

刘佳, 郭海燕, 邓国卫, 等. 川藏铁路四川段沿线诱发地质灾害降水阈值研究[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 83–91. [LIU jia, GUO Haiyan, DENG Guowei, et al. Study on Precipitation Threshold of Geological Disasters along Sichuan – Tibet Railway[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 83–91. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.015.]

川藏铁路四川段沿线诱发地质灾害降水阈值研究^{*}

刘 佳^{1,2}, 郭海燕¹, 邓国卫¹, 徐金霞¹, 钟燕川¹, 徐沅鑫¹

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072;
2. 四川省气候中心, 四川 成都 610072)

摘要: 利用2009—2019年川藏铁路沿线四川段地质灾害数据、国家气象中心逐小时降水量资料, 统计了地质灾害与降水的关系, 发现研究区89%的滑坡灾害和96.6%的泥石流均发生在汛期, 且地质灾害高发路段位于青衣江暴雨区, 与四川地区降水时空分布特征相吻合。分析雨型、降雨强度、前期降雨等因子对地质灾害的影响, 发现快速激发, 中速激发和慢速激发的地质灾害分别约占33.3%、25.9%、40.8%, 表明降雨历时并不是影响地质灾害发生的最直接因子, 前期降雨的作用不可忽视; 结合环境因子对地质灾害进行了分区, 基于降雨历时–雨强(I–D)预报模型建立了川藏铁路沿线四川段引发地质灾害的降水阈值分布。利用该降水阈值的分布特征, 检验了2019年引发地质灾害的降水量, 发现阈值雨量的判别方法较为科学, 具有较强的参考价值。

关键词: 地质灾害; 降水类型; 灾害降水阈值; 川藏铁路

中图分类号: X43; P642; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2022)01–0083–09

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.015

川藏铁路作为全国铁路网中长期规划的重要组成部分, 东起四川成都, 经雅安、康定、理塘、白玉过金沙江入藏, 再经昌都、林芝抵达西藏拉萨, 是西藏及沿途区域的重要东出通道。但由于该线路位于青藏高原及其边缘地带, 地势起伏大, 地形切割破碎, 地震活动剧烈, 具有相对高差大、沟谷深切、坡体稳定性差等特点, 山洪、崩塌滑坡等地质灾害成为影响该区域交通廊道安全的关键制约性因素^[1–5]。其中, 川藏铁路四川段滑坡和泥石流具有数量多、规模大、分布广泛、难以整治等特点, 尤其是在雅砻江、澜沧江、怒江、帕龙藏布及其支流的两侧^[6]。因此, 基于地质灾害研究开展的线性工程分析, 对于川藏铁路的前期选线、中期建设和后期运营中的灾害管理具有重要意义。

引发地质灾害的因素很多, 降水是引发地质灾害的最重要因素^[7]。因此, 国内外许多学者相继开展了地质灾害与降雨关系的研究, 探讨地质灾害预警预报方法^[8–12]。其中滑坡、石流致灾临界雨量阈值的确定是关键。目前针对阈值确定的方法主要分为统计法和动力方法^[13]。其中统计法

主要受灾情资料短缺以及灾害起动方式多样的限制^[14–18], 动力方法一般用于小范围流域单沟、单坡的临界雨量计算^[19–20]。综上研究显示, 清楚地了解诱发灾害的降雨特征, 确定致灾临界雨量阈值, 建立合适的预报模型, 对研究区域滑坡、泥石流特征及有效预报有重要意义。

众所周知, 四川区域地质灾害的易发性风险高, 针对该区域地质灾害研究已广泛开展, 谭万沛等^[9]根据不同方法对全省泥石流灾害进行分区风险分析, 刘海知^[21]、邓国卫^[22]等人在此基础上建立了雨量阈值模型, 但受降水局地性和地形影响, 模型针对性较弱; 一些学者针对某个小流域或小区域建立降水阈值模型, 但存在适用局限^[23–24]。以上针对区域和单点灾害的降水阈值分析方法并不适用于线性工程的地质灾害。目前, 仅有少量学者开展了地质灾害对既有铁路工程的定性风险评估^[25–31], 而根据地形和气候条件对川藏铁路沿线地质灾害进行综合分区, 并探讨该区域地质灾害与降水关系的研究较少。因此, 本研究考虑到2008年汶川地震发生后, 地质灾害极为

* 收稿日期: 2021–06–16 修回日期: 2021–08–27

基金项目: 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目–青年专项(SCQXKJQN2020054); 国家气候中心委托项目“面向路地综合需求的气象灾害影响与风险评估研究”; 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(SCQXKJYJXZD202102)

第一作者简介: 刘佳(1985–), 女, 汉族, 陕西咸阳人, 高级工程师, 主要从事气候变化和风险区划研究. E-mail: liujia851229@163.com
通讯作者: 郭海燕(1979–), 女, 汉族, 山西吕梁人, 高级工程师, 主要从事气象灾害风险与气候影响评估研究.

E-mail: ghy–824@163.com

易发, 收集了2008年汶川地震之后到2019年成都至甘孜段交通廊道内的滑坡和泥石流事件, 结合降雨资料, 分析诱发川藏铁路四川段沿线地质灾害的降雨特点和降雨阈值, 旨在为线性工程的地质灾害预测预报作贡献。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文利用四川省地质环境监测总站和四川省气候中心共同收集的川藏铁路沿线2009—2019年495个泥石流和滑坡灾害点资料, 该资料主要通过野外实地考察、野外访问、文献查询获得, 收集到的各县市地质灾害暴发次数见表1; 气象数据主要来源于中国气象局信息中心提供的川藏铁路沿线219个区域自动站和27个常规站2009—2019年逐时降水资料, 选取了质控后的观测数据。所选择的气象台站位置如图1。其中, 27个常规站点资料主要用于2009—2019年降水各项指标的分析; 区域自动站资料将用于2004—2019年提高暴雨精细化程度的分析; 地理信息数据包括: 国家测绘局提供的1:5万数字高程数据。

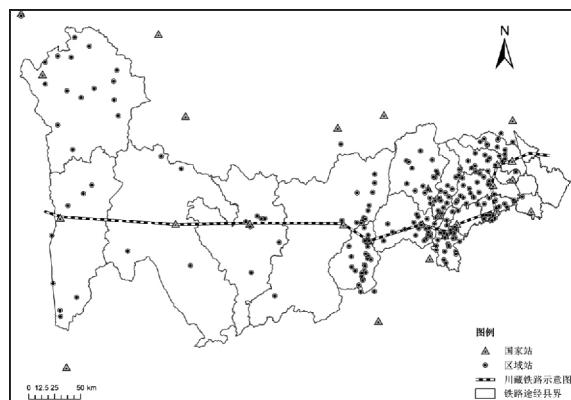


图1 川藏铁路四川段沿线区域的气象站分布
(审图号: 国审字(2017)第3557号, 底图无修改。下同。)

表1 川藏铁路四川段沿线的年平均降水量(1981—2010年)和收集到的地质灾害次数

行政县	面积/km ²	年平均降水量/mm	收集的地质灾害次数/次	行政县	面积/km ²	年平均降水量/mm	收集的地质灾害次数/次
巴塘县	8 186	415.7	14	蒲江县	580	1 200.8	42
白玉县	10 591	626.7	6	邛崃市	1 384	1 038.6	6
宝兴县	3 114	935.0	121	色达县	9 339	667.3	1
崇州市	1 090	977.7	9	双流县	1 068	855.7	41
大邑县	1 548	1 031.0	20	天全县	2 400	1 576.2	16
丹巴县	5 649	538.3	7	乡城县	5 061	428.9	1
康定市	11 600	858.4	16	新津县	330	951.6	3
理塘县	14 352	764.6	7	新龙县	9 183	636.2	1
芦山县	1 364	1 222.3	37	雅江县	7 682	679.4	17
泸定县	2 165	878.5	27	雨城区	1 060	1 663.8	62
名山区	614	1 407.0	41				

1.2 技术方法

(1) 地质灾害分区方法^[22]。根据研究区域地质条件、地貌类型和气候背景特征等主要环境因子与地质灾害的关系, 采用信息量模型对易发度进行评估, 利用ArcGIS中的自然断点法对易发度进行分级, 再与研究区内其他背景特征相结合, 实现对地质灾害分区。

(2) 阈值确定方法。借鉴文献[23]关于各降雨组成的划分, 利用降雨指标刻画诱发地质灾害的降水特征。结合诱发地质灾害降雨强度随着降雨时间历时增加呈现指数型下降^[13]的研究结论, 采用降雨强度与降水历时两个参数指标确定四川典型滑坡泥石流灾害区雨量阈值曲线, 表达式如下:

$$I = a \times D^{-b} \quad (1)$$

式中: I 表示平均雨强; D 表示降水历时; a , b 为参数。由于 D 的确定方法差异较大^[24], 本文将地质灾害发生日雨量峰值时刻作为灾害发生时刻和 D 的截止时刻, 考虑到前期降雨对地质灾害的作用^[25], 将有效降雨的起始时刻作为 D 的开始时刻^[26], 其中有效降雨量 R_y , 表达式如下:

$$R_y = \sum_i 0.8 \times (n_i/24) \times R_i \quad (2)$$

式中: R_i , n_i 分别为降水过程中第 i 小时的降雨量及其距地质灾害发生时刻的小时数, 若 t 之前的历次降雨过程的有效降雨量之和小于 t 时刻至 D 截止时刻之间历次降雨过程有效降雨量之和的10%, 则以 t 时刻作为 D 的开始时刻^[22]。

2 研究成果

2.1 时空特点

(1) 时间分布特征。2009—2019年川藏铁路四川沿线各县年平均地质灾害发生次数为45次, 呈显著上升趋势(图2), 其中2019年灾害次数异常偏高, 总体属暴雨偏多年, 区域性暴雨多, 年降水量1 034.4 mm, 较常年偏多8%。其中峨眉山2 075.8 mm, 名

山1 955.1 mm; 全省共计457站次发生暴雨, 较常年偏多50站次; 大暴雨79站次, 较常年偏多16站次。其中峨眉山市8月3日的日降水量为全省最大(211.5 mm)。由此可见, 铁路沿线地质灾害发生次数, 与该年暴雨和大暴雨次数呈现出一定的相关性^[21]。

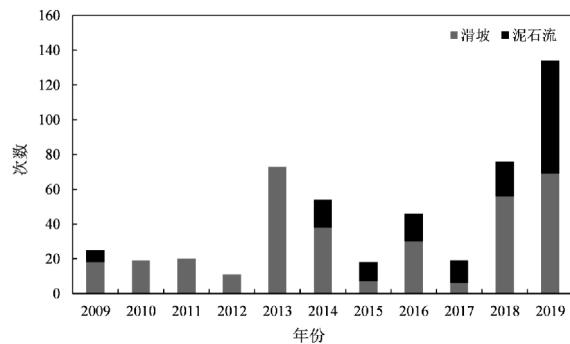


图2 2009—2019年川藏铁路四川段沿线地质灾害发生次数

从年内分布来看(图3), 川藏铁路四川沿线地质灾害高发月为7月, 其次为8月和6月。其中, 89%的滑坡灾害发生在汛期(5—9月), 7月份滑坡灾害最多, 占总量的81.3%。96.6%的泥石流灾害发生在汛期, 8月份泥石流灾害最多, 占总量的39.5%。地质灾害基本与四川地区降水的周期变化规律相吻合。

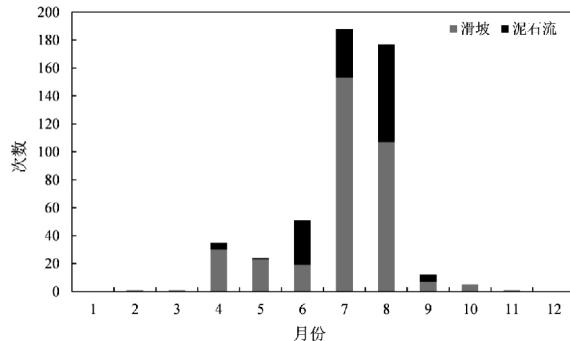


图3 2009—2019年内历史地质灾害发生数量

(2)空间分布特征。川藏铁路四川段在四川境内全长约650 km, 途经成都市(温江区、崇州市、大邑县、邛崃市、蒲江县)—雅安市—甘孜州(泸定县、康定市、雅江县、理塘县、巴塘县、白玉县)(图4), 地势由西北向东南倾斜, 山区面积占2/3以上。沿途各县从东至西主要分布有中亚热带湿润气候区(成都—雅安)、高原温带湿润气候区(康定—雅江)和高原温带半湿润气候区(理塘—巴塘—白玉)3种气候类型。降水差异显著, 其中盆地区域降雨频繁, 年均降雨量达800~1 600 mm; 川西北高原年降雨量在600~800 mm, 生态环境脆弱, 少量降水即能引发严重的地质灾害。由图4可见, 沿线灾害点多集中在康定以西的盆地区域, 这一区域位于青衣江暴雨中心, 常年降水丰富; 同时这一区域受汶川地震影响较大, 地质结构较

为不稳定, 地质灾害物源丰富。

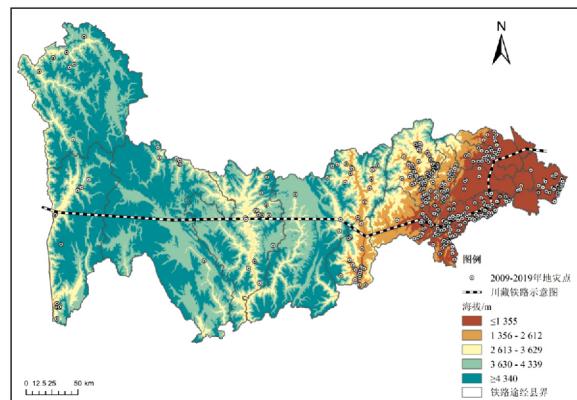


图4 川藏铁路四川段沿线地质灾害分布图

根据2009—2019年灾情观测资料统计, 2009年以来川藏铁路四川境内沿途21个县共发生有记录的地质灾害495起, 其中滑坡灾害记录347起, 泥石流灾害记录148起。从区域来看(图4), 川藏铁路成雅段地质灾害发生频率最高, 灾害中心集中在崇州、大邑、蒲江、邛崃四县市; 雅安至白玉段地质灾害发生频率次之, 集中发生在宝兴、天全和康定境内。其中, 滑坡灾害点主要分布于铁路沿线东部的低山、中低山地带, 宝兴县和雨城区是铁路沿线滑坡灾害较多的县, 分别占19.9%和17.6%, 而西部高原区域的灾害点稀少; 泥石流灾害也主要集中于盆地东部山谷, 以康定为界, 川西高原西半部分康定—雅江—巴塘—理塘—白玉地区泥石流沟占该地区的35.8%; 东半部分成都—雅安—康定, 泥石流沟占该区域的64.2%, 受青衣江暴雨区影响, 滑坡、泥石流活动频繁。

2.2 地质灾害分区

根据地形、地质和气候背景等环境因子与地质灾害关系, 选取高程、高程差、坡度、岩土类型、断裂层密度、土地利用类型、植被类型、植被覆盖度和降水作为地质灾害易发度分析因子, 计算易发度综合信息量^[22], 得到川藏铁路沿线地质灾害易发度总信息量变化范围为-14.9~4.4, 运用ArcGIS中的自然断点法, 将易发度分为高易发度、较高易发度、中等易发度、较低易发度、低易发度等5级进行区划(表2)。

对川藏铁路沿线地质灾害易发度分析发现, 川藏铁路沿线地质灾害易受水系和地形影响, 高发区主要集中在成雅段, 灾害中心集中在崇州、大邑、蒲江、邛崃四县市; 较高易发区主要集中在雅康段, 灾害中心集中在宝兴、芦山、天全以及康定五县市; 中等易发区主要集中在康定到理塘段, 灾害中心集中在雅江及理塘东南部; 较低和低易发区主要集中在理塘到白玉段, 该区域海拔≥3 000 m, 部分区域属于高原草原、草甸区域, 一般不易形成滑坡、泥石流灾害(图5)。

表2 信息量法易发度等级划分

易发度等级	低易发区	较低易发度	中等易发区	较高易发区	高易发区
信息量	< -9.2	(-9.2, -5.7]	(-5.7, -3.2]	(-3.2, 0.9]	> 0.9

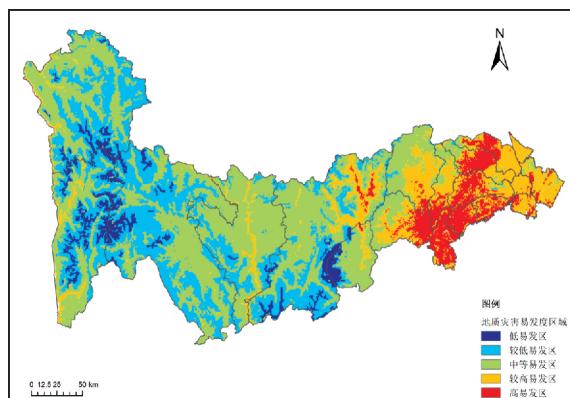


图5 川藏铁路四川段沿线地质灾害易发度分区

2.3 致灾临界雨量阈值确定

(1) 各种降雨参数对地质灾害发生的作用。各种降雨参数都可能影响地质灾害的发生，因此利用降雨历时划分短历时降雨($D < 12$ h)，中历时降雨($12 \text{ h} < D < 24$ h)和长历时降雨($D > 24$ h)三类，分别对应地质灾害的快速，中速和慢速激发；再结合2009—2019年地质灾害事件对应的降雨过程，发现三种历时的降雨诱发的地质灾害分别约占33.3%、25.9%、40.8%，表明该区域降水历时不是影响地质灾害发生的最直接因子。利用诱发降水量统计铁路沿线附近诱发地质灾害的降水级别(图6)，发现64.8%的地质灾害是由暴雨以上级别的降雨激发，表明强降雨对沿线区域的地质灾害有一定激发作用。此外，有10.2%的地质灾害是由短历时、中雨以下级别的降雨激发，也表明前期降雨对铁路沿线地质灾害的作用不可忽视。

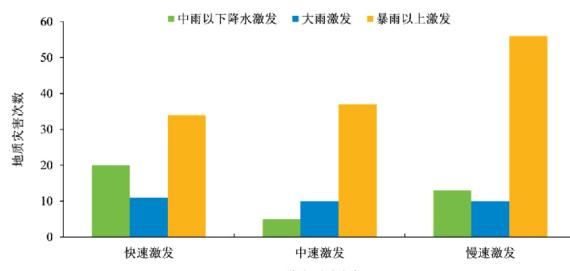


图6 诱发地质灾害的降水类型分类

基于以上研究，本文将激发雨强作为川藏铁路沿线地质灾害发生的直接因子，进一步对激发降雨与降雨历时的关系，激发降雨和前期有效降雨的关系进行对比分析(图7、图8)。图7显示了各种降雨历时下地质灾害对应的平均激发雨强分别为 12.2 mm/h (短历时降雨)、 18.8 mm/h (中历时降雨)和 8.6 mm/h (长历时降雨)。图9为降雨过程平均诱发雨强与降雨诱发历时的关系。针对历史多个过程对三类历时的诱发雨强进行平均，发现短历时降雨的平均值为 8.1 mm/h 、中历时降雨的平均值为 4.1 mm/h 和长历时降雨的平均值为

2.6 mm/h 。从495次诱发地质灾害的降雨过程来看，最小激发雨强为 0.2 mm/h ，最小诱发雨量为 5.2 mm ，发生在2019年7月1日理塘县；最大激发雨强为 38.8 mm/h ，发生在2016年7月5日的名山区；最大诱发雨量 233.7 mm ，发生在2019年8月21日的宝兴县；平均激发雨强为 12.5 mm/h ，平均诱发雨量为 83.0 mm/h 。由此可见降水历时越长，降水强度越小。

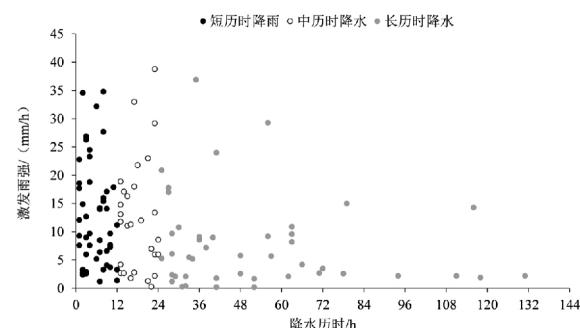


图7 不同降水历时条件下的激发雨强

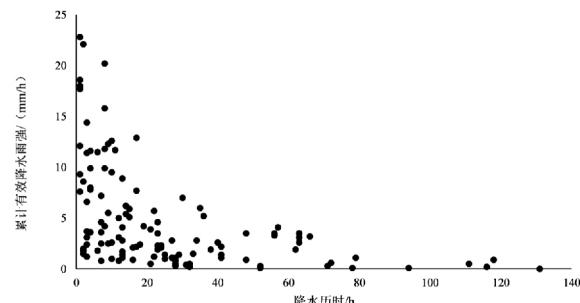


图8 不同降水历时条件下的累计有效降水雨强(平均诱发雨强)

2.4 模型选取和个例分析

虽然目前川藏铁路沿线区域也有一些关于降雨阈值的研究结果，但是，该区幅员辽阔，含多个县市，且地形复杂，受气候和环境差异的影响，统一的模型不一定能代表各路段(子区)的真实阈值；因此，有必要对各个子区的致灾灾害事件和降雨条件进行分析，确定不同子区的最重要的降雨参数，进而建立预报模型。为考虑样本数量和相关性呈现的问题，基于川藏铁路四川段沿线地质灾害易发度分区，将川藏铁路沿途县分为4个区域，具体划分如表3所示。

利用各子区域灾害点最近气象站降水作为地质灾害点雨量，采用式(1)和式(2)，分析各子区地质灾害发生平均雨强和降水历时关系。进行以川藏铁路雨城段为例，地质灾害主要集中在青衣江下游流域，地处四川盆地西部边缘，长江上游，是青藏高原向成都平原的过渡地带，位于青衣江暴雨区，雨量充沛，夏季暴雨较多。由于搜集的地质灾害事件较少，直接取图9中代表地质灾害事件各点的下限得到该区域的降雨阈值：

$$I = 18.1 D^{-1.0} \quad (3)$$

表3 川藏铁路四川段沿线分区

易发区	沿线县区
高易发区	崇州—大邑—邛崃
	蒲江
	名山
较高易发区	雨城区
	芦山—天全
中等易发区	宝兴(东)
	宝兴(西)—泸定—康定
低易发区和较低易发区	雅江—理塘—巴塘—白玉

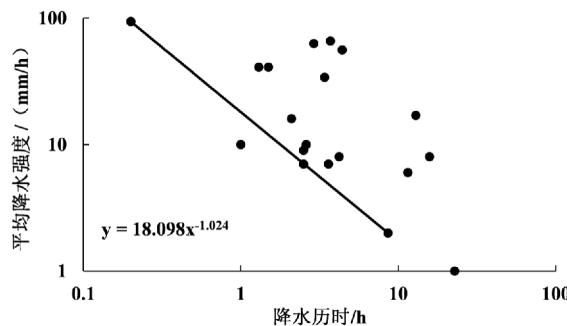


图9 川藏铁路雨城段诱发地质灾害的降水I-D关系

适用范围为降雨持时 1~100 h。从图 9 来看, 如用 I-D 关系来进行预报(图 9 中预警线), 虽可涵盖 96% 的地质灾害事件(24/25)。

同理, 对川藏线名山段进行分析, 该区域也处于青衣江暴雨区, 以图 10 中代表地质灾害事件各点的下限得到该区域的降雨阈值:

$$I = 150.9 D^{-1.56} \quad (4)$$

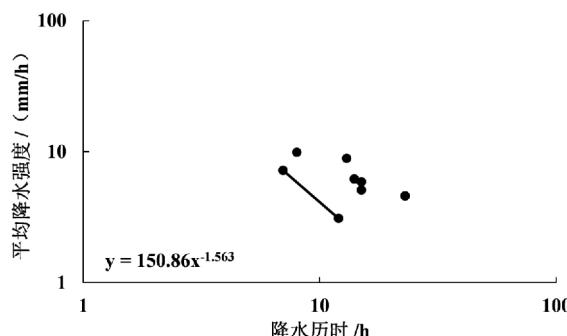


图10 川藏铁路名山段诱发地质灾害的降水I-D关系

适用范围为降雨持时 1~100 h。从图 10 来看, 如用 I-D 曲线预报(图 10 中预警线), 虽可涵盖 100% 的地质灾害事件(8/8)。据实地调查发现名山地质灾害虽发生较多, 但多分布在山区, 距铁路沿线较远, 相对影响较低; 离铁路较近的地质灾害点(隐患点)也都进行了应急工程, 因此也大大降低了灾害对铁路的影响。

运用川藏线铁路沿线 2009—2018 年地质灾害点记录数据和同期 219 个区域自动站和 27 个常规气象观测站小时雨量观测数据, 将离灾害点最近气象站降水作为地质灾害点雨量, 采用式(1)和式(2), 分析各子区地质灾害发生平均雨强和降水历时关系。由于高原低风险区地质灾害样本数较少, 因而不作统计, 其他各区所有平均雨强及其降水历时数据点绘于双对数坐标系中(见图 11a—图 11f), 根据这些点和下限值分别拟合出平均雨量线和区域临界雨量线, 得到表 4。结合灾害分区和降水历时可见, 高易发区(如雨城区、蒲江和芦山—天全段)对前期降水作用依赖性相对偏高, 中等易发区(如宝兴—泸定—康定段)对有效累积降水的依赖性相对偏高。

2.5 阈值检验

以四川省雅安市宝兴县作为研究区, 搜集了发生在 2019 年 8 月 22 日的地质灾害事件的雨量数据, 以此来检验川藏铁路沿线地质灾害发生的降雨阈值的可靠性。研究区位于四川省西部, 四川盆地西部边缘, 东邻芦山, 南毗天全, 西连康定, 北接小金, 东北与汶川交界, 是成都平原与川西高原的过渡带。总体属热带季风性湿润气候, 呈现典型立体气候型, 年均温度 14.4℃。降水比较充分, 境内常年平均降雨量为 912.1 mm, 最高年降雨量为 1 196.3 mm(2005 年), 最低年降雨量为 664.5 mm(1983 年)。80% 的年降雨集中于 6—9 月。

8 月 19 日以来, 宝兴县遭受 12 a 以来最大持续强降雨, 8 月 19 日 14 时至 21 日 14 时全县降雨超过 100 mm 的区域达 29 个, 超过 200 mm 的区域 7 个。截至 8 月 21 日晚 22 时, 连续强降雨导致宝兴县地质灾害、泥石流、崩塌 200 余处, 9 个乡镇全部受灾, 受灾人口约 3 万人, 转移安置约 1.2 万人, 受困游客约 2 000 人。

表4 各子区诱发地质灾害临界雨量阈值公式

易发区域	适用区域	临界雨量线		可涵盖 2009—2018 年地质灾害事件/%
		公式	取值范围	
高易发区	崇州—大邑—邛崃	$I = 43.0 D^{-0.96}$	$1 < D < 100 \text{ h}$	78
	蒲江	$I = 27.1 D^{-0.61}$	$1 < D < 100 \text{ h}$	92
	名山	$I = 150.9 D^{-1.56}$	$1 < D < 100 \text{ h}$	94
	雨城区	$I = 18.1 D^{-1.02}$	$0.1 < D < 100 \text{ h}$	96
较高易发区	芦山—天全	$I = 9.8 D^{-0.90}$	$0.1 < D < 10 \text{ h}$	100
	宝兴(东)	$I = 96.0 D^{-1.73}$	$1 < D < 100 \text{ h}$	100
中等易发区	宝兴(西)—泸定—康定	$I = 64.0 D^{-1.36}$	$1 < D < 120 \text{ h}$	95
低易发区和较低易发区	雅江—理塘—巴塘—白玉	$I = 9.6 D^{-1.01}$	$0.1 < D < 100 \text{ h}$	96

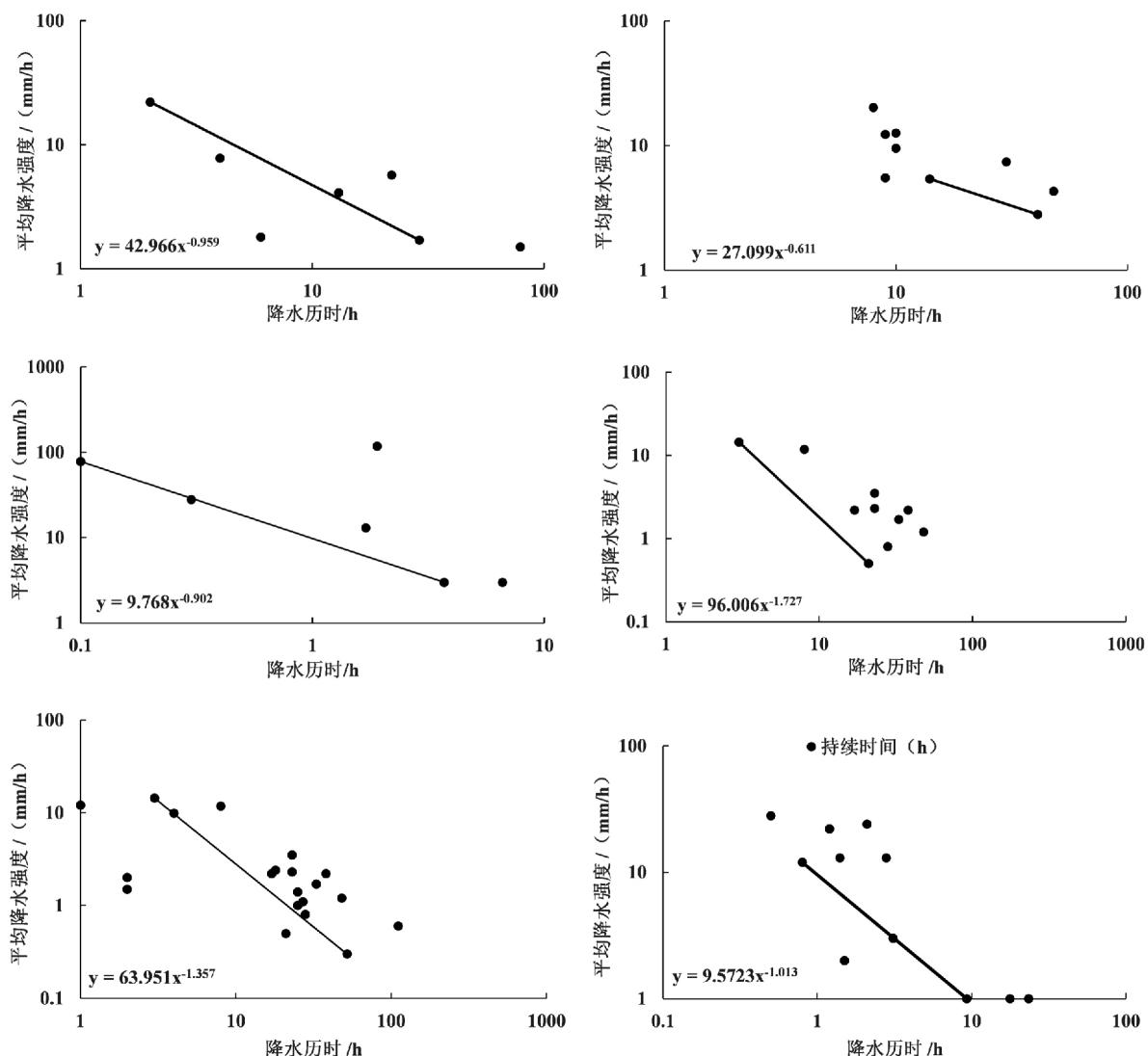


图 11 川藏铁路诱发地质灾害的降水 I-D 关系

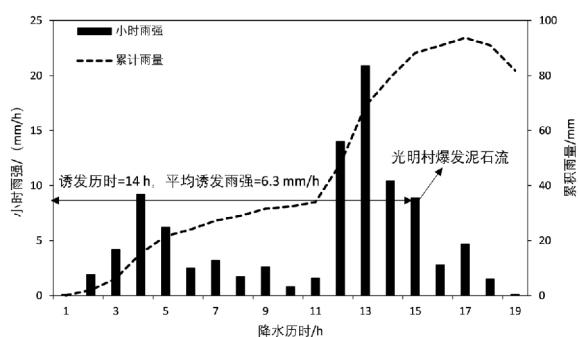


图 12 2019年8月20日宝兴县蜂桶寨乡光明村泥石流爆发时刻与降雨过程

以蜂桶寨乡光明村以及宝兴县灵关镇安坪村桃子坪为例，期间宝兴县蜂桶寨乡光明村和灵关镇安坪村分别有不同程度的降雨，发生滑坡和泥石流灾害。8月21日03:30，宝兴县蜂桶寨乡光明村外郎坪公路被泥石流切断。受强降雨影响，8月22日10:35—13:40，青衣江干流及其部分支流出现超警超保洪水。其中，宝兴河宝兴站洪峰水位超保证水位2.02 m，重现期超100 a一遇，是

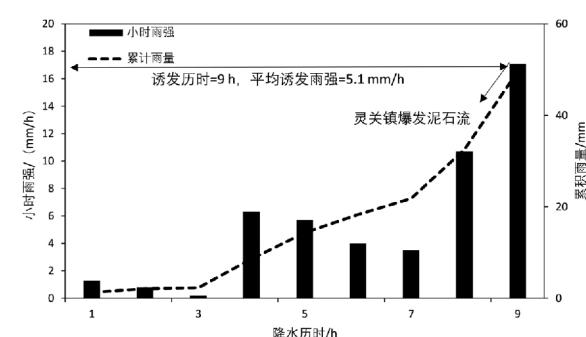


图 13 2019年8月22日宝兴县灵关镇泥石流爆发时刻与降雨过程

实测第一大洪水。8月22日08:30左右，高速公路四分局指挥中心发布消息，雅康高速康定至雅安方向多功站附近发生塌方，宝兴县灵关镇道路等基础设施损毁严重。搜集这两个地区地质灾害发生前后的雨量数据，计算灾害事件的降雨强度、累积降雨和降雨历时(图12、图13)。

利用本文提出的方法确定宝兴县24次地质灾害发生的临界降雨阈值(表5)。在降雨历时相同的情况下，比较实际值(平均雨强和累积雨量)与临

界阈值(平均雨强和累积雨量)。如果实际降雨参数高于临界雨量阈值,该区域就有可能暴发滑坡。进一步选取发生在2019年8月22日四川省雅安市宝兴县地质灾害数据,采用本文提出的地质灾害发生降雨阈值预测的暴发次数为23次,不暴发0次。而实际情况为暴发23次,不暴发0次。预测结果与实际一致。表5所示的验证结果表明,根据泥石流发生的降雨阈值预测泥石流的暴发情况与实际情况比较接近。

利用同样方法检验不同区域ID阈值与2019年实际地质灾害,如图14可见,用I-D关系来进行

预报(图14中预警线),崇州-大邑-邛崃段可涵盖50%的地质灾害事件(1/2),蒲江段可涵盖50%的地质灾害事件(1/2),芦山-天全段涵盖100%的地质灾害事件(4/4),宝兴(东)段可涵盖91.7%的地质灾害事件(11/12),宝兴(西)-泸定-康定段可涵盖91.7%的地质灾害事件(11/12),可涵盖60%的地质灾害事件(3/5),雨城区可涵盖100%的地质灾害事件(1/1),可涵盖50%的地质灾害事件(1/2)。其中崇州-大邑-邛崃段、蒲江段地质灾害预报涵盖率较低可能与地形复杂度及资料收集局限性有关。

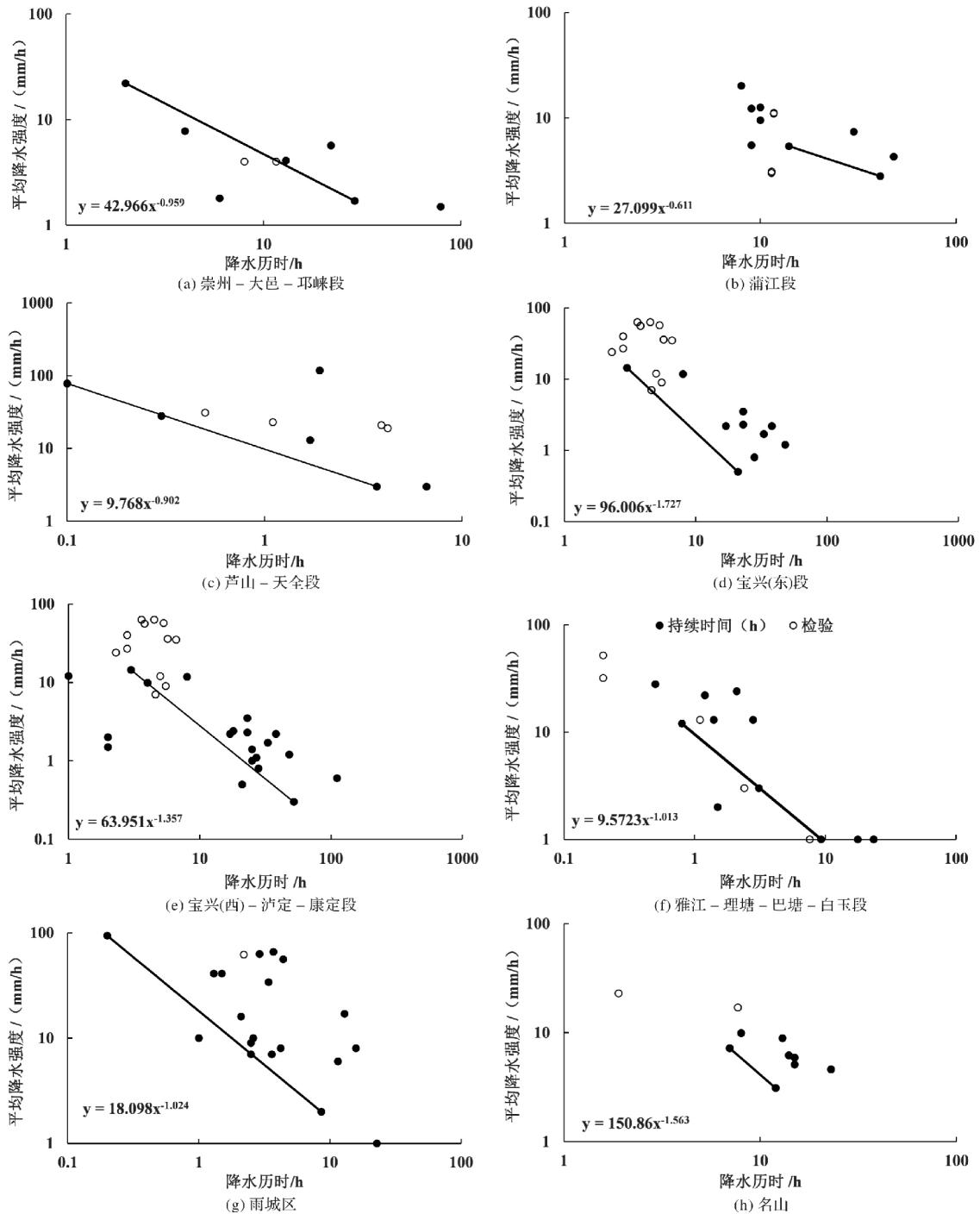


图14 川藏铁路2019年地质灾害对应的降水条件(实心点为2009—2018年诱发地质灾害的降水场次;
空心点为2019年诱发地质灾害的降水场次)

表 5 四川省雅安市宝兴县地质灾害预测结果与实际

序号	灾害类型	灾害点	实际值		临界阈值		预测结果	实际爆发情况
			D/h	I/(mm/h)	D/h	I/(mm/h)		
1	滑坡	宝兴县大溪乡坡坡上不稳定斜坡	7	4.6	1	96.0	是	是
2	泥石流	宝兴县穆坪镇小鱼溪泥石流	7	4.6	2	28.9	是	是
3	泥石流	宝兴县穆坪镇鼻梁骨泥石流	7	4.6	3	14.3	是	是
4	泥石流	宝兴县穆坪镇叮灵子沟泥石流	7	4.6	4	8.7	是	是
5	泥石流	宝兴县穆坪镇观岩组泥石流(省道 K291 + 890)	7	4.6	5	5.9	是	是
6	泥石流	宝兴县穆坪镇管家沟泥石流	7	4.6	6	4.3	是	是
7	泥石流	宝兴县穆坪镇教场沟泥石流	7	4.6	7	3.3	是	是
8	泥石流	宝兴县穆坪镇打水沟泥石流	9	5.5	8	2.6	是	是
9	泥石流	宝兴县穆坪镇冷木沟泥石流	9	5.5	9	2.1	是	是
10	泥石流	宝兴县穆坪镇干晏沟泥石流	12	5.0	10	1.8	是	是
11	泥石流	宝兴县穆坪镇阿支沟泥石流	24	2.3	11	1.5	是	是
12	泥石流	宝兴县陇东镇崇兴村黄大地组水翻堰泥石流	24	2.3	12	1.3	是	是
13	泥石流	宝兴县陇东镇新江村 2 组塔子沟泥石流	27	2.8	13	1.1	是	是
14	滑坡	宝兴县蜂桶寨乡光明村杨明杰房后滑坡	35	6.0	14	1.0	是	是
15	滑坡	宝兴县蜂桶寨乡民治场镇滑坡	36	5.2	15	0.9	是	是
16	泥石流	宝兴县永富乡出居沟(中岗沟)泥石流	36	5.2	17	0.7	是	是
17	泥石流	宝兴县硗碛乡和平集中安置点泥石流	36	5.2	18	0.6	是	是
18	泥石流	宝兴县硗碛乡十四亩沟泥石流	36	5.2	19	0.6	是	是
19	滑坡	宝兴县硗碛乡大地沟滑坡	36	5.2	20	0.5	是	是
20	滑坡	宝兴县硗碛乡灯光组不稳定斜坡	36	5.2	21	0.5	是	是
21	滑坡	宝兴县硗碛乡冰丰 1 组滑坡	36	5.2	22	0.5	是	是
22	滑坡	宝兴县硗碛乡嘎日组滑坡	36	5.2	23	0.4	是	是
23	泥石流	宝兴县硗碛乡泽根村半截沟泥石流	36	5.2	24	0.4	是	是

3 结论与讨论

本研究利用川藏铁路四川段沿线 2009—2019 年发生的滑坡泥石流灾害记录数据，分析了该沿线地质灾害与环境因子关系，研究了地质灾害分区，并探讨了各子区与诱发降水关系，得到如下结论：

(1) 2009—2019 年川藏铁路四川沿线各县年平均地质灾害发生次数为 45 次，呈显著上升趋势。沿线地质灾害发生次数，与该年暴雨和大暴雨次数呈现出一定的相关性。沿线地质灾害高发月为 7 月，其次为 8 月和 6 月。其中，89% 的滑坡灾害和 96.6% 的泥石流均发生在汛期(5—9 月)，地质灾害基本与四川地区降水的周期变化规律相吻合。

(2) 川藏铁路成雅段地质灾害发生频率最高，灾害中心集中在崇州、大邑、蒲江、邛崃四县市；雅安至白玉段地质灾害发生频率次之，集中在宝兴、天全和康定境内。其中，滑坡灾害点主要分布于区域东部的低山、中低山地带，西部高山高原区的灾害点稀少；泥石流灾害也主要集中于盆地东部山谷，以康定为界，川西高原西半部分康定—雅江巴塘—理塘—白玉地区泥石流沟占该地区的 35.8%；东半部分成都—雅安—康定，泥石流沟占该区域的 64.2%；地质灾害高发区位于青衣江暴雨区，同时受地震影响，地质结构较为不稳定，山区土层松散，因此由暴雨引发的滑坡、泥石流活动频繁。

(3) 对 2009—2019 年间 201 次地质灾害事件对应的降雨过程进行分析，发现快速激发，中速激发和慢速激发的地质灾害分别约占 33.3%、25.9%、

40.8%，表明降雨历时不是导致地质灾害发生的最直接因子。不同降雨参数对地质灾害的诱发作用有所差异，64.8% 的地质灾害都是由暴雨激发，表明直接降雨因子是诱发泥石流的最关键因子；10.2% 的地质灾害的爆发与短历时、中雨以下级别的降雨有关，表明前期降雨的作用也很重要。

(4) 环境背景相异各区地质灾害与诱发降水关系差异明显。不同地区地质灾害预报的降雨指标不同，所采用的预报模型和临界阈值也存在差异。基于降雨历时 - 雨强($I-D$)预报模型建立了川藏铁路沿线四川段引发地质灾害的降水阈值分布，其中高易发区对前期降水作用依赖性相对偏高，中等易发区对有效累积降水的依赖性相对偏高。利用该系列地质灾害雨量阈值，验证 2019 年地质灾害气象风险，得到了较好的应用。

($I-D$)预报模型的局限性在于模型本身是关于档次诱发降水的历时与平均雨强之间的关系，忽略了激发雨强(峰值雨强)与前期降水的影响^[32]。因此下一步可针对激发雨强对地质灾害的影响角度分析。同时，限于地质灾害资料的数量和质量与实际情况有差距，因此，未来需要加强铁路沿线雨量和地质灾害的监测。

致谢：审稿专家对本文提出了建设性修改建议，编辑部袁志祥老师审阅本文并提出重要修改意见，在此一并致谢。

参考文献：

- [1] 丁朋朋, 杨宗信, 游勇, 等. 川藏铁路沿线滑坡灾害易损性评价[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 133—138.

- [2] 刘盛健. 川藏公路地质灾害危险性评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [3] 廖秋林, 李晓, 董艳辉, 等. 川藏公路林芝—八宿段地质灾害特征及形成机制初探[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 33–39.
- [4] 王鹰, 陈炜涛, 张昆, 等. 川藏公路地质灾害防御体系及防治对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005(3): 63–66.
- [5] 邹强, 崔鹏, 杨伟. G318川藏公路段泥石流危险性评价[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 342–348.
- [6] 宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(1): 14–19.
- [7] 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 62–67, 93.
- [8] 铁永波, 周洪福, 倪化勇. 西南山区短时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 110–113.
- [9] 谭万沛. 泥石流扇的类型与土地利用模式[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(1): 71–74.
- [10] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055–1060.
- [11] 吴跃东, 向帆, 马玲. 安徽省地质灾害气象预警预报研究[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 26–29.
- [12] 张雅斌, 杜继稳, 蔡蕊, 等. 陕西省精细化地质灾害气象预警研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 28–34.
- [13] 刘海知, 马振峰, 范广洲. 四川省典型区域滑坡泥石流致灾临界雨量阈值确定方法[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 126–131.
- [14] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 98(3): 239–267.
- [15] CHAN R K S, PUN W K. Landslide warning system in Hongkong[J]. Geotechnical News, 2004, 22(4): 33–35.
- [16] 姚学祥, 徐晶, 薛建军, 等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 97–102.
- [17] 谢正伦, 陆源忠, 游保彬, 等. 泥石流发生临界降雨线设定方法之研究[J]. 中华水土保持学报, 1995, 26(3): 167–172.
- [18] 詹钱登, 李明熹. 土石流发生降雨警戒模式[J]. 中华水土保持学报, 2004, 35(3): 273–283.
- [19] 陈悦丽, 赵琳娜, 王英, 等. 降雨型地质灾害预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30(2): 142–153.
- [20] 李守定, 白亚恒, 姜越, 等. 基于内外动力耦合成因理论的新疆地质灾害气象预警显式统计模型[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(2): 286–300.
- [21] 刘海知, 马振峰, 范广洲, 等. 四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 73–77.
- [22] 邓国卫, 孙俊, 郭海燕, 等. 四川泥石流灾害分区及其与诱发降水关系[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 95–102.
- [23] JIBSON R. Debris flow in southern Puerto Rico[J]. Geological Society of America, Special Paper, 1989, 236: 29–55.
- [24] 周伟, 唐川. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 786–793.
- [25] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11–15.
- [26] 赵衡, 宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1481–1487.
- [27] 魏少伟, 雷大鹏, 卢大玮, 等. 山区既有铁路地质灾害风险评估方法[J]. 铁道建筑, 2016(1): 47–52.
- [28] 王剑, 陆德彪, 唐一哲, 等. 基于虚拟应答器的GNSS列车安全定位及风险分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(6): 45–52.
- [29] 杨宗信, 丁朋朋, 王栋, 等. 川藏铁路(康定至林芝段)沿线滑坡风险分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 97–103.
- [30] 李秀珍, 崔云, 张小刚, 等. 川藏铁路康定至昌都段滑坡崩塌灾害特征及空间分布规律[J]. 四川地质学报, 2019, 39(3): 441–446.
- [31] 张子曰. 川藏铁路沿线气象风险特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [32] 郭晓军, 崔鹏, 马力, 等. 都汶公路沿线诱发泥石流的降雨特征[J]. 山地学报, 2014, 32(6): 739–746.

Study on Precipitation Threshold of Geological Disasters along Sichuan Section of Sichuan – Tibet Railway

LIU jia^{1,2}, GUO Haiyan¹, DENG Guowei¹, XU Jinxia¹, ZHONG Yanchuan¹ and XU Yuanxin¹

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu/Heavy Rain and Drought – Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

2. Climate Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on the geological disaster data of Sichuan section along Sichuan – Tibet railway from 2009 to 2019 and hourly precipitation data of National Meteorological Center, this paper makes statistics on the relationship between geological disasters and precipitation. It is found that 89% of landslide disasters and 96. 6% of debris flows occurred in flood season, and the road section with high geological disasters is located in the rainstorm area of Qingyi River. It is consistent with the temporal and spatial distribution characteristics of precipitation in Sichuan. By analyzing the influence of rain type, rainfall intensity and previous rainfall on geological disasters, it is found that geological disasters with rapid excitation, medium – speed excitation and slow excitation account for about 33. 3%, 25. 9% and 40. 8% respectively. It shows that rainfall duration is not the most direct factor affecting geological disasters, and the role of early rainfall can not be ignored. The geological disasters were divided according to environmental factors, and the precipitation threshold distribution of geological disasters in Sichuan along the Sichuan – Tibet railway was established based on the rainfall duration – rainfall intensity (I – D) forecast model. Based on the distribution characteristics of the precipitation threshold, the precipitation that caused geological disasters in 2019 was tested, and it was found that the method of judging the threshold rainfall was scientific and had strong reference value.

Key words: geological disasters; precipitation type; disaster precipitation threshold; the Sichuan – Tibet railway