引文格式：李成林,刘严松,赖思翰,等. 基于层次分析法的青海拉加滑坡群影响因素分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(9): 36-39. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.09.009

# 基于层次分析法的青海拉加滑坡群影响因素分析

李成林[1,2]，刘严松[3,4,5]，赖思翰[1]，王　地[1]，何星慧[1]，刘雅兰[1]
（1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059；
2. 中节能建设工程设计院有限公司，四川 成都 610059；3. 中国地质调查局成都地质调查中心，四川 成都 610081；
4. 中国地质大学，北京 100083；5. 四川三合空间科技有限公司，四川 成都 610094）

**摘　要：**以青藏高原东北缘拉加新近系红层区的典型滑坡群为研究对象，对区内地质环境背景、滑坡地质特征进行了认识，厘定了滑坡的内外影响因素，并利用层次分析法（AHP）定量计算了各影响因素的权重，确定了权重次序，总结了研究区滑坡的形成演化过程。结果表明，区内滑坡的空间分布与新近系紫红色湖相碎屑岩地层关系密切，集中发育于每年的6—9月，与区内集中降雨期重叠。在反复冻融、地质构造、工程活动、地震等因素叠加作用下，岩层强度进一步降低，集中降雨诱发最终形成滑坡地质灾害。区内滑坡影响因素权重分析显示，*CR* =0.090 4，滑坡影响因素选取合理，影响作用由强到弱依次为地层岩性、降雨、冻土冻融、地下水、地质构造、工程活动、地形地貌、地震。

**关键词：**地质特征；影响因素；AHP；高原红层；拉加滑坡群
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）09-0036-04

## Influence Factor Analysis of the Lajia Landslide Group Based on Analytic Hierarchy Process

LI Chenglin[1,2], LIU Yansong[3,4,5], LAI Sihan[1], WANG Di[1], HE Xinghui[1], LIU Yalan[1]
(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Cecep Construction Engineering Design Institute Limited, Chengdu 610059, China;
3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China;
4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
5. Sichuan Sumhope Spatial Technology Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

**Abstract:** In this paper, we selected the typical landslide group in the red bed area of Lajia Neogene in the northeast edge of Qinghai Tibet Plateau as the research object, recognized the geological environment background and geological characteristics of landslide, determined the internal and external influence factors of landslide, calculated the weight of each influence factor quantitatively by using the analytic hierarchy process (AHP), determined the weight order of influence factors, and summarized the formation and evolution process of landslide in the study area. The results show that the spatial distribution of landslides in the area is closely related to the Neogene purplish red clastic rock stratum. Landslides in the area are mainly developed from June to September, which overlaps with the concentrated rainfall period in the area. Under the superposition of repeated freezing and thawing, geological structure, engineering activities, earthquake and other factors, the rock stratum strength is further reduced, and the landslide geological disaster is finally formed induced by concentrated rainfall. The weight analysis of landslide influence factors shows that *CR* =0.090 4, the selection of landslide influence factors is reasonable, and the effects of influence factors from strong to weak are formation lithology, rainfall, frozen soil freezing and thawing, groundwater, geological structure, engineering activities, landform and earthquake.

**Key words:** geological characteristic, influence factor, AHP, plateau red bed, Lajia landslide group

青海玛沁县拉加地区位于青藏高原东北部，区域气候恶劣、地质构造复杂、地表风化作用强烈，是青藏高原东北部典型的红层分布区[1]。在拉加新近系紫红色湖相碎屑岩地层区发育有北东—南西带状分布的滑坡群，滑坡数量约占全县滑坡数量的56%[2]。由于特殊的地质背景，高原红层区滑坡的形成演化往往受多种因素的耦合作用[3]。有效认识影响因素类型和作用大小对监测、防治区内滑坡地质灾害具有重要意

收稿日期：2022-06-05；修回日期：2022-08-05。
项目来源：四川省自然资源厅基金资助项目（KJ2016-07）；四川省教育厅基金资助项目（18ZB0065）；青海省科技厅重点研发资助项目（2019-SF-130）。
第一作者简介：李成林（1996—），硕士研究生，工程师，现主要从事地表过程成灾机理研究、岩土工程勘察生产管理工作，E-mail：596763621@qq.com。

义。传统滑坡地质灾害影响因素主要依据专家经验进行定性分析，分析过程无法有效量化，分析精度受专家经验和前期工作程度限制，在一定程度上影响了滑坡成因演化、风险评价等工作[4]。因此，在调查分析的基础上，本文总结了研究区地质环境背景、滑坡特征，厘定了滑坡发育的主要影响因素，并利用层次分析法（AHP）对比和定量计算各影响因素，确定其权重，以总结区内滑坡的形成过程，以期为高原红层滑坡的调查评价和区内地质灾害监测、防治提供参考。

## 1　地质环境背景

研究区位于青海省玛沁县北东的拉加镇，属拉加盆地中段；区内构造总体为北东—南西展布，主要发育拉加断裂带。断裂带出露宽度为10～30 m，主断面产状较陡，实测主断层面产状297°∠67°。断裂带南西与东昆仑断裂带交汇于玛沁县城附近，交切部位是区内地震频发的地区之一（图1）。区内除黄河两岸阶地上分布少量第四系冲洪积层外，主要发育一套新近系紫红色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩地层，为陆内咸化湖相碎屑岩层，地层与区内滑坡、泥石流等地质灾害空间关系密切。研究区海拔集中在3 000~4 200 m，属黄河流域，黄河由南东向北西穿过拉加地区，黄河两侧支流水系发育，河流侵蚀作用强烈；6—8月为集中降雨期，2020年区内降水天数达174 d，降水量达1 196.85 mm；6—9月的月均气温大于0℃，最低气温出现在1月；区内发育季节性冻土，最大冻结深度为0.65~2.46 m。

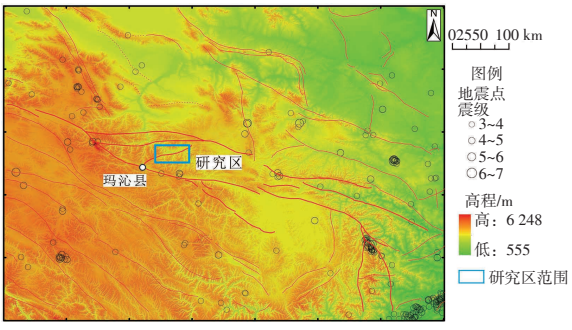



图1　研究区位置与地质构造简图

## 2　滑坡地质特征

### 2.1　空间分布概况

地质特征认识是滑坡影响因素分析的基础。研究区为玛沁县滑坡地质灾害的主要分布区，滑坡呈北东—南西带状集中发育于拉家镇周缘，形成典型滑坡群。滑坡主要为岩质滑坡，以中小型为主，发育少量大型滑坡。

### 2.2　地质特征分析

区内隆列、军功等大型滑坡特征最典型。隆列滑坡位于拉加镇北东的下知迈村，总体形态为簸箕状，主滑方向为120°，前后缘距离约为750 m，两侧距离约为1 400 m，平面面积约为110×10$^4$ m$^2$；后缘高程为3 537 m，前缘坡脚高程为3 311 m，平均坡度为17°（图2）。隆列滑坡分布在新近系上新统紫红色粉砂质泥岩夹薄层泥质粉砂岩层中，基岩产状124°∠22°；为顺向岩质滑坡，下部为新近系紫红色泥岩层，滑体上覆紫红色残坡积碎石土层；从后缘到前缘，主滑体依次发育3级次级滑体，形成顺主滑方向铲状叠置排列的特征。主滑体坡面呈折线形，后缘、前缘较平缓，中部坡度较大，形成后缘（Ⅰ）、中部（Ⅱ）、前缘（Ⅲ）3段差异明显的变形带，其中变形带Ⅰ形成多级平台、反向槽谷、断塞塘，后缘壁光滑且产状陡立，滑壁上可见左行排列的擦痕，呈左行剪切特征，远离滑壁发育的裂缝以张性为主，裂缝呈锯齿状，单条裂缝长1.5~4.6 m、宽0.2~0.5 m，裂缝两侧块体落差较小（0.1~0.2 m），基本保持原始坡面形态；变形带Ⅱ发育多级陡坎，陡坎高0.5~2.3 m，倾向南西，产状近直立，中部次级滑体后缘均为簸箕状，后缘中间部位垂向落差较大，表土解体呈松散状，表面分布有被膜状白色膏盐类结晶物质（图2a），后缘靠近两侧端的落差较小，两侧滑壁见顺滑动方向的擦痕（图2b），局部发育渗水和鼓丘（图2c、2d、2e），（西）宁—果（洛）（S101）公路北东—南西向穿过主滑体中部（图2f），公路路面可见拉张裂缝，裂缝带宽3~5 m，单条裂缝长1~9 m，宽2~30 cm（图2g、2h），局部发育鼓丘；变形带Ⅲ发育主滑体上的第三级次级滑体，次级滑体斜坡坡度平均为12°，滑体上冲沟发育，受裂隙拉伸变形错断，次级滑体中部发育鼓丘，滑体上的电线桩已倾倒，次级滑体前缘分布大量紫红色泥质松散堆积物（图2i、2j）。

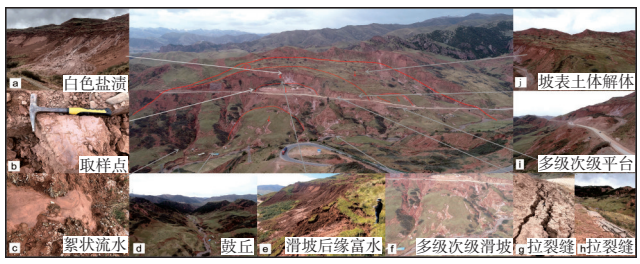



图2　隆列滑坡全貌（镜向北西）

军功滑坡地质特征与隆列滑坡类似，位于拉加镇南西侧，整体形态呈宽簸箕状，为大型顺向岩质滑坡，主滑方向为302°，在20世纪80年代就已发生变形，并于1991年8月、1992年6月、2011年8月、2019年9月发

生多次滑动[5]，在老滑体上发育多级次级滑体。

## 3 滑坡影响因素分析

研究区滑坡具有不同时期新老滑坡群聚分布、受多种因素影响的特征。根据分层解析的思路，本文分别对区内滑坡的内外影响因素进行分析，并利用AHP方法探讨各影响因素的权重，总结滑坡形成演化规律。

### 3.1 内部影响因素分析

滑坡总体呈北东—南西带状集中分布，与新近系紫红色湖相碎屑岩地层空间关系密切。分析组成滑体的泥岩、砂岩组构和物质成分发现，砂岩中Ca、Fe、K元素含量相对较高（图3）。偏光显微镜中砂岩成分为石英矿物碎屑（含量约为65%）、长石矿物碎屑（含量约为10%）和相似成分的填隙物（含量约为25%）。矿物碎屑分选中等、磨圆较差，多为棱角状—次棱角状，孔隙胶结，颗粒支撑。砂岩电子显微镜分析显示，碎屑颗粒的孔隙间充填有方解石，方解石表面发育溶蚀孔，部分石英颗粒表面可见石膏晶体。

利用Image-Pro Plus对SEM图像进行二值处理，测出粉砂岩孔隙率为0.171，微观孔隙最小、最大、平均直径分别为0.365 um、49.198 um、3.033 um；微、小、中、大孔隙占比分别为38%、58%、3.6%和0.4%。泥岩电子显微镜分析显示，粘土矿物主要为伊利石，鳞片状结构，矿物颗粒间孔隙发育，孔隙率为0.326，孔隙中含石膏、方解石。

砂岩、泥岩的物质成分和组构观测显示，研究区岩石均含有大量微观孔隙、易溶于水的盐类物质和吸水易膨胀的粘土矿物；大量微观孔隙利于水的进入并与岩石内部的盐类物质、粘土矿物发生反应，破坏岩石微观结构，从根本上降低了岩石抗压、抗剪等物理性质，在外界因素作用下，更有利于滑坡的发育。

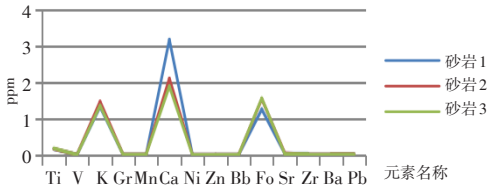



图3 砂岩元素分布特征

### 3.2 诱发因素分析

水与碎屑岩物质的相互作用是红层区岩石强度降低的根本原因[6-8]，水是区内滑坡发育的重要诱发因素。测试显示，伊利石吸水粒间体积膨胀为50%~60%，硫酸盐类矿物吸水体积可膨胀61%。在水岩作用下，易溶盐岩类矿物吸水膨胀、潮解或溶解将导致粒间结构变化，并引起岩石的初始损伤，岩石强度变低[9-11]。统计显示，区内滑坡主要发育在6—9月，与集中降雨期重叠（图4）。滑坡主要分布于黄河及其支流两岸，常年受流水侧蚀作用影响；在集中降雨期，地下水位上升，增大了水岩作用范围。

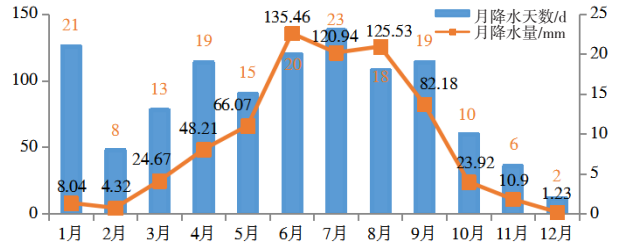



图4 研究区月降水天数与月降水量统计图

研究区为季节性冻土区，冻土最早出现在9月初，最晚出现在10月底，消融时间最早在2月中旬，最晚在3月底；冻土期孔隙水结冰体积增大，冰劈作用增大原生裂隙，反复冻融过程将进一步破坏岩土体微观结构，降低岩土体强度[12-13]。在公路开挖等高强度人类活动影响下，这些岩土体的稳定性进一步降低[14-15]。除上述因素外，断裂构造也影响滑坡地质灾害的发育。拉加盆地为裂陷盆地，控制了滑坡等地质灾害的总体展布特征。

### 3.3 影响因素权重分析

在分析滑坡地质特征和影响因素的基础上，利用AHP方法计算影响因素权重，并利用一致性指标（*CI*）、平均随机一致性指标（*RI*）和一致性比率（*CR*）判断影响因素矩阵的合理性。AHP方法在深入分析复杂决策问题本质、影响因素的基础上，利用较少定量信息，使决策思维过程数学化，在地学多因子复杂问题综合评价中具有特定优势，能有效实现多目标复杂问题中定性与定量相结合的决策分析[16-18]。本文利用SPSSPRO软件进行决策分析，根据区内滑坡的地质特征，厘定地形地貌、地层岩性、地质构造、降雨、冻土冻融、地下水、地震、工程活动8个影响因素来构建层次结构模型，进行影响因素的两两对比分析；并参照Santy的1~9标度法确定滑坡影响因素的重要性指标（表1），构建滑坡影响因素判断矩阵（表2），进行

表1 滑坡影响因素的重要性指数表

| 重要性指数 | 含义 | 重要性指数 | 含义 |
|---|---|---|---|
| 1 | 同等重要 | 1/3 | 略微不重要 |
| 3 | 略微重要 | 1/5 | 相当不重要 |
| 5 | 相当重要 | 1/7 | 明显不重要 |
| 7 | 明显重要 | 1/9 | 绝对不重要 |
| 9 | 绝对重要 | 1/2、1/4、1/6、1/8 | 两个相邻判断的中间值 |
| 2、4、6、8 | 两个相邻判断的中间值 | | |

表2　研究区滑坡影响因素判断矩阵

| | 地形地貌 | 地层岩性 | 地质构造 | 降雨 | 冻土冻融 | 地下水 | 地震 | 工程活动 | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 地形地貌 | 1 | 1/9 | 1/3 | 1/8 | 1/5 | 1/4 | 2 | 2 | 0.034 8 |
| 地层岩性 | 9 | 1 | 5 | 2 | 4 | 5 | 8 | 7 | 0.351 9 |
| 地质构造 | 3 | 1/5 | 1 | 1/7 | 1/4 | 1/3 | 3 | 2 | 0.056 2 |
| 降雨 | 8 | 1/2 | 7 | 1 | 3 | 4 | 7 | 5 | 0.269 1 |
| 冻土冻融 | 5 | 1/4 | 4 | 1/3 | 1 | 2 | 4 | 3 | 0.132 2 |
| 地下水 | 4 | 1/5 | 3 | 1/4 | 1/2 | 1 | 3 | 1/2 | 0.075 5 |
| 地震 | 1/2 | 1/8 | 1/3 | 1/7 | 1/4 | 1/3 | 1 | 1/2 | 0.024 8 |
| 工程活动 | 2 | 1/7 | 1/2 | 1/5 | 1/3 | 2 | 2 | 1 | 0.055 4 |

注：$A_{xy}$ 为列因素 $y_n$ 与行因素 $x_n$ 比较而得出的重要性指数。

综合数学运算，得出影响因素的权重系数。

通过计算得到最大特征值 $\lambda_{max}$ =8.891 9，对应的特征向量为0.417 7、4.221 2、0.674 5、3.227 0、1.585 8、0.905 0、0.297 9、0.664 7；对特征向量进行归一化，得到影响因素权重。检验判断矩阵的一致性发现，$CI$=0.127 4、$RI$=1.41（$n$=8）、$CR$=0.090 4 < 0.1，说明滑坡影响因素指数选取合理。根据影响因素权重大小，研究区影响因素重要性由大到小依次为地层岩性、降雨、冻土冻融、地下水、地质构造、工程活动、地形地貌、地震。

### 3.4　影响因素作用过程分析

根据地质特征和影响因素分析，地层岩性和长期的水岩作用是区内滑坡聚集性分布的重要影响因素。镜下分析显示，新近系发育的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩微孔隙和微裂隙发育，所含易溶性盐类矿物遇水发生水解、溶蚀（溶解）等作用，增大了岩石孔隙并降低了岩石强度，导致岩石初始损伤；长期反复的冻土冻融作用加剧了岩石微观裂隙的发育，进一步降低了岩石强度；地质构造、工程活动、地震等因素的叠加促使微孔隙、微裂隙发展成贯通性的裂隙面，在集中降雨期，岩土体失稳，形成滑坡地质灾害。受特殊的地质条件和高原环境等因素影响，区内滑坡集中分布在北东—南西带状展布的拉加盆地红层区，最终形成了拉加滑坡群。

## 4　结　语

基于野外调查，认识了对研究区地质背景和滑坡地质特征，探讨了滑坡的内外影响因素，并利用AHP方法定量计算了各影响因素的权重，总结了影响因素的重要性。拉加滑坡群分布在北东—南西向带状展布的裂陷盆地区，具有空间群聚特征，分布范围总体受裂陷盆地控制，与新近系紫红色湖相碎屑岩地层空间关系密切。区内滑坡集中发育在6—9月，与集中降雨期重叠，说明与降雨关系密切。通过分析隆列、军功两处典型滑坡的滑体岩石开展显微组构和成分发现，新近系紫红色粉砂质泥岩和泥质粉砂岩微孔隙、微裂隙发育，岩石孔隙中的易溶性盐类矿物遇水发生水解、溶蚀（溶解）等作用，对岩层微观组构造成初始损伤。反复冻融、地质构造、工程活动、地震等多因素的叠加影响，进一步降低了岩层强度，在降雨诱发下，形成滑坡地质灾害。区内滑坡影响因素作用由强到弱依次为地层岩性、降雨、冻土冻融、地下水、地质构造、工程活动、地形地貌、地震。

## 参考文献

[1] 吴红刚,马惠民,张红利,等. 青海高原红层滑坡机理的地质综合分析[J]. 西北地震学报,2011,33(增刊1):413-417

[2] 陶国新,洪文之. 滑坡对宁果公路的危害及防治对策[J]. 水文地质工程地质,1995,22(5):29-31

[3] 李廷勇,王建力. 中国的红层及发育的地貌类型[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2002,25(4):427-431

[4] 龙晓君,郑健松,李小建,等. 一种地质生态环境评估系统[J]. 测绘科学,2018,43(3):65-70

[5] 程柯力,白慧林,方宏宇. 青海省军功滑坡变形破坏特征及机理研究[J]. 甘肃水利水电技术,2021,57(1):45-51

[6] 赵明华,陈炳初,苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学 版),2007,38(2):351-356

[7] 吴道祥,刘宏杰,王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):4 173-4 179

[8] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204

[9] 程强,周德培,封志军. 典型红层软岩软弱夹层剪切蠕变性质研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3 176-3 180

[10] 谭罗荣. 关于粘土岩崩解、泥化机理的讨论[J]. 岩土力学,2001,22(1):1-5

[11] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):33-38

（下转第80页）