

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2025.02.012

引文格式: 徐登财, 张泰丽, 黑李莎, 王一鸣. 2025. 基于有效雨量的地质灾害降雨阈值研究——以温州市为例[J]. 华东地质, 46(2): 252-267. (XU D C, ZHANG T L, HEI L S, WANG Y M. 2025. Study on rainfall threshold of geological disasters based on effective rainfall model in Wenzhou City[J]. East China Geology, 46(2): 252-267.)

基于有效雨量的地质灾害降雨阈值研究—— 以温州市为例

徐登财¹, 张泰丽^{2,3}, 黑李莎⁴, 王一鸣⁵

(1. 温州市地质环境监测中心, 浙江温州 325027; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 3. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏南京 210016; 4. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 5. 温州大学建筑工程学院, 浙江温州 325000)

摘要:温州市地处我国东南沿海强降雨核心区, 极端降雨事件频繁, 历年地质灾害高发。文章通过收集、整理该市历年地质灾害与降雨数据(地质灾害样本 2 692 个, 其中时间精确到月份的地质灾害点 2 615 个, 时间跨度为 1905—2023 年), 对全市地质灾害的发育情况、时空分布规律及其与降雨量的关系进行了分析, 并基于有效雨量模型, 统计分析不同类型地质灾害的降雨阈值。结果表明: 温州市地质灾害类型主要为台风暴雨群发型与单点突发型。台风暴雨群发型地质灾害的时空分布与台风暴雨活动密切相关, 并与降雨极值有较密切的相关性; 单点突发型地质灾害的爆发与强降雨之间的相关性一般。通过统计分析, 获得了温州市域范围内的台风暴雨群发型滑坡灾害与泥石流灾害在不同概率率下的降雨阈值 $I-D$ 曲线, 并提出了不同类型地质灾害的降雨阈值建议。该研究可为温州市地质灾害的预警提供理论支持和科学依据, 具有重要的现实意义和应用价值。

关键词: 温州市; 地质灾害; 台风暴雨; 有效雨量; 降雨阈值

中图分类号: P642.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)02-252-16

温州市简称“瓯”, 地处浙江省东南部, 现辖鹿城、龙湾、瓯海和洞头 4 区, 瑞安、乐清和龙港 3 市(县级), 以及永嘉、平阳、苍南、文成、泰顺 5 县, 其地理坐标为 $119^{\circ}37' \sim 121^{\circ}18' E$, $27^{\circ}03' \sim 28^{\circ}36' N$ 。该市地形地貌多样, 地质环境及地质构造复杂, 台风暴雨等极端降雨事件多发, 造成历年的地质灾害具有频发、高发的特征(伍剑波等, 2021)。根据《浙江省温州市地质灾害防治十四五规划》, 该市突发性地质灾害易发区面积达 $9\,556\text{ km}^2$, 占全市陆域面积的 78.9%。此外, 根

据统计的 1905—2023 年各类文献及调查报告等资料, 温州市记载的崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害累计 2 692 个, 引发地质灾害群发事件 13 次, 造成 125 人死亡、164 人受伤。温州市地质灾害的发生与降雨事件密切相关, 绝大部分地质灾害是由台风暴雨、局部地区强降雨等降雨事件所引发的, 尤其是每年的台汛期(7—9 月), 由台风暴雨引发的地质灾害具有规模小、危害大、群发突发等特性。例如, 2004 年 8 月 13 日, 受当年第 14 号台风“云娜”的影响, 乐清市北部山区遭

* 收稿日期: 2025-02-28 修订日期: 2025-04-21 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“浙江飞云江流域地质灾害调查(编号: DD20160282)”、“浙江丽水地区灾害地质调查(编号: DD20190648)”、“浙闽沿海台风暴雨型地质灾害精细调查与风险管控(编号: DD20221742)”和温州市自然资源和规划局“温州市地质灾害风险防范区阈值专项研究(编号: ZZGC-ZBCG-2023026)”项目联合资助。

第一作者简介: 徐登财, 1969 年生, 男, 高级工程师, 本科, 主要从事地质灾害调查监测与风险预警研究工作。Email: xudengcai@163.com。

通信作者简介: 张泰丽, 1980 年生, 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事地质灾害监测、预警与风险评价研究工作。Email: 674802878@qq.com。

受了百年一遇的特大暴雨,过程降雨量达 916 mm,降雨量突破了当地历史记录,造成了爆发群发性滑坡、泥石流等地质灾害 125 处,42 人死亡(龚新法, 2004; 袁丽侠等, 2009)。可见,降雨与地质灾害之间存在着密不可分的关系,因此开展极端降雨条件下地质灾害降雨阈值研究对地质灾害预警预报具有重要的意义。

降雨阈值(rainfall threshold)指引发地质灾害发生的临界降雨量,由诱发滑坡的降雨表征参数的最小值或最大值表示。目前,国内外学者针对降雨阈值与地质灾害之间的关系开展了大量的研究工作。1969 年,学者 Endo 提出诱发滑坡所需最小降雨量的概念(Endo, 1969); 1974 年, Onodera 首次确定了诱发滑坡的降雨阈值(Onodera et al., 1974); 1975 年, Campbell 指出前期降雨与降雨强度的共同作用将会诱发滑坡灾害(Campbell, 1975); 1980 年, Caine 利用全球范围内的 73 个滑坡灾害点及降雨资料,分析了诱发滑坡的降雨强度、历时及其与滑坡发生之间的联系,建立了全球范围的降雨强度-持续时间(*I-D*)阈值曲线(Caine, 1980)。此后,基于历史灾害数据和降雨数据统计得出的降雨阈值研究方法得到迅速发展,并作为地质灾害风险预测的判据,从而广泛地应用于地质灾害危险性分析研究中。

在不同地质环境背景的地区,诱发地质灾害的降雨临界条件往往有所不同,因此地质灾害早期预警的关键是确定合理的降雨阈值。降雨阈值计算模型主要包括基于经验统计的降雨阈值模型(Bordoni et al., 2019)、基于物理过程模拟的降雨阈值模型(Alvioli et al., 2014; Marin et al., 2020; Marino et al., 2020; Napolitano et al., 2016; Papa et al., 2013; Wu et al., 2015),以及基于水文气象过程的降雨阈值模型(Fusco et al., 2019; Marin and Velásquez, 2020)。目前,使用最广泛的是基于经验统计的降雨阈值模型(Guzzetti et al., 2008)。该模型通过统计诱发滑坡的历史降雨事件,将其降雨强度、历时条件描绘在双对数坐标中,再运用相关统计分析软件拟合出这些数据点的下限百分水平线,得到的幂指数曲线或线性线即为对应的降雨阈值(Giannecchini et al., 2016; Guo et al., 2016)。

与国外相比,国内关于经验性降雨阈值的研究相对较少,最可能的原因在于缺乏系统的地质

灾害编录数据,尤其是降雨等诱发事件的不完整,导致建立经验性降雨阈值时缺乏数据,从而给确定阈值增加了难度。尽管如此,基于崩塌、滑坡泥石流等区域性地质灾害调查评价项目积累的成果数据,不同学者仍开展了一些降雨阈值研究,并取得了一定的成果。2010 年以来,许多地质灾害研究单位及学者对温州市地质灾害降雨阈值开展了大量的研究,针对滑坡和泥石流降雨阈值取得了丰硕的研究成果(鲍其云等, 2016; 麻士华等, 2011; 孙丽影等, 2024; 汤人杰等, 2019; 王一鸣等, 2011)。温州市地质灾害降雨阈值的研究方法,从早期的经验判断,到相关性分析及图表分析,再到如今的降雨阈值模型分析,经历了从定性到定量的演变过程,其应用性和实用性也不断增强。然而,由于数理统计主要依赖于样本,不同的研究者所采用的样本代表性不同,涉及时间也不同,因此计算得到的统计结果也相差很大,加之不同阶段所采取的研究方法不同,不同研究结果所呈现的降雨阈值相差也较大,导致阈值的应用性还不够广泛。一方面,现有的研究成果主要是按行政区划开展的相关研究,而能联系地质灾害发育的地质地貌条件所开展的阈值统计研究成果较少,导致统计分析的结果难以反映地质灾害发生的地质地貌背景;另一方面,在类似地质地貌的县(市、区),由于历史地质灾害降雨数据不同,导致所得到的降雨阈值也相差较远。

基于此,本文针对温州市地质灾害阈值研究存在的不足,通过收集研究区历史降雨与地质灾害资料,基于统计分析方法,从区域与单体地质灾害等不同尺度来研究温州市地质灾害与降雨之间的相互关系,揭示地质灾害的特征与降雨阈值,为地质灾害风险预警提供科学有效的降雨阈值与建议。

1 研究区地质背景

1.1 气象

温州市属于亚热带海洋性季风气候区,四季分明,雨量充沛,多年平均降雨量为 1 500~2 200 mm,主要集中在梅汛期和台汛期。据百年资料统计,最大年降雨量为 2 919.8 mm(1911 年),最小年降雨量为 1 103 mm(1979 年),春夏之交有梅雨,7—9 月常有台风。

在降水量时间分布上,年内降水分布不均。一年有2个相对多雨季节和2个相对少雨季节,呈双峰型,盛夏和冬季相对少雨。每年从3月份开始,降雨量明显增多,至5—6月份达到第一个高峰(俗称梅雨期),历年平均月降雨量分别为204.2 mm和205.4 mm;3—6月的总降雨量为670.2 mm,占全年降雨量的43%。梅雨期结束后进入盛夏,降雨量锐减,7月份历年平均降雨量为136.4 mm。8—9月份因多台风暴雨和雷阵雨,形成第二个高峰期,历年平均降雨量分别为214.7 mm与213.4 mm,占全年降雨量的28%。11月份至第二年1月份是全年的少雨季节,历年平均降雨量仅144.8 mm,占全年降雨量的9%(图1)。

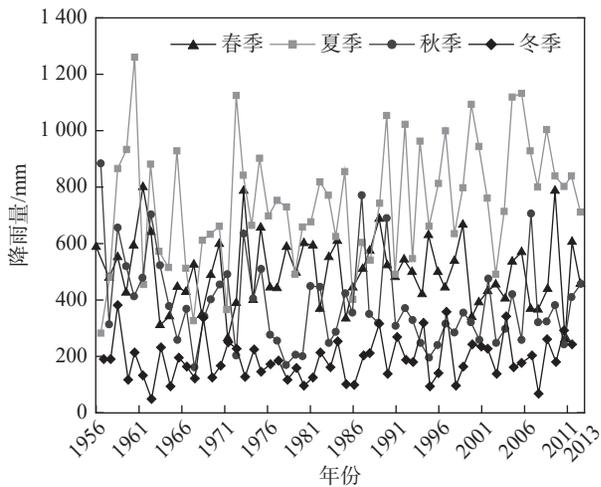


图1 1956—2013年温州市四季降雨量图

Fig. 1 Seasonal rainfall of Wenzhou (1956–2013)

在降雨量地理空间分布上,山区大于沿海平原地区,迎风山坡大于背风面,且随着海拔增加降雨量也递增。多年平均降雨量在1595 mm以上,山区年平均降雨量为1700~2200 mm,平原区年平均降雨量为1500~1600 mm。

1.2 地形地貌

温州市属于浙南中低山区,以中低山和侵蚀剥蚀丘陵为主,沿海分布大面积的海积平原及岛屿。该市地貌的发育,深受地壳运动、构造、岩性、气候及水流等诸多因素的影响,主要山脉均呈SW-NE向展布,地势由西南向东北呈梯形倾斜,依次分布中低山、丘陵、平原、沿海滩涂和岛屿等地貌单元(图2)。该市山地面积为9212 km²,占全市陆地面积的78.2%;平原面积为2059 km²,占全市陆地面积的17.5%;江河水面积为340 km²,占

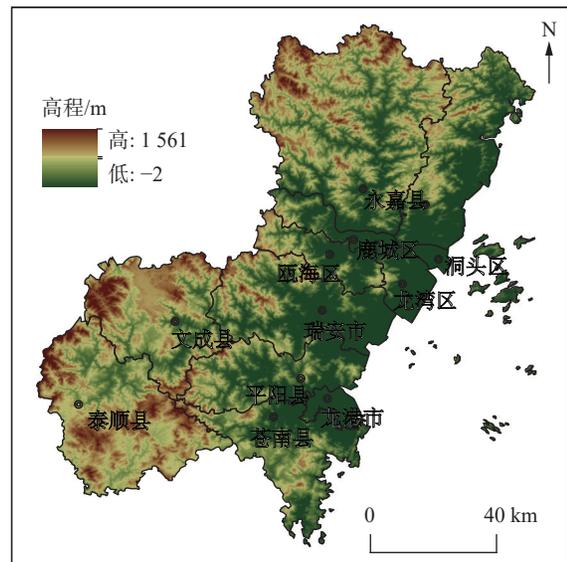


图2 温州市地势图

Fig. 2 Topography of Wenzhou

全市陆地面积的2.8%;岛屿面积为173 km²,占全市陆地面积的1.5%,因此具有“八山一水一分田”之称。

温州市西南部以中低山为主,地势高峻,海拔千米以上,最高点位于泰顺白云尖,海拔1611 m;中部以海拔500~1000 m的低山和盆地为主;东部为地势低平、河网密布的滨海平原,大部分海拔为10 m以下,间有少数300~500 m的剥蚀残丘。海域多岛屿,其地质构造、岩性和地貌形态与陆域相似,以基岩岛为主。

1.3 区域地质构造

温州市所在的东南沿海地区在构造上处于欧亚大陆板块东南缘,濒临太平洋板块,属于华南褶皱系浙东南褶皱带之温州—临海拗陷,以强烈的断块活动为主,分布大量的中生代火山岩、火山沉积岩和侵入岩,形成独具古火山特点的构造体系,为环太平洋巨型构造-岩浆活动带中最活跃的地区之一。区内构造以断裂为主,褶皱极不发育,表层构造以脆性-韧性断裂及推覆、滑脱构造为主,尤其脆性断裂极其发育,其中NE向及NW向断裂最为醒目(图3)。

通过研究区的区域性大断裂分别为NNE向温州—镇海大断裂、NE向泰顺—黄岩大断裂以及NW向淳安—温州大断裂。受区域性大断裂的影响,NE向和NW向断裂构成了研究区的主要构造骨架,其次为SN向和EW向断裂,NNE向、

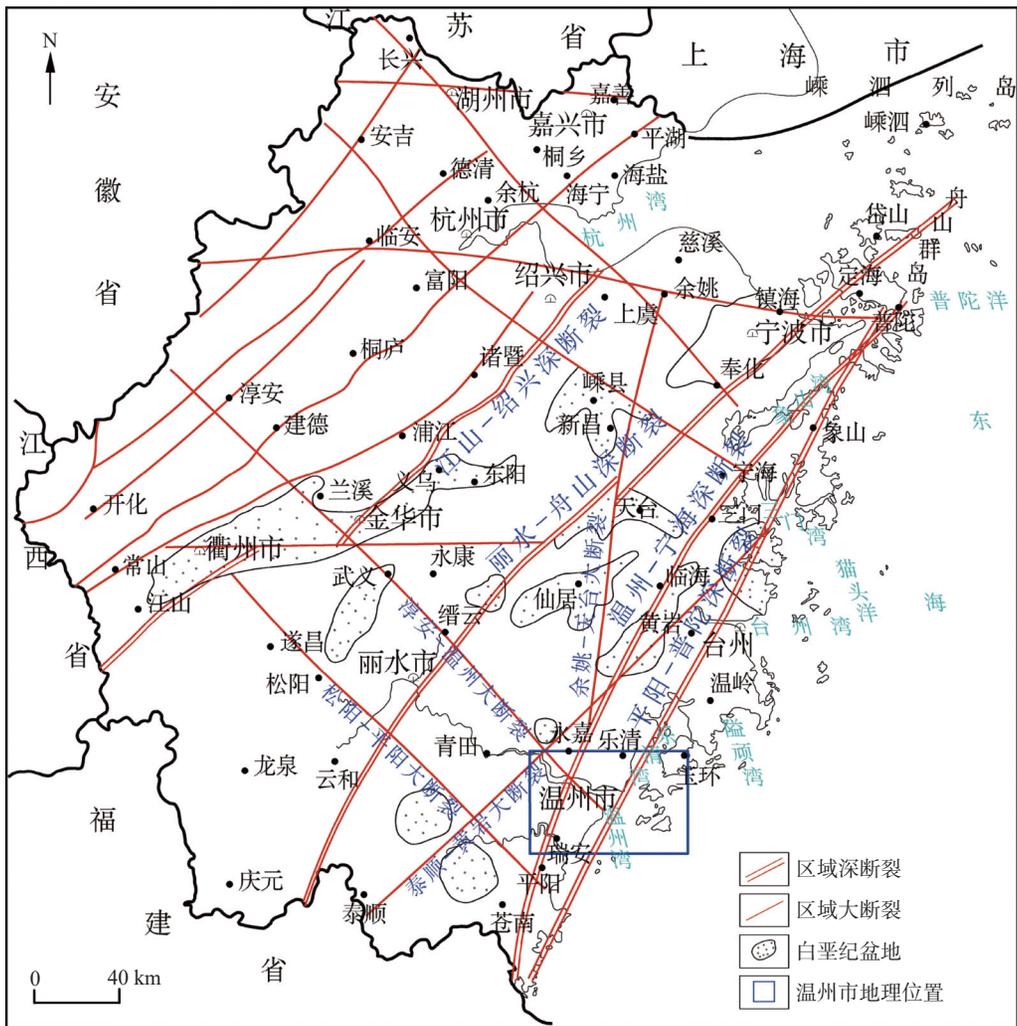


图3 温州市地质构造纲要图
Fig. 3 Geological structures of Wenzhou

NEE 向断裂不发育。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001), 区内地震动峰值加速度为 0.05 g, 对应的地震基本烈度区为 VI 度区, 属于东南沿海二级地震区的东北段, 接近三级地震区, 为少震、弱震区, 区域地壳稳定。

1.4 工程地质

根据温州市山区岩体的地层岩性、岩石强度、抗风化能力、结构类型及工程地质特性的组合特征, 可将其划分为 4 个工程地质岩组(图 4), 分别为坚硬块状侵入岩岩组(Q)、坚硬-较坚硬块状熔岩岩组(R)、坚硬-较坚硬块状火山碎屑岩岩组(H)和较软层状沉积岩岩组(S)。Q 岩组新鲜岩石的构造裂隙不甚发育, 岩体以整体-块状结构为主, 抗风化能力较弱, 风化作用较强, 球状风化显著; R 岩组多呈块状-整体结构, 新鲜岩石致密、坚硬,

其完整性和均匀性均较好, 抗风化能力强, 山高坡陡, 工程地质条件简单, 但断层带、软弱夹层使岩体的完整性和稳定性变差; H 岩组的岩石发生了一定程度的风化, 局部风化较强烈, 且以化学风化为主, 且沿构造带、矿化带岩石的蚀变较强烈, 除硅化蚀变外, 其他蚀变均造成岩石的强度急剧下降, 总体上岩体呈碎裂-块状结构; S 岩组岩体普遍破碎, 风化强烈。

2 地质灾害分布规律

2.1 地质灾害发育情况

本研究共收集有坐标的地质灾害样本 2 692 个, 其中时间精确到月份的地质灾害点共 2 615 个, 时间跨度为 1905—2023 年。这些灾害点的数据

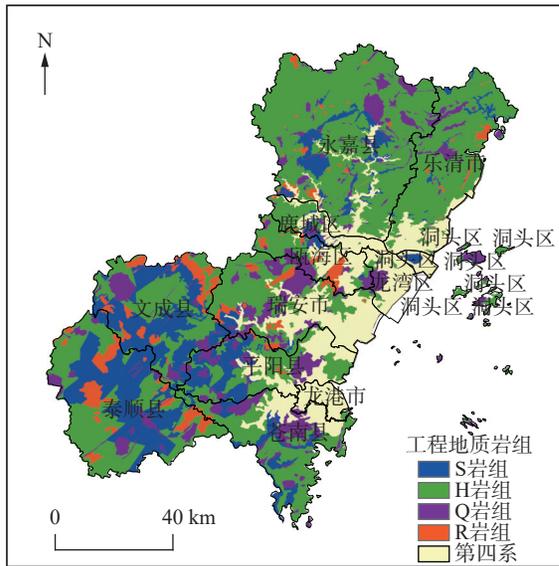


图4 温州市工程地质简图

Fig. 4 Engineering geology of Wenzhou

精度各不相同,大部分精确记录到“日”,一些台风暴雨群发性灾害可以精确记录到灾害发生的小时段。

从地质灾害的总体分布来看(图 5(a)),温州市地质灾害存在多个密集分布区,其中以永嘉南部—鹿城—瓯海区西北部的地质灾害分布最为密集,其次为瑞安—平阳—文成交界处、平阳苍南交界处以及乐清北部、文成中部等区域,其地质灾害的分布均较密集(图 5(b))。

地质灾害类型包括滑坡、崩塌和泥石流。其

中,房前屋后人工切坡形成的滑坡和崩塌数量最多,分别为 1 846 处(占比 70.6%)和 490 处(占比 18.7%)。崩滑灾害点分布范围较广,在温州市各区县均有分布,空间上较为分散,主要以永嘉南部—鹿城—瓯海区西北部和瑞安—平阳—文成交界处最为密集。泥石流灾害点有 279 处(占比 10.7%),主要分布在乐清北部,瓯海西部次之,永嘉西南部与泰顺东南部也较为密集。

从地质灾害的爆发形式来看,主要有台风暴雨群发型与单点突发型两类。1999—2022 年,由台风暴雨所诱发的群发性地质灾害有 1 243 处,包括崩塌、滑坡和泥石流 3 类,其中崩滑灾害 1 059 处、泥石流灾害 184 处,占同时期区域内地质灾害数量的 48%;单点突发型地质灾害共 1 345 处,主要以崩塌和滑坡为主,其中崩滑灾害 1 250 处,泥石流灾害 95 处,为短历时强降雨爆发,占同时期区域内地质灾害数量的 52%。

2.2 地质灾害分布规律

将温州市地质灾害划分为单点突发型与台风暴雨群发型两类,并对不同类型地质灾害的时空分布规律进行了总结,同时开展了其与强降雨量相关性的分析及研究。

2.2.1 台风暴雨群发型地质灾害分布规律

1999—2022 年,台风暴雨引发了温州市群发型地质灾害 1 243 处,其中单次群发地质灾害 20 处以上,在此期间的 10 次台风暴雨过程中,占同

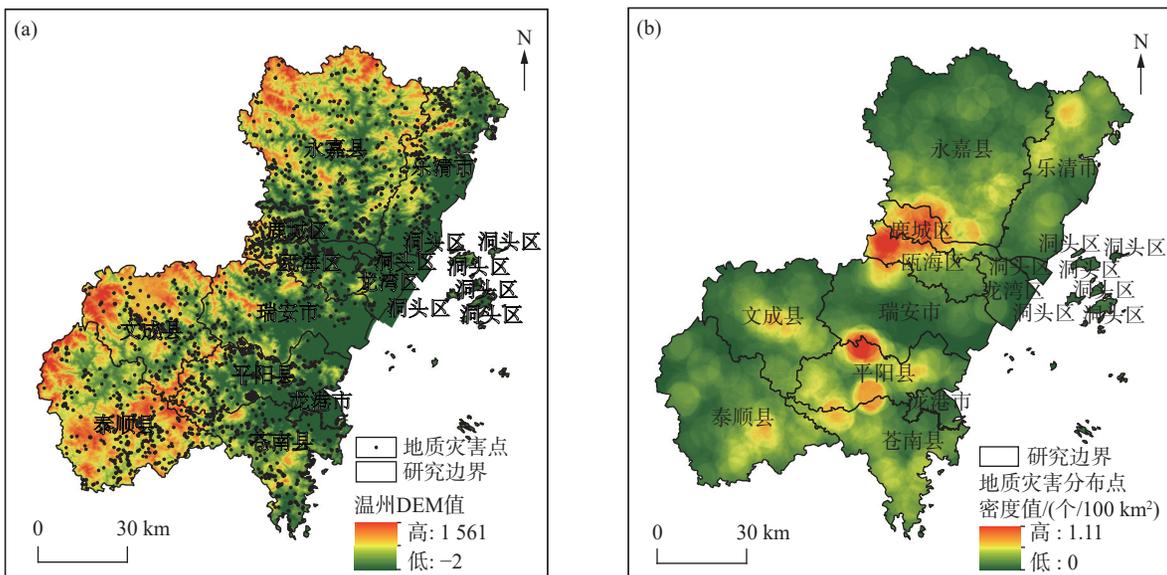


图5 温州市地质灾害分布图(a)及地质灾害分布点密度图(b)

Fig. 5 Geological hazards distribution (a) and density of geological hazard points (b) in Wenzhou

时期区域内地质灾害总数的 48%。

从群发型地质灾害的空间分布来看, 地质灾害的分布与其相对应的台风暴雨的空间分布密切相关。按灾害类型统计, 滑坡、崩塌的空间分布上存在着多个密集分布中心(图 6(a)), 以永嘉南部—鹿城—瓯海区西北部最为密集, 其次为瑞安—平阳—

文成交界处、平阳—苍南交界处以及乐清北部、文成中部等区域; 泥石流主要分布于乐清北部地区, 瓯海西部地区次之。另外, 永嘉西南部与泰顺东南部也较为密集(图 6(b))。这些区域是台风登陆以来遇到的第一列中低山, 其形成的降雨量也相应较大。

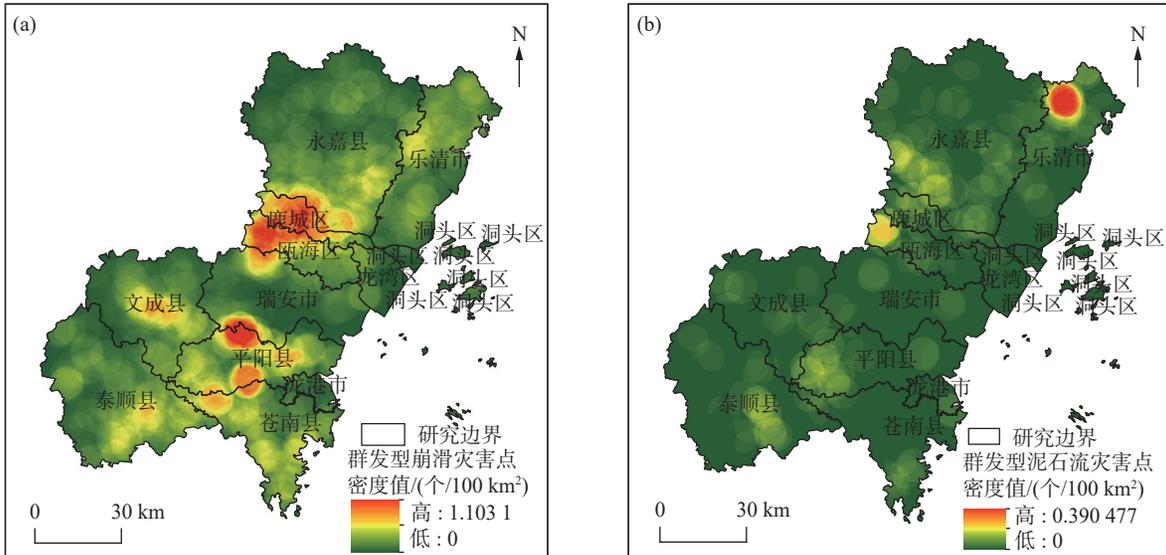


图6 温州市台风暴雨群发型崩滑灾害点密度图(a)及泥石流灾害点密度图(b)

Fig. 6 Density of landslide occurrences (a) and density of debris flow occurrences caused by typhoon and rainstorm (b)

从台风暴雨群发型地质灾害的时间分布来看, 地质灾害与台风活动周期密切同步, 主要集中在 7 月、8 月和 9 月, 分别占 13.3%、37.0%、49.2% (图 7)。以登陆点广东汕头—浙江宁波为界, 统计了 1980—2023 年影响温州市的台风数量如表 1 和图 7 所示, 可知影响温州市的台风主要集中于 7 月、8 月和 9 月, 8 月台风数量达到峰值。相对于台风数量, 台风暴雨诱发的群发型地质灾害也集中于 7—9 月, 9 月地质灾害数量达到峰值, 这说明影响温州市的台风以秋后台风为主。

2.2.2 单点突发型地质灾害分布规律

本研究将由短历时强降雨激发的零星地质灾害称为单点突发型地质灾害。1999—2022 年, 单点突发型地质灾害有 1 345 处, 占同时期区域内地质灾害总数的 52%。

从空间分布来看, 单点突发型滑坡在全市均有分布, 最密集处位于瓯海西部, 其次为平阳—苍南交界处, 再次为乐清南部—平阳北部—苍南南部—泰顺东南部—文成中部—永嘉南部等地区

(图 8)。

从爆发时间来看, 单点突发型地质灾害全年均会发生, 尤其是 5—10 月发生的几率显著多于其他时段。6—9 月是地质灾害高发时段, 8 月最高发, 时间分布与台汛期基本同步(图 9)。

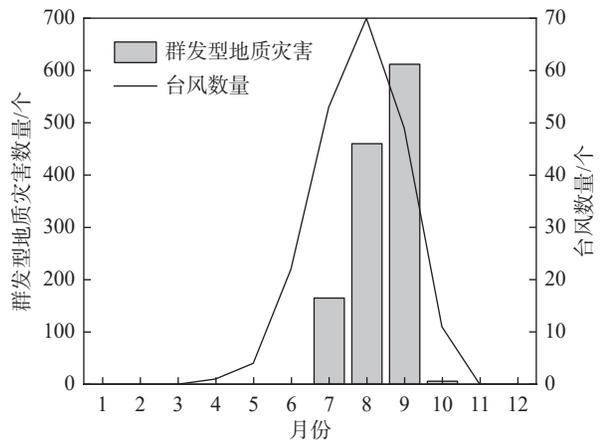


图7 温州市台风暴雨群发型地质灾害月度分布柱状图

Fig. 7 Monthly distribution of typhoon/rainstorm-induced geo-hazard clusters

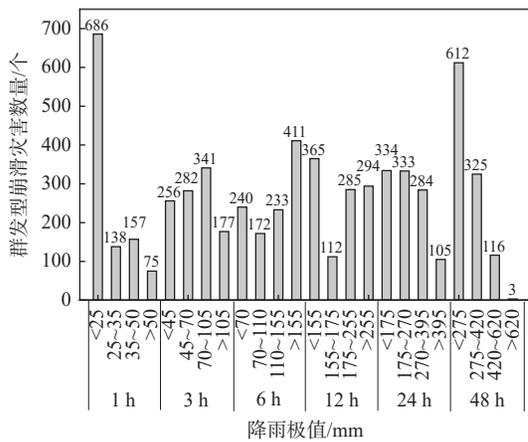


图 11 温州市群发型崩滑灾害与降雨极值关系柱状图
Fig. 11 The relationship between landslide clusters and rainfall extremes in Wenzhou

较而言, 1 h 雨强、3 h 雨强、48 h 雨强极值与地质灾害发生的相关性相对较低。

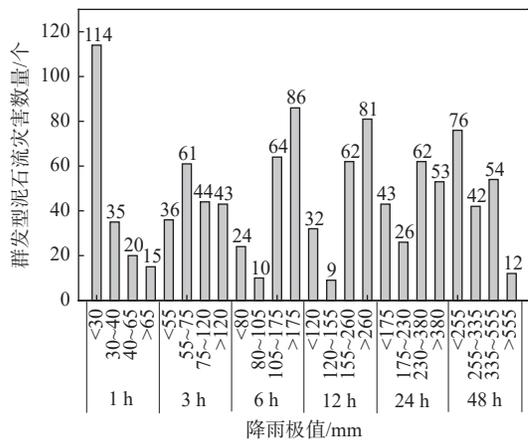


图 12 温州市群发型泥石流灾害与降雨极值关系柱状图
Fig. 12 The relationship between debris flow clusters and rainfall extremes

3 温州市地质灾害降雨阈值

基于前述分析可知, 单点突发型地质灾害的爆发与强降雨的相关性一般, 而台风暴雨群发型地质灾害与降雨极值的相关性较为密切。因此, 本研究基于有效雨量模型, 对台风暴雨群发型滑坡泥石流地质灾害的降雨阈值进行了分析。

3.1 有效降雨量模型

降雨诱发滑坡一般可分为两个阶段: 第一阶段为前期降雨阶段。在此阶段的降雨, 由于受水分蒸发和地表径流的影响, 导致入渗到岩土体中

的雨量小于实际降雨量。入渗到岩土体中的能够增加土体孔隙水压力、减小土体有效应力和土体抗剪强度的雨量称为有效降雨量。此阶段为滑坡的孕育阶段。第二阶段为关键降雨阶段, 此阶段的降雨直接触发滑坡的发生。由于一次降雨并不一定会导致滑坡的发生, 而每次降雨量中也只有部分对滑坡的发生起到一定的作用, 累计降雨量显然不能作为临界降雨量。因此, 用一段时间的当天降雨量分别乘以降雨衰减系数得到有效降雨量, 更能真实反映土体含水量的变化对滑坡的影响, 具体如公式(1)所示:

$$R_e = \sum_{i=1}^n \alpha^{n-i} R_n, \quad (1)$$

式中: R_e 为有效降雨量; R_n 为前 n 日降雨量; α 为降雨衰减系数; n 为降雨持续时间。

3.2 降雨与地质灾害数据

有效降雨量模型需要有长序列的降雨量数据支撑。本研究收集了 3 次引发群发性滑坡泥石流灾害的台风暴雨量数据, 分别为 200608 号台风“桑美”、200908 号台风“莫拉克”和 201909 号台风“利奇马”, 并基于这 3 次台风长时间序列逐小时降雨数据用于分析有效雨量。

3.2.1 200608 “桑美”台风地质灾害

台风“桑美”是 2006 年第 7 个登陆我国大陆的台风, 8 月 10 日 17 时 25 分登陆浙江苍南马站镇。台风“桑美”是登陆我国大陆最强的台风之一(后来被 2014 年第 9 号台风威马逊所超越), 百年一遇, 比 2005 年登陆美国的“卡特里娜”飓风还要略强。

台风“桑美”形成的过程中, 全市灾害最大 1 h 极值降雨量为 129.5 mm, 大部分雨量站分布在 80 mm 以下; 最大 3 h 极值降雨量为 240.5 mm, 主要分布在 140 mm 以下; 最大 6 h 极值降雨量为 370.3 mm, 主要分布在 300 mm 以下; 最大 12 h 极值降雨量为 454.1 mm, 主要分布在 300 mm 以下; 最大 24 h 极值降雨量为 474.4 mm, 主要分布在 400 mm 以下(表 2)。

“桑美”台风引发的地质灾害发生的时间段以 2006 年 8 月 10 日为主, 共引发地质灾害 19 处, 其中滑坡 16 处, 崩塌 3 处, 主要分布在苍南县(图 13)。由降雨等值线与地质灾害的相关性可知, 地质灾害的分布与降雨量密切相关, 地质灾害基本发生在降雨强度与过程雨量较大的区域内。

表2 “桑美”台风降雨极值统计表
Table 2 Statistics of extreme rainfall during Typhoon Saomai

降雨发生后的时间/h	1	3	6	12	24	48
极值降雨量/mm	129.5	240.5	370.3	454.1	474.4	478.5

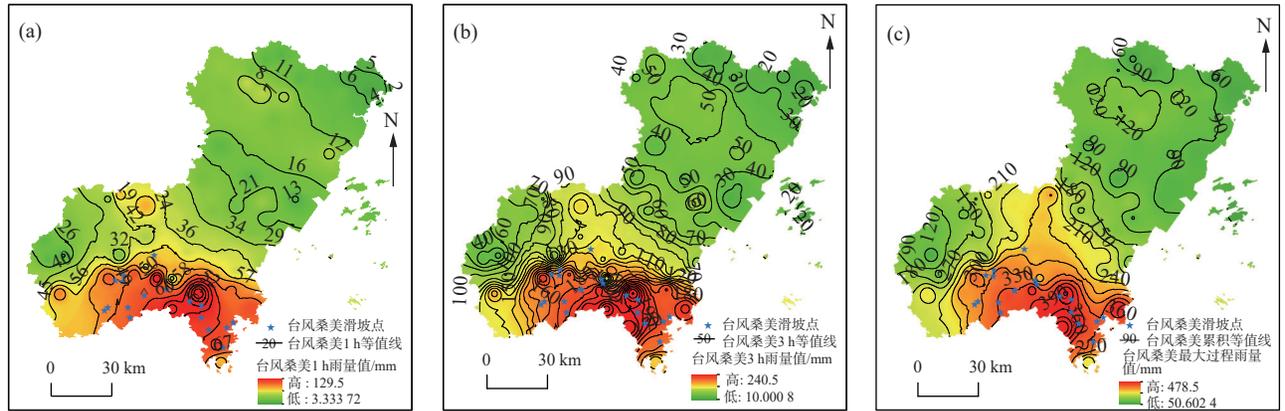


图13 温州市“桑美”台风期间最大1 h雨量等值线与地质灾害分布(a)、最大3 h雨量等值线与地质灾害分布(b)及最大过程雨量等值线与地质灾害分布图(c)

Fig. 13 The maximum 1-hour rainfall contour line (a), the maximum 3-hour rainfall contour line (b) and the maximum process rainfall contour line and the geological disaster distribution (c) during the Typhoon Saomai

3.2.2 200908“莫拉克”台风地质灾害

“莫拉克”台风形成于2009年8月上旬,于8月4日获得正式名称,8月6日达到强度巅峰,并在8月7日夜间登陆台湾省花莲县。其后因受双台风效应、地形、季风等因素的综合影响,在台湾海峡周边长久滞留并带来极端降水,造成了台湾省自1959年“八七水灾”以来最严重的一次水灾——八八水灾,并重创华东以及华南地区,造成789人遇难以及62亿美元的经济损失,成为2009年太平洋台风季经济损失最重的一次风暴。

台风“莫拉克”形成的过程中,全市灾害最大1 h极值降雨量为62.6 mm,主要分布在60 mm

以下;最大3 h极值降雨量为139 mm,主要分布在120 mm以下;最大6 h极值降雨量为219.8 mm,主要分布在180 mm以下;最大12 h极值降雨量为334 mm,主要分布在240 mm以下;最大24 h极值降雨量为540.5 mm,主要分布在360 mm以下;最大48 h极值降雨量为750 mm,主要分布在500 mm以下(表3)。

“莫拉克”台风所带来的强降雨诱发了温州市地质灾害163处,其中滑坡崩塌159处,泥石流4处。地质灾害遍布温州全市,在平阳县、瑞安市和文成县一带地质灾害最集中,发生时间多集中在8月9日中午11时至下午13时之间(图14)。

表3 “莫拉克”台风降雨极值统计表
Table 3 Statistics of extreme rainfall during Typhoon Morakot

降雨发生后时间/h	1	3	6	12	24	48
极值降雨量/mm	62.6	139.2	219.8	334	540.5	750

3.2.3 201909“利奇马”台风地质灾害

台风“利奇马”于2019年8月7日5时左右被中央气象台升格为台风,23时左右被进一步升格为超强台风,并于8月10日1时45分左右在浙江省温岭市城南镇沿海登陆。登陆时中心附近最大风力为16级(52 m/s),这使其成为2019年以来

登陆中国的最强台风以及1949年以来登陆浙江省第三强的台风。

“利奇马”台风形成的过程中,全市灾害最大1 h极值降雨量为168.5 mm,主要分布在100 mm以下;最大3 h极值降雨量为441 mm,主要分布在200 mm以下;最大6 h极值降雨量为

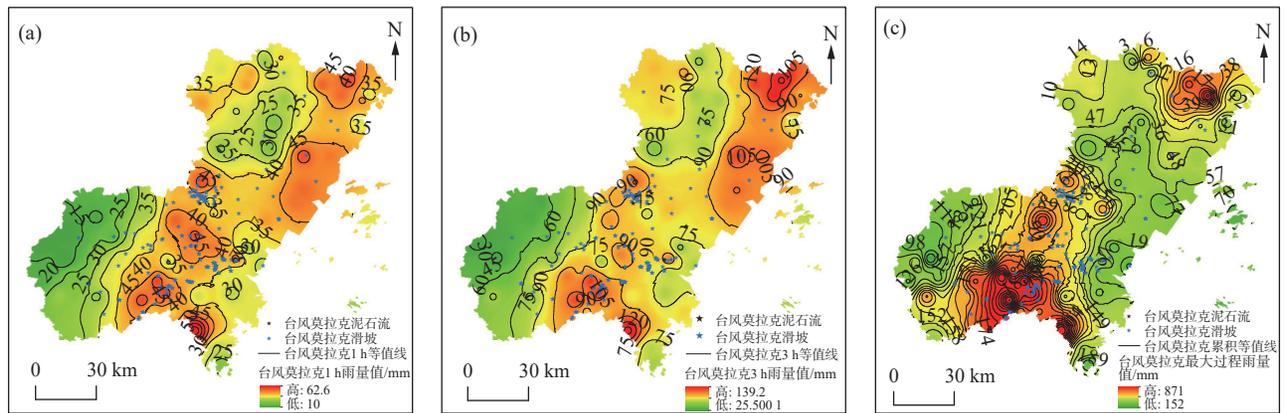


图 14 温州市“莫拉克”台风期间最大 1 h 雨量等值线与地质灾害分布(a)、最大 3 h 雨量等值线与地质灾害分布(b)及最大过程雨量等值线与地质灾害分布图(c)

Fig. 14 The maximum 1-hour rainfall contour line (a) , the maximum 3-hour rainfall contour line (b) and the maximum process rainfall contour line and the geological disaster distribution (c) during the Typhoon Morakot

565 mm, 主要分布在 300 mm 以下; 最大 12 h 极值降雨量为 750 mm, 主要分布在 400 mm 以下; 最大 24 h 极值降雨量为 883.5 mm, 主要分布在 580 mm 以下; 最大 48 h 极值降雨量为 922 mm, 主要分布在 620 mm 以下(表 4)。

台风“利奇马”从温州北东侧经过, 所带来的强降雨诱发了包括永嘉山旱滑坡在内的群发性滑坡泥石流 107 处, 其中滑坡 87 处, 泥石流 20 处(图 15)。

3.3 降雨数据提取与分析

3.3.1 降雨数据的提取

本研究采用泰森多边形开展雨量站分类(图 16)。雨量站所在的多边形范围内存在地质灾害, 则认为该雨量站记录的降雨事件激发了地质灾害; 雨量站所在的多边形范围内不存在地质灾害, 则认为该雨量站记录的降雨事件未激发地质灾害。

提取以上 3 次台风的降雨数据, 发现滑坡、泥石流事件一共 286 次, 其中滑坡 261 次, 泥石流

表 4 “利奇马”台风降雨极值统计表
Table 4 Statistics of extreme rainfall during Typhoon Lekima

降雨发生后时间/h	1	3	6	12	24	48
极值降雨量/mm	168.5	441	565	750	883.5	922

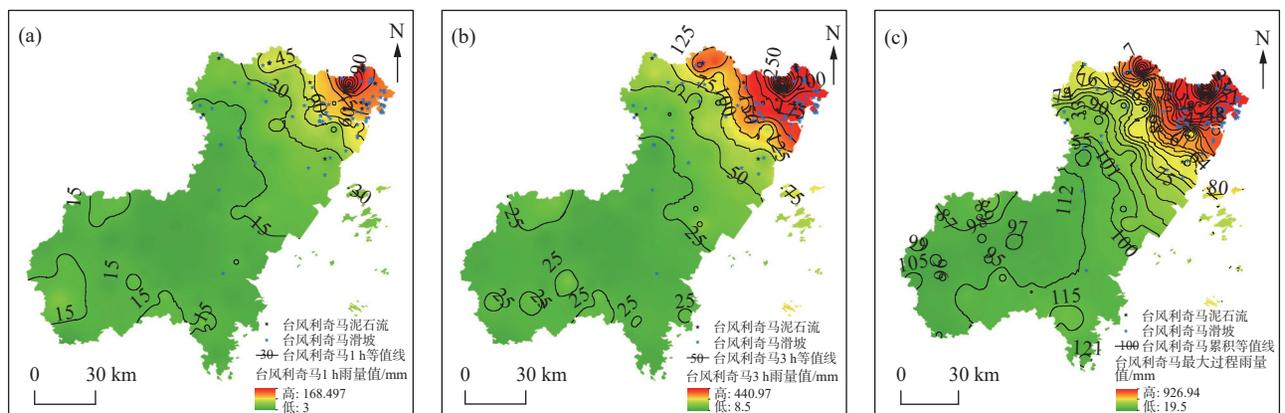


图 15 温州市“利奇马”台风期间最大 1 h 雨量等值线与地质灾害分布(a)、最大 3 h 雨量等值线与地质灾害分布(b)及最大过程雨量等值线与地质灾害分布图(c)

Fig. 15 The maximum 1-hour rainfall contour line (a) , the maximum 3-hour rainfall contour line (b) and the maximum process rainfall contour line and the geological disaster distribution (c) during the Typhoon Lekima

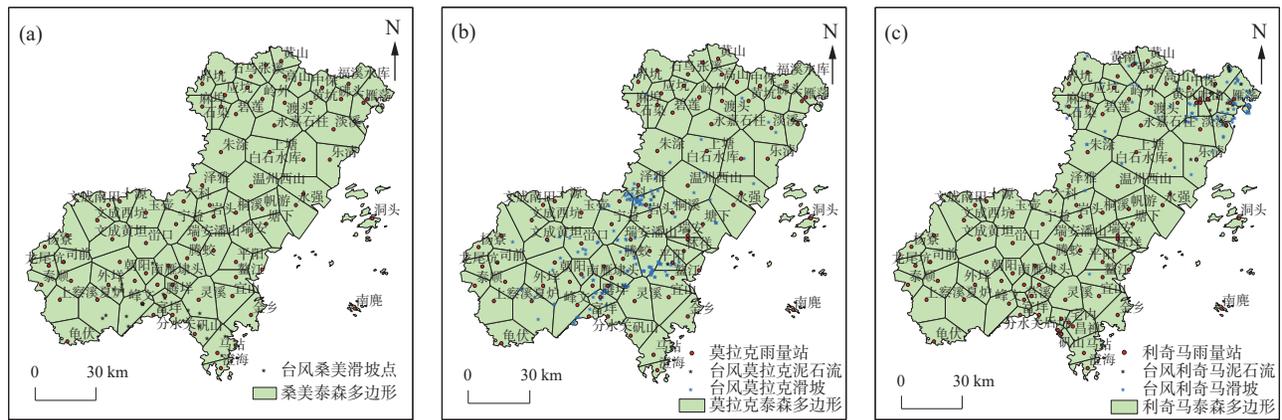


图16 “桑美”台风(a)、“莫拉克”台风(b)及“利奇马”台风(c)雨量站泰森多边形分布图

Fig. 16 Thiessen polygon distribution of rainfall stations for Typhoon Saomai (a), Typhoon Morakot (b) and Typhoon Lekima (c)

25次。将相同雨量站中的多场同类型地质灾害事件视为同一场降雨所引发,经归并后,共有激发滑坡的降雨事件75次,泥石流事件12次。

3.3.2 降雨日数相关性分析

考虑样本的选取受空间影响较大,基于泰森多边形雨量站数据,选取相同个数的无灾害点雨量站和有灾害点雨量站,记灾害点发生当日降雨量为 R_i ,当日降雨量和前一日的累计降雨量为 R_2 ,以此类推,作为持续日数前期累计降雨量,将累计前10日降雨量与样本依次做Person相关性分析,计算方法如下。

将Person相关系数用于度量两个变量 X 与 Y 的相关程度,其值介于-1与1之间,反映的是两个变量之间线性相关的强弱程度,具体如公式(2)所示。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

式中: r 为简单相关系数; X_i 和 Y_i 分别为降雨量和

滑坡次数的观测值; \bar{X} 和 \bar{Y} 为均值; n 为样本量。

不同日数前期累计降雨量与滑坡相关性分析如表5所示,结果显示相关性呈先增后减的趋势,在累计2天达到峰值0.5345,而后两者相关性系数逐渐下降。因此,将累计2天降雨作为该区降雨诱发滑坡地质灾害的关键前期降雨日数。

不同日数前期累计降雨量与泥石流相关性分析如表6所示,结果表明相关性呈先增后减的趋势,在累计2天达到峰值0.6621,而后两者相关性系数逐渐下降。因此,将累计2天降雨作为该区降雨诱发泥石流地质灾害的关键前期降雨日数。

已有研究表明,台风诱发东南沿海的滑坡灾害有效降雨量大多为累计前2天降雨量,至多不超过累计前5天。上述2天降雨与周边区域台风降雨诱发地质灾害的情况与已有研究结果基本一致。

3.3.3 衰减系数的确定

相关研究表明,对滑坡而言,降雨衰减系数 α 值一般为0.72~0.86,台风地区和非台风地区有所

表5 不同日数前期累计降雨量与滑坡相关性分析

Table 5 Correlation analysis between cumulative rainfall in different days and landslide

r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10
0.3757	0.5345	0.3499	0.2760	0.2841	0.3351	0.3349	0.3013	0.2970	0.2931

注: r1—r10为不同日数前期累计降雨量与滑坡相关系数。

表6 不同日数前期累计降雨量与泥石流相关性分析

Table 6 Correlation between debris flow and cumulative rainfall for different days

r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10
0.4558	0.6621	0.4257	0.2574	0.2449	0.2615	0.2567	0.1961	0.1933	0.1902

注: r1—r10为不同日数前期累计降雨量与滑坡相关系数。

不同。台风期间, 降雨往往在短时间内以极高的强度降落, 使土体迅速饱和, 吸收能力较好, 大量的降雨转化为地表径流, 从而降低了实际渗入土体中的降雨量; 非台风期间, 降雨强度较低且分布较均匀, 土体入渗量更大。因此, 台风地区的有效雨量系数 α 值一般较低, 而非台风地区由于更多降雨转化为有效入渗量, 其系数 α 值相对较高。对于浙江省来说, 已有统计结果表明非台风地区 $\alpha=0.8$, 台风地区 $\alpha=0.7$ (Zhang et al., 2011)。本研究采用 3 次台风群发性滑坡为样本, 其降雨过程短且雨量集中, 降雨强度大, 有效雨量采用累计前 2 天的降雨量, 滑坡的衰减系数 α 取值为 0.7。

对泥石流而言, 前人研究表明在所考虑的前期降雨观测时段内, 每天降雨的衰减系数是相对独立的。日本的泥石流灾害研究中, 衰减系数 α 一般取值为 0.5(瀬尾克美等, 2001); 国内类似气候区也有研究采用了该方法对泥石流地质灾害的临界雨量进行了计算(谭万沛, 1989)。本研究采用了 3 次台风诱发的泥石流灾害为样本, 参考上述成果, 泥石流有效雨量采用累计前 2 天降雨量, 衰减系数 α 取值为 0.5。

3.4 降雨阈值曲线

降雨阈值 $I-D$ 曲线如图 17 所示。本研究采用发生概率 50% 时所对应的 $I-D$ 阈值线作为综合 $I-D$ 阈值曲线, 即基于历史灾害数据点统计, 诱发 50% 的历史灾害的预警雨量界限。采用 50% 的阈值曲线在统计学上具有代表性, 能较好地反映一般情况下灾害触发的“中等风险”水平, 可为预警决策提供稳定的依据。结果表明: 滑坡发生

概率 50% 时对应的 $I-D$ 阈值线为: $I_{50} = 25.30 D^{-0.49}$; 泥石流发生概率 50% 时所对应的 $I-D$ 阈值线为: $I_{50} = 115.86 D^{-0.83}$ 。

此外, 本研究还采用概率法, 分析得到了不同概率下的滑坡/泥石流阈值曲线。分别选取 0%、30%、50% 和 80% 代表启动概率、低概率、中等概率以和高概率。不同概率下的地质灾害降雨阈值曲线如图 18 所示。在实际预警中, 基于不同概率构建多级阈值曲线能够提供更细致的风险分级, 为多级预警系统提供依据, 使预警响应可以根据风险等级的不同而进行差异化管理, 从而提高整体防灾、减灾效率(韩帅等, 2023)。

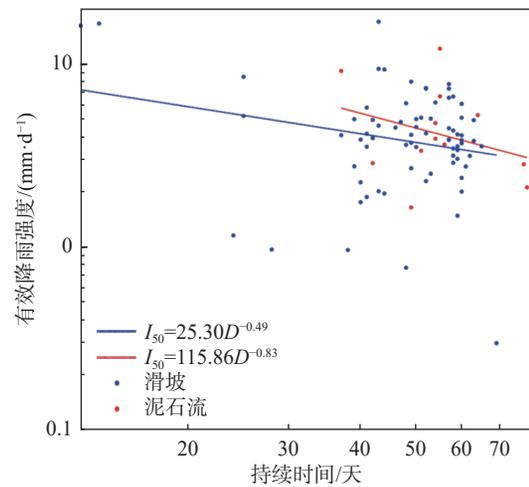


图 17 基于有效雨量的 $I-D$ 拟合曲线(蓝线为滑坡 $I-D$ 曲线, 红线为泥石流 $I-D$ 曲线)

Fig. 17 $I-D$ fitting curve based on effective rainfall amount (blue line is landslide $I-D$ curve, red line is debris flow $I-D$ curve)

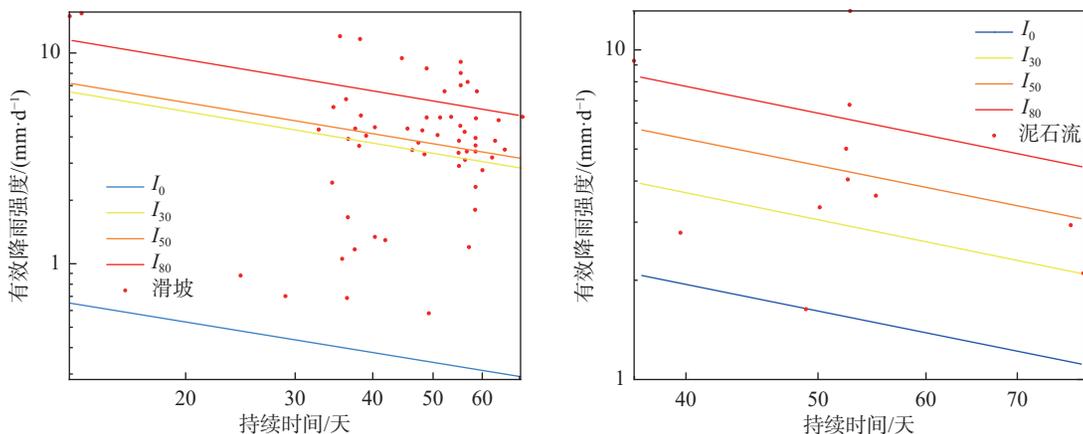


图 18 基于有效雨量的不同概率 $I-D$ 曲线(左图为滑坡, 右图为泥石流)

Fig. 18 $I-D$ curves of different probabilities based on effective rainfall model (the left picture is landslide, and the right is debris flow)

3.5 降雨阈值建议

基于上述有效雨量模型的 $I-D$ 阈值曲线, 可得到温州市地质灾害降雨阈值建议, 具体如表 7 和表 8 所示。

由计算结果可知, 崩滑灾害的降雨阈值要显著低于泥石流灾害的降雨阈值。因此, 在开展地

质灾害气象预警调查工作时, 对崩滑灾害与泥石流灾害分别设置不同的预警阈值是非常合理的。从发生地质灾害的样本来看, 由于采取的是台风汛期群发性地质灾害的地质灾害样本, 因此, 在具体应用方面, 该阈值也较适合应用于台风暴雨型地质灾害的预警。

表7 温州市崩滑灾害降雨阈值建议表(基于有效雨量)(单位: mm)

Table 7 Recommended rainfall thresholds for landslide disasters in Wenzhou (based on effective rainfall amount) (mm)

预警时长	启动概率	低概率	中等概率	高概率
$I-D$ 曲线	$I_0=2.38D^{-0.50}$	$I_{30}=23.03D^{-0.50}$	$I_{50}=25.30D^{-0.50}$	$I_{80}=40.60D^{-0.50}$
1 h	2.4	23.0	25.3	40.6
3 h	4.2	40.3	44.3	71.1
6 h	5.9	57.4	63.1	101.2
12 h	8.5	81.8	89.8	144.2
24 h	12.0	116.5	127.9	205.3
48 h	17.1	165.9	182.2	292.4

表8 温州市泥石流灾害降雨阈值建议表(基于有效雨量)(单位: mm)

Table 8 Recommended rainfall thresholds for debris flow disasters in Wenzhou (based on effective rainfall amount) (mm)

预警时长	启动概率	低概率	中等概率	高概率
$I-D$ 曲线	$I_0=41.98D^{-0.83}$	$I_{30}=79.64D^{-0.83}$	$I_{50}=115.86D^{-0.83}$	$I_{80}=167.60D^{-0.83}$
1 h	42.0	79.6	115.9	167.6
3 h	50.6	96.0	139.7	202.0
6 h	56.9	108.0	157.1	227.3
12 h	64.0	121.5	176.8	255.7
24 h	72.1	136.7	198.9	287.7
48 h	81.1	153.8	223.7	323.7

4 结论

(1) 本文收集、整理了温州市历年地质灾害与降雨量数据, 并基于收集的样本数据对该市地质灾害发育情况进行了分析, 将其地质灾害类型划分为台风暴雨群发型与单点突发型两类。台风暴雨群发型地质灾害主要包括崩塌、滑坡和泥石流, 约占同时期(1999—2022年)地质灾害总数的 51.5%; 单点突发型地质灾害主要以崩塌和滑坡为主, 约占同时期地质灾害总数的 48.5%。

(2) 分析总结了温州市不同类型地质灾害的时空分布规律, 结果表明: 台风暴雨群发型地质灾害从空间分布看, 其与相对应台风暴雨的空间分布密切相关, 从时间分布来看, 其与台风活动周期

密切同步; 单点突发型地质灾害从空间分布来看, 全市均有分布, 从时间分布看, 全年均会发生, 6—9月为高发时段。此外, 对不同类型地质灾害的爆发数量与降雨极值关系进行了统计分析, 结果表明: 单点突发型地质灾害的爆发与强降雨相关性一般, 台风暴雨群发型地质灾害与降雨极值的相关性较为密切。

(3) 基于有效雨量模型, 采用 3 次台风降雨与地质灾害数据开展地质灾害降雨阈值研究, 统计分析得到了温州市域范围台风暴雨群发型滑坡灾害与泥石流灾害在不同概率下的降雨阈值 $I-D$ 曲线, 并提出了温州市不同类型地质灾害降雨阈值建议, 为台风暴雨型地质灾害预警提供了理论应用基础。

(4)在实际地质灾害预警中,降雨阈值建议的转化与应用还存在一些不足之处,特别是在实时监测数据接入、动态调整机制及区域适用性方面尚需进一步验证。未来可考虑建立动态更新的预警模型,对不同地质环境下降雨阈值的区域适用性进行更深入的研究,提高预警系统的准确性和及时性。

References

- ALVIOLI M, GUZZETTI F, ROSSI M. 2014. Scaling properties of rainfall induced landslides predicted by a physically based model[J]. *Geomorphology*, 213: 38-47.
- BAO Q Y, MA T H, LI C J, WANG B X. 2016. Rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of landslides in 62 hilly and mountainous counties of Zhejiang Province[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 32(5): 48-55,95 (in Chinese with English abstract).
- BORDONI M, CORRADINI B, LUCHELLI L, VALENTINO R, BITTELLI M, VIVALDI V, MEISINA C. 2019. Empirical and physically based thresholds for the occurrence of shallow landslides in a prone area of Northern Italian Apennines[J]. *Water*, 11(12): 2653.
- CAINE N. 1980. The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows[J]. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 62(1-2): 23-27.
- CAMPBELL R H. 1975. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California[M]. Washington: US Government Printing Office.
- ENDO T. 1969. Probable distribution of the amount of rainfall causing landslides[R]. Sapporo: Annual Report of the Hokkaido Branch, Government Forest Experiment Station, 122-136.
- FUSCO F, DE VITA P, MIRUS B B, BAUM R L, ALLOCCA V, TUFANO R, DI CLEMENTE E, CALCATERA D. 2019. Physically based estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides in volcanic slopes of Southern Italy[J]. *Water*, 11(9): 1915.
- GIANNECCHINI R, GALANTI Y, AVANZI G D A, BARSANTI M. 2016. Probabilistic rainfall thresholds for triggering debris flows in a human-modified landscape[J]. *Geomorphology*, 257: 94-107.
- GONG X F. 2004. The current situation, characteristics and causes of debris flows in the northern mountainous area of Yueqing City[J]. *Zhejiang Land & Resources*, (10): 38-42 (in Chinese).
- GUO X J, CUI P, LI Y, MA L, GE Y G, MAHONEY W B. 2016. Intensity-duration threshold of rainfall-triggered debris flows in the Wenchuan earthquake affected area, China[J]. *Geomorphology*, 253: 208-216.
- GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, STARK C P. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update[J]. *Landslides*, 5(1): 3-17.
- HAN S, HUI S J, SUN Q, ZHANG S, SHI L, ZHANG Y, ZHU Q W. 2023. Research on ecological restoration technology of high-steep slopes of abandoned mines based on geological safety evaluation[J]. *East China Geology*, 44(2): 216-227 (in Chinese with English abstract).
- MA T H, LI C J, SUN L L, LI W, HE C F. 2011. Rainfall intensity-duration thresholds for landslides in Zhejiang region, China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 22(2): 20-25 (in Chinese with English abstract).
- MARIN R J, GARCÍA E F, ARISTIZÁBAL E. 2020. Effect of basin morphometric parameters on physically-based rainfall thresholds for shallow landslides[J]. *Engineering Geology*, 278: 105855.
- MARIN R J, VELÁSQUEZ M F. 2020. Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides[J]. *Geomorphology*, 351: 106976.
- MARINO P, PERES D J, CANCELLIERE A, GRECO R, BOGAARD T A. 2020. Soil moisture information can improve shallow landslide forecasting using the hydrometeorological threshold approach[J]. *Landslides*, 17(9): 2041-2054.
- NAPOLITANO E, FUSCO F, BAUM R L, GODT J W, DE VITA P. 2016. Effect of antecedent-hydrological conditions on rainfall triggering of debris flows in ash-fall pyroclastic mantled slopes of Campania (southern Italy)[J]. *Landslides*, 13(5): 967-983.
- ONODERA T, YOSHINAKA R, KAZAMA H. 1974. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan[J]. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 15(4): 191-200.
- PAPA M N, MEDINA V, CIERVO F, BATEMAN A. 2013. Derivation of critical rainfall thresholds for shallow landslides as a tool for debris flow early warning systems[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10): 4095-4107.
- SENOO K, HARAGUCHI K, KIKUI T, YOSHIDA S. 2001. On the theme and improvement of standard rainfall for warning and evacuation from sediment disasters[J]. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 53(6): 37-44 (in Japanese with English abstract).

- SUN L Y, ZHANG H H, QIU C J, YANG Z B, ZHANG C X, ZHANG B, ZHANG T L. 2024. Temporal variability of influence factors weights and rainfall thresholds of geological hazards in Ningbo City[J]. *East China Geology*, 45(2): 218-227 (in Chinese with English abstract).
- SUN Q, ZHANG T L, WU J B, WANG H S, ZHU Y H, HAN S. 2021. Application of shallow landslide stability model to landslide prediction in the Linxi River basin of southern Zhejiang[J]. *East China Geology*, 42(4): 383-389 (in Chinese with English abstract).
- TAN W P. 1989. Distribution characters of critical rainfall line for the debris flow gully[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 9(6): 21-26 (in Chinese with English abstract).
- TANG R J, XU G L, TANG Z Q. 2019. Study on critical rainfall of grouped slope debris flows in Wenzhou[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 30(3): 60-66 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y M, YUAN M H, YIN K L, GONG X F. 2011. Analysis on the critical rainfall for the outbreak of debris flow in Southeast mountain area of Zhejiang Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 22(3): 21-26 (in Chinese with English abstract).
- WANG H S, WU J B, ZHANG T L, SUN Q, LI Y. 2020. Dynamic assesment of geohazard susceptibility based on the SHALSTAB model[J]. *East China Geology*, 41(1): 88-95(in Chinese with English Abstract).
- WU Y M, LAN H X, GAO X, LI L P, YANG Z H. 2015. A simplified physically based coupled rainfall threshold model for triggering landslides[J]. *Engineering Geology*, 195: 63-69.
- WU J B, WANG H S, ZHANG T L, SUN Q, ZHU Y H. 2021. Analysis and prediction of the groundwater dynamics of landslide induced by typhoon rainstorm[J]. *East China Geology*, 42(4): 390-397 (in Chinese with English abstract).
- YUAN L X, CUI X, WANG Z P, LI Y S. 2009. Cause mechanism of Xianrentan debris flow in Yueqing City, Zhejiang Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 18(2): 150-154 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG G R, CHEN L X, DONG Z X. 2011. Real-time warning system of regional landslides supported by WEBGIS and its application in Zhejiang Province, China[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2: 247-254.

附中文参考文献

- 鲍其云, 麻士华, 李长江, 王保欣. 2016. 浙江 62 个丘陵山区县引发滑坡的降雨强度——历时阈值[J]. *科技通报*, 32(5): 48-55,95.
- 龚新法. 2004. 乐清市北部山区泥石流现状特征及成因[J]. *浙江国土资源*, (10): 38-42.
- 韩帅, 惠淑君, 孙强, 张帅, 时磊, 张颖, 朱庆伟. 2023. 基于地质安全评价的废弃矿山高陡边坡生态修复技术研究[J]. *华东地质*, 44(2): 216-227.
- 瀬尾克美, 原口勝則, 菊井稔宏, 吉田真也. 2001. 在滑坡和疏散下的标准降雨的问题和改进[J]. *砂防学会誌*, 53(6): 37-44.
- 麻士华, 李长江, 孙乐玲, 李炜, 何彩芬. 2011. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 22(2): 20-25.
- 孙丽影, 张弘怀, 邱昌骏, 杨珍斌, 张长响, 张斌, 张泰丽. 2024. 宁波地质灾害影响因子权重的时变性与雨量阈值研究[J]. *华东地质*, 45(2): 218-227.
- 孙强, 张泰丽, 伍剑波, 王赫生, 朱延辉, 韩帅. 2021. SHAL-STAB 模型在浙南林溪流域滑坡预测中的应用[J]. *华东地质*, 42(4): 383-389.
- 谭万沛. 1989. 泥石流沟的临界雨量线分布特征[J]. *水土保持通报*, 9(6): 21-26.
- 汤人杰, 徐光黎, 汤忠强. 2019. 温州群发性坡面泥石流临界雨量研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 30(3): 60-66.
- 王一鸣, 袁民豪, 殷坤龙, 龚新法. 2011. 浙东南山丘区泥石流爆发的临界雨量分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 22(3): 21-26.
- 王赫生, 伍剑波, 张泰丽, 孙强, 李燕. 2020. 基于 SHAL-STAB 模型的地质灾害易发性动态评价[J]. *华东地质*, 41(1): 88-95.
- 伍剑波, 王赫生, 张泰丽, 孙强, 朱延辉. 2021. 台风暴雨型滑坡地下水位动态特征及预测[J]. *华东地质*, 42(4): 390-397.
- 袁丽侠, 崔星, 王州平, 李永生. 2009. 浙江乐清仙人坦泥石流的形成机制[J]. *自然灾害学报*, 18(2): 150-154.

Study on rainfall threshold of geological disasters based on effective rainfall model in Wenzhou City

XU Dengcai¹, ZHANG Taili^{2,3}, HEI Lisha⁴, WANG Yiming⁵

(1. Geological Environment Monitoring Center, Wenzhou Natural Resources and Planning Bureau, Wenzhou 325027, Zhejiang, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

Abstract: Wenzhou is located in the coastal area of southeast China, where frequent occurrences of extreme rainfall have resulted in a high incidence of geological disasters over the years. This study collects the historical geological disasters and rainfall data of Wenzhou (a total of 2 692 geological disaster samples, of which 2 615 are accurately dated to the month, spanning from 1905 to 2023) to analyze the development, spatio-temporal distribution patterns of geological disasters, and their relationship with rainfall. Based on the effective rainfall model, we statistically analyzed the rainfall thresholds of different types of geological disasters in Wenzhou. The results show that the geological disasters in Wenzhou are mainly classified into two categories: the cluster disasters triggered by typhoon-rainstorm and the single-point sudden disasters. Among them, the cluster disasters triggered by typhoon-rainstorm is closely related to typhoon rainstorm activities, and strongly correlated with rainfall extreme, while the single-point sudden geological disasters has less correlation with heavy rainfall. The statistical analysis derives the intensity–duration (*I-D*) curves of rainfall thresholds at various probabilities for cluster landslide and debris flow disasters triggered by typhoon-rainstorm in Wenzhou. Additionally, it recommends rainfall-threshold values for different types of geological disasters in Wenzhou. This study provides theoretical support and scientific evidence for early warning of geological disasters in Wenzhou, which has significant practical importance and application value.

Key words: Wenzhou City; geological disasters; typhoon and rainstorm; effective rainfall; rainfall threshold