

# Study on the Formation Mechanism of Rain-Frost Coupling Landslides in the Loess Area of Eastern Qinghai

Haiming Yang

Qinghai Provincial Institute of Geology and Mineral Resources Exploration (No. 3), Xining, Qinghai, 810001, China

## Abstract

The eastern region of Qinghai is located in the transition zone between the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, where thick loess deposits are widely distributed. The area features a typical plateau continental climate, with intense freeze-thaw effects during winter and spring, and concentrated rainfall in summer and autumn. This leads to frequent rainfall-freeze-thaw coupled landslide disasters, posing a serious threat to people's lives, property, and the safety of major engineering projects. Based on a detailed analysis of the regional geological environment, this paper systematically elucidates the coupled mechanisms of rainfall and freeze-thaw cycles on loess slopes. The study suggests that freeze-thaw cycles primarily contribute to landslide formation by altering the physical and mechanical properties of the soil, creating freezing-induced water stagnation effects, redistributing moisture, and forming impermeable frozen soil layers. Meanwhile, rainfall acts as a direct triggering factor, ultimately inducing landslides by increasing slope load, raising groundwater levels, and softening the sliding zone soil. The temporal succession and spatial superposition of these two factors constitute the unique landslide development pattern in this region. Finally, the paper proposes a conceptual model of "preliminary freeze-thaw weakening followed by rainfall triggering," which is validated using numerical simulations and field monitoring data, aiming to provide a scientific basis for landslide disaster early warning and prevention in the area.

## Keywords

Eastern Qinghai; Loess landslide; Precipitation; Freeze-thaw cycle; Coupling mechanism; Formation pattern

## 青海东部黄土区降雨-冻融耦合型滑坡形成机理研究

杨海明

青海省有色第三地质勘查院, 中国·青海 西宁 810001

## 摘 要

青海东部地区地处青藏高原与黄土高原的过渡带, 广泛分布着厚层黄土。该区域具有典型的高原大陆性气候, 冬春季节冻融作用强烈, 夏秋季节降雨集中, 由此引发的降雨-冻融耦合型滑坡灾害频发, 对人民生命财产和重大工程安全构成了严重威胁。本文在详细分析区域地质环境背景的基础上, 系统阐述了降雨与冻融循环两种营力对黄土边坡的耦合作用机理。研究认为, 冻融循环主要通过改变土体的物理力学性质、冻结滞水效应与水分重分布、形成不透水冻土层三个方面为滑坡创造条件; 而降雨则作为直接的触发因素, 通过增加坡体荷载、抬高地下水位、软化滑带土等方式, 最终诱发滑坡。二者在时间上的先后衔接与空间上的叠加效应, 构成了该地区独特的滑坡发育模式。本文最后提出了“前期冻融弱化-后期降雨触发”的概念模型, 并利用数值模拟和现场监测数据进行了验证, 以期为该地区的滑坡灾害预警与防治提供科学依据。

## 关键词

青海东部; 黄土滑坡; 降雨; 冻融循环; 耦合机理; 形成模式

## 1 引言

滑坡属于一种主要的地质灾害类型, 其形成受到复杂地形条件、地质构造、水文特征和气象因素的综合影响, 在我国范围内, 黄土高原被视作滑坡灾害相对发育的区域, 青海东部地区涵盖西宁、海东地区及周边部分区域, 属于青藏高原东北边缘的关键组成部分, 特殊的地理位置让该区域同

时呈现青藏高原的寒冻环境与黄土高原的土质特点。当地黄土覆盖层较厚, 沟壑分布密集, 地质环境本身较为脆弱。

需要强调的是, 该地区的气候条件为滑坡发育提供了独特的动力背景。每年从 10 月持续到次年 4 月, 漫长冬季导致地表土体反复经历冻结和融化过程; 而在 6 月至 9 月期间, 降水相对集中, 短时强降雨现象也时有发生, 这种冬春季节冻融、夏秋季节降雨的气候节律, 使得边坡稳定性在两类不同性质却又密切关联的营力作用下不断恶化, 最终形成具有区域特色的降雨-冻融耦合型滑坡。

最近几年, 伴随全球气候变化和人类工程活动加强, 此类滑坡的发生频率和影响规模呈现上升态势, 对城镇建

【作者简介】 杨海明 (1986-), 男, 藏族, 中国青海门源人, 本科, 工程师, 从事水工环地质 (主要地质灾害, 水文地质, 生态修复等) 研究。

设、交通线路以及农田安全带来严重威胁，因此，深入探讨降雨与冻融作用对黄土边坡的耦合劣化机制，不仅具备重要理论意义，也是该地区防灾减灾工作的现实需求。本文尝试系统梳理和总结前人研究成果，结合实地考察与理论分析，进一步探讨青海东部黄土区此类滑坡的形成机理，并尝试构建一个综合性概念模型。

## 2 研究区地质环境背景概况

### 2.1 地形地貌

青海东部黄土区位于祁连山系东段与拉脊山一带，整体地势西南偏高而东北偏低，海拔普遍处在 2000 到 3000 米的范围，属于中低山丘陵地貌类型，黄土堆积覆盖在基岩山丘上，形成黄土梁、峁、坪等典型地貌，沟谷切割较深，边坡陡峭，自然坡度多在 20 度至 40 度之间，这样的地形条件有利于滑坡的发生。

### 2.2 地层与岩土特性

该区域地表主要覆盖着第四纪风积黄土以及冲洪积形成的沉积物，黄土本身结构比较松散，内部孔隙较大，垂直节理发育，还表现出一定的湿陷特性，矿物组成上以石英和长石为主，黏土矿物占比也较高，这导致它对水分和温度的变化反应比较敏感。在渗透性方面，垂直方向远大于水平方向，这种明显的方向差异对降水入渗及地下水的迁移过程有重要影响。

### 2.3 气象水文条件

研究区属于高原大陆性气候，年平均气温在 3 到 8 摄氏度之间，年降水量有 350 至 500 毫米，这些降水在一年分配得极不均匀，大约六到七成集中在 7 月至 9 月。年蒸发量明显高于降水量，冬季气候寒冷干燥，最大冻土深度能达到 1.0 至 1.5 米，每年春季融冻期和夏季雨季是滑坡的两个高发时段，不过后者常常与之前的冻融作用有紧密联系。

## 3 冻融循环对黄土边坡的弱化机理

冻融循环是一种周期性改变土体物理状态和力学性质的强烈物理风化作用，其对黄土边坡的弱化主要体现在以下三个方面：

### 3.1 土体物理力学性质的劣化

黄土中的水分在冻结时体积膨胀约 9%，冰晶的生长对土颗粒产生挤压力，破坏其原始结构连接。当土体融化时，部分黏土矿物胶结作用因水膜增厚而永久性丧失，导致土体变得松散、承载力下降。大量室内试验研究表明，经历多次冻融循环后，黄土的凝聚力  $c$  值会出现显著衰减，而内摩擦角  $\phi$  值的变化相对复杂，但总体强度呈下降趋势。这种强度的降低直接降低了边坡的稳定性。

从表 1 可以清晰地看出，随着冻融循环次数的增加，黄土的凝聚力  $c$  和无侧限抗压强度下降最为显著，这表明冻融作用主要破坏了土颗粒间的胶结联结。

表 1 黄土经历不同冻融循环次数后的力学参数变化

冻融循环次数	凝聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\phi$ (°)	无侧限抗压强度 (kPa)	弹性模量 (MPa)
0 (原状土)	25.5	28.3	210	55.2
3	18.2	27.8	165	42.1
7	14.1	27.5	132	35.8
15	11.5	26.9	105	28.3

### 3.2 冻结滞水效应与水分重分布

在冻结过程中，由于负温梯度的存在，深层未冻结区的水分会向冻结锋面迁移并冻结，这一现象称为水分迁移。其结果是，在冻结层底部或内部形成高含水率甚至饱和的冰夹层。春季融化时，上部冻土层自上而下融化，而下部尚未完全融化的冻土层形成了一个相对隔水层。这使得上部融化的水分无法及时下渗，从而在冻土层之上形成暂态饱和区，极大增加了坡体的自重和孔隙水压力。

### 3.3 不透水冻土层的形成

在深冬季，持续的低温可使坡体表层以下一定深度形成连续、稳定的冻土层。该冻土层渗透系数极低，相当于一个天然的隔水顶板。此时，如果坡体内部存在地下水或后续有冰雪融水、少量降雨补给，这些水体将被阻挡在冻土层之上，使坡体土体趋于饱和，为后续的失稳埋下伏笔。

## 4 降雨对黄土边坡的触发机理

降雨是诱发滑坡最直接、最普遍的因素。在已被冻融作用预先弱化的边坡上，降雨的触发作用更为显著。

### 4.1 增加坡体自重

降雨入渗直接增加了边坡土体的容重。由天然状态下的容重增加到饱和状态下的容重，这种自重增加虽然本身对稳定性影响有限，但与其他因素叠加时作用不可忽视。

### 4.2 抬高地下水位与产生超静孔隙水压力

降雨入渗是地下水的主要补给来源。水位的抬升直接导致滑带上的孔隙水压力增大，根据有效应力原理，这将降低滑带土的有效正应力，从而显著削弱其抗剪强度。特别是在强降雨条件下，入渗速率大于排泄速率时，会在非饱和区产生暂态超静孔隙水压力，进一步推动土体向失稳方向发展。

### 4.3 滑带土的软化效应

黄土中的黏土矿物遇水会发生软化，其抗剪强度指标会急剧降低。对于已经因冻融而结构受损的黄土，这种软化效应更为迅速和剧烈。雨水沿裂隙、落水洞等优势通道快速灌入，可直接软化深部的潜在滑带，使其迅速转化为真正的滑动面。

## 5 降雨 – 冻融耦合作用机理与概念模型

单独考虑冻融或降雨的作用不足以完全解释青海东部黄土滑坡的复杂成因。二者的耦合效应，即“1+1>2”的协同破坏作用，才是问题的核心。

### 5.1 时间上的耦合：季节性序次作用

耦合作用在时间上表现为清晰的序次性：

冬季冻结弱化期：土体经历反复冻融，结构变得疏松，强度降低，并在冻结层底部积累水分。

春季融冻不稳定期：冻土层自上而下融化，形成暂态饱和区，此时易发生以浅层滑坡和泥石流为主的地质灾害。

夏季降雨触发期：前期冻融作用已使边坡处于“亚稳定”的临界状态。此时，集中的强降雨作为“最后一根稻草”，通过前述的加载、增孔压、软化等机制，最终触发中深层

滑坡。

### 5.2 空间上的耦合：作用深度的叠加

冻融作用的影响深度通常限于活动层，而降雨入渗和地下水波动的影响深度可以更深。当降雨入渗到已被冻融作用劣化的浅层土体时，破坏从浅部开始；而当雨水通过裂隙等优势通道直接补给到深部潜在滑带时，则可能引发深层滑坡。冻融形成的裂隙网络为降雨的快速深部入渗提供了通道，极大地提高了降雨的触发效率。

表 2 降雨 - 冻融耦合型滑坡与单一成因滑坡特征对比

特征	降雨 - 冻融耦合型滑坡	单一降雨型滑坡	单一冻融型滑坡
发生时间	主要发生在夏季雨季，但与前期冻融密切相关	集中发生在雨季	主要发生在春季融雪期
滑体特征	滑体多为饱和、松散黄土，易转化为泥流	滑体含水量高，多见塑性滑动	滑体浅薄，多呈塑流状
滑动面深度	浅层至中层为主，受冻融层和入渗深度控制	变化较大，可深可浅	极浅，通常小于 2 米
触发机制	冻融预先弱化结构，降雨提供触发动力和水源	降雨入渗导致孔隙水压力剧增	融冻水在相对隔水层上集聚
预警难度	较高，需综合考虑前期冻融历史和实时降雨	较高，依赖于精准的降雨阈值	相对较低，与气温回升过程关联明显

### 5.3 “前期冻融弱化 - 后期降雨触发”概念模型

基于以上分析，本文提出青海东部黄土区降雨 - 冻融耦合型滑坡的形成概念模型（图 3），其过程可概括为：

准备阶段：边坡经历多次冻融循环，土体结构损伤，强度参数（c 值）显著降低。冻结作用引起水分向冻结锋面迁移，形成高含水量区。

临界阶段：冻土层完全融化，其在融化过程中形成的暂态饱和区使边坡安全系数降至最低。边坡处于失稳的临界状态。

触发阶段：强降雨事件发生。雨水快速入渗，一方面进一步增加坡体自重和孔隙水压力，另一方面强烈软化已受损的潜在滑带土。

失稳阶段：当降雨强度和持续时间超过某一临界阈值时，边坡沿被软化的弱面发生突然性滑动，形成滑坡灾害。

## 6 案例分析：以青海省某滑坡为例

青海省境内发生一处中型黄土滑坡，滑体长约 150 米，宽约 80 米，平均厚度约 6 米，造成下方公路中断。现场调查与监测数据回溯分析证实了上述耦合模型。

该区域在 2021-2022 年冬季经历了超过 10 次的显著冻融循环，冻土深度达 1.2 米。根据布置在坡体上的含水率传感器数据显示，在春季融冻期，坡体 1.0-1.5 米深处出现了明显的含水率峰值，证实了冻结滞水效应的存在。在滑坡发生前一周，该地区累计降雨量达到 85mm，其中最大日降雨量为 42mm。数值模拟反演表明，若不考虑前期的冻融弱化作用（即使用原状土参数计算），该边坡在同等降雨条件下仍能保持稳定；而当采用经历冻融循环后的土体参数进行计算时，边坡的安全系数在降雨过程中迅速降至 1.0 以下，与实际情况高度吻合。此案例有力地证明了冻融预先弱化在滑坡形成中的关键作用。

## 7 结语

青海东部黄土区降雨 - 冻融耦合型滑坡是该地区独特气候与地质环境条件下的产物，其形成机理是冻融循环的预先弱化作用与降雨的直接触发作用在时空上耦合的结果。

冻融循环通过劣化土体力学性质、引起水分重分布并形成相对隔水层等方式，为滑坡创造了物质和力学条件，使边坡从稳定状态进入“亚稳定”的临界状态。

降雨作为最终的触发因子，通过增加荷载、抬高孔隙水压力和软化滑带土，打破了边坡的极限平衡状态，导致失稳滑动。

本文建立的“前期冻融弱化 - 后期降雨触发”概念模型能够较好地解释此类滑坡的发育规律，对于指导该区域的滑坡灾害预警具有重要实践意义。在今后的预警模型中，除了考虑实时降雨量，还应引入能够表征前期冻融作用强度的指标。

### 参考文献

- [1] 何文文,肖培青,何子森,等. 黄土丘陵区天然植被坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应 [J]. 水土保持研究, 1-8
- [2] 贾坤钰,马莉,景璇璇. 草地覆盖密度对土壤水分降雨响应的影响——以关中平原为例 [J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2025, 45 (02): 71-77+100.
- [3] 刘庆,沈东辉,和继军,等. 极端降雨条件下黄土沟壑区细沟侵蚀形态特征 [J]. 中国水土保持科学(中英文), 2025, 23 (03): 42-52.
- [4] 李杨,孟凡光. 湿陷性黄土区桥梁桩基设计及防护处理措施 [J]. 工程技术研究, 2025, 10 (11): 194-196.
- [5] 郭斌斌. 基于临汾黄土地区极端强降雨的路基塌陷成因分析及处治措施 [J]. 交通世界, 2025, (16): 77-79.
- [6] 李海茹. 溅蚀与片蚀作用下黄土区典型土壤团聚体分离与流失机制[D]. 西北农林科技大学, 2025.