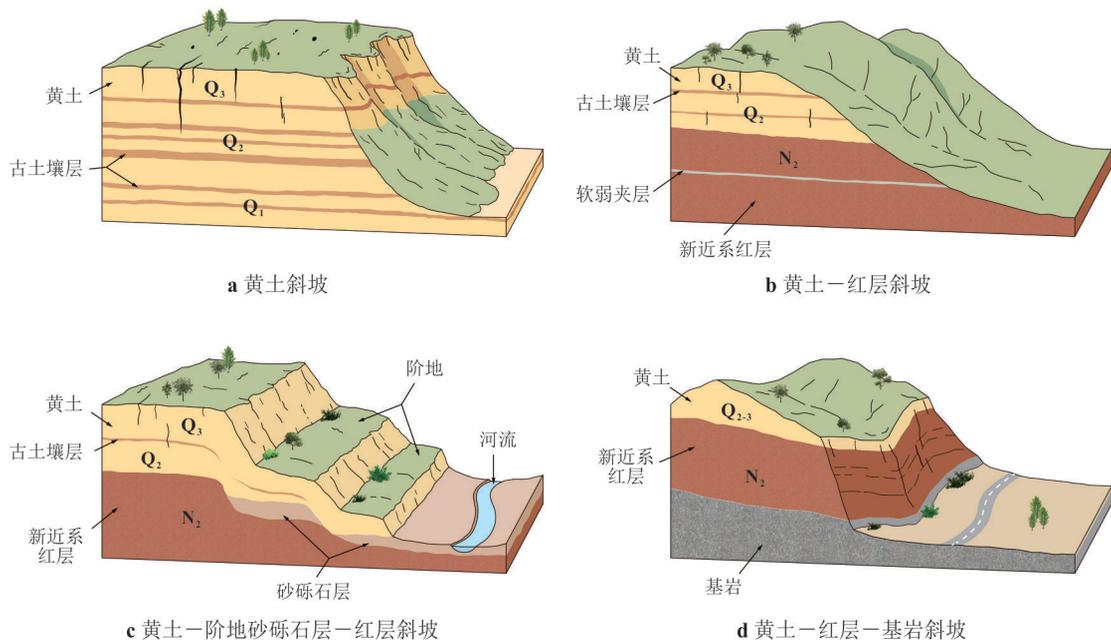


图3 黄土高原典型斜坡结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of typical slope structures in the Loess Plateau

上述4种斜坡结构基本涵盖了黄土高原地区与黄土-红层相关的滑坡孕灾体类型。然而,各类斜坡结构的出露情况与分布特征则随着黄土高原地貌类型的变化而呈现显著的差异(王少凯, 2020)。以第四系黄土为主要物质组成的斜坡,其分布范围覆盖了黄土高原绝大部分区域,包括黄土塬、梁、峁以及河流阶地与沟谷边缘地带,尤其在汾渭盆地、鄂尔多斯盆地等盆地内部的黄土台塬周边及黄土梁两侧,常见大量黄土高陡斜坡发育。黄土-红层斜坡主要分布于山间盆地周缘及内侧的黄土丘陵-沟壑区及河流侵蚀区,如西宁盆地、临夏盆地、兰州盆地、陇西盆地、天水盆地、西吉盆地及六盘山山前盆地等。在黄河、渭河流域等河流的冲积平原与阶地地带,斜坡主体的结构组成则以黄土-阶地砂砾石层-红层为主,因河流阶地表层常被第四系黄土覆盖,野外往往仅可见黄土与阶地沉积层出露。黄土-红层-基岩斜坡的分布区域与黄土-红层斜坡大致相同,主要发育于盆地内侧的河流侵蚀区、山前断裂带附近及盆地周缘。在黄河上游斜坡带区域,可见古近系及白垩系红色基岩大面积出露,与上覆新近系红层及黄土共同构成了该区域的易滑地层组合(周保等, 2019)。

在黄土高原不同区域,黄土-红层斜坡结构的差异性不仅体现在其蕴含的结构类型方面,也体现在新近系红层的形成时代及岩性组成方面。受沉积

环境、内外动力地质作用等因素影响,不同区域斜坡带所出露的新近系红层可能为同期异相沉积,也可能是不同地质时期的产物,因此,其岩土体类型及物理力学性质亦存在一定差异。基于前期在黄土高原开展的地质灾害调查研究工作,本文重点划分出3个黄土-红层滑坡集中分布区,自东向西依次为渭河盆地西部黄土塬区、天水-陇西盆地地区及西宁-兰州盆地地区(图4),各区域的主要斜坡结构类型、新近系红层时代及典型易滑地层组合如表1所示。

渭河盆地是位于黄土高原南缘的新生代断陷盆地,盆地西侧的宝鸡地区是大型黄土-红层滑坡的集中分布区之一(图4)。在宝鸡市渭河北岸约98 km长的塬边斜坡带范围内,发育的滑坡数量达上百处之多(胡广韬, 1986; 辛鹏等, 2013)。渭河盆地西部黄土塬区地表广泛覆盖第四系黄土,最大厚度约160 m,下伏不同沉积相的新近系地层(丁仲礼和刘东生, 1989)。出露的新近系红层主要包括上新统蓝田组(N_2l)三趾马红粘土和三门组(N_2s)泥岩-砂砾石层两种同期异相地层(表1),其中,三趾马红粘土为风成红色土状沉积,属超固结硬质粘土,透水性差,遇水易发生崩解;三门组为一套河湖相近水平沉积地层,主要由棕红色硬质粘土与灰白色砂砾石互层构成(岳乐平, 1996; 曲永新等, 1999; Li *et al.*, 2015)。这两套新近系红层作为渭河盆地西部大

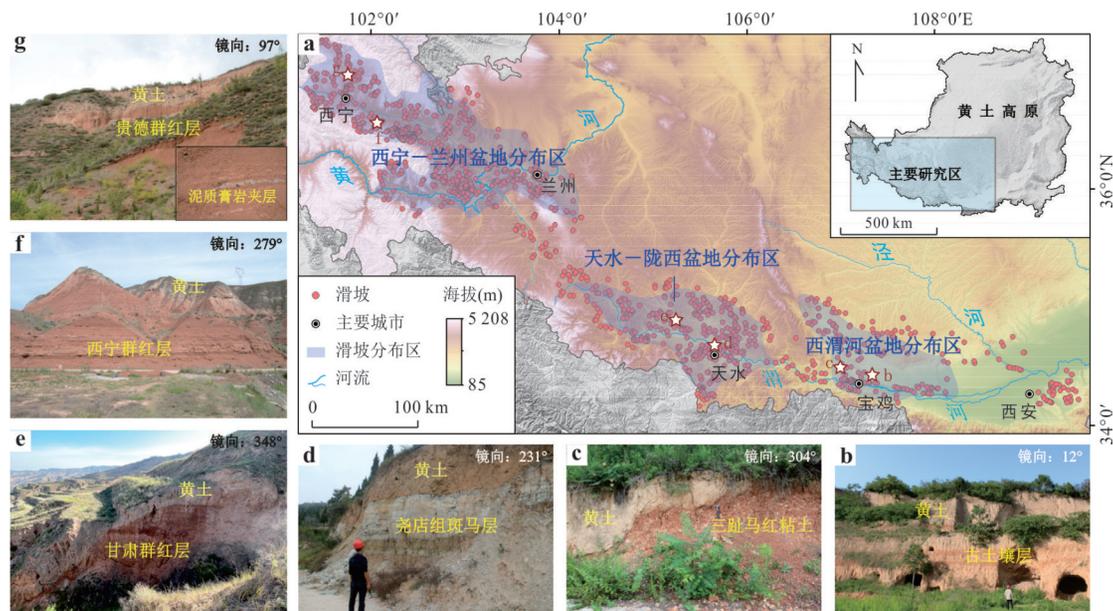


图4 典型黄土-红层滑坡分布区及其斜坡结构特征

Fig.4 Typical distribution areas of loess-red bed landslides and the features of sliding-control structures

型滑坡的主要控滑地层,与上覆黄土共同构成多种易滑岩组,主要包括黄土-古土壤、黄土-三趾马红粘土、黄土-阶地砂砾石层-三门组地层和黄土-阶地砂砾石层-三趾马红粘土-三门组地层4类(图4b和4c)。

天水-陇西盆地地区地处青藏高原东北缘西秦岭和六盘山构造带交汇部位,新构造活动强烈(马收先等,2016),发育有一系列成带状分布的黄土-红层滑坡群(图4a)。盆地内新生代地层连续且较为完整,北部地层近水平展布,南部地层因受西秦岭北缘断裂带影响,发生强烈褶皱变形(宋春晖,2006)。区内第四系黄土沉积序列变化显著,新近系地层亦呈现明显的差异性分布特征。其中,出露最广的新近系地层为一套中新统红层,该套地层可划分为3个岩性段:下段为甘泉组(N_1^1),又称“下红层”,岩性主要为褐红色泥岩夹灰绿色泥灰岩和砂质条带;中段为尧店组(N_1^2),由灰绿-灰白色泥灰岩或钙质泥岩与红色泥岩或粉砂岩韵律互层构成,因表现为红绿相间的典型特征,也被称作“斑马层”(图4d);上段为杨集寨组(N_1^3),亦称“上红层”,岩性主要为黄褐色钙质泥岩、泥灰岩与褐红色泥岩互层(宋春晖等,2006;杨利荣等,2017;王浩杰等,2023),三段均属易滑地层,与上覆黄土共同构成天水-陇西盆地地区的典型易滑岩组(表1)。

西宁-兰州盆地地区是地处黄土高原向青藏高原过渡地带的黄土-红层滑坡密集分布区(李美

林等,2005;辛鹏等,2015,2018),区内包含陇中盆地西部的西宁盆地和兰州盆地两个次级盆地(Dai *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2016),其北部为祁连山-海原断裂带,西侧以海晏-拉脊山断裂为界,南部与西秦岭北缘断裂带相邻,东部经六盘山断裂带与鄂尔多斯地块及天水盆地相对(李兆雨等,2023)。盆地内沉积的巨厚新生代地层主要为古近系西宁群和新近系贵德群,二者均属红色碎屑岩系,以砂泥岩为主,局部含次生石膏岩脉(图4f~4g)。其中,新近系贵德群在西宁盆地可进一步划分为下中新统谢家组(N_{1x})、中中新统车头沟组(N_{1c})、上中新统咸水河组(N_{1xn})和上新统临夏组(N_{1l})(表1),在兰州盆地地区则划分为中新统咸水河组中段、咸水河组上段和上新统临夏组(岳乐平等,2000; Dai *et al.*, 2006; 杨利荣等,2017)。在西宁-兰州盆地地区,西宁群、贵德群红层及其上覆黄土构成了典型的易滑岩组,是该区域大型滑坡的主要物质基础。

1.2 黄土-红层结构面类型及特征

结构面特征是除地层岩性外的另一关键性斜坡结构组成要素。在岩石力学中,结构面指斜坡岩体中对其变形破坏起控制作用的地质界面,是岩土体力学性质发生突变的边界(谷德振和黄鼎成,1979; Jeager *et al.*, 2009),其发育类型多样,既包括沉积建造过程中形成的原生结构面,也包括成岩后受内外动力地质作用改造形成的各种次生结构面

表 1 黄土-红层滑坡典型分布区斜坡结构类型及易滑地层组合

Table 1 Slope structure types and sliding-prone strata in typical distribution areas of loess-red bed landslides

黄土-红层滑坡分布区	主要斜坡结构类型	新近系红层类型及地层划分	典型易滑地层组合	资料来源
渭河盆地西部黄土塬区	黄土斜坡 黄土-红层斜坡 黄土-阶地-红层斜坡	蓝田组(三趾马红粘土) 三门组(泥岩-砂砾岩互层)		曲永新等(1999);石菊松等(2013);辛鹏等(2013); Li <i>et al.</i> (2015)
天水-陇西盆地地区	黄土斜坡 黄土-红层斜坡 黄土-阶地-红层斜坡 黄土-红层-基岩斜坡	中新统杨集寨组(上红层) 中新统尧店组(斑马层) 中新统甘泉组(下红层)		宋春晖(2006);杨利荣等(2017);王浩杰等(2023)
西宁-兰州盆地地区	黄土-红层斜坡 黄土-阶地-红层斜坡 黄土-红层-基岩斜坡	上新统临夏组 中新统咸水河组 中新统车头沟组 中新统谢家组		Dai <i>et al.</i> (2006);杨利荣等(2017);李兆雨等(2023)
图例				

(王景明和张骏, 1985; 张成恭等, 2000; 胡厚田和赵晓彦, 2006), 这些结构面是斜坡体中相对薄弱的部位, 直接或间接控制着斜坡潜在破坏面的形成与扩展。

相较于均质岩体中的结构面, 黄土地层发育的结构面体系呈现更高的空间异质性和成因多样性(王少凯, 2020)。鉴于其特殊的物质组成和力学特性, 一些学者围绕黄土斜坡结构面的类型、空间展布及灾害效应开展了系统的研究工作, 建立了多个具有工程应用价值的分类体系(王景明和张骏, 1985; Peng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2025)。结构面划分的依据包括结构面规模、成因、力学性质、空间产状、形成时代、形态特征及发育程度等。从发育层次来看, 这些

不同类型的结构面大多赋存于黄土地层中, 且有相当一部分为黄土中特有的结构面(如垂直节理、湿陷裂缝、落水洞等), 其中仅少量涉及了红层相关的地质界面(如黄土-红层接触面)。然而, 对于大型黄土-红层滑坡而言, 其形成过程不仅受上覆黄土中结构面的影响, 更主要受新近系红层中各种优势结构面控制, 因此, 有必要重点针对红层开展专门的结构面分类研究。

多尺度性是岩体结构面的典型特征之一。从颗粒接触边界到大型地质构造, 不同尺度的结构面不仅呈现显著的物性特征差异, 其对斜坡稳定性的控制机制与作用范围亦表现出差异性特征(谷德振和黄鼎成, 1979)。鉴于此, 本文基于黄土高原地区黄土-红层斜坡结构面的野外特征调查, 结合现有岩

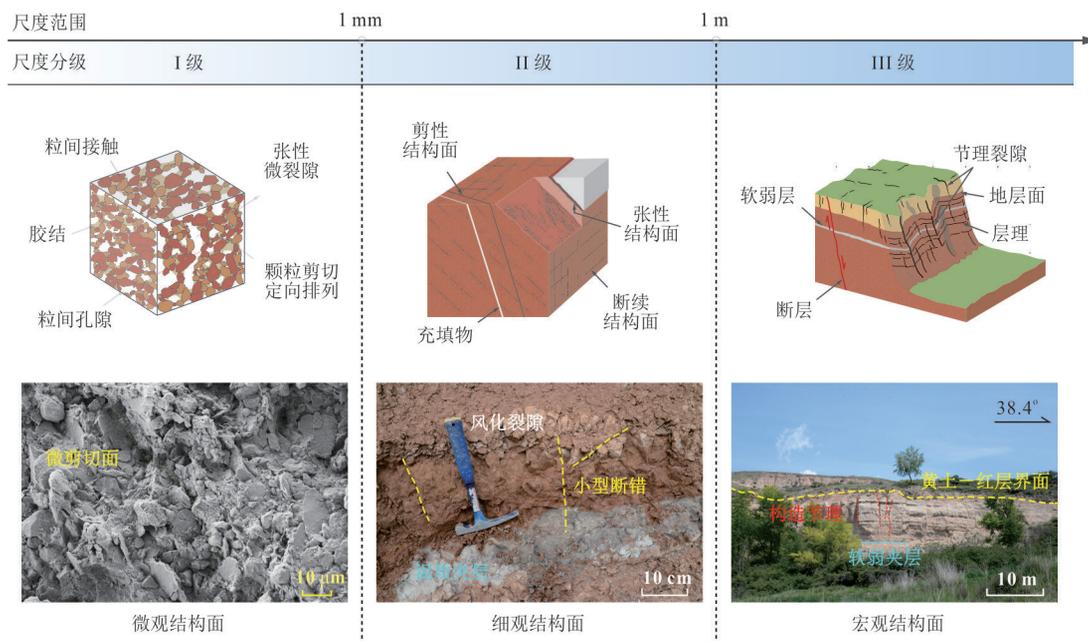


图 5 黄土—红层斜坡结构面尺度分级示意图

Fig.5 Schematic diagram of structural plane scale classification for loess-red bed slopes

土体结构面分级标准,以延展长度为依据,将红层结构面划分为 3 种尺度级别(图 5)。其中,微观结构面(I级)主要指颗粒尺度的界面,其延伸长度小于 1 mm(多为微米级),属于显微构造范畴(Nan *et al.*, 2021);细观结构面(II级)长度介于 1 mm~1 m 之间,延展性较差,发育密度较高,作为岩体结构的基本单元,其空间组合形式直接影响岩块的变形模式与强度特性;宏观结构面(III级)延伸长度大于 1 m,其规模一般与斜坡(带)的尺度相当,通过切割坡体形成优势滑移边界。需要说明的是,传统岩体结构面分级通常依据成因、规模及工程效应等因素划分为 5 级,本文所采用的 3 级划分方法主要基于研究对象——新近系红层结构面的实际发育特征及其对黄土—红层滑坡的控制作用,旨在突出其在斜坡稳定性分析中的工程地质意义。

在每种尺度级别下,黄土—红层结构面又可根据其形成的动力学机制划分为沉积成因、构造成因和非构造成因三大类型(表 2)。其中,沉积成因的结构面作为原生地质界面,其形成受控于沉积建造与成岩演化的双重机制(程强, 2010),涵盖了从宏观到细观尺度的各种地层边界(如黄土—红层接触面、红层—基岩接触面)、层理面、夹层等层状地质体(图 6a),以及微观尺度的成岩胶结差异面等。构造成因的结构面主要为地壳运动、构造地应力等自然内营力作用下形成的断层及构造节理(图 6b)。非

构造成因结构面的形成和发育受控于重力、气候、水以及人类活动等外营力(卢全中和彭建兵, 2006),其类型复杂多样,规模以细观和宏观尺度为主,包括卸荷裂隙、风化裂隙、层间剪切带、泥化夹层、老滑坡滑面(带)等(图 6c),通常呈现动态演化特征。

2 黄土—红层斜坡结构控滑效应及滑坡模式

2.1 斜坡结构的控滑效应

大量滑坡案例研究表明,孕育于黄土—红层复合斜坡中的重大滑坡灾害,其潜在滑面多起始于各类结构面及软弱层带,这些宏观非连续地质界面通过特定的空间展布形式(如平行叠置、交叉切割)以及与临空面的组合,共同构成了黄土—红层滑坡特有的控滑结构体系。这些控滑结构在渗流作用、构造应力等内外动力作用下,其矿物成分、几何形态与力学参数发生显著变化,经历逐步变形、扩展与贯通演化阶段,最终形成连续的滑动面(带),成为诱发滑坡的根本原因(Peng *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017; Zhuang *et al.*, 2018; 辛鹏等, 2020)。结构面的控滑效应不仅具有明显的尺度依赖性(表 2),还取决于其自身的发育程度及与其他类型结构面的共生关系,其作用范围涉及斜坡稳定性、滑坡几何

表 2 黄土-红层斜坡结构面类型与特征

Table 2 Types and features of structure planes in loess-red bed slopes

结构面尺度	形成时期	成因机制	类别	控滑效应
宏观结构面	原生	沉积成因	黄土-红层、红层-基岩接触面	主要控制单体滑坡的形成,作为滑坡的优势渗流通道和约束边界,主导滑坡发育类型、形态及规模等
			红层层理面	
	次生	非构造成因	红层内软岩夹层	
			卸荷裂隙	
构造成因	断层面	层间错动带(面)		
	构造节理			
微观结构面	原生	沉积成因	层理	作为岩体结构基本单元,直接影响岩块尺度的变形模式与力学特性,进而达到间接控制斜坡局部变形、促进宏观结构面的形成和扩展的作用
			原生节理	
	构造成因	构造节理		
		小型断错		
	次生	非构造成因	风化裂隙	
			卸荷裂隙	
层间剪切带				
伴生破裂面				
微观结构面	原生	沉积成因	粒间接触面	控制红层物质成分、微观结构的变化,主导红层的物理力学行为
			颗粒胶结面	
	粒间孔隙			
次生	张性、剪性微裂隙			

形态及变形破坏机理等多个层面。

2.1.1 控滑结构的边界约束效应 对于单体滑坡而言,滑动面的贯通本质上是一种或多种宏观结构面定向扩展的力学过程。在黄土-红层斜坡中,沉积成因的原生结构面是主导滑坡发育的关键控滑结构,这类地质界面多呈近水平或缓倾状产出($0\sim 12^\circ$)(图 6a),层间结合度较差、抗剪强度显著低于围岩,易产生剪切错动形成软弱层面(曲永新等, 1999; 程强等, 2004, 2009)。在滑坡形成演化过程中,顺层发育的软弱结构面往往构成滑坡底部的滑动边界(Peng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019; 彭建兵等, 2020; 图 7a),约束主滑体的运动方向、速度、距离等运动学特征;另一方面,其在斜坡中所处的位置直接影响滑坡的类型与物质组成。例如,当滑动面发育于黄土-红层接触带时,滑体物质以黄土为主,若软弱层面存在于新近系红层内部(如层理面、泥化夹层等),则滑体呈现黄土-红层混杂堆积特征。

在一系列次生结构面中,与地层呈高角度相交的断层面及节理裂隙往往作为侧向边界约束滑坡范围的横向扩展(图 7a),进而影响滑坡的形态特征(辛鹏等, 2013; Peng *et al.*, 2018, 2019; Wang *et al.*, 2019)。在黄土-红层斜坡变形过程中,这些结构面沿纵深方向不断延伸并与底部软弱层面交切,构成滑坡与母体的分离面。不同成因类型的次生结构面对滑坡的发育规模具有明显的控制作用,对于非构造成因的风化和卸荷裂隙,其地表下切深度一般小于 10 m,主要诱发浅层崩滑,而构造成因的断层及节理系统可穿透第四系覆盖层直达基岩面,通常构成大规模黄土-红层滑坡的关键控滑结构。

2.1.2 控滑结构的水力学效应 在黄土-红层滑坡形成过程中,水是驱动结构面向滑面转化的关键外营力之一(Zhang *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2020)。野外调查与室内试验研究表明,斜坡中发育的各类优势结构面通过构建三维渗流网络,形成渗透性明显高于岩土体介质的优势渗流通道(Xu *et al.*,

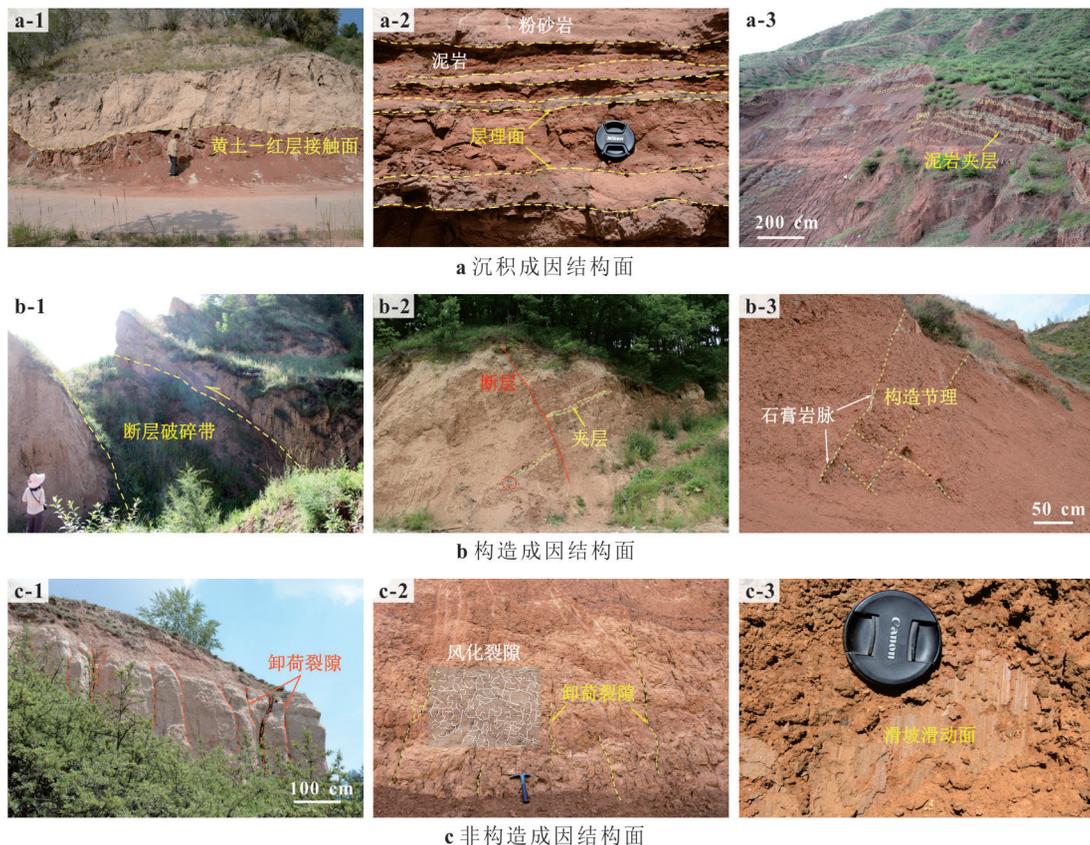


图6 黄土—红层结构面成因类型

Fig.6 The genetic types of the loess-red bed structure planes

2012; Sun *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2024; 图 7b), 这种水力传导特性从根本上改变了斜坡的水文地质结构. 在各类结构面中, 张性结构面(如断层破碎带、张节理、风化与卸荷裂隙等)因其显著的渗透各项异性, 成为地表水垂向入渗的主要路径. 同时, 由于红层中泥岩渗透性较低, 黄土—红层界面及红层内部泥质夹层等原生界面常作为隔水边界(图 7b), 在渗流补给条件下易形成上层滞水, 导致软弱层面进一步劣化, 抗剪强度随之降低(Wen *et al.*, 2005; 吴玮江等, 2014; Wang *et al.*, 2020). 构造成因与非构造成因结构面在水力响应方面亦存在显著差异, 前者因延伸深度大、连通性高, 可形成贯穿黄土与新近系红层的复合渗流通道, 引发深层滑动; 后者受限于浅表层发育特征, 主要导致局部渗透失稳.

2.1.3 控滑结构的力学弱化效应 相较于均质岩土体, 含结构面的斜坡岩土体呈现显著弱化的物理力学特性, 其根本原因在于结构面网络形成了力学薄弱带(Hoek and Bray, 1977; 谷德振和黄鼎成, 1979; 胡卸文等, 1994). 控滑结构对黄土—红层斜坡的力学弱化效应主要体现在 3 个方面: 首先, 结构

面的空间展布破坏了岩土体完整性, 导致粘聚力和内摩擦角显著下降, 从而降低滑坡的触发阈值(Zhou *et al.*, 2023). 试验与数值模拟结果表明, 含结构面的黄土—红层岩土体试样在剪切作用下, 破坏优先沿软弱层面发生, 其应力—应变曲线呈现典型的应变软化特征, 且结构面倾角对抗剪强度影响显著(卢全中等, 2009; Sun *et al.*, 2016; 张泽林等, 2021). 相较于均质岩土体试样, 含结构面试样的抗剪强度下降幅度最高可达 70% 以上(邓京萍和张惠英, 1988; 祝艳波等, 2021). 其次, 结构面的存在使岩土体力学性质呈现各项异性, 导致应力传递路径受阻, 局部应力分布异常(Brady and Brown, 2006). 在外部荷载作用下, 剪切应变沿结构面定向累积, 并在其尖端处或应力阻滞部位产生应力集中, 加速结构面扩展与次生裂隙萌生, 从而降低斜坡稳定性(张淑坤等, 2020; 祝艳波等, 2021). 对于层状结构的黄土—红层斜坡, 软弱夹层的应力阻滞效应可能导致坡脚处形成剪应力集中区, 坡顶出现拉应力集中区(图 7c), 加剧深层滑坡风险. 第三, 结构面具有显著的流变特性, 通过控制岩土体的蠕变

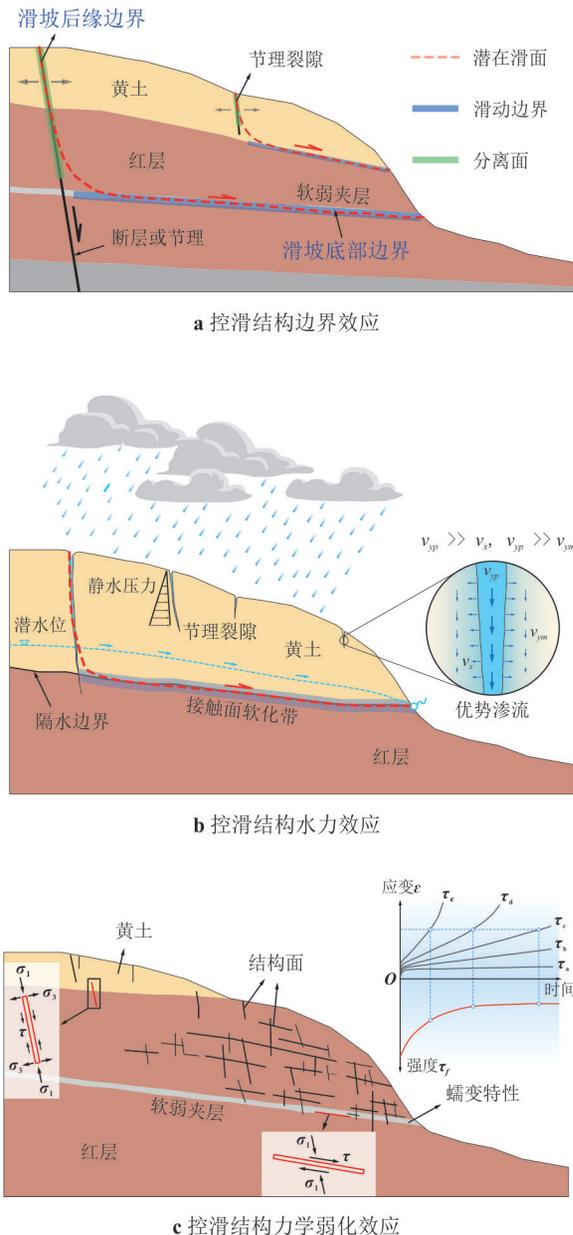


图 7 黄土—红层斜坡结构控滑效应示意图

Fig.7 Schematic diagram of the sliding control effect of the loess-red bed slope structures

变形和长期强度,直接影响斜坡的长期持续稳定性(徐平等, 2002; 孙钧, 2007). 试验研究表明,红层及其软弱夹层在压缩和剪切作用下的强度具有随时间逐步弱化的时效特征(程强等, 2009),这种细观尺度的损伤过程是控滑结构变形扩展乃至滑动面贯通的关键驱动因素(Hart, 2000; 李连崇等, 2014). 此外,红层中砂泥岩互层因软、硬岩流变特性差异引发非协调变形,硬岩层脆性破裂与软岩层塑性流动的共同作用,会导致滑面贯通速率大幅提升(杨淑碧等, 1996; 许强和唐然, 2023). 上述力学

弱化效应的耦合关系最终决定滑坡破坏模式与运动特征,构成了黄土—红层滑坡结构控滑的内在机制.

2.2 黄土—红层滑坡类型及发育模式

前已述及,对于由不同控滑结构组合形成的滑动面(带),因其形态特征、力学性质、埋藏深度及临空条件等方面的差异,所对应的滑坡规模、发育类型、失稳模式及运动演化特征亦存在显著区别. 在黄土—红层斜坡中,控滑结构面的有效组合形成三维结构体,构成了滑坡的原型基础,控制其发育类型和规模(彭建兵等, 2020). 基于控滑结构的发育层位,黄土高原地区的滑坡通常可划分为黄土滑坡、黄土—古土壤层滑坡、黄土—红层接触面滑坡、黄土—红层(复合)滑坡、红层—基岩接触面滑坡、黄土—红层—基岩(复合)滑坡六种基本类型(图 8). 其中,黄土—红层滑坡依据滑面与地层接触关系,可进一步细分为黄土—红层顺层滑坡与黄土—红层切层滑坡两个亚类(吴玮江和王念秦, 2002).

在上述滑坡类型中,黄土滑坡与黄土—古土壤层滑坡的滑体介质均以第四系黄土为主,其滑动边界由黄土层内部的节理裂隙与软弱夹层组合扩展而成,滑面埋深相对较浅(一般 $<30\text{ m}$),规模多为中小型($<1\times 10^6\text{ m}^3$)(曲永新等, 1999; Xu *et al.*, 2012; 张泽林等, 2015),主要由降雨、河流侵蚀和人类活动等外动力作用下形成. 黄土—红层接触面滑坡主要受控于黄土层内部的陡倾结构面与黄土—红层接触界面,滑体物质主要为黄土,仅在接触面附近夹带少量风化泥岩(Wen *et al.*, 2005; 吴玮江等, 2014),一般为中等—大型滑坡($\sim 10^4\sim 10^6\text{ m}^3$),水力作用是此类滑坡的主要诱发因素. 对于黄土—红层滑坡、红层—基岩接触面滑坡及黄土—红层—基岩复合滑坡,其后缘边界通常由贯穿黄土和基岩的构造成因结构面所约束,底部滑动面深埋于黄土下伏基岩内部(通常 $>50\text{ m}$),发育规模可达大型—巨型($>1\times 10^6\text{ m}^3$)(曲永新等, 1999; Zhang *et al.*, 2020),其形成多为降雨、地震等内外动力耦合作用的结果. 特别地,在黄土—红层斜坡中,当地层呈顺倾或近水平发育时,易沿红层软弱层面发生顺层滑移,而在地层反倾条件下,则多发育黄土—红层切层滑坡.

在国际上广泛应用的滑坡分类体系中,运动模式是滑坡的首要分类标准(Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Hungr *et al.*, 2014). 根据运动形式的差

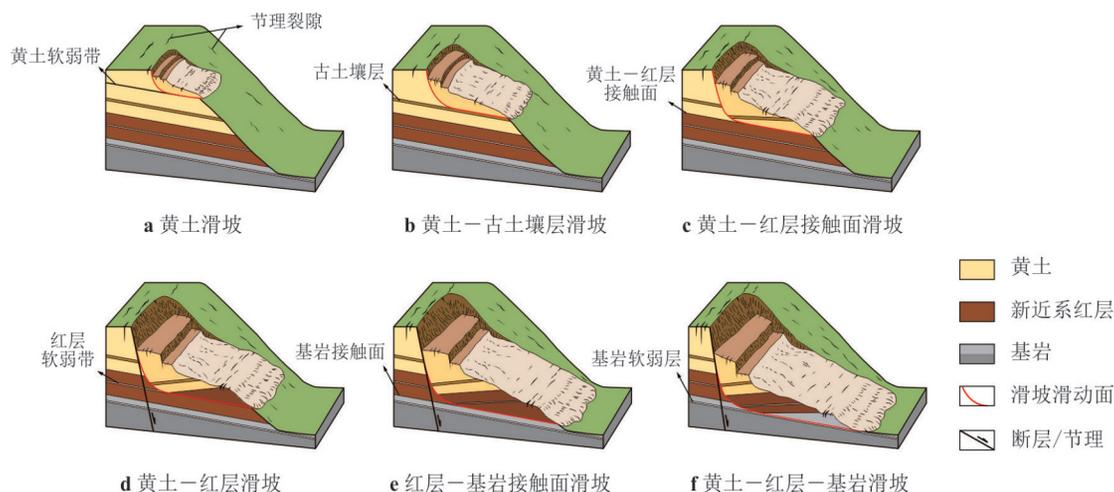


图8 不同结构面控制作用下滑坡的发育类型

Fig.8 The development types of landslides under the control of different structural planes

异,广义的滑坡可划分为崩塌(fall)、倾倒(topple)、滑动(slide)、侧向扩离(lateral spreading)和流动(flow)5种基本类型,每种运动类型又可依据滑体物质组成的差异进一步划分为若干亚类.其它定量参数(如运动速度、滑坡体积、运动距离等)和现象学指标(如滑动面在斜坡中所处的位置)则通常作为描述性标准,以突显滑坡特征的差异性(Li and Mo, 2019).本文以上述分类标准为基础框架,同时考虑黄土高原地区黄土-红层滑坡所特有的物质成分与运动学特性,将其细分为7种类型,表3列出了各类滑坡的基本发育模式、主要控滑结构及其典型特征.

对于以黄土或黄土-红层为主要滑体介质的滑坡,滑动和流动是两种最主要的运动模式(表3).其中,滑动包含旋转型滑动、平移型滑动和旋转-平移复合型滑动3种亚类.旋转型滑坡,常见于厚度较大、物质组成相对均一的黄土地层中(吴玮江和王念秦, 2002),部分沿新近系泥岩切层滑动的大型滑坡,通常发育两个及以上的滑面,呈多级旋转滑动特征(胡海涛等, 1965; 李滨等, 2011).平移型滑坡通常发育于顺倾或近水平层状斜坡中,滑体在水动力作用下沿软弱面或软弱夹层发生顺层剪切滑动(张倬元等, 1994).与红层相关的软弱层面包括黄土与泥岩的接触面、泥岩中的软弱夹层及软硬岩接触带等.旋转-平移复合型滑动是大型红层滑坡的主要的运动形式之一(Xin *et al.*, 2018).此类滑坡主滑体由多个次级旋转型滑坡组合而成,每一级

滑坡的弧形滑面均与主滑面基底相切,随着次级滑体数量的增加,宏观上整体呈现平移型滑动特征.

黄土高原地区的流动型滑坡主要包括泥流(mudflow)和流滑(flowslide)两种类型.泥流以黄土为主要物质来源,在陡峻的地形和充足的水源条件下,由黄土滑坡产生的松散堆积体在饱水状态下转化而成(王家鼎, 1997),具有较高的运动速度和运动距离(李同录等, 2007; 许领等, 2008b).流滑是饱和岩土体在超孔隙水压力或液化作用下发生的破坏形式(Hungr *et al.*, 2014),其滑面通常发育于饱水的黄土层内部或黄土与泥岩接触面区域(Smalley and Derbyshire, 1991; Dijkstra *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 2009).对于部分黄土-泥岩滑坡,其滑体后部以滑动为主要运动形式,而前缘则呈现流态化运动,整体表现为流滑的运动特征(Hungr *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2021).

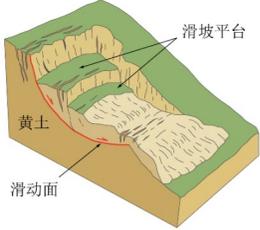
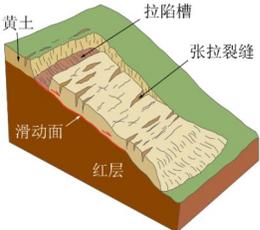
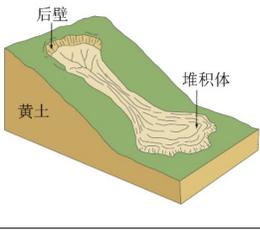
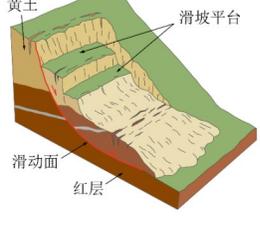
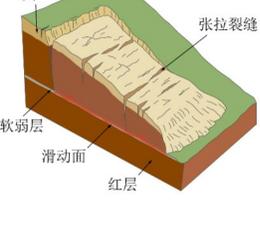
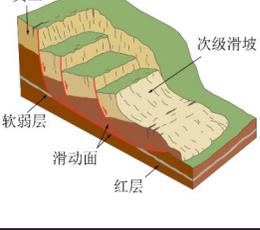
3 基于结构控滑效应的黄土-红层滑坡形成演化机理

3.1 黄土-红层滑坡结构控滑灾变机制

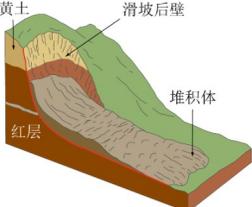
黄土高原新近系红层滑坡的灾变过程通常是多种诱发因素协同作用的结果,其形成演化本质上是水文地质条件、工程活动与岩土体响应之间复杂的相互作用(彭建兵等, 2020).各类诱发因素通过不同驱动效应对滑坡施加外部激励,而控滑结构则

表 3 黄土-红层滑坡发育模式及典型特征

Table 3 The failure modes and typical characteristics of loess-red bed landslides

主要物 质组成	运动模式	图示	控滑结构	主要特征	典型案例
	旋转型滑动 Rotational slide		黄土垂直节理/构造节理/断层/卸荷裂隙+黄土内部软弱层带	滑面发育于黄土层内部,呈近圆弧形,埋深一般小于 10 m,滑坡规模通常为小-中型($< 10^6 \text{ m}^3$),运动速度介于慢速-极快速($5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^3 \text{ mm/s}$)之间,运动距离较短,诱发因素多为降雨和人类活动	黑方台磨石沟滑坡(许领等, 2008b);黑方台焦家崖头滑坡(吴玮江和王念秦, 2002)
黄土	平移型滑动 Translational slide		黄土垂直节理/构造节理/断层/卸荷裂隙+黄土-古土壤/红层接触面	滑坡通常沿黄土-古土壤层或红层的接触界面发生滑动,规模多为小-中型($< 10^6 \text{ m}^3$),运动速度介于非常缓慢-快速($5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$)之间,运动距离较短,主要由水力作用诱发	互助县红崖村滑坡(Zhang Shuai <i>et al.</i> , 2023);天水市罗峪沟滑坡(吴玮江等, 2014)
	泥流 Mudflow		黄土垂直节理/构造节理/断层/卸荷裂隙+黄土内饱水软化带/黄土-古土壤/红层接触面	滑坡的发生伴随着黄土层在饱水条件下的静态液化,规模一般为小-中型($< 10^6 \text{ m}^3$),呈流态化运动特征,运动速度介于快速-极快速之间($5 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^3 \text{ mm/s}$),运动距离较远	黑方台党川2#滑坡(许强等, 2016);天水市中寨滑坡(Wanget <i>al.</i> , 2022);泾阳南塬蒋刘滑坡(马鹏辉等, 2018)
	旋转型滑动 Rotational slide		构造节理/断层+红层内部破裂带+蠕变带	主滑面呈近弧形发育,切割黄土-红层,规模多为大型-巨型($> 10^6 \text{ m}^3$),运动速度介于快速-极快速之间($5 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^3 \text{ mm/s}$),运动距离中等或较远,多为水-震耦合作用下形成	西宁市九家湾滑坡(Wang Fawu <i>et al.</i> , 2023);西宁市张家湾滑坡(白朝能等, 2021)
黄土-红层	平移型滑动 Translational slide		构造节理/断层+红层软弱夹层/层理面	滑体沿近水平或缓倾红层软弱层顺层滑移,规模一般为大型-巨型($> 10^6 \text{ m}^3$),运动速度通常较为缓慢($< 5 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$),运动距离较短,水力作用是其主要驱动力	互助县菜子沟滑坡(辛鹏等, 2018)
	旋转-平移复合型滑动 Rotational-translational compoundslide		构造节理/断层+红层软弱夹层/层理面/老滑坡滑面	发育 2 个以上呈弧形滑动的块体,每个弧形滑面均与红层中固定深度的滑动基底相切,规模多为大型-巨型($> 10^6 \text{ m}^3$),运动速度介于慢速-非常快速($5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^1 \text{ mm/s}$),运动距离较短	黑方台黄茨滑坡(王恭先, 1997);宝鸡市金顶寺滑坡(李滨等, 2013)

续表3

主要物质组成	运动模式	图示	控滑结构	主要特征	典型案例
	流滑 Flowslide		构造节理/断层+红层内部破裂带/锁固段	起始于黄土—红层切层滑坡, 规模为大型—巨型($> 10^6 \text{ m}^3$), 呈高速远程运动, 运动速度多为极快速($> 5 \times 10^3 \text{ mm/s}$), 具有流态化堆积特征	酒勒山滑坡(Zhang <i>et al.</i> , 2002); 查纳滑坡(黄大庭, 1990)

作为地质响应的主要载体,通过结构面力学参数的动态劣化实现能量传递与状态转换.因此,揭示此类滑坡形成机制的关键问题之一在于阐明结构面在外界作用下的渐进破坏机理,即地质结构面如何在多场耦合作用下实现由初始损伤带向贯通性滑动面的灾变转化.

在众多外界因素中,水是诱发地质灾害最为活跃的地质营力.对于黄土—红层滑坡而言,水—岩相互作用是控制结构面向滑面演化的重要机制(周翠英等, 2023),其作用涉及物理、化学及力学多过程的综合影响.试验研究表明,黄土—红层结构面及软弱夹层的抗剪强度与含水率呈现显著的负相关关系(Mu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021),这种力学性能的大幅衰减特征所反映的是岩土体遇水后发生软化、崩解的物化过程.结构面作为水分在斜坡中运移的优势通道,促进了水在岩土体内的扩散,并形成了复杂的水—岩界面(周翠英等, 2019);在水—岩界面部位,红层软岩胶结物中的伊利石、蒙脱石等粘土矿物易在水化作用下出现体积膨胀,进而与水中的阳离子发生化学反应生成可溶盐,导致粘土颗粒逐渐溶解、脱落并释放到水溶液中(廖进等, 2024);在长期浸水环境下,红层粘土矿物的水化和溶蚀作用使岩体中孔隙和微裂隙发生变化,破坏了自然状态下软岩的内部结构,从而出现泥化现象(张永安等, 2008);随着胶结物颗粒不断流失,水—岩界面范围逐步扩大,颗粒间连结持续减弱,当构成骨架的碎屑颗粒脱离岩体时,即发生崩解(周翠英等, 2019).上述水—岩相互作用过程致使软弱夹层逐渐转化为低强度泥化带,成为滑坡启动的潜在滑移面.

水—岩相互作用对斜坡应力场的重构是驱动结构面劣化的又一重要内在机制(彭建兵等, 2020).降雨和地表水入渗一方面会增加坡体自重,并在后缘拉裂缝中形成静水压力(Rahardjo *et al.*,

2005; Fan *et al.*, 2009),另一方面会导致地下水位抬升并形成水力坡降带,从而产生沿斜坡向下的渗透力(Orense *et al.*, 2004; Tohari *et al.*, 2007).这些作用的叠加导致斜坡下滑力显著增大,加速了斜坡后缘拉张裂缝的扩展;同时,物理模型试验结果表明,水在顺层软弱带区域的富集会引发孔隙水压力的升高和有效应力的下降(Li *et al.*, 2024),亦或扬压力的产生(Fan *et al.*, 2009),进而导致潜在滑面抗剪强度降低,当水源持续补给时,易在黄土层内或黄土—红层接触面处的饱和软化带中产生超孔隙水压力,引发静态液化型黄土滑坡(王家鼎, 1997; 武彩霞等, 2011; 许强等, 2016).

除水力作用外,地震是诱发大型黄土—红层滑坡的另一关键外因.试验与数值模拟研究表明,当地震波在黄土—红层斜坡体中传播时,会在裂隙、软弱夹层等力学薄弱带部位产生应力集中与反复加卸载作用,导致其发生动态张裂与累积损伤(Sun *et al.*, 2017; 王平等, 2018; Chen *et al.*, 2022),进而促进了结构面的扩展和贯通,显著降低了岩土体整体强度和完整性.这种动力损伤过程一方面直接削弱了结构面的力学性能,另一方面也改变了斜坡的水文地质结构.地震作用下新生和扩张的结构面形成新的优势渗流通道,加速了斜坡在水力作用下的破坏进程(杨校辉等, 2022; Wang *et al.*, 2025).这种地震—降雨的耦合致灾效应是许多大型滑坡形成的关键驱动力,而结构面与两者的互馈作用则是控制滑坡启动和运动过程的关键物理过程.

3.2 控滑结构与滑坡运动特性的关联机制

滑坡失稳后的运动过程是决定其致灾范围、危险性程度的关键,同时也是滑坡动力学行为的外在表现.对于黄土—红层滑坡,其运动模式多样、运动学机理复杂,且受到诸多因素的影响.前已述及,受不同类型控滑结构主导的滑坡往往对应不同的运

动演化模式,因此,关于控滑结构与黄土—红层滑坡运动过程的关联机制也是值得重点关注的科学问题。滑坡的运动特性涉及能量的转换过程,而结构面的发育类型、空间形态、物质成分及力学性质,直接控制着滑坡形成演化过程中能量的释放形式和释放条件,以此对滑坡的速度和运距等运动参数造成影响(吴玮江和王念秦,2002)。例如,对于以平移滑动为主的黄土—红层接触面滑坡或黄土—红层顺层滑坡,其滑面多受控于近水平或缓倾状泥化夹层,呈粘塑性特征,且延伸距离长,在此条件下,初始势能在长期大范围滑动摩擦过程中被逐步消耗,转化为滑体动能的比例相对较低,因而通常表现为低速、短距离运动。而对于以旋转型滑动为主的黄土层内滑坡或黄土—红层切层滑坡,其滑面贯通往往伴随着锁固段的突发脆性破坏,且相较于顺层滑面,滑体与底部滑动边界的相对接触面积大幅降低。在此情况下,滑体的初始势能得以快速释放,同时,因与滑面摩擦消耗的能量相对较低,因此在启滑后易获得较高的初速度,若前缘地形开阔,往往形成高速远程运动。

对于流动型滑坡,流态化是其实现高速远程运动的重要前提。滑坡流态化运动中包含的一系列复杂物理力学过程,是破解滑坡高流动型谜题的关键。以此为基础,国内外学者提出多种动力学理论与假说,如动量传递效应(Heim, 1932; Van Gassen, 1989)、动力破碎减阻(Davies *et al.*, 1999)、声波流态化(Melosh, 1978)、裹挟减阻(Iverson *et al.*, 2011, 2012)、滑带液化减阻(Seed, 1968; Hutchinson and Bhandari, 1971)等。在众多机理中,黄土的饱和液化被普遍认为是控制黄土高原地区黄土—红层滑坡流态化远程运动的关键物理过程(王家鼎, 1992; 武彩霞等, 2011; Zhang *et al.*, 2021)。在滑坡形成阶段,其前缘或内部的饱和黄土可能发生强度骤降甚至静态液化,从而导致滑体高速启程;在滑坡高速运动过程中,滑体与运动路径的强烈相互作用,引发沿程饱和松散砂土层的振动和剪切液化(动态液化)(彭建兵等, 2020),形成具有远程运动特性的流动型黄土—红层滑坡。

4 存在的问题及研究展望

数十年来,国内外学者围绕黄土高原地区滑坡灾害的分布规律、孕灾背景、成灾机理及风险防控等方面开展了系统性研究,在黄土滑坡动力学机制

方面取得了重要进展,推动了工程地质理论体系的完善与研究方法的创新。西北红层作为我国红层体系的重要分支,其分布范围之广、灾害效应之强、灾变机理之复杂,在全国乃至全球范围内都具有典型性与特殊性。关于新近系黄土—红层滑坡的研究,目前正面临从点到面、从外在到内在,从宏观到微观的理论突破,而控滑斜坡结构是从本质上揭示其形成机理及演化模式的关键环节和重要突破口。与控滑结构相关的黄土—红层滑坡物理力学机制,仍面临一系列悬而未决的科学问题:①在控滑结构演化动力学过程方面,如何定量表征地质营力与结构面扩展—贯通—重组过程的时空耦合效应?②在结构面多尺度力学行为方面,不同级别的结构面在滑坡形成过程中如何通过跨尺度能量传递与损伤累积诱发斜坡失稳?③在结构控滑效应方面,结构面几何参数(如倾角、粗糙度、连通率等)、力学性质(如抗剪强度、流变特性参数)与渗透系数等关键指标在何种临界状态下触发滑坡灾变?④在控滑结构与滑坡运动的关联性方面,如何构建考虑结构面动态演化的多场耦合数值模型,实现滑坡动态演化全过程的定量描述?面对以上问题和挑战,亟待从以下4个方面开展下一步的研究工作:

4.1 多场耦合作用下控滑结构动态演化过程及机理

黄土—红层滑坡滑动边界的形成是控滑结构在多物理场协同作用下持续演化的最终结果。现有研究对控滑结构向滑面演化机理的分析多局限于单一诱发因子,研究方法多基于滑坡案例调查与数值模拟反演,侧重于结构面变形演化过程的定性分析,而对应力场—渗流场耦合作用下的结构面动态响应规律缺乏系统认知。因此,后续研究应重点突破多场耦合驱动下控滑结构的动态演化机制。通过“天—空—地”一体化综合观测技术,精准识别典型红层滑坡的控滑结构体系与初始变形特征;在此基础上,构建集成微震监测、位移监测、孔隙水压力与含水率监测的多物理场综合监测系统,结合滑带土原位结构扫描与剪切流变试验等新型技术手段,分析不同环境条件下结构面扩展、贯通与重组的时空演化特征,揭示应力场—渗流场耦合作用下控滑结构从微观损伤到宏观破坏的演化路径,明确结构面动态扩展的主要驱动力与边界约束条件,为黄土—红层滑坡灾变机理研究提供基础支撑。

4.2 基于水—岩相互作用的红层结构面力学劣化机制

红层作为典型湿热气候条件下形成的沉积地

层,其形成过程经历了强烈的淋滤与生物化学作用.在现有天然环境下,红层性状已趋于相对稳定,其力学性能的劣化主要源于气候条件变化,以及人为开挖、侵蚀或暴露引起的应力状态改变,从而打破了原有的水-岩平衡状态.在此过程中,多尺度结构面既是红层斜坡中地下水的赋存介质,也是水渗流扩散的优势通道,因而成为水-岩相互作用的“前沿阵地”.目前,红层水-岩相互作用研究主要集中于细微观尺度的矿物溶解、结构软化和界面过程,缺乏对细微观软化机制与宏观结构面力学损伤之间的系统关联.针对黄土高原地区的黄土-红层斜坡结构,其材料异质性与地质界面多样性导致水-岩相互作用显著,亟需有针对性地对其力学劣化机制进行研究.因此,精准刻画黄土-红层滑坡水-岩相互作用的物理-化学-力学多场协同效应,揭示控滑结构在赋存环境变化条件下力学性能渐进劣化的内在机制,是下一步的重点研究方向.通过开展干-湿循环与长期浸水试验,结合矿物成分分析、细观结构扫描及力学测试,探究水分运移、矿物溶解、离子交换等作用对结构面强度衰减的影响规律;利用数字图像相关、三轴试验CT扫面技术等新型手段,量化非饱和状态下结构面损伤累积过程,建立物理侵蚀-化学溶蚀与力学参数劣化的关联模型,突破传统单一场力学分析的理论局限.

4.3 黄土-红层滑坡结构控滑临界状态与判据

黄土-红层滑坡的启动过程受地质结构面主导,其临界状态的判定是灾害预警的核心难题.此类滑坡多发育于黄土-红层接触带或红层内部软弱夹层,结构面的空间展布、几何形态及力学特性决定了斜坡失稳的阈值条件.当前研究对结构控滑临界状态的刻画主要基于静态强度准则(如Mohr-Coulomb理论).然而,黄土-红层软弱层面因物性差异显著、界面渗透性突变及水-岩作用时效性,其力学行为涉及多物理场的耦合作用,传统判据难以准确表征结构面从损伤累积到贯通破坏的动态演化过程;另一方面,现有判据未能全面考虑多尺度结构面的协同效应,例如细观裂隙扩展与宏观软弱层剪胀的相互作用,以及地下水渗流-化学溶蚀耦合作用对临界抗滑力的弱化机制.因此,亟需构建融合地质结构多尺度特征、水-岩作用动态演化及多场耦合效应的临界状态判定理论体系.未来研究需通过原位监测、物理模型试验与数值模拟等方法,揭示黄土-红层结构面在动静荷载与水化学环

境下的变形-渗流-化学协同演化规律,量化结构面损伤速率与抗滑力衰减的时空关联.在此基础上,通过引入机器学习算法,对地质结构参数、多场监测数据及力学响应等多源信息进行融合分析与智能识别,建立基于临界应变能、渗透压突变及声发射特征的多指标联合判据模型,为黄土-红层滑坡的临界状态识别与动态预警提供定量化理论支撑.

4.4 基于结构控滑效应的黄土-红层滑坡运动演化模型

已有研究表明,黄土-红层滑坡的运动学行为与控滑结构间存在显著相关性.目前针对结构面控滑效应的研究多集中于滑坡运动现象的分类与表观特征描述,关于控滑结构与滑坡运动模式的内在关联机制尚不明确.在滑坡运动演化模拟方面,目前常用的运动学模型多基于均质化假设,将滑体简化为刚性块体或连续介质,未能充分考虑滑动过程中结构面动态扩展、剪胀效应及能量传递特征,导致运动速度、运动距离及冲击力等关键参数的预测结果与实际情况存在显著偏差;此外,水-力耦合作用下黄土-红层软弱层面基质吸力衰减、孔隙水压力重分布与摩擦系数动态演化的关系尚未融入运动学方程,难以准确刻画滑坡启滑后的运动参数时变特性.未来研究应进一步构建融合结构控滑效应的黄土-红层滑坡运动演化模型.通过多尺度结构面原位监测与高速环剪试验,解析滑动过程中结构面剪切带厚度、碎屑颗粒分选性及孔隙率演化的时空规律,并基于反演分析,建立结构面动摩擦系数与剪切速率的耦合本构方程;在此基础上,基于离散元-有限元耦合数值方法,研发能够精准刻画结构面各向异性、剪胀效应及渗流路径自调整的三维运动模拟平台,实现真实尺度下大型黄土-红层滑坡运动速度、运动距离及影响范围的精准预测.

5 结语

黄土高原地区的黄土-红层滑坡作为我国特殊地质背景下形成的典型地质灾害,其致灾机理的复杂性不仅源于多尺度控滑结构的动态演化,还涉及多物理场的耦合作用.控滑结构作为连接内外动力地质作用与滑坡灾变的核心纽带,其损伤累积与动态扩展过程直接控制滑坡的临界状态与运动行为.本文聚焦新近系大型黄土-红层滑坡的关键控滑结构,首先从斜坡物质结构、易滑地层和多级结构面三个层面系统总结了黄土-红层斜坡地质结

构类型及赋存特征;其次,概括了结构面在滑坡形成演化中的边界约束、水力传导与力学弱化三重控滑效应,据此构建了基于结构控滑特征的滑坡分类体系与灾变模式;进一步地,从滑坡的启动条件和运动演化过程两个方面对控滑结构的作用机制进行了分析.基于当前的研究现状,与黄土—红层滑坡结构控滑机制相关的研究仍面临黄土—红层滑坡控滑结构演化动力过程不明、结构面多尺度力学行为不清、结构控滑临界判据缺失,以及控滑结构与滑坡运动的关联性不足等诸多挑战.因此,未来研究应聚焦多场耦合驱动下控滑结构的跨尺度演化规律,建立水—岩—力—化多过程协同的定量表征方法,发展基于结构面渐进弱化动力过程的滑坡临界状态判据,构建融合多尺度结构面动态响应机制的滑坡运动模拟平台,从而为西北地区重大工程安全运维、国土空间规划及地质灾害风险防控提供科学依据和理论支撑.

Reference

- Bai, C. N., Peng, L., Shen, Y., et al., 2021. Characteristics and Mechanism of Zhangjiawan Large Scale Landslide in Xining. *Science Technology and Engineering*, 21(3): 927—934(in Chinese with English abstract).
- Brady, B. H. G., Brown, E. T., 2006. *Rock Mechanics for Underground Mining*. Allen & Unwin, London
- Chen, J. C., Wang, L. M., Wang, P., et al., 2022. Failure Mechanism Investigation on Loess-Mudstone Landslides Based on the Hilbert-Huang Transform Method Using a Large-Scale Shaking Table Test. *Engineering Geology*, 302: 106630. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106630>
- Chen, Y. M., Shi, Y. C., Liu, H. M., et al., 2005. Distribution Characteristics and Influencing Factors Analysis of Seismic Loess Landslides. *Earthquake Research in China*, 21(2): 235—243(in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q., Kou, X. B., Huang, S. B., et al., 2004. The Distributes and Geologic Environment Characteristics of Red Beds in China. *Journal of Engineering Geology*, 12(1): 34—40(in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q., Zhou, D.P., Feng, Z.J., 2009. Research on Shear Creep Property of Typical Weak Intercalation in Redbed Soft Rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(s1): 3176—3180(in Chinese with English abstract).
- Dai, S., Fang, X. M., Dupont-Nivet, G., et al., 2006. Magnetostratigraphy of Cenozoic Sediments from the Xining Basin: Tectonic Implications for the Northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B11): 2005JB004187. <https://doi.org/10.1029/2005JB004187>
- Davies, T. R., McSaveney, M. J., Hodgson, K. A., 1999. A Fragmentation-Spreading Model for Long-Runout Rock Avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6): 1096—1110. <https://doi.org/10.1139/cgj-36-6-1096>
- Deng, J. P., Zhang, H. Y., 1988. The Controlling of Fissure on the Mechanical Properties of Chengdu Clay. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 15(2): 42—46(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(1/2/3): 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(3/4): 153—171. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90001-9)
- Ding, Z.L., Liu, D.S., 1989. Progresses of Loess Research in China (Part 2): Paleoclimatology and Global Change. *Quaternary Sciences*, 10(1): 1—9(in Chinese with English abstract).
- Fan, X. M., Xu, Q., Zhang, Z. Y., et al., 2009. The Genetic Mechanism of a Translational Landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(2): 231—244. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0194-1>
- Guo, Y. C., Xie, Q., Wen, J. Q., 2007. Red Beds Distribution and Engineering Geological Problem in China. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 34(6): 67—71(in Chinese with English abstract).
- Hart, M. W., 2000. Bedding-Parallel Shear Zones as Landslide Mechanisms in Horizontal Sedimentary Rocks. *Environmental and Engineering Geoscience*, 6(2): 95—113. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.6.2.95>
- Heim, A., 1932. *Bergsturz und Menschenleben*. Naturforschenden Gesellschaft, Zütich.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1977. *Rock Slope Engineering*. The Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hu, G. T., 1986. The Historical Transformation of the Land-sliding Causes and Factors in the Border Slopes of Loessial Highland in the Baoji-Changxing Area. *Journal of Chang'an University Earth Science Edition*, 8(4): 23—27(in Chinese with English abstract).
- Hu, H. T., Hsang, S., Wang, C.F., et al., 1965. The Characteristic Constitution and Structure of Landslides in

- Western Kwangchung Region and Analysis of Their Stability. *Acta Geological Sinica*, 39(4): 435—460, 479—483 (in Chinese with English abstract).
- Hu, H.T., Zhao X.Y., 2006. Studies on Rockmass Structure in Slope of Red Bed in China. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(6): 689—794(in Chinese with English abstract).
- Hu, X.W., Li, Q.F., Zhao, Z.S., et al., 1994. Mechanical Properties of Fissured Clay. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 16(4): 81—88(in Chinese with English abstract).
- Huang, D. T., 1990. Section Characters and Tectonic of Large-Sized Landslide on the Stratum of Semi-Rock. *Journal of Soil and Water Conservation*, 4(3): 43—50(in Chinese with English abstract).
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes Classification of Landslide Types, an Update. *Landslides*, 11(2): 167—194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hutchinson, J. N., 1988. General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology: Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10-15 July 1988V1, P3-35. Publ Rotterdam: a Balkema, 1988. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26: 1—15 [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)90310-0)
- Hutchinson, J. N., Bhandari, R. K., 1971. Undrained Loading, a Fundamental Mechanism of Mudflows and Other Mass Movements. *Géotechnique*, 21(4): 353—358. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.4.353>
- Iverson, R. M., 2012. Elementary Theory of Bed-Sediment Entrainment by Debris Flows and Avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3): 2011JF002189. <https://doi.org/10.1029/2011JF002189>
- Iverson, R. M., Reid, M. E., Logan, M., et al., 2011. Positive Feedback and Momentum Growth during Debris-Flow Entrainment of Wet Bed Sediment. *Nature Geoscience*, 4(2): 116—121. <https://doi.org/10.1038/ngeo1040>
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., Zimmerman, R., 2009. Fundamentals of Rock Mechanics. John Wiley and Sons Inc., New Jersey.
- Lei, X. Y., 2006. Models of Loess Stratigraphical Structure on the Terraces in the Loess Plateau of China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(2): 113—122(in Chinese with English abstract).
- Li, B., Feng, Z., Wang, W. P., 2015. Characteristics of the Sanmen Formation Clays and Their Relationship with Loess Landslides in the Guanzhong Area, Shaanxi, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10): 7831—7843. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1822-7>
- Li, B., Wu, S. R., Shi, J. S., et al., 2013. Engineering Geological Properties and Hazard Effects of Hipparion Laterite in Baoji, Shaanxi Province. *Geological Bulletin of China*, 32(12): 1918—1924(in Chinese with English abstract).
- Li, B., Yin, Y. P., Wu, S. R., et al., 2011. Basic Types and Characteristics of Multiple Rotational Landslides in Loess. *Journal of Engineering Geology*, 19(5): 703—711(in Chinese with English abstract).
- Li, F.L., Chen, Z.Y., Zhang, Z.Q., 2005. Preliminary Analysis of Landslides in Qinghai. *Journal of Engineering Geology*, 13(3): 300—309(in Chinese with English abstract).
- Li, K., Sun, P., Wang, H. J., et al., 2024. Insight into Failure Mechanisms of Rainfall Induced Mudstone Landslide Controlled by Structural Planes: From Laboratory Experiments. *Engineering Geology*, 343: 107774. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107774>
- Li, L. C., Li, S. H., Li, H., 2014. Time-Dependent Deformation of Rock Slopes Based on Long-Term Strength Characteristics of Rocks. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(1): 47—56(in Chinese with English abstract).
- Li, T. L., Long, J. H., Li, X. S., 2007. Types of Loess Landslides and Methods for Their Movement Forecast. *Journal of Engineering Geology*, 15(4): 500—505(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. R., Mo, P., 2019. A Unified Landslide Classification System for Loess Slopes: a Critical Review. *Geomorphology*, 340: 67—83. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.020>
- Li, Y. R., Wang, Y. Y., Aydin, A., 2024. Loess Structure: Evolution and a Scale-Based Classification. *Earth-Science Reviews*, 249: 104665. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2023.104665>
- Li, Z.Y., Li, Y.X., Li, W.H., et al., 2023. Sedimentary Facies and Paleoenvironmental Evolution of the Cenozoic Lanzhou Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 25(3): 648—670(in Chinese with English abstract).
- Liang, C. Y., Zhang, H., Wang, T., 2022. Red Clay/Mudstone Distribution, Properties and Loess - Mudstone Landslides in the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 81(15): 386. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10489-4>
- Liao, J., Lan, C. H., Wu, Y. T., et al., 2024. Micro-Meso-

- Macro Interface Correlation Processes and Cross-Scale Cascade Effects in Red-Bed Soft Rocks Softening. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 43(5): 1241–1254(in Chinese with English abstract).
- Lu, Q. Z., Ge, X. R., Peng, J. B., et al., 2009. Failure Characteristics of Fissured Loess under Triaxial Compression Condition. *Rock and Soil Mechanics*, 30(12): 3689–3694(in Chinese with English abstract).
- Lu, Q. Z., Peng, J. B., 2006. Characteristics of Structural Planes of Loess Mass in Loess Plateau of China and Its Hazard Effect. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 26(4): 446–450(in Chinese with English abstract).
- Ma, P. H., Peng, J. B., Li, T. L., et al., 2018. Forming Mechanism and Motion Characteristics of the “3·8” Jiangliu Loess Landslide in Jingyang County of Shaanxi Province. *Journal of Engineering Geology*, 26(3): 663–672(in Chinese with English abstract).
- Ma, S. X., Li, H. L., Zhang, Y. Q., et al., 2016. The Neogene Extension of the Tianshui Basin: Evidence from Sedimentary and Structural Records. *Geological Bulletin of China*, 35(8): 1314–1323(in Chinese with English abstract).
- Melosh, H. J., 1978. Acoustic Fluidization. *American Scientist*, 71(B13): 158–168.
- Mu, W. P., Wu, X., Qian, C., et al., 2020. Triggering Mechanism and Reactivation Probability of Loess-Mudstone Landslides Induced by Rainfall Infiltration: a Case Study in Qinghai Province, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 79(1): 22. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8767-1>
- Nan, J. J., Peng, J. B., Zhu, F. J., et al., 2021. Shear Behavior and Microstructural Variation in Loess from the Yan'an Area, China. *Engineering Geology*, 280: 105964. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105964>
- Orense, R. P., Shimoma, S., Maeda, K., et al., 2004. Instrumented Model Slope Failure Due to Water Seepage. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(1): 15–26. <https://doi.org/10.2328/jnds.26.15>
- Peng, J. B., Leng, Y. Q., Zhu, X. H., et al., 2016. Development of a Loess-Mudstone Landslide in a Fault Fracture Zone. *Environmental Earth Sciences*, 75(8): 658. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5336-8>
- Peng, J. B., Tong, X., Wang, S. K., et al., 2018. Three-Dimensional Geological Structures and Sliding Factors and Modes of Loess Landslides. *Environmental Earth Sciences*, 77(19): 675. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7863-y>
- 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(5): 714–730 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. B., Wang, S. K., Wang, Q. Y., et al., 2019. Distribution and Genetic Types of Loess Landslides in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 329–350. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2018.11.015>
- Qu, Y. X., Zhang, Y. S., Qin, Z. M., 1999. Hipparion Laterite and Landslide Hazards on Loess Plateau of Northwestern China. *Journal of Engineering Geology*, 7(3): 257–265(in Chinese with English abstract).
- Rahardjo, H., Lee, T. T., Leong, E. C., et al., 2005. Response of a Residual Soil Slope to Rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2): 340–351. <https://doi.org/10.1139/t04-101>
- Seed, H. B., 1968. The Fourth Terzaghi Lecture: Landslides during Earthquakes Due to Liquefaction. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(5): 1053–1122. <https://doi.org/10.1061/jsfea.0001182>
- Shen, Z. L., Wang, Y. X., 2002. Review and Outlook of Water-Rock Interaction Studies. *Earth Science*, 27(2): 127–133 (in Chinese with English abstract).
- Shi, J. S., Li, B., Wu, S. R., et al., 2013. Mechanism of Large-Scale Slide at Edge of Loess Plateau on North of Weihe River in Baoji Urban Area, Shaanxi Province. *Journal of Engineering Geology*, 21(6): 938–949(in Chinese with English abstract).
- Shi, J. S., Wu, L. Z., Qu, Y. X., et al., 2018. Neogene Clay and Its Relation to Landslides in the Southwestern Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 77(5): 204. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7350-5>
- Smalley, I. J., Derbyshire, E., 1991. Large Loess Landslides in Active Tectonic Regions. In: Jones, M., Cosgrove, J., eds., Neotectonics and Resources. Belhaven Press, London, 202–219.
- Song, C. H., 2006. Tectonic Uplift and Cenozoic Sedimentary Evolution in the Northern Margin of the Tibet Plateau (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou(in Chinese with English abstract).
- Sun, J., 2007. Rock Rheological Mechanics and Its Advance in Engineering Applications. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(6): 1081–1106(in Chinese with English abstract).
- Sun, P., Li, R. J., Jiang, H., et al., 2017. Earthquake-Triggered Landslides by the 1718 Tongwei Earthquake in Gansu Province, Northwest China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(4): 1281–1295. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-0988-8>

- [//doi.org/10.1007/s10064-016-0949-4](https://doi.org/10.1007/s10064-016-0949-4)
- Sun, P., Peng, J. B., Chen, L. W., et al., 2016. An Experimental Study of the Mechanical Characteristics of Fractured Loess in Western China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4): 1639–1647. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0793-y>
- 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>
- Tohari, A., Nishigaki, M., Komatsu, M., 2007. Laboratory Rainfall-Induced Slope Failure with Moisture Content Measurement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5): 575–587. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2007\)133:5\(575\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:5(575))
- Van Gassen, W., Cruden, D. M., 1989. Momentum Transfer and Friction in the Debris of Rock Avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4): 623–628. <https://doi.org/10.1139/t89-075>
- Varnes, D.J. 1978. Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J., eds., Landslides, Analysis and Control, Special Report. National Academy of Sciences, Washington, D C.
- Wang, F. W., Chen, Y., Yan, K. M., 2023. A Destructive Mudstone Landslide Hit a High-Speed Railway on 15 September 2022 in Xining City, Qinghai Province, China. *Landslides*, 20(4): 871–874. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02016-0>
- Wang, G.X. 1997. Sliding Mechanism and Prediction of Critical Sliding of Huangci Landslide in Yongjing County, Gansu Province. *Journal of Catastrophology*, 12(3): 23–27(in Chinese with English abstract).
- Wang, G. X., Wu, Z. J., Zhang, X. H., et al., 2025. Experimental Study on Dynamic Response Characteristics and Failure Modes of Rainfall and Non-Rainfall Loess High Steep Slopes under Earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 199: 109706. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109706>
- Wang, H. J., Sun, P., Zhang, S., et al., 2020. Rainfall-Induced Landslide in Loess Area, Northwest China: a Case Study of the Changhe Landslide on September 14, 2019, in Gansu Province. *Landslides*, 17(9): 2145–2160. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01460-0>
- Wang, H. J., Sun, P., Zhang, S., et al., 2022. Evolutionary and Dynamic Processes of the Zhongzhai Landslide Re-activated on October 5, 2021, in Niangniangba, Gansu Province, China. *Landslides*, 19(12): 2983–2996. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01966-9>
- Wang, H. J., Sun, P., Zhang, S., et al., 2023. Characteristics and Slope Structure of the Beishan Landslide Group in Tianshui City. *Journal of Geomechanics*, 29(2): 236–252 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. D., 1992. A Mechanism of High-Speed Loess Landslides: Saturated Loess Creeping Liquefaction. *Geological Review*, 38(6): 532–539(in Chinese with English abstract).
- Wang, J. D., 1997. Discussion on Several Disasters of “Building a Residence by Mountain” in China Loess Mountain City (IV): Analysis of Loess Mudflow. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 27(5): 443–447(in Chinese).
- Wang, J.M., Zhang, J., 1985. On Loessial Jointe. *Journal of Xi'an College of Geology*, 7(2): 30–41(in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Wang, H. J., Chai, S. F., et al., 2018. Derivation Mechanism and Deformation Characteristics of Slope Slip Surface at Loess-Weathered Rock Interface. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(S2): 4027–4037(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.K., 2020. Study on the Mechanisms for Geohazards of Macro Loess Discontinuities (Doctoral Dissertation). Chang'an University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Wang, S. K., Peng, J. B., Zhuang, J. Q., et al., 2019. Underlying Mechanisms of the Geohazards of Macro Loess Discontinuities on the Chinese Loess Plateau. *Engineering Geology*, 263: 105357. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2019.105357>
- Wang, W. T., Zhang, P. Z., Liu, C. C., et al., 2016. Pulsed Growth of the West Qinling at ~30 Ma in Northeastern Tibet: Evidence from Lanzhou Basin Magnetostratigraphy and Provenance. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11): 7754–7774. <https://doi.org/10.1002/2016jb013279>
- Wang, X. G., Lian, B. Q., Kai, L., et al., 2021. Trigger Mechanism of Loess-Mudstone Landslides Inferred from Ring Shear Tests and Numerical Simulation. *Journal of Mountain Science*, 18(9): 2412–2426. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6791-6>
- 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(3): 404–413(in Chinese with English abstract).
- Wen, B. P., Wang, S. J., Wang, E. Z., et al., 2005. Deformation

- mation Characteristics of Loess Landslide along the Contact between Loess and Neocene Red Mudstone. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79(1): 139–151. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2005.tb00875.x>
- Wu, C. X., Xu, L., Dai, F. C., et al., 2011. Topographic Features and Initiation of Earth Flows on Heifangtai Loess Plateau. *Rock and Soil Mechanics*, 32(6): 1767–1773(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(2): 36–40(in Chinese with English abstract).
- Wu, W. J., Su, X., Liu, W., et al., 2014. Loess-Mudstone Interface Landslides: Characteristics and Causes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(5): 1167–1175(in Chinese with English abstract).
- Xin, P., Liu, Z., Wu, S. R., et al., 2018. Rotational-Translational Landslides in the Neogene Basins at the Northeast Margin of the Tibetan Plateau. *Engineering Geology*, 244: 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.024>
- Xin, P., Shi, J.S., Hu, L., et al., 2020. The Structure and Distribution Characteristic of Clay Minerals in Bedding Parallel to the Shear Zone of the Neogene Soft Rock. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1625–1637(in Chinese with English abstract).
- Xin, P., Wang, T., Wu, S. R., 2015. The Formation Mechanism of Multilevel Rotational Mudstone Landslides in Hanjiashan of Datong County, Qinghai Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(6): 771–780(in Chinese with English abstract).
- Xin, P., Wang, T., Wu, S. R., 2018. A Study of the Formation Mechanism of Caizigou Large-Scale Translational Gliding Landslide in Neogene Mudstone Basin of Xining-Minhe, Qinghai Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(3): 342–350(in Chinese with English abstract).
- Xin, P., Wu, S. R., Shi, J. S., et al., 2013. Slope Structure on the North Bank of Baoji-Fufeng Section in the Middle Reaches of Weihe River and Its Indicative Significance on the Formation Mechanism of Large Landslide. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(2): 506–514 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Dai, F.C., Min, H., 2008a. Research Progress and Some Thoughts on Loess Landslides. *Advances in Earth Science*, 23(3): 236–242(in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Dai, F. C., Tham, L. G., et al., 2012. Investigating Landslide-Related Cracks along the Edge of Two Loess Platforms in Northwest China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(10): 1023–1033. <https://doi.org/10.1002/esp.3214>
- Xu, L., Dai, F.C., Kwong, A.K.L., et al., 2008b. Types and Characteristics of Loess Landslides at Heifangtai Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 26(3): 364–371(in Chinese with English abstract).
- Xu, P., Yang, T.Q., Xu, C.M., et al., 2002. Creep Characteristic and Long-Term Stability of Rock Mass in Ship Lock High Slope of the Three Gorges Project. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(2): 163–168(in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Peng, D.L., Qi, X., et al., 2016. Dangchuan 2# Landslide of April 29, 2015 in Heifangtai Area of Gansu Province: Characteristics and Failure Mechanism. *Journal of Engineering Geology*, 24(2): 167–180(in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Tang, R., 2023. Study on Red Beds and Its Geological Hazards. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(1): 28–50(in Chinese with English abstract).
- Yang, L.R., Li, J.X., Yue, L.P., et al., 2017. Paleogene-Neogene Stratigraphic Realm and Tectonic-Sedimentary Evolution of the Qilian Mountains and Their Surrounding Areas. *Science China Earth Sciences*, 47(5): 586–600(in Chinese with English abstract).
- Yang, S.B., Xu J., Dong X.B., 1996. Rheological Feature of Slope Rockmass Composed of Alternating Beds of Sandstone and Mudstone in Red Beds Area. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 7(2): 12–24(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.H., Chen, K.Q., Diao, X.F., et al. 2022. Model Tests and Stability of Accumulation Landslides under Couplingaction of Earthquake and Rainfall. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(s1): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Yenes, M., Monterrubio, S., Nespereira, J., et al., 2009. Geometry and Kinematics of a Landslide Surface in Tertiary Clays from the Duero Basin (Spain). *Engineering Geology*, 104(1/2): 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.08.008>
- Yue, L.P., 1996. Depositional Relation Between the Loess, Red Clay and Sedimentation of the Lakebasin in the Loess Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(4): 148–153(in Chinese with English abstract).
- Yue, L. P., Heller, F., Qiu, Z. X., et al., 2000. Magnetostratigraphy and Paleoenvironmental Record of Tertiary Deposits of Lanzhou Basin. *Chinese Science Bulletin*, 45(18): 1998–2002(in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. X., Wang, G. H., Luo, C. Y., et al., 2009. A Rapid Loess Flowslide Triggered by Irrigation in China. *Land-*

- slides*, 6(1): 55–60. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0135-2>
- 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, S., Sun, P., Li, R., et al., 2023. Preliminary Investigation on a Catastrophic Loess Landslide Induced by Heavy Rainfall on 1 September 2022 in Qinghai, China. *Landslides*, 20(7): 1553–1559. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02086-8>
- Zhang, S., Xu, Q., Hu, Z. M., 2016. Effects of Rainwater Softening on Red Mudstone of Deep-Seated Landslide, Southwest China. *Engineering Geology*, 204: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.013>
- Zhang, S.K., Wang, L.G., Lu, L., et al., 2020. Weakening Effects of Occurrence Structural Plane on Mechanical Properties of Silty Mudstone. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(11): 2015–2023(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.G., Wang, S.J., Zhang, Z.Y., 2000. Chinese Engineering Geology. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Y. A., Li, F., Chen, J., 2008. Analysis of the Interaction between Mudstone and Water. *Journal of Engineering Geology*, 16(1): 22–26(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. L., Wang, T., Wu, S. R., 2020. Distribution and Features of Landslides in the Tianshui Basin, Northwest China. *Journal of Mountain Science*, 17(3): 686–708. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5595-4>
- Zhang, Z. L., Wang, T., Wu, S. R., et al., 2017. Dynamics Stress-Strain Behavior of Tianshui Soils. *Landslides*, 14(1): 323–335. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0694-6>
- Zhang, Z. L., Wang, T., Wu, S. R., et al., 2021. Study on Shear Mechanical Properties of Mudstone with Weak Intercalation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(4): 713–724(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. L., Wu, S. R., Tang, H. M., et al., 2015. Control Effect of Evolution Process of the Yellow River Terrace in Lanzhou on Landslide Activity. *Earth Science*, 40(9): 1585–1597(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Chen, S. M., Tao, L. J., 2002. 1983 Sale Mountain Landslide, Gansu Province, China. In: Evans, S.G., DeGraff, J.V., eds., *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms*. Geological Society of America, (XV): 149–163.
- Zhang, Z. Y., Chen, S. M., Tao, L. J., 2002. 1983 Sale Mountain Landslide, Gansu Province, China. *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 149–164. <https://doi.org/10.1130/reg15-p149>
- Zhang, Z.Y., Wang, S.T., Wang, L.S., 1994. Principles of Engineering Geological Analysis. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, L. Q., Ma, P. H., Peng, J. B., et al., 2025. Genesis, Characteristic and Disaster Effects of Loess Meso-Interfaces: a Field Geological Investigation. *CATENA*, 251: 108804. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108804>
- Zhou, B., Li, X.L., Wei, G., et al., 2019. Research on the Development Patterns of Giant Landslides in the Lagan Gorge-Sigou Gorge Section of the Upper Yellow River. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhou, C.Y., Huang, S.Y., Liu, Z., et al., 2019. The Interface Process and Its Dynamic Model of Red-Bed Soft Rock Softening. *Rock and Soil Mechanics*, 40(8): 3189–3206(in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. Y., Liu, Z., Xue, Y. G., et al., 2023. Some Thoughts on Basic Research of Red Beds Disaster. *Journal of Engineering Geology*, 31(3): 689–705(in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. Y., Yang, X., Liang, Y. H., et al., 2019. Classification of Red-Bed Rock Mass Structures and Slope Failure Modes in South China. *Geosciences*, 9(6): 273. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060273>
- Zhou, Y. Y., Yu, B., Fan, W., et al., 2023. 3D Characterization of Localized Shear Failure in Loess Subject to Triaxial Loading. *Engineering Geology*, 322: 107174. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107174>
- Zhu, Y. B., Li, H. F., Lan, H. X., et al., 2021. Experimental Study on Influence of Loess Joints Angle on Mechanical Properties of Loess. *Journal of Engineering Geology*, 29(4): 1178–1187(in Chinese with English abstract).
- Zhuang, J. Q., Peng, J. B., Xu, C., et al., 2018. Distribution and Characteristics of Loess Landslides Triggered by the 1920 Haiyuan Earthquake, Northwest of China. *Geomorphology*, 314: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.04.012>

中文参考文献

- 白朝能, 彭亮, 沈远, 等, 2021. 西宁张家湾特大滑坡特征及机理. *科学技术与工程*, 21(3): 927–934.
- 陈永明, 石玉成, 刘红玫, 等, 2005. 黄土地区地震滑坡的分布特征及其影响因素分析. *中国地震*, 21(2): 235–243.
- 程强, 2010. 红层软岩边坡岩体结构特征及边坡岩体稳定性分

- 析. 中国岩石力学与工程学会. 岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 成都: 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 65—70.
- 程强, 寇小兵, 黄绍楦, 等, 2004. 中国红层的分布及地质环境特征. 工程地质学报, 12(1): 34—40.
- 程强, 周德培, 封志军, 2009. 典型红层软弱夹层剪切蠕变性研究. 岩石力学与工程学报, 28(s1): 3176—3180.
- 邓京萍, 张惠英, 1988. 成都粘土的裂隙性对力学性能的控制作用. 水文地质工程地质, (2): 42—46.
- 丁仲礼, 刘东生, 1989. 中国黄土研究新进展(一)黄土层. 第四纪研究, (1): 24—35.
- 谷德振, 黄鼎成, 1979. 岩体结构的分类及其质量系数的确定. 水文地质工程地质, (2): 8—13.
- 郭永春, 谢强, 文江泉, 2007. 我国红层分布特征及主要工程地质问题. 水文地质工程地质, (6): 67—71.
- 胡广韬, 1986. 宝鸡—常兴一带黄土塬边滑坡原因与因素的历史转化性. 西安地质学院学报, 8(4): 23—27.
- 胡海涛, 项式均, 王肇芬, 等, 1965. 关中西部滑坡的结构、构造特征及稳定性分析. 地质学报, 45(4): 435—458.
- 胡厚田, 赵晓彦, 2006. 中国红层边坡岩体结构类型的研究. 岩土工程学报, 28(6): 689—794.
- 胡卸文, 李群丰, 赵泽三, 等, 1994. 裂隙性粘土的力学特性. 岩土工程学报, 16(4): 81—88.
- 黄大庭, 1990. 半成岩地层大型滑坡的剖面特征和构造. 水土保持学报, 4(3): 43—50.
- 雷祥义, 2006. 黄土高原河谷阶地黄土层结构模式. 海洋地质与第四纪地质, 26(2): 67—71.
- 李滨, 吴树仁, 石菊松, 等, 2013. 陕西宝鸡市三趾马红土工程地质特性及灾害效应. 地质通报, 32(12): 1918—1924.
- 李滨, 殷跃平, 吴树仁, 等, 2011. 多级旋转黄土滑坡基本类型及特征分析. 工程地质学报, 19(5): 703—711.
- 李芙林, 陈忠宇, 张志强, 2005. 青海滑坡初探. 工程地质学报, 13(3): 300—309.
- 李连崇, 李少华, 李宏, 2014. 基于岩石长期强度特征的岩质边坡时效变形过程分析. 岩土工程学报, 36(1): 47—56.
- 李同录, 龙建辉, 李新生, 2007. 黄土滑坡发育类型及其空间预测方法. 工程地质学报, 15(4): 500—505.
- 李兆雨, 李永项, 李文厚, 等, 2023. 青藏高原东北部兰州盆地新生代沉积相与古环境演化. 古地理学报, 25(3): 648—670.
- 廖进, 兰春晖, 吴勇桃, 等, 2024. 红层软岩软化的微—细—宏观界面关联过程与跨尺度级联效应. 岩石力学与工程学报, 43(5): 1241—1254.
- 卢全中, 葛修润, 彭建兵, 等, 2009. 三轴压缩条件下裂隙性黄土的破坏特征. 岩土力学, 30(12): 3689—3694.
- 卢全中, 彭建兵, 2006. 黄土体结构面的发育特征及其灾害效应. 西安科技大学学报, 26(4): 446—450.
- 马鹏辉, 彭建兵, 李同录, 等, 2018. 陕西泾阳“3·8”蒋刘黄土滑坡成因及运动特征分析. 工程地质学报, 26(3): 663—672.
- 马收先, 李海龙, 张岳桥, 等, 2016. 天水盆地新近纪伸展构造——来自沉积与构造变形方面的证据. 地质通报, 35(8): 1314—1323.
- 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(5): 714—730.
- 曲永新, 张永双, 覃祖森, 1999. 三趾马红土与西北黄土高原滑坡. 工程地质学报, 7(3): 257—265.
- 沈照理, 王焰新, 2002. 水—岩相互作用研究的回顾与展望. 地球科学, 27(2): 127—133.
- 石菊松, 李滨, 吴树仁, 等, 2013. 宝鸡渭河北岸黄土塬边大型滑坡成因机制研究. 工程地质学报, 21(6): 938—949.
- 宋春晖, 2006. 青藏高原东北缘新生代沉积演化与高原构造隆升过程(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 孙钧, 2007. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展. 岩石力学与工程学报, 26(6): 1081—1106.
- 王恭先, 1997. 甘肃省永靖县黄茨滑坡的滑动机理与临滑预报. 灾害学, 12(3): 23—27.
- 王浩杰, 孙萍, 张帅, 等, 2023. 天水市北山滑坡群发育特征及坡体结构分区. 地质力学学报, 29(2): 236—252.
- 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, 1997. 中国黄土山城“依山造居”的几个灾害问题讨论(IV)——黄土泥流分析. 西北大学学报(自然科学版), 27(5): 443—447.
- 王景明, 张骏, 1985. 论黄土节理. 西安地质学院学报, 7(2): 30—41.
- 王平, 王会娟, 柴少峰, 等, 2018. 黄土—风化岩接触面斜坡滑移面衍生机理及变形特征. 岩石力学与工程学报, 37(s2): 4027—4037.
- 王少凯, 2020. 黄土宏观界面及其控灾机制研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 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(3): 404—413.
- 武彩霞, 许领, 戴福初, 等, 2011. 黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究. 岩土力学, 32(6): 1767—1773.
- 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(2): 36—40.
- 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等, 2014. 黄土—泥岩接触面滑坡的特征与成因. 冰川冻土, 36(5): 1167—1175.
- 辛鹏, 石菊松, 胡乐, 等, 2020. 新近纪软岩质水平滑带的结构与内部黏土矿物聚集规律. 地质学报, 94(5): 1625—1637.
- 辛鹏, 王涛, 吴树仁, 2015. 青海西宁大通县韩家山泥岩质多级旋转型滑坡形成机制研究. 地球学报, 36(6): 771—780.
- 辛鹏, 王涛, 吴树仁, 2018. 青海西宁—民和新近纪泥岩盆地菜子沟大型平推式滑坡形成机制研究. 地球学报, 39(3): 342—350.
- 辛鹏, 吴树仁, 石菊松, 等, 2013. 渭河中游宝鸡—扶风北岸斜坡

- 结构及其对大型滑坡形成机理的指示意义. 吉林大学学报(地球科学), 43(2): 506—514.
- 许领, 戴福初, 闵弘. 2008a. 黄土滑坡研究现状与设想. 地球科学进展, 23(3): 236—242.
- 许领, 戴福初, 邝国麟, 等, 2008b. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律. 山地学报, 26(3): 364—371.
- 徐平, 杨挺青, 徐春敏, 等, 2002. 三峡船闸高边坡岩体时效特性及长期稳定性分析. 岩石力学与工程学报, 21(2): 163—168.
- 许强, 彭大雷, 亓星, 等, 2016. 2015年4.29甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究. 工程地质学报, 24(2): 167—180.
- 许强, 唐然, 2023. 红层及其地质灾害研究. 岩石力学与工程学报, 42(1): 28—50.
- 杨利荣, 李建星, 岳乐平, 等, 2017. 祁连山及邻区古—新近纪地层分区与构造—沉积演化. 中国科学:地球科学, 47(5): 586—600.
- 杨淑碧, 徐进, 董孝璧, 1996. 红层地区砂泥岩互层状斜坡岩体流变特性研究. 地质灾害与环境保护, 7(2): 12—24.
- 杨校辉, 陈昆全, 刁显锋, 等, 2022. 地震与降雨耦合作用下堆积体滑坡模型试验及稳定性研究. 岩土工程学报, 44(s1): 58—62.
- 岳乐平, 1996. 黄土高原黄土、红色粘土与古湖盆沉积物关系. 沉积学报, 14(4): 148—153.
- 岳乐平, Heller F, 丘占祥, 等, 2000. 兰州盆地第三系磁性地层年代与古环境记录. 科学通报, 45(18): 1998—2002.
- 张淑坤, 王来贵, 陆璐, 等, 2020. 赋存结构面粉砂质泥岩力学性能弱化机制研究. 岩土工程学报, 42(11): 2015—2023.
- 张咸恭, 王思敬, 张倬元, 2000. 中国工程地质学. 北京: 科学出版社.
- 张永安, 李峰, 陈军. 2008. 红层泥岩水岩作用特征研究. 工程地质学报, 16(1): 22—26.
- 张泽林, 王涛, 吴树仁, 等, 2021. 泥岩中软弱夹层的剪切力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 40(4): 713—724.
- 张泽林, 吴树仁, 唐辉明, 等, 2015. 兰州黄河阶地演变过程对滑坡活动的控制效应. 地球科学, 40(9): 1585—1597.
- 张倬元, 王士天, 王兰生, 1994. 工程地质分析原理. 北京: 地质出版社.
- 周保, 李小林, 魏刚, 等, 2019. 黄河上游拉干峡—寺沟峡段特大型滑坡发育规律研究. 北京: 地质出版社.
- 周翠英, 黄思宇, 刘镇, 等, 2019. 红层软岩软化的界面过程及其动力学模型. 岩土力学, 40(8): 3189—3206.
- 周翠英, 刘镇, 薛翊国, 等, 2023. 关于红层灾变基础研究的若干思考. 工程地质学报, 31(3): 689—705.
- 祝艳波, 李红飞, 兰恒星, 等, 2021. 节理倾角对黄土力学特性影响试验研究. 工程地质学报, 29(4): 1178—1187.