

陇东陕甘边界降雨水毁灾情调查与启示

刘银鹏, 李同录, 胡向阳, 李萍, 付昱凯

Investigation of water induced damages triggered by rainfall in east Gansu and the implications

LIU Yinpeng, LI Tonglu, HU Xiangyang, LI Ping, and FU Yukai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-09>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CiteSpace的浅层滑坡文献计量分析

Metrological analyses on literatures of shallow landslides using CiteSpace software

吕佼佼, 范文, 高徐军, 张友科 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 43-49

四川金川-小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析

Influencing factors of landslides and rockfalls along the Jinchuan-Xiaojin highway in Sichuan

谢洪波, 刘正疆, 文广超, 陈红旗, 杨运航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 10-17

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123

青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period

魏正发, 曹小岩, 张俊才, 应忠敏, 严慧, 魏赛拉加 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 134-142

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-09

刘银鹏, 李同录, 胡向阳, 等. 陇东陕甘边界降雨水毁灾情调查与启示 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 77-83.

LIU Yinpeng, LI Tonglu, HU Xiangyang, *et al.* Investigation of water induced damages triggered by rainfall in east Gansu and the implications[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 77-83.

陇东陕甘边界降雨水毁灾情调查与启示

刘银鹏^{1,2}, 李同录^{1,2}, 胡向阳³, 李 萍^{1,2}, 付昱凯^{1,2}

- (1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃 正宁 745399;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:黄土地区降雨导致的水毁灾害常有发生, 造成严重的工程灾害和人员伤亡。对已有水毁灾害的调查和成因分析, 可为防治区灾害提供经验。2021 年 8 月中旬至 10 月初, 在陇东陕甘边界黄土地区持续了 50 多天降雨, 引发了大量水毁灾害, 导致 G211 国道中断两周。文中介绍了这次降雨在 G211 沿线及其附近的村镇引起水毁灾害的现场调查情况, 发生在村镇的水毁灾害有黄土窑洞塌陷、土质房屋和夯土围墙倒塌; 发生在道路上的水毁灾害有路基外缘沉陷开裂, 路基内侧边坡崩塌、斜坡浅层滑移及滑坡泥石流等地质灾害。这些灾害规模小、影响范围不大; 但数量多、致灾性较为普遍。文章还调查了植被对黄土斜坡稳定性的有利和不利影响。针对水毁灾害, 分析其原因并提出了村镇和道路建设中针对此类水毁灾害的预防措施。

关键词: 陇东; 水毁灾害; 窑洞; 浅层滑坡; 滑坡-泥石流; 崩塌

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)03-0077-07

Investigation of water induced damages triggered by rainfall in east Gansu and the implications

LIU Yinpeng^{1,2}, LI Tonglu^{1,2}, HU Xiangyang³, LI Ping^{1,2}, FU Yukai^{1,2}

- (1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Observation and Research Station of Water Cycle and Geological Environment for the Chinese Loess Plateau, Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China;
3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Flood-induced disaster caused by rainfall in loess area often occurs, causing serious engineering disasters and casualties. The investigation and cause analysis of existing flood-induced disaster can provide experience for disaster prevention and control areas. From mid-August to early October, 2021, more than 50 days of rainfall triggered a large number of Flood-induced disaster in the loess area of east Gansu Province. The damages made G211 national highway close for two weeks. This paper introduces the on-the-spot investigation of the flood disaster caused by this rainfall in villages and towns along route 211 and its vicinity, it happened in the villages and towns are mainly the collapse of loess living caves, collapse of earth-houses and fall of earth-walls. Geo-disasters on the road are subsidence and cracking of the soil filling subgrade, collapse of the cutting slope at inner side of the road, shallow flow-slide of the main slope. These disasters are small in scale and weak in influence, but

收稿日期: 2022-01-28; 修订日期: 2022-03-13

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金专项资助项目(42041006); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JM-167)

第一作者: 刘银鹏(1998-), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: 2914165936@qq.com

it is large in number and serious in disastrous. We also investigated the positive and passive effects of vegetation on the loess slope. Based on investigation of the flood-induced disaster, this paper analyzes its causes, and puts forward some preventive measures in the construction of villages, towns and roads.

Keywords: east Gansu Province; flood-induced disaster; loess living cave; shallow slide; landslide-mudflow; slope collapse

0 引言

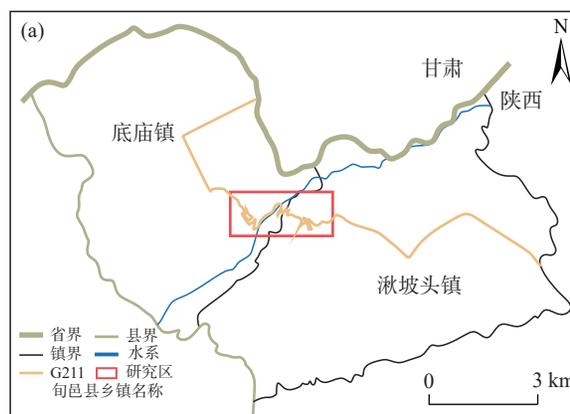
自 2021 年 8 月中旬初至 10 月初,陇东陕甘交界的正宁—旬邑县,断断续续持续了长达 50 多天的降雨,引发了黄土沟壑两侧斜坡大范围浅层滑移,村镇的土质围墙、窑洞和民房大量坍塌;道路路基沉降开裂,路肩斜坡发生滑塌、滑坡,其中 G211 国道中断两个星期,甜永高速旬邑北到罗川古城段自 10 月 1 日封闭至 12 月 31 日。由于地方政府和相关部门采取了果断的应急方案,及时疏散了受威胁的群众,封闭了危险路段,此次灾害未造成人员伤亡,但灾害迫使部分居民转移避险,并造成一定的财产损失和道路毁坏。

就在灾害集中发生的 10 月 1 日—5 日,项目组进行了现场灾情调查,目睹了部分灾害发生的过程,取得了第一手资料。鉴于类似连续降雨事件在黄土地区时有发生,历史上也多次发生过大范围水毁灾害,通过对该类灾情调查和发生规律的分析,总结经验,以便采取合理的措施,提前消除灾害隐患。

文中调查范围是 G211 国道沿线,自陕西省旬邑县的湫坡头镇,经该镇的店子河村到底庙镇(图 1)。降雨是这次水毁灾害的诱发因素,为此收集了陕西旬邑和甘肃正宁气象站 2021 年 8 月 1 日—10 月 15 日的逐日降雨资料(图 2)。可以看出,8 月 16 日—10 月 10 日断续降雨 50 多天,降雨的密度和强度不断加大。其中正宁县在 56 天里,降雨的天数达 27 天,累计降雨量 754.9 mm,仅 10 月 5 日单日降雨量达到 163.0 mm。旬邑县降雨的天数 26 天,累计雨量 490.7 mm,日最大降雨量 47.5 mm。此次降雨空间分布很不均匀,甘肃正宁县离陕西旬邑县的直线距离为 42 km,累计降雨量相差 264.2 mm。我们调查段的 midpoint 店子河村距正宁县城 19 km,距旬邑县城 22 km。虽然所属行政区归陕西旬邑县,实则离甘肃正宁县更近。据当地群众反映,今年的降雨在历史上也属罕见。

文中首先对降雨在黄土层中的入渗情况进行了调查,许多学者^[1-5]认为无论是自然降雨现场观测,还是人工降雨试验,都发现黄土中水分入渗深度有限,约 2 m,最大不超过 4 m^[6]。沿国道有大量修路取土时人工开挖的直立剖面,在直立剖面上对降雨湿润锋深度逐一进行

测量,结果表明,此次降雨过程在黄土中的湿润锋深度介于 1.5~2.0 m。如图 3(a)剖面所示,在该剖面每隔 20 cm 取样测含水率,含水率随深度曲线如图 3(b)所示。可以看出,湿润锋以上黄土接近饱和,但没有达到饱和状态,湿润锋以下则很干。湿润锋的深度控制了水



(a) 调查区域位置



(b) 调查区卫星影像图

图 1 调查区基本情况

Fig. 1 The basic situation of the survey area

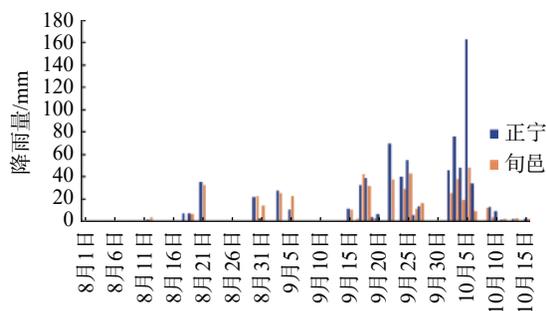


图 2 正宁县、旬邑县 8—10 月逐日降雨序列

Fig. 2 Daily rainfall sequence from August to October in Xunyi County and Zhengning County

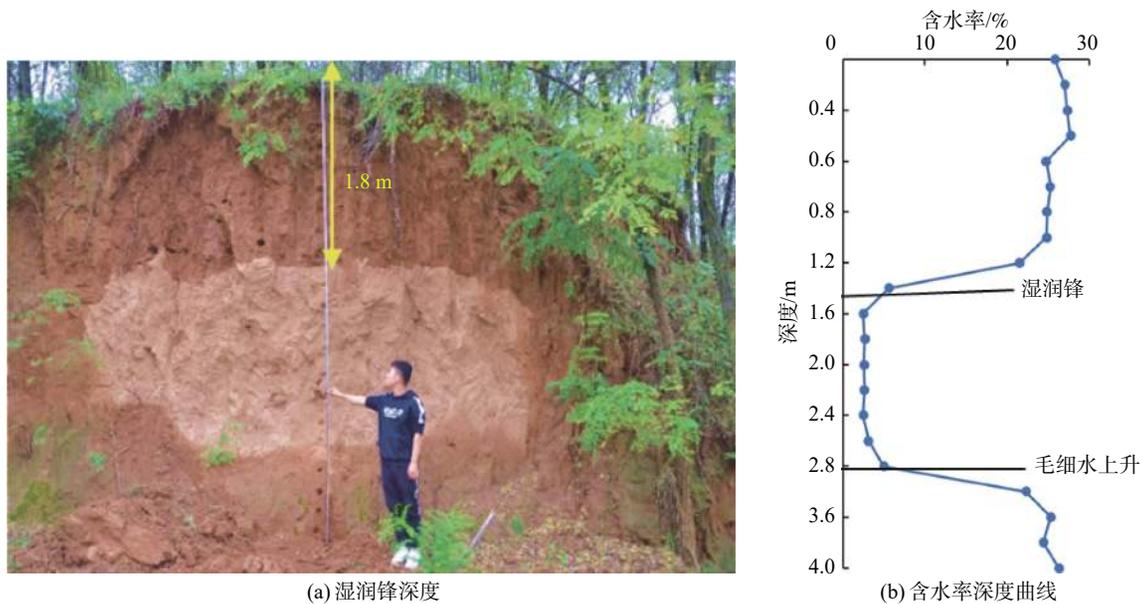


图3 黄土垂直剖面上湿润锋及含水率

Fig. 3 Wetting front and moisture content on a vertical loess profile

毁灾害的性质和发育范围,坡脚部分含水率升高是由于毛细上升引起^[7],毛细上升高度和浸湿范围介于0.8~1.5 m。

文中没有针对特定区域所有灾点的逐一排查,只是对湫坡头镇至底庙镇之间的村镇的居民宅院破坏情况和G211国道损毁情况进行了调查,发生在村镇的水毁灾害有黄土窑洞塌陷、土质房屋和夯土围墙倒塌;发生在道路上的水毁灾害有路基外缘沉陷开裂,路基内侧边坡崩塌、斜坡浅层滑移及滑坡泥石流等地质灾害,总结了这些水毁的特点,并调查了植被对黄土滑坡和崩塌的影响。

1 居住地居民宅院破坏情况

1.1 窑洞坍塌

重点对陕西旬邑湫坡头镇和该镇店子河村居民宅院进行了调查,发现人们居住的土窑和土房及土墙三类土质设施部分损坏或完全毁坏。在底庙镇和店子河村破坏的窑洞有两类,一类当地人称为“箍窑”,是人造窑洞,先用砖砌成窑洞的内拱,周围及顶部用夯土回填而成。窑洞顶回填土2.0 m左右,这类窑洞完全塌落,调查的“箍窑”坍塌之前,主要用来存放农具,村民居住在外面砖房,无人伤亡,如图4(a)所示。第二类是在天然黄土地层中开挖出的窑洞,称为“土窑”^[8],如图4(b)所示。该类窑洞整体坍塌少,但洞顶以上直立边坡的坡缘大部分塌落,堆土淹埋部分窑洞口。调查的“土窑”少部分还有人居住,但无人员伤亡。一般来说,黄土窑洞

的破坏与年久失修、历年降水入渗和风化作用、季节冻胀、生物活动、地震等均有关,而此次调查中这两类窑洞破坏明显是由持续的降雨造成的,破坏形式不同的原因和拱顶土层厚度及湿润锋深度有关。“箍窑”拱顶2.0 m左右的回填土完全浸湿,单层砖砌的拱顶不足以支撑丧失强度的拱顶,导致彻底陷落。自然黄土中开挖的窑洞拱顶一般留有3~6 m的土层,湿润锋最深到2 m处,拱顶还有1~4 m的干土层,这部分强度高的土层还能支撑上部的土层荷载。而窑洞顶,湿润锋以上的直立边坡,由于浸湿强度减弱发生滑塌。

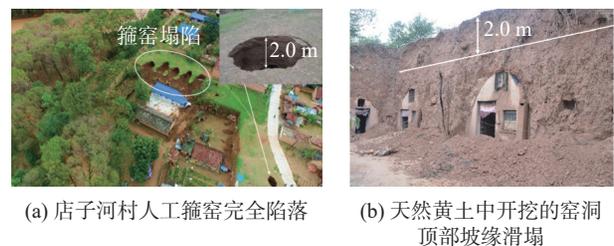


图4 店子河村两类窑洞破坏情况

Fig. 4 Damages of the two types of living caves in Dianzhe Village

1.2 土房倒塌

底庙镇、店子河村都有大量土坯房屋倒塌。黄土地区人们自古有居住窑洞的习惯。20世纪80年代初,房子才开始出现,第一代房子墙体都是土坯或夯土,墙内嵌木质立柱,立柱支撑房顶,房顶也是木质构架,上铺泥草和青瓦防水(图5)。这类房子已经年久失修、风化破损,目前已基本废弃,但大部分还没有拆除,作为临时

住地和存放物资的场所。此次持续降雨导致土墙的墙根被屋顶滴下的雨水溅湿,房顶的泥皮和青瓦本身是透水的,短期降水不会有太多渗入;降雨时间一长,雨水透过青瓦和泥草渗入墙体,约 3 m 高的墙体,自上、下两个方向几乎全被浸湿,无法承受墙体自重和屋顶的荷载而倒塌,留下残垣断壁。一些幸存的土房也成危房,局部开裂或倾斜。



(a) 湫坡头镇房屋倒塌 (b) 店子河村房屋倒塌

图 5 房屋倒塌情况
Fig. 5 Collapse of the houses

1.3 土墙倒塌

与土坯房同期修建的老式院落,围墙也是用黄土夯筑的。这次降雨导致大部分这类土墙倒塌,土墙和土房倒塌的原因类似。围墙高度一般 3 m,墙根的毛细水上升高度约 1 m,湿润锋深度约 2 m,墙体几乎全部被浸透,无法承载其自重。如图 6 所示的院落围墙,全部或部分倒塌,留下残垣断壁。



图 6 湫坡头镇夯土墙倒塌情况
Fig. 6 Damage of the earth wall in Qiupotou town

2 道路损毁情况

2.1 路基沉降开裂

G211 国道 K495+860 m 至 K506+315 m 段穿越店子河沟(图 1),在店子河两侧斜坡上弯弯曲曲盘山而上。其中 K501 至 K506 段位于湫坡头镇一侧,半填半挖路基较多。在长 5 km 的爬坡路段,共出现路基开裂 6 处,累计长度 1.5 km,占该路段总长的 30%(图 7)。这类路基沉陷都出现在路基外缘填方一侧^[9-10],路基开裂发生在填挖交界处,说明路基填土的压实度不够,填挖交界面也没有处理好,开裂最宽处达 20 cm,外侧护栏严重变形,部分已经倾倒。



(a) G211-K505+620m (b) G211-K503+600m

图 7 G211 路面局部沉降开裂情况
Fig. 7 Settlement and cracking of the subgrade on G211 national road

2.2 路肩直立边坡小型滑塌

G211 虽为国道,但在该路段等级低,为三级公路,路肩和路基外侧都为黄土斜坡,但没有护坡,植被覆盖良好。调查路段有许多修路时开挖的直立边坡,高度 5~15 m。这类直立边坡整体稳定,可以看到直立面上黄土裸露,在降雨中仍保持干燥状态,有较高的强度。而在直立坡的坡顶,湿润锋以上被浸湿的土体大多发生滑塌,类似土质直立边坡的破坏现象较为普遍^[11]。这类滑塌的规模很小,滑塌厚度一般为 1 m 左右,滑移面倾角约 30°,滑体的体积小,只是堆积在道边的沟中,阻塞排水设施,没有直接阻塞道路的情况。然而这类滑塌对交通的影响不在其本身,而在其另一面。该区域植被非常发育,以当地优势树种刺槐、白杨、山杏等为主,树随坡顶的滑塌一起倒下,横在路上,阻断道路。如图 8(a)直立边坡坡高 4.1 m,湿润锋深 1.5 m,毛细水上升 0.8 m,湿润锋以上发生滑塌,坡缘植被为蒿草和灌木,随黄土一起滑塌。图 8(b)所示的坡高为 7.7m,湿润锋深 1.6 m,倾倒刺槐根深 1.4 m,树杆直径 0.38 m,刺槐树与滑塌一起滑出后掉落坡脚下,滑体阻断水渠,刺槐阻断道路。G211K506 至 K495 路段,共有此类滑塌 42 处,倒下的大树阻断道路 11 处,虽不致命但数量多对交通影响大。



(a) G211-K504+85路侧坡顶滑塌 (b) G211-K506+190路侧坡顶滑塌

图 8 直立边坡坡顶滑塌
Fig. 8 Collapses on the top of the vertical slope

2.3 斜坡浅层滑移及滑坡泥流

这次持续降雨在陇东陕甘边界处引发了大面积的斜坡浅层滑移,这类滑移发育在黄土沟谷的两侧(图 9)。现场调查表明,该类滑坡滑动面深度浅,一般不超过

2 m,与上面所述的湿润锋深度是一致的。发生滑移的斜坡坡度一般在 $35^{\circ} \sim 75^{\circ}$,这和 2013 年陕北大面积浅层滑移的情况比较一致^[12]。这类浅层滑移大部分位于无人居住的区域,发生的面积大,但致灾较少,对地表植被破坏比较严重。

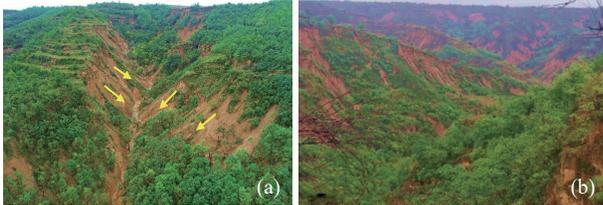


图 9 店子河沟谷两侧斜坡大面积浅层滑移
Fig. 9 Shallow slides in the sides of the loess gullies near Danzhihe Valley

该类滑坡大多转化为流态或者泥流,顺坡滑移较远的距离。这次降雨在 G211 公路沿线诱发了 2 处这类规模较大的滑坡阻塞了道路。1 处为 K504+670 m 段滑坡,位于店子河沟的左岸斜坡上。公路盘山而下,在图 10(a)上可见。该段路面上斜坡有 3 处小滑坡,路面下 2 处滑坡。剪出口都在上层公路内侧陡坎之上,斜坡坡度 39° ,滑坡顺坡长分别为 50 m、80 m、100 m,宽度分别为 5 m、4 m、6 m,滑体厚度 1.5 ~ 2.0m。滑体转变为流态,倾泻到上层路面,并越过路面,冲倒外侧护栏,流向路基下方斜坡,左侧滑体停留在半坡上,右侧两个滑体汇聚一处,停滞在下层路面上。滑体淹埋了上层路面 250 m,下层路面 100 m。由于转化为泥流,路面外侧堆积体厚度 20 ~ 30 cm,车辆和行人还能勉强通过,见图 10(b)。1 处为 K498 段滑坡,位于店子河沟的右岸斜坡上(图 11)。滑坡出口也在公路内侧陡坎之上,高位剪出,斜坡坡度 60° ,顺坡长 12 m,沿路宽度为 127 m,滑体堆积在路面,阻塞了排水沟,滑体为流态,厚度较薄,还可以通行。除这 2 处较大滑坡外,还有多处类似小型滑坡,堵塞了公路内排水沟、乔木倒塌、挡住道路。

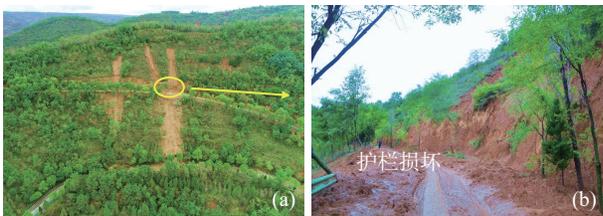


图 10 G211-K504+670 m 陡倾浅层滑坡
Fig. 10 Mud flow of steep slope landslide

这类浅层滑坡是降雨直接诱发的,降雨入渗土体的重度增加不大,土体重度的增加虽然使斜坡土体的下滑



图 11 G211-K498 陡倾浅层滑坡
Fig. 11 Mud flow of steep slope landslide

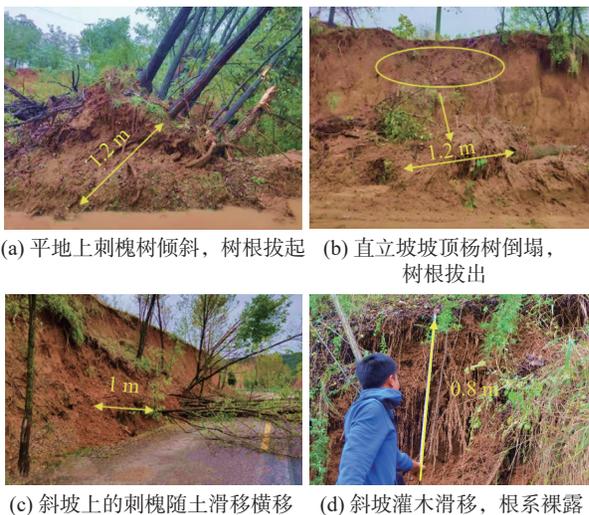
力变大,但同时也增大了斜坡土体的阻滑力,所以重度对斜坡稳定性不敏感^[13],因此水的入渗引起强度降低是其关键原因。

降雨中,浅层黄土是一个由于变湿的过程,干的黄土有很高的基质吸力,也就是有很低的负孔隙水压力,浸湿后吸力大幅度降低,孔隙水压力显著升高,当达到饱和时,吸力和相应孔隙水压力都接近 0。尽管湿润锋以上的滑体接近饱和状态,但是这部分水属于悬挂毛细水,滑动前滑体包括滑动面上的孔隙水压力为一个不大的负值,也就是有很小的基质吸力^[14-15]。稳定性分析时,可以将基质吸力按 0 考虑,此时的强度参数应该取饱和黄土的有效强度参数,孔隙水压力取 0。我们对饱和和重塑黄土的慢剪试验得出其有效黏聚力为 0,有效内摩擦角为 30° 。考虑到原状黄土还有一定的黏聚力,与这次现场调查得到的这类浅层滑坡主要发生在 35° 坡的现象比较一致。对滑体土的基本物理指标测定表明,滑体土的饱和含水率为 34.5%,而液限为 33.6%,可见当滑体接近饱和时,一经扰动就会由固态转化为流态,形成泥流^[16-17]。

3 植被对滑坡滑塌的影响

这次由滑坡和滑塌直接造成的道路阻塞段少,倒下大树阻断道路段多。该地区植被发育,覆盖率基本上为 100%,植物类型以乔木为主,夹杂灌木和草本植物,乔木有白杨、刺槐、国槐、侧柏和山杏等。植被对坡面冲刷起到很好的防护作用,植被覆盖的斜坡少有侵蚀裸露的地方。植物根系对土层有锚固作用,根系的强度远大于土的强度,对其作用范围内的土体稳定性有显著加固作用^[18-19]。这次降雨导致斜坡上的大量大树连根拔出,甚至平地上的大树倾斜或倾倒,根也被拔出,见图 12(a),这使我们有必要对根系的长度和范围进行测量统计。刺槐、白杨等优势树种的测量表明,根系密集段的深度在 0.8 ~ 1.2 m 以上,最大的一颗杨树,直径

0.38 m, 树干高 8 m, 其主根系深 1.2 m, 向下非常稀疏, 见图 12(b)。这意味着当降雨湿润锋不超过主根系的深度, 即 1.2 m 时, 根系的锚固作用下, 即使斜坡很陡, 也不容易滑动^[20]。若湿润锋进入主根系以下, 根系的锚固作用消失, 而大树本身有加载作用, 大树重心高, 对根系部分还起到一个向坡下的弯折作用。对于深层滑坡, 这种作用微不足道。对于只有不到 2 m 的浅层滑坡, 这种作用占到下滑力的很大一部分。如图 12(c) 和图 12(d) 所示, 斜坡乔木和灌木发生滑移, 堵塞公路, 此时的植被负面作用显著, 比没有植被时更容易发生滑动^[21-22]。这次降雨测得的湿润锋为 1.5~2.0 m, 远低于主根系的发育深度, 导致大量斜坡浅层土和植被一起滑下, 滑面大面积裸露。



(a) 平地上刺槐树倾斜, 树根拔起 (b) 直立坡坡顶杨树倒塌, 树根拔出



(c) 斜坡上的刺槐随土滑移横移 (d) 斜坡灌木滑移, 根系裸露

图 12 各类树和灌木根系测量

Fig. 12 Measurement of the root length for trees and shrubs

由此可见, 植被对浅层滑坡的作用是双重的作用, 当湿润锋高于主根系底界时, 根系锚固有稳定斜坡的作用; 湿润锋低于主根系底界时, 锚固作用消失, 重力加载和弯折利于斜坡滑动。湿润锋深度取决于降雨持续时间, 一般降雨湿润锋深度不足 1 m, 此次降雨在历史上较为罕见的, 这次大面积滑坡是在这种极端降雨条件下引起。

4 结论

这次持续降雨引发的水毁灾害虽然不是毁灭性的, 也无人员伤亡, 但对当地交通和居民生活造成了较大影响, 给应急管理的工作也造成了巨大压力, 能以此为教训, 采取一些预防措施, 防患于未然, 在下次灾害来临时沉着应对。通过此次调查获得以下几点结论:

(1) 这次降雨造成城镇的水毁主要是已经废弃的窑洞、土房和土墙倒塌, 针对这些废弃场地, 在建设新农村的同时, 建议将这些废弃场地清除, 变为新的耕地或建设用地, 既节约土地资源, 也消除安全隐患。

(2) 路面开裂部分, 主要是由于填土不均匀沉降引起, 尚未发现整体滑移的现象。需要回填裂缝, 填平路面, 修复护栏。

(3) 调查发现, 对于较低的黄土边坡, 一般坡高不大于 15 m, 直立坡比陡坡更稳定。直立坡坡面在降雨时淋不到雨水, 黄土保持干燥状态, 具有高的强度; 陡坡坡面接受雨水, 更容易破坏, 因此低的人工边坡采用直立坡更好。

(4) 直立坡整体稳定, 但是坡顶浸湿部分容易滑塌, 常见直立坡都有植被, 当湿润锋低于根系深度时, 坡边缘的大树随滑塌倒下, 阻断公路。为此在路基内侧直立边坡坡顶一定范围, 如栽种根系较深的树木或 5 m 内代之以藤类和灌木。对路基内侧坡度大于 35°, 水平距离 10 m 以内的斜坡也做相同处置。这样即便是滑塌或滑坡, 不会因倒下的大树阻路或砸损过往车辆。

(5) 对出现大面积浅层滑移的斜坡, 涉及范围广且未来潜在滑移区也很难准确确定, 可不作专门治理。对道路造成影响的地段, 可清理道路, 修复护栏。再出现类似本次极端降雨时, 及时预警封闭道路。

参考文献 (References):

- [1] 李萍, 李同录, 王阿丹, 等. 黄土中水分迁移规律现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1331-1339. [LI Ping, LI Tonglu, WANG Adan, et al. Field experimental study on water migration in loess [J]. Geotechnical Mechanics, 2013, 34(5): 1331-1339. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张常亮, 李萍, 李同录, 等. 黄土中降雨入渗规律的现场监测研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(6): 728-734. [ZHANG Changliang, LI Ping, LI Tonglu, et al. In-situ observation on rainfall infiltration in loess [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 728-734. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李萍, 李同录, 付昱凯, 等. 非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3551-3560. [LI Ping, LI Tonglu, FU Yukai, et al. In-situ observation on regularities of rainfall infiltration in loess [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3551-3560. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HOU X K, VANAPALLI S K, LI T L. Water flow in unsaturated soils subjected to multiple infiltration events [J]. Canadian Geotechnical Journal. 2020, 57(3): 366-376.

- [5] LI P, LI T L, VANAPALLI S K. Influence of environmental factors on the wetting front depth: A case study in the Loess Plateau [J]. *Engineering Geology*, 2016, 214: 1 - 10.
- [6] 刘海松,倪万魁,杨泓全,等.黄土路基降雨入渗现场试验 [J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(1): 60 - 63. [LIU Haisong, NI Wankui, YANG Hongquan, et al. Site test on infiltration of loess subgrade under rainfall circumstance [J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 2008, 30(1): 60 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李萍,李同录,侯晓坤,等.黄土中毛细上升速率的现场测试 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 503 - 507. [LI Ping, LI Tonglu, HOU Xiaokun et al. Field experiment on rate of capillary rise in loess [J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(6): 503 - 507. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 雷祥义,魏青珂.陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究 [J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 64 - 69. [LEI Xiangyi, WEI Qingke. Study on the origin and countermeasure of the casualty loess landfalls in the Northern Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 64 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 莫海军.公路水毁灾害综合防治措施分析 [J]. *大科技*, 2019, 31: 105 - 106. [MO Haijun. Analysis of comprehensive prevention and control measures of highway flood disaster [J]. *Super Science*, 2019, 31: 105 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 熊玲.分析公路水毁病害形成机制与治理 [J]. *黑龙江交通科技*, 2021, 44(2): 60 - 61. [XIONG Ling. Analysis of the formation mechanism and treatment of highway flooding [J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2021, 44(2): 60 - 61. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 江漫雪.在建二级公路边坡滑塌的病害调查与形成机制研究 [J]. *交通世界*, 2021(20): 2. [JIANG Manxue. Disease investigation and formation mechanism of slope collapse of secondary highway under construction [J]. *Transpo World*, 2021(20): 2. (in Chinese with English abstract)]
- [12] WANG G L, LI T L, XING X L, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan 'an, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 73(12): 7933 - 7944.
- [13] 孙乾征,江兴元.非饱和理论下各因素变化对浅层滑坡影响 [J]. *公路*, 2020, 65(4): 36 - 41. [SUN Qianzheng, JIANG Xingyuan. Influence of various factors on shallow landslide under unsaturated theory [J]. *Highway*, 2020, 65(4): 36 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 邢鲜丽,李同录,李萍,等.黄土抗剪强度与含水率的变化规律 [J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(3): 53 - 59. [XING Xianli, LI Tonglu, LI Ping, et al. An analysis of the influence of declined water levels on the reliability of the pipeline protection retaining wall [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(3): 53 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [15] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 379 - 392.
- [16] 蔺晓燕,李同录,张子然,等.陕西华县高楼村黄土滑坡——泥流的成因分析 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 282 - 288. [LIN Xiaoyan, LI Tonglu, ZHANG Ziran, et al. Cause of gaoloucun loess flowslide in Huaxian County, Shaanxi Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 282 - 288. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 习羽,李同录,邢鲜丽.灌渠渗漏诱发的黄土滑坡泥流触发机理分析 [J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(1): 135 - 142. [XI Yu, LI Tonglu, XING Xianli. Analysis of the triggering mechanism of a loess flowslide induced by water canal leakage [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(1): 135 - 142. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 1 - 47. [WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: Theories and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 1 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 徐则民,黄润秋,唐正光,等.植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 438 - 450. [XU Zemin, HUANG Runqiu, TANG Zhengguang, et al. Limitation of biotechnical slope protection and contribution of vegetation to deep seated landslide preparation [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 438 - 450. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究 [J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(3): 10 - 17. [SUN Changzhong, HUANG Baolong, CHEN Haibin, et al. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the loess plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(3): 10 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等.子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系——以富县“7·21”特大暴雨为例 [J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4635 - 4643. [HAN Yong, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the “7·21” disaster in Fuxian County. [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4635 - 4643. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕锋.黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探 [J]. *中国水土保持*, 1999, 5(3): 13 - 16. [HOU Qingchun, HAN Ruilian, HAN Shifeng. Preliminary study on the problem of “dry soil layer” of artificial grassland in Loess Plateau [J]. *China Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3): 13 - 16. (in Chinese with English abstract)]