



引文格式: 王佳运, 石小亚, 吴子龙, 等. 伊犁谷地黄土工程地质性质与滑坡地质灾害时空分布成因[J]. 西北地质, 2025, XX(XX): 204–212. DOI: 10.12401/j.nwg.2024030

Citation: WANG Jiayun, SHI Xiaoya, WU Zilong, et al. Engineering Geological Property of Loess and Cause of Spatial and Temporal Distribution of Landslide Geo-Hazards in Yili Valley[J]. Northwestern Geology, 2025, XX(XX): 204–212. DOI: 10.12401/j.nwg.2024030

伊犁谷地黄土工程地质性质与滑坡 地质灾害时空分布成因

王佳运^{1,2}, 石小亚^{1,*}, 吴子龙³, 卢娜¹, 陈社斌¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710119; 3. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄土滑坡是伊犁谷地最为典型的地质灾害之一。为揭示伊犁谷地黄土滑坡地质灾害时空分布的成因, 针对伊犁谷地不同区域采集了 121 件黄土原状样品开展物理力学性质试验, 并分析伊犁谷地滑坡地质灾害发育特征与时空分布规律, 研究伊犁黄土工程地质性质与滑坡地质灾害时空分布规律的相关性。研究表明, 伊犁谷地滑坡在空间上主要分布于黄土发育的中低山区与山前黄土丘陵区, 集中分布在伊犁谷地东南部, 时间上, 主要集中发育在每年的 4~5 月融雪期; 较大的细颗粒含量与天然含水率以及低抗剪强度是空间上伊犁谷地东南部黄土滑坡发育的根本原因; 黄土的低渗透性、反复冻融作用造成表部黄土劣化与强度降低是导致伊犁谷地 4~5 月融雪期浅表层黄土滑坡灾害发育的主要因素。笔者研究可为伊犁谷地黄土滑坡地质灾害的成因机制研究与防治提供参考。

关键词: 黄土滑坡; 时空分布; 物理力学性质; 伊犁谷地

中图分类号: P642.3; P642.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0204-09

Engineering Geological Property of Loess and Cause of Spatial and Temporal Distribution of Landslide Geo-Hazards in Yili Valley

WANG Jiayun^{1,2}, SHI Xiaoya^{1,*}, WU Zilong³, LU Na¹, CHEN Shebin¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Province Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

3. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Loess landslide is one of the most typical geo-hazards in Yili valley, Xinjiang. In order to reveal the causes of spatial and temporal distribution of loess landslides in Yili Valley, 121 undisturbed loess samples have been collected from different areas in Yili Valley and carried out physical and mechanical properties

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-12-12; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“黄河流域重点区生态地质调查”(DD20230092), “南疆兵团师市规划建设区资源环境综合地质调查”(DD20201119)联合资助。

作者简介: 王佳运(1978-), 男, 正高级工程师, 博士, 从事黄土地质、灾害地质调查与机理研究。E-mail: 75433890@qq.com。

* 通讯作者: 石小亚(1980-), 女, 副高级工程师, 硕士, 从事地质信息与地质灾害有关工作。E-mail: 627892564@qq.com。

tests, and the development characteristics and spatial and temporal distribution of landslide geo-hazards in Yili Valley were analyzed, and then the correlation between the engineering geological properties of loess in Yili valley and the spatial and temporal distribution of landslide geo-hazards was studied. The results show that landslides in Yili Valley are mainly distributed in the middle and low mountain areas and the loess hilly areas in front of mountains, and are concentrated in the southeast of the Yili Valley; high fine particle content, high natural water content and low shear strength are the essential causes of loess landslide development in the southeastern of the Yili Valley; the low permeability of loess, and the deterioration and strength reduction of surface loess caused by repeated freeze-thaw are the main factors which lead to the development of shallow loess landslides in the snowmelt period from April to May in Yili Valley. The studies in this paper can provide reference for the research on the mechanism and prevention of the loess landslide geo-hazards in Yili Valley.

Keywords: loess landslide; spatial and temporal distribution; physical and mechanical property; Yili valley

伊犁是古丝绸之路北道要冲、丝绸之路经济带的重要支点。伊犁地区黄土分布广泛(叶玮等, 1998, 1999; 尹光华等, 2009; 安海堂等, 2010), 由于伊犁地区黄土特殊的工程地质性质, 以及伊犁地区复杂的地质背景条件与独特的气候条件, 导致伊犁地区地质灾害频发(毛伟等, 2018; 曹小红等, 2020; 孙萍萍等, 2022)。伊犁黄土的粒度特征在颗粒含量、粒径方面与黄土高原黄土有显著区别(李越等, 2019), 同时, 相比西安、兰州等地的黄土高原黄土, 伊犁黄土具有易溶盐含量高、结构不稳定等特点, 湿陷性强烈(张爱军等, 2016, 2019; 张婉等, 2017; 米文静等, 2019), 从而对伊犁黄土颗粒间的胶结作用、屈服应力、强度等力学性质影响显著(王毓国等, 2018; 莫腾飞等, 2018; 牛丽思等, 2020a, 2020b)。降水与冻融是导致伊犁谷地地质灾害发育的主要影响因素(梁世川等, 2023), 特别是冻融因素。众多学者研究认为, 季节性冻融作用在坡体内产生较高的孔隙水压力, 导致滑坡失稳(Govi et al., 1993; Harris et al., 2000; 王念秦等, 2008; LI et al., 2014)。伊犁谷地地质灾害高易发, 危害严重, 前人对伊犁谷地地质灾害的成因、分布特征与规律等方面进行了分析、总结, 认为伊犁地区广布的厚层晚更新统黄土结构疏松, 具有较大的湿陷性, 易损性大, 震陷性强, 结合伊犁的山区地形条件、丰沛的降水、冻融、地震以及人类工程活动的综合作用, 导致黄土滑坡发育, 且多发生在春夏冰雪消融期和夏季降雨时节, 集中分布于伊犁谷地南北两侧的中低山及低山丘陵区。但是伊犁谷地黄土的工程地质性质与地质灾害的发育分布规律相关性尚未进行研究。笔者拟通过采集伊犁谷地原状黄土样品并开展物理力学性质指标测

试, 分析伊犁谷地滑坡地质灾害发育特征与时空分布规律, 研究伊犁黄土工程地质性质与滑坡地质灾害时空分布规律的相关性, 为伊犁谷地黄土滑坡地质灾害的成因机制研究与防治提供参考。

1 地质环境背景条件

1.1 地形地貌

伊犁谷地地处新疆天山山脉西段, 总体呈“三山夹两谷地一盆地”的地貌格局(计文化等, 2022; 张向飞等, 2023), 山区地形占到伊犁谷地总面积的70%以上(图1)。伊犁谷地地貌类型为侵蚀褶皱断块山、剥蚀堆积块状隆起山和堆积平原3个一级地貌单元和11个二级地貌单元(曹小红等, 2020)。

1.2 地层岩性

伊犁谷地出露的地层包括元古界、古生界、新生

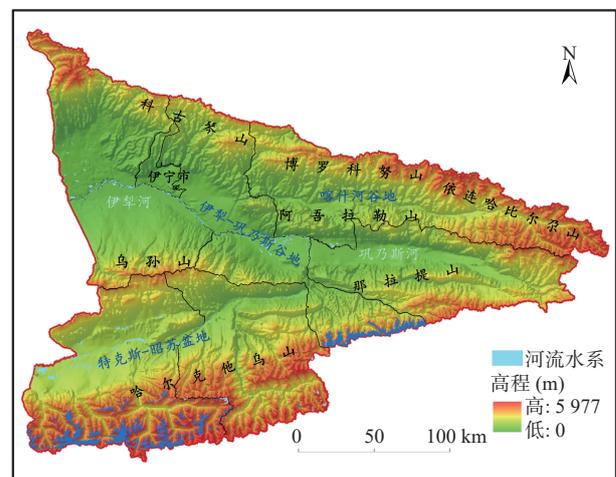


图1 伊犁谷地地形地貌图

Fig. 1 Topographic map of Yili valley

界第三系以及第四系地层,其中,伊犁谷地第四系黄土以晚更新统黄土为主体,多分布于谷地两侧的山麓地带或覆盖在山区的基岩山坡上,在垂直方向上,上限至海拔高度2 000~2 200 m,下限与河谷平原相接,厚度一般为5~30 m,山前丘陵区向山区由厚变薄。

1.3 地质构造

伊犁谷地大地构造属西南天山褶皱系西天山优地槽褶皱带。伊犁谷地处于强烈地震活动带,故新构造运动相当强烈,主要表现为继承性垂直升降和伴之而来的断裂和褶皱。新构造运动不仅造成老断裂复活,同时也产生一些新断裂,导致区内峡谷发育、地形陡峻,第四系松散堆积物抬升,具有较高的势能,为地质灾害的发育提供了有利条件。

1.4 气象水文

伊犁谷地处于欧亚大陆的中心地带,属于典型的温带大陆性气候。受地形和大气环流影响,区内降水分布很不均匀,总的趋势是东部大于西部,山区大于平原,平均年降水量为349.3 mm,降雨量集中在每年的4~6月份,降雪期为每年的10月至翌年的3月。近些年来,伊犁谷地的年降水量整体增湿趋势明显。区内地下水类型主要包括基岩裂隙水与松散岩类孔隙水。基岩裂隙水主要分布于基岩山区,松散岩类孔隙水主要分布在伊犁谷地平原地带。

1.5 人类工程活动

切坡建房与道路开挖修建活动是区内比较普遍的人类工程活动,切坡与开挖均会造成斜坡应力平衡的破坏,导致斜坡出现开裂、滑移等变形活动,在降雨、冻融等因素的作用下诱发崩塌、滑坡以及泥石流等地质灾害。

2 伊犁谷地滑坡发育特征与时空分布

2.1 发育特征

伊犁谷地地质灾害及隐患发育2 938处,主要类型为崩塌、滑坡与泥石流,其中,滑坡占比83.8%,崩塌占比10.79%,泥石流占比3.4%,其他灾害占比2.01%(新疆维吾尔自治区地质环境监测院,2014),滑坡是伊犁谷地最为发育的地质灾害类型,且以黄土滑坡为主。滑坡主要发育在伊犁谷地的中低山区与山前黄土丘陵区,据实地调查的滑坡数据统计(毛伟等,2018),按照规模划分,以中小型黄土滑坡为主,占滑坡总数的93.73%;滑坡周界比较清晰,后缘多呈圈椅状形态,平面形态多呈半圆形或长舌状,剖面形态多为直线型或凹型;按照滑坡体发育的厚度,多为10 m以内的浅层或浅表层滑坡(表1);在现状条件下,滑坡的稳定性大多处于稳定差或较差状态。

2.2 时空分布规律

2.2.1 空间分布规律

从行政区域上,滑坡主要分布于伊犁谷地东南部的新源县、巩留县以及尼勒克县(表2),其所占灾害总数的比例分别为47.48%、22.18%、15.35%,合计占比84.44%。从地形地貌上,滑坡主要分布于海拔1 500~2 500 m与1 000~1 500 m两个高程区间内,即伊犁谷地的中低山区与山前黄土丘陵区(图2),也是伊犁谷地黄土的主要分布区,分别占伊犁谷地滑坡总数的53.37%与24.41%,合计占比77.78%。从坡度上,滑坡主要分布于21°~50°的坡度区间内(图3),其中,

表1 伊犁谷地滑坡体厚度分类表

Tab. 1 Classification of landslide thickness in Yili valley

滑坡厚度 (m)	浅层 < 10 m	中层 10 m ≤ h < 25 m	深层 25 m ≤ h < 50 m	超深层 > 50 m	合计
数量统计 (处)	1 088	113	34	9	1 244
比例 (%)	87.46	9.08	2.73	0.72	100.00

表2 伊犁谷地滑坡地质灾害在行政单元上的分布数量

Tab. 2 Quantity of landslide geo-hazards in Yili valley Based on administrative units

行政单元	新源	巩留	尼勒克	特克斯	伊宁县	霍城	昭苏	察布查	伊宁市	合计
滑坡数量 (处)	1 169	546	378	123	79	51	50	48	18	2 462
占比	47.48	22.18	15.35	5.00	3.21	2.07	2.03	1.95	0.73	100

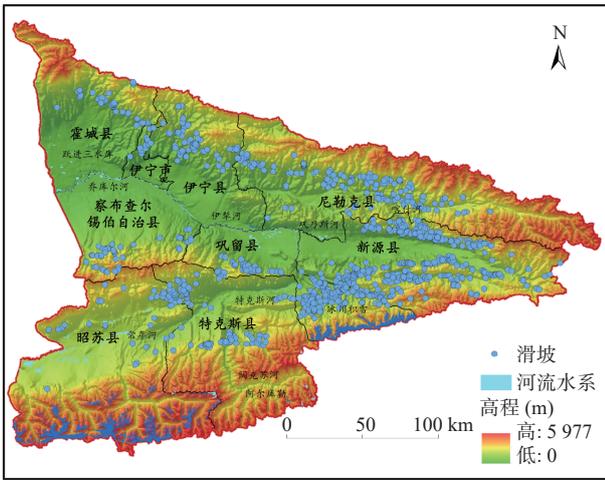


图2 伊犁谷地滑坡与地形高程分布图

Fig. 2 Distribution of landslide and topographic elevation in Yili valley

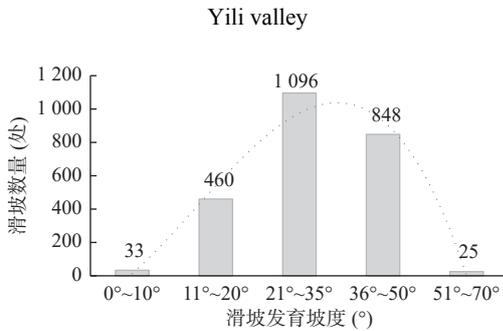


图3 伊犁谷地滑坡在不同坡度区间分布

Fig. 3 Quantity of different slope zones of landslide in Yili valley

21°~35°区间的滑坡发育数量占比 44.53%, 36~50°区间的滑坡发育数量占比 34.44%, 合计占比 78.97%。

2.2.2 时间分布规律

根据有具体发生时间的 465 处滑坡的统计分析(图 4), 伊犁谷地滑坡主要发生于每年的 3~7 月, 尤其集中在融雪期 4~5 月, 4 月、5 月发生滑坡数量占比分别为 31.84%、40%。滑坡灾害的发育与春季气温回升导致冰雪消融以及降水量快速增加有明显的关联性(图 4)。因此, 伊犁谷地滑坡灾害集中发育于春季的冰雪消融与汛期降水快速增加的重合期, 即, 每年的 4~5 月。

3 伊犁谷地黄土工程地质性质

针对伊犁谷地黄土分布区域与发育规律, 在伊犁谷地不同区域 13 处采样点(图 5)进行现场原状黄土取样, 采样深度 2.5~3.5 m, 均位于晚更新统黄土层内,

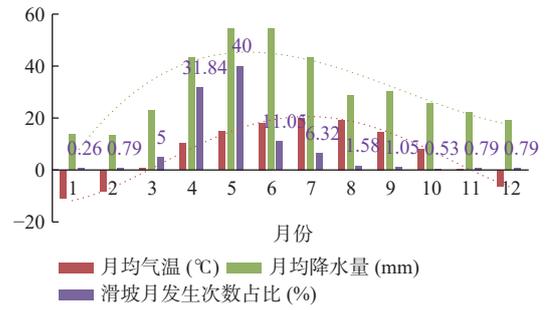


图4 伊犁谷地月均气温、月降水量与滑坡发生次数

Fig. 4 Monthly average temperature, monthly precipitation and frequency of landslides in Yili valley

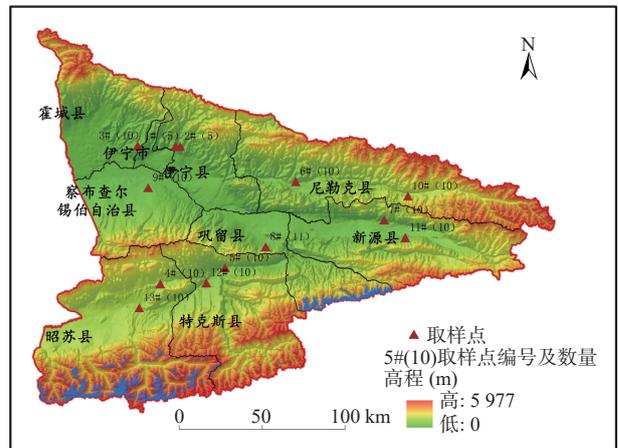


图5 伊犁谷地原状黄土样品采集点及数量分布

Fig. 5 Sampling locations and quantity distribution of undisturbed loess samples in Yili valley

共采集了 121 件原状黄土样品开展了物理力学性质试验与分析。

3.1 伊犁谷地黄土的物理性质

伊犁谷地西北部黄土天然含水率平均为 6.53%, 东南部黄土天然含水量平均 10.41%(图 6、图 7)。整体上, 黄土天然含水率由西北向东南方向逐渐增加;

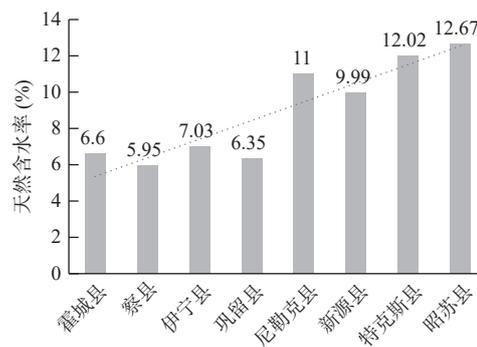


图6 伊犁谷地黄土天然含水率分布

Fig. 6 Natural water content of loess

而黄土砂含量则相反,西北部黄土砂含量平均为7.23%,最高达10%,东南部黄土砂含量平均为2.57%,最高为4.31%,整体上由西北向东南逐渐减少。

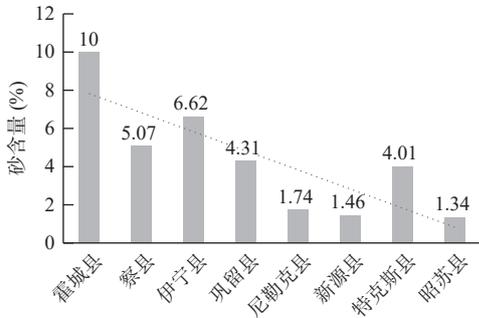


图7 伊犁谷地黄土砂含量分布

Fig. 7 Loess sand content

伊犁谷地北、东、南三面环山,为向西开敞的喇叭形谷地,受西风气流及地形影响,由西北向东南降水逐渐增多;受地形影响,在风力搬运作用下,伊犁谷地黄土颗粒由西北向东南运移沉积,且较粗颗粒相比于细颗粒先期沉积,形成了天然含水率与砂含量在伊犁谷地的空间变化规律。由于粗颗粒间有较大的孔隙,细颗粒间孔隙相比较小,导致粗颗粒含量大的黄土孔隙比较大,天然密度较小,粗颗粒含量小、细颗粒含量大的黄土则孔隙比较小,天然密度较大。伊犁谷

地西北部黄土天然密度平均为1.39 g/cm³,东南部黄土天然密度平均为1.49 g/cm³,整体上呈现出由西北而东南黄土天然密度逐渐增加的规律变化(图8)。

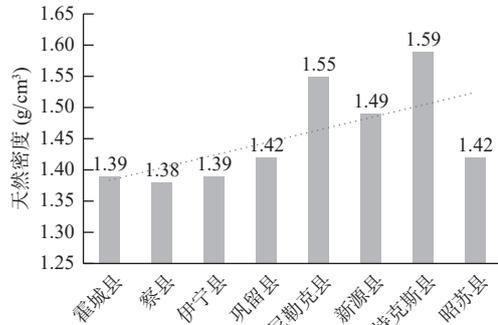


图8 伊犁谷地黄土天然密度分布

Fig. 8 Natural density of loess in Yili valley

伊犁谷地黄土液限小于40%,塑性指数大于10,属于低液限土;西北部黄土液限平均为25.40%,塑性指数平均为16.14,为低液限粉质黏土;而东南部黄土液限平均为33.01%,塑性指数平均为23.81,为低液限黏土(表3)。黄土的液限与塑性指数主要取决于细颗粒的含量有关,伊犁谷地自西北而东南砂粒含量逐渐减少,细颗粒含量逐渐增加,其液限和塑性指数也表现类似特征(图9)。

表3 伊犁谷地黄土的液塑限及塑性指数

Tab. 3 Liquid limit, plastic limit and plastic index of loess in Yili valley

指标	霍城县	伊宁县	察县	巩留县	尼勒克县	新源县	特克斯县	昭苏县
液限 (%)	25.7	28.04	22.45	36.42	33.03	32.35	30.76	32.5
塑限 (%)	13.44	7.44	6.89	2.88	10.18	7.17	12.81	12.99
塑性指数	12.26	20.6	15.56	33.54	22.85	25.18	17.95	19.51

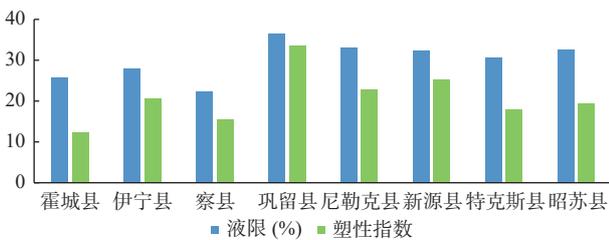


图9 伊犁谷地黄土的液限与塑性指数分布图

Fig. 9 Liquid limit and plastic index of loess in Yili valley

伊犁谷地西北部霍城、伊宁等的黄土压缩指数平均为0.15,为低压缩性土,新源、尼勒克等东南部的黄

土压缩指数平均为0.22,为中压缩性土(表4)。整体上,压缩指数由西北向东南逐渐增加(图10),土的压缩性逐渐增加。伊犁谷地西北部的黄土湿陷系数平均为0.0043,为非自重湿陷,东南部黄土湿陷系数平均为0.0415,为中等湿陷,湿陷系数呈现西北低、东南高的特征。伊犁谷地黄土的渗透性整体很低,西北部黄土渗透系数平均为28.3×10⁻⁸ cm/s,东南部黄土渗透系数平均为6.8×10⁻⁸ cm/s,由西北向东南逐渐减小。这与伊犁谷地黄土的砂粒与细颗粒含量、密度、含水率等性质有关。

表 4 伊犁谷地黄土的压缩指数、湿陷系数与渗透系数

Tab. 4 Compression index and coefficient of collapsibility and permeability

指标	霍城	伊宁	察县	巩留	尼勒克	新源	特克斯	昭苏
压缩指数	0.136	0.149	0.151	0.178	0.212	0.243	0.185	0.268
湿陷系数 (%)	0.003 2	0.005 7	0.004 1	0.077	0.047	0.05	0.023	0.010 6
渗透系数 (cm/s)	3.00E-07	2.00E-07	3.50E-07	6.50E-08	7.00E-08	4.50E-08	8.00E-08	8.00E-08

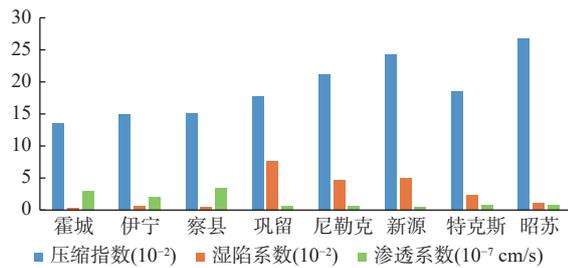


图 10 伊犁谷地黄土的压缩指数、湿陷系数与渗透系数

Fig. 10 Compression index and coefficient of collapsibility and permeability of loess in Yili valley

3.2 伊犁谷地黄土的力学性质

根据伊犁谷地黄土的直剪强度(表 5)与三轴剪切

强度数据(表 6), 随着上覆应力的增加, 黄土的剪切应力随之增加。伊犁谷地西北部黄土在 100 kPa、200 kPa、400 kPa 下的直剪强度平均值分别为 109.99 kPa、164.34 kPa、259.56 kPa, 三轴剪切强度平均值分别为 384.57 kPa、609.07 kPa、856.35 kPa, 东南部黄土在 100 kPa、200 kPa、400 kPa 下的直剪强度平均值分别为 81.67 kPa、134.34 kPa、239.56 kPa, 三轴剪切强度平均值分别为 221.38 kPa、376.57 kPa、706.77 kPa, 呈现由霍城县、伊宁县等伊犁谷地西北部向巩留、新源等伊犁谷地东南部黄土力学强度逐渐降低的特征(图 11、图 12)。伊犁谷地西北部黄土的抗剪强度明显大于东南部黄土的抗剪强度。

表 5 伊犁谷地黄土直剪强度

Tab. 5 Direct shear strength of loess in Yili valley

指标	霍城县	伊宁县	察县	巩留县	尼勒克县	新源县	特克斯县	昭苏县
100 kPa直剪强度	120.26	112.7	97.01	90.17	83.34	76.66	84.01	74.18
200 kPa直剪强度	191.26	156.37	145.39	141.34	132.79	132.48	139.24	125.87
400 kPa直剪强度	266.41	261.75	250.52	248.46	238.3	236.26	247.14	227.65

表 6 伊犁谷地黄土三轴剪切强度

Tab. 6 Triaxial shear strength of loess in Yili Valley

指标	霍城县	伊宁县	察县	巩留县	尼勒克县	新源县	特克斯县	昭苏县
100 kPa直剪强度	460.01	433.44	260.27	346.74	183.55	182.56	248.37	145.69
200 kPa直剪强度	754.85	536.55	535.8	491.97	373.97	318.38	435.88	262.63
400 kPa直剪强度	885.65	884.47	798.93	763.85	715.8	675.42	728.85	649.93

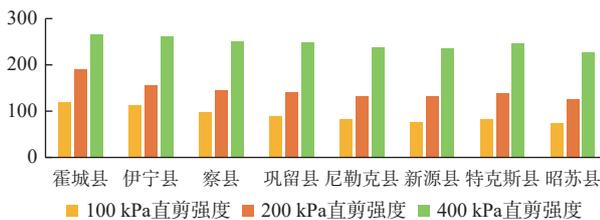


图 11 伊犁谷地不同区域黄土直剪强度

Fig. 11 Direct shear strength of loess in different regions of Yili valley

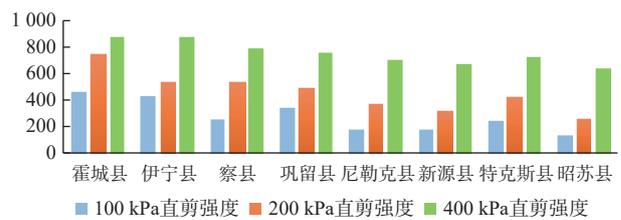


图 12 伊犁谷地不同区域黄土三轴剪切强度

Fig. 12 Triaxial shear strength of loess in different regions of Yili valley

基于三轴试验结果,绘制了伊犁谷地黄土的摩尔应力圆,并得到了粘聚力 c 值和内摩擦角 φ 值(表 7),数据表明,伊犁谷地西北部黄土粘聚力与内摩擦角平均值分别为 22.54 kPa、30.27°,东南部黄土粘聚力与内摩擦角平均值分别为 31.20 kPa、24.69°,由西北而东南

黄土的粘聚力 c 值逐渐增加,而内摩擦角 φ 值逐渐减小(图 13),这与伊犁谷地西北部黄土砂粒含量高、东南部黄土细颗粒含量高的特征有关。黄土的抗剪强度自西北而东南却是逐渐减小,说明伊犁谷地黄土的抗剪强度主要取决于内摩擦角 φ 值。

表 7 伊犁谷地不同区域黄土内聚力与内摩擦角

Tab. 7 Cohesion and internal friction angle of loess in different regions of Yili Valley

指标	霍城县	伊宁县	察县	巩留县	尼勒克县	新源县	特克斯县	昭苏县
粘聚力 C (kPa)	18.32	25.38	23.91	29.79	31.91	34.97	28.1	31.22
内摩擦角 φ (°)	34.14	29.65	27.02	25.67	23.02	19.08	27.32	28.37

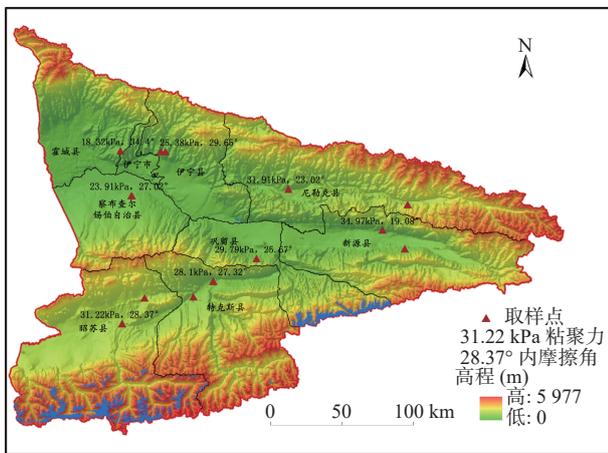


图 13 伊犁谷地不同区域黄土的粘聚力与内摩擦角

Fig. 13 Cohesive force and internal friction Angle of loess in different regions of Yili valley

伊犁谷地地质灾害主要分布于黄土分布的中低山区与山前黄土丘陵区,以中小型浅表层黄土滑坡为主,且主要分布于伊犁谷地东南部,明显受控于黄土工程地质性质。伊犁谷地黄土砂含量自西北而东南逐渐减小、细颗粒含量与天然含水率逐渐增加以及孔隙比逐渐减小的特征,导致伊犁谷地黄土的天然密度、液限与塑性指数、压缩性、湿陷性、渗透性以及抗剪强度的规律性变化,即,黄土的天然密度、液限与塑性指数、压缩性与湿陷性自西北而东南逐渐增加,渗透性逐渐降低,特别是黄土的内摩擦角随着细颗粒含量的增加而减小,而抗剪强度主要取决于内摩擦角,导致伊犁谷地黄土的抗剪强度自西北而东南逐渐降低。因此,较高的细颗粒含量与天然含水率以及低抗剪强度是伊犁谷地在空间上东南部黄土滑坡发育的根本原因。

前人研究发现,细粒土经过反复冻融作用后,结构发生破坏并变得疏松,渗透系数增大,抗剪强度降低(Chamberlain et al., 1979; Zimmie et al., 1990; 倪万魁等, 2014)。春季冰雪消融期反复的冻融作用,导致伊

犁谷地表部黄土的渗透性增加,抗剪强度降低,土体劣化、开裂变形,形成大量地表裂缝。随着 4~5 月春季气温回升导致冰雪消融,雪水大量入渗。由于伊犁谷地黄土的渗透性整体较低,入渗雪水主要赋存于黄土上部,导致斜坡上部土体强度不断降低并发生破坏,形成浅表层滑坡,这也是伊犁谷地大部分黄土滑坡具有滑动深度浅、规模中小型的发育特征的原因。因此,伊犁谷地黄土的低渗透性、反复冻融作用造成上部黄土劣化与强度降低是导致伊犁谷地 4~5 月的融雪期浅表层、中小型黄土滑坡灾害发育的主要因素。

4 结论

(1)滑坡是伊犁谷地最为发育的地质灾害类型,以中小型浅表层黄土滑坡为主,空间上主要分布在伊犁谷地黄土发育的中低山区与山前黄土丘陵区,且集中分布在伊犁谷地东南部;时间上主要集中发育在每年的 4~5 月融雪期。

(2)伊犁谷地黄土由西北而东南粘聚力 c 值逐渐增加,内摩擦角 φ 值逐渐减小,而黄土的抗剪强度自西北而东南却是逐渐减小,说明伊犁谷地黄土的抗剪强度主要取决于内摩擦角 φ 值。

(3)较大的细颗粒含量与天然含水率以及低抗剪强度是空间上伊犁谷地东南部黄土滑坡发育的根本原因。黄土的低渗透性、反复冻融作用造成上部黄土劣化与强度降低是导致伊犁谷地 4~5 月融雪期浅表层黄土滑坡灾害发育的主要因素。

参考文献(References):

安海堂,刘平.新疆伊犁地区黄土滑坡成因及影响因素分析[J].地质灾害与环境保护,2010,21(3):22-25.

- AN Haitang, LIU Ping. Genesis and influencing factors of loess landslides in Yili region in Xinjiang[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(3): 22-25.
- 曹小红, 孟和, 尚彦军, 等. 伊犁谷地黄土滑坡发育分布规律及成因[J]. 新疆地质, 2020, 38(3): 405-411.
- CAO Xiaohong, MENG He, SHANG Yanjun, et al. The development and distribution of loess landslides in Yili valley and its causes[J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(3): 405-411.
- 计文化, 王永和, 杨博, 等. 西北地区地质、资源、环境与社会经济概貌[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 15-27.
- JI Wenhua, WANG Yonghe, YANG Bo, et al. Overview of geology, resources, environment and social economy in northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 15-27.
- 李越, 宋友桂, 宗秀兰, 等. 伊犁盆地北部山麓黄土粒度端元指示的粉尘堆积过程[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 162-177.
- LI Yue, SONG Yougui, ZONG Xiulan, et al. Dust accumulation processes of piedmont loess indicated by grain-size end members in northern Yili Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 162-177.
- 梁世川, 乔华, 吕东, 等. 伊犁谷地地质灾害分布特征及主控因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 880-888.
- LIANG Shichuan, QIAO Hua, LV Dong, et al. Study on distribution characteristics and main controlling factors of geohazards in Ili Valley[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 880-888.
- 毛伟, 如黑艳, 木合买尔, 贺强. 新疆伊犁谷地滑坡地质灾害形成机制及防治措施[J]. 西部资源, 2018(3): 131-134.
- MAO Wei, RU Heiyan, HE Qiang. Formation mechanism and prevention measures of landslide geological disaster in Yili Valley, Xinjiang[J]. Western Resources, 2018(3): 131-134.
- 米文静, 张爱军, 郭敏霞. 伊犁黄土湿陷变形特性研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31(12): 49-53.
- MI Wenjing, ZHANG Aijun, GUO Minxia. Study on collapsible deformation characteristics of Yili loess[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(12): 49-53.
- 莫腾飞, 郭敏霞, 娄宗科, 等. 含水率变化对伊犁黄土变形和剪切特性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 87-94.
- MO Tengfei, GUO Minxia, LOU Zongke, et al. The effect of moisture content on deformation and shearing characteristics of Ili loess[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 87-94.
- 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922-927.
- NI Wankui, SHI Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-927.
- 牛丽思, 张爱军, 赵佳敏, 等. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2020a, 42(9): 1705-1714.
- NIU Lisi, ZHANG Aijun, ZHAO Jiamin, et al. Influences of soluble salt content on mechanical properties of Ili undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020a, 42(9): 1705-1714.
- 牛丽思, 张爱军, 王毓国, 等. 高易溶盐非饱和伊犁原状黄土的临界状态特性[J]. 岩土力学, 2020b, 41(8): 2647-2658.
- NIU Lisi, ZHANG Aijun, WANG Yuguo, et al. Critical state characteristics of high soluble salt unsaturated undisturbed Ili loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020b, 41(8): 2647-2658.
- 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 96-107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. Geo-hazards research and investigation in the loess regions of western China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 96-107.
- 王毓国, 张爱军, 赵庆玉, 等. 易溶盐含量对伊犁黄土持水特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 212-217.
- WANG Yuguo, ZHANG Aijun, ZHAO Qingyu, et al. Effect of soluble salt content on water-holding characteristics of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Supp.1): 212-217.
- 王念秦, 姚勇. 季节冻土区冻融期黄土滑坡基本特征与机理[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 163-166.
- WANG Nianqin, YAO Yong. Characteristics and mechanism of landslides in loess during freezing and thawing periods in seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 163-166.
- 新疆维吾尔自治区地质环境监测院. 新疆伊犁谷地滑坡成灾规律研究报告[R]. 乌鲁木齐, 2014.
- 叶玮, 靳鹤龄, 赵兴有, 等. 新疆伊犁地区黄土的粒度特征与物质来源[J]. 干旱区地理, 1998, 21(12): 1-8.
- YE Wei, JIN Heling, ZHAO Xingyou, et al. Depositional features and material sources of loess in Yili region, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 1998, 21(12): 1-8.
- 叶玮. 新疆伊犁地区自然环境特点与黄土形成条件[J]. 干旱区地理, 1999, 22(3): 9-16.
- YE Wei. Characteristics of physical environment and conditions of loess formation in Yili area, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 1999, 22(3): 9-16.
- 尹光华, 王兰民, 袁中夏, 等. 新疆伊犁黄土的物性指标、动力学特性与滑坡[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 899-905.
- YIN Guanghua, WANG Lanmin, YUAN Zhongxia, et al. Physical index, dynamic property and landslide of Yili loess[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 899-905.
- 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 117-122.
- ZHANG Aijun, XING Yichuan, HU Xinli, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal

- of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Supp.2): 117-122.
- 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1040-1049.
- ZHANG Aijun, WANG Yuguo, XING Yichuan, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1040-1049.
- 张婉, 张爱军, 陈佳玫, 等. 含水率和密度对伊犁黄土湿陷系数的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 211-220.
- ZHANG Wan, ZHANG Aijun, CHEN Jiamei, et al. Effect of moisture content and density on collapsibility coefficient of Yili loess[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2017, 45(5): 211-220.
- 张向飞, 陈莉, 曹华文, 等. 中国新疆-中亚大地构造单元划分及演化简述[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 1-39.
- ZHANG Xiangfei, CHEN Li, CAO Huawen, et al. Division of tectonic units and their evolutions within xinjiang, china to central asia[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 1-39.
- Chamberlain E J, Gow A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(4): 73-92.
- Govi M, Pasuto A, Silvano S, et al. An example of a low-temperature-triggered landslide[J]. Engineering Geology, 1993, 36(1-2): 53-65.
- Harris C, Lewkowicz A G. An Analysis of the Stability of Thawing Slopes, Ellesmere Island, Nunavut, Canada[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37: 449-462.
- Li T L, Li P, Wang H. Forming mechanism of landslides in the seasonal frozen loess region in China [J]. Springer International Publishing, 2014, 41-51.
- Zimmie T F, La Plante C. The effect of freeze-thaw cycles on the permeability of a fine grained soils [C]//Proceedings of 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference. Philadelphia, PA: Drexel University, 1990: 580-593.