

熊 诚,李晴岚,雷呈斌,等. 2001~2016 年香港滑坡与降雨的时序特征[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(4): 605-616.

XIONG Cheng, LI Qing-lan, LEI Cheng-bin, et al. Temporal Characteristics of Landslides and Rainfall in Hong Kong, China from 2001 to 2016[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(4): 605-616.

DOI: 10.19814/j.jese. 2021. 10025

2001~2016 年香港滑坡与降雨的时序特征

熊 诚^{1,2}, 李晴岚^{1*}, 雷呈斌², 孙立群¹, 阮建军³

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市自然资源和不动产评估发展研究中心
(深圳市地质环境监测中心), 广东 深圳 518040; 3. 深圳市地质局, 广东 深圳 518023)

摘 要:随着城市建设步伐加快,城市滑坡灾害对群众生命财产安全的威胁日益突出。降雨造成的滑坡占滑坡总数的90%以上,研究降雨量与滑坡数之间的关系,对城市安全和防灾减灾具有重要意义。根据香港土木工程拓展署发布的滑坡年报中2001~2016年日滑坡时间数据、增强自然地形滑坡清单的滑坡空间数据以及香港天文台日降雨观测数据,分析香港滑坡数和降雨量之间的定量和定性关系。结果表明:日滑坡数、月滑坡数和年滑坡数,与日降雨量、月降雨量和年降雨量成显著正相关关系,其相关系数分别为0.406、0.718、0.682;当日滑坡数除受当日降雨量的影响以外,也受前13 d累积降雨量的影响;当日与前4 d累积降雨量对当日滑坡数影响明显,当日与前1 d降雨量影响权重最大,当日降雨量的权重影响平均是前1 d降雨量影响权重的1.2倍;在降雨量超过200 mm(特大暴雨)的条件下,发生群发性滑坡概率为87.5%;降雨及滑坡最集中的月份是6月,6月至8月降雨集中,滑坡灾害较其他月份更为严重。本研究对粤港澳大湾区防灾减灾和市政建设规划具有参考价值。

关键词:滑坡;降雨;时序特征;回归分析;相关性;有效自由度;临界相关系数;香港

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2022)04-0605-12

Temporal Characteristics of Landslides and Rainfall in Hong Kong, China from 2001 to 2016

XIONG Cheng^{1,2}, LI Qing-lan^{1*}, LEI Cheng-bin², SUN Li-qun¹, RUAN Jian-jun³

(1. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Shenzhen Natural Resources and Real Estate Evaluation and Development Research Center (Shenzhen Geo-environment Monitoring Center), Shenzhen 518040, Guangdong, China; 3. Shenzhen Geology Bureau, Shenzhen 518023, Guangdong, China)

Abstract: With the acceleration of urban construction, the impact of urban landslide disasters on the safety and property of residents has become increasingly prominent. Statistics show that landslides caused by rainfall account for more than 90% of the total landslides. The research on the qualitative and quantitative relationships between rainfall and landslide is of great significance to urban safety and urban disaster prevention and mitigation. Based on daily landslides data from 2001 to 2016 in the annual landslide report published by the Civil Engineering and Development

收稿日期:2021-10-15;修回日期:2022-02-23 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2019B111101002);国家重点研发计划项目(2018YFB0204403)

作者简介:熊 诚(1988-),男,湖北鄂州人,中国科学院深圳先进技术研究院工程师,理学博士,博士后,

E-mail: cross_xiong1511@163.com.

* 通讯作者:李晴岚(1971-),女,湖南津市人,研究员,博士研究生导师,工学博士, E-mail: ql.li@siat.ac.cn.

Department of Hong Kong, the spatial landslides data from the *Enhanced Natural Terrain Landslide Inventory* and the daily rainfall observation data from Hong Kong Observatory, the quantitative and qualitative relationships between landslides and rainfall in Hong Kong were analyzed. The results show that the daily, monthly and annual landslides are significantly correlated with daily, monthly and annual rainfall, and the correlation coefficients are 0.406, 0.715 and 0.640, respectively; the occurrence of daily landslide is not only affected by the rainfall of the same day, but also by the accumulated rainfall of the previous 13 days; the daily landslides is significantly influenced by the rainfall on the same day and the previous four days; the rainfall on the same day and the previous one day has the greatest impact on the daily landslide; on average, the impact of the rainfall on the current day is 1.2 times the impact of rainfall of the day before; when the daily rainfall exceeds 200 mm (extremely heavy rain), the probability of mass landslides reaches 87.5%; the month with the highest probability of rainfall and landslide in Hong Kong is June, and landslide disasters are more serious from June to August than those in other months in Hong Kong. This research can provide valuable references for disaster prevention and mitigation, and municipal construction planning in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

Key words: landslide; rainfall; temporal characteristic; regression analysis; correlation; effective degree of freedom; critical correlation coefficient; Hong Kong

0 引 言

中国是一个地质灾害频发的国家,仅 2011~2015 年,全国登记地质灾害及隐患点 288 525 处,包含滑坡 148 214 处、崩塌 67 478 处,造成直接经济损失约 2 400 亿元^[1]。东南沿海丘陵地带为滑坡高风险区^[1],该地区经济发达、人口众多,一旦发生滑坡,社会经济损失巨大。例如,2013 年 5 月下旬强降雨造成广东珠海地区滑坡,仅珠海市斗门区直接经济损失就达 2 000 万元^[2];2014 年 3 月 30 日,广东省肇庆市长乐墓园因暴雨发生山体滑坡事故,造成当场死亡 5 人、抢救无效死亡 1 人、受伤 1 人^[3]。位于东南沿海的香港是全球人口密度最高的地区之一,其面积狭小且缺乏平地,居民楼及公共基础设施常修建于丘陵地带。受强风及季节性强降雨共同作用,香港滑坡频发,威胁公众生命财产及自然环境。香港土木工程拓展署(CEDD)下辖土木工程处(GEO)是官方负责滑坡事务的机构,已记录近几十年香港发生的滑坡^[4]。香港在城市规划中规定自然土地面积红线,相比人工边坡,自然土地地形更容易受到暴雨影响而发生滑坡^[5-7]。单次暴雨事件可以同时触发多处滑坡,特定危险区域可能发生多个滑坡灾害^[8]。对香港发生的滑坡进行研究,除能帮助本地防灾减灾,也对具有相似地形特征、但缺乏系统完善历史数据的粤港澳大湾区内其他城市防治自然

灾害具有重要的参考价值。

滑坡研究多从滑坡成因、过程、分布等方面展开。在成因上,滑坡受降雨影响大^[9],降雨造成的滑坡占比高达 90%^[10]。前人关于香港降雨-滑坡关系的研究,多利用香港土木工程拓展署发布的滑坡数据以及对应降雨数据^[11-16]。例如,Lumb 研究 1950~1973 年香港岛和九龙半岛的滑坡,揭示发生滑坡主要原因是雨水直接渗透到斜坡表面区域,在土壤饱和后导致土壤有效凝聚力丧失;还定量研究降雨对滑坡的影响,认为当日降雨量超过 100 mm 以及前 15 d 累计降雨量超过 350 mm 时,极易发生灾难性滑坡^[11],但未区分当日降雨量与前 15 d 累计降雨量的关系。Kay 等基于香港土木工程拓展署发布的滑坡数据和降雨数据,发现包含每小时、每日降雨量和滑坡活动强度的组合数据可能更适合作为滑坡活动指标,并认为需要用一种更加定量的方法来确定滑坡在各种降雨条件下的可能性^[12]。Finlay 等利用香港岛 1984 年 1 月至 1994 年 6 月雨量计 15 min 降雨数据与香港土木工程拓展署发布的滑坡数据,研究滑坡发生概率与降雨之间的关系,表明 3 h 降雨量是预测滑坡数的最佳指标;并发现滑坡发生日期通常与强降雨日期一致,但滑坡时间与强降雨发生时间也存在不相符的情况,反映了记录的滑坡时间不准确,或者滑坡在最高强度降雨之前或之后发生的可能性^[13]。Dai 等基于 1984~1997 年香港

土木工程拓展署发布的滑坡数据及同期香港天文台 5 min 降雨数据,研究降雨量与滑坡发生之间的关系,发现 12 h、24 h 滚动降雨对预测滑坡数最为重要,并且随着时间推移,需要定期审查和更新定义降雨和滑坡之间的关系^[14]。Gao 等分析增强自然地形滑坡清单(Enhanced Natural Terrain Landslide Inventory,ENTLI)中 1984~2013 年滑坡记录数据和同期降雨数据,发现最大 1 h 滚动降雨量与滑坡数进行线性回归分析时的判定系数最小,说明以 1 h 滚动降雨量计算滑坡发生的不确定性大;此外,最大 4 h 和最大 24 h 滚动降雨量可以提供较好的滑坡预测,其初始降雨阈值分别为 100 和 200 mm^[15]。

前人除了探讨短期(数小时到几日)降雨与滑坡的关系,对于香港长期降雨与滑坡的关系也有相关结论。Lumb 指出:灾难性和严重的滑坡事件在干旱年或平均干旱年之后的湿润年比在湿润年之后发生的可能性更大,小滑坡事件在平均湿润年份更有可能发生,孤立滑坡事件最有可能发生在干旱年^[11]。Dai 等统计 1984~1997 年香港滑坡年际变化,发现其分布非常不均匀,年滑坡数最少是 1991 年(低于 100 个),最多是 1993 年(超过 800 个)^[14]。Ko 等指出因季节性降雨及深层土壤雨蚀,由降雨导致的浅层滑坡是香港自然地形发生的最主要滑坡类型;并开发了基于降雨的滑坡敏感性模型,通过结合不同可能情况的年平均降雨发生频率,将暴雨为基础的滑坡密度转换为年滑坡频率,编制香港滑坡频率图^[16]。

以上研究表明,香港滑坡的发生除受当前降雨影响,也受前期累积降雨影响^[11,13-15],但前人针对当前降雨与前期累积降雨对滑坡的影响关系研究多为

定性描述,缺乏详细定量探索。滑坡观测数据通常缺乏长时间实时监测,绝大多数记录都以日为单位,以小时为单位的研究结果又存在较大不确定性。因此,研究日降雨量与日滑坡数的关系,比小时级别的研究结论更加可靠^[11,14-15]。对于降雨-滑坡月变化、年变化的定量关系结论亦不多,但某一地区长时间降雨-滑坡关系研究可以为区域气候特征、资源调配、防灾减灾决策提供重要信息。进入 21 世纪,气候变暖趋势明显,极端气候增多^[17],有必要根据最新数据开展香港降雨-滑坡关系研究。因此,本文基于香港 2001~2016 年日滑坡数和日降雨量数据研究滑坡和降雨的关系,为香港预防滑坡地质灾害、减灾救灾和规划市政建设提供科学参考,同时也为正进行快速城市化发展的粤港澳大湾区其他城市防灾减灾提供参考。

1 数据来源

香港地形变化较剧烈,只有少量平坦区域[图 1(a)],汛期滑坡频繁。本文研究香港滑坡及降雨所使用数据包含日滑坡数和日降雨量数据。

本文采用的滑坡数据有两套(滑坡时间序列数据和滑坡空间分布数据),均来自香港土木工程拓展署。滑坡时间序列数据取自 2004~2018 年香港土木工程拓展署发布的上一年度滑坡年报,记录长达 16 年官方确认滑坡数据(<https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo/geo-reports/index.html>)。该数据记录了滑坡发生日期,滑坡发生地点仅有街道描述,缺少具体经纬度坐标,因此,本文利用这套数据进行时间序列分析。滑坡空间分析数据来自香港土木工程拓展署发布的增强自然地形滑坡清单,

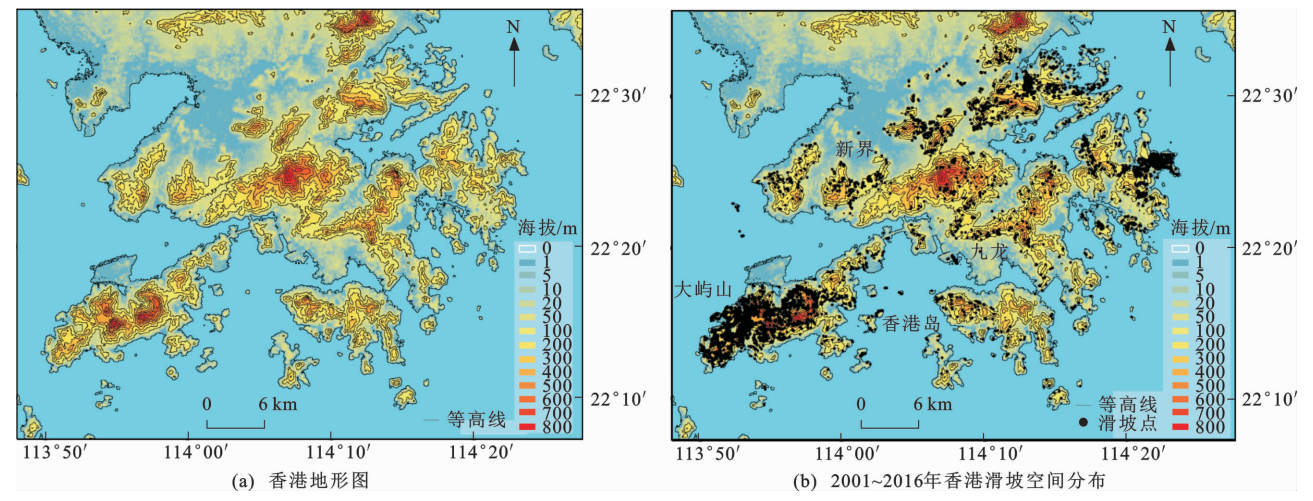


图 1 香港地形图及 2001~2016 年滑坡空间分布

Fig. 1 Topography and Spatial Distribution of Landslides in Hong Kong from 2001 to 2016

截取时间为 2001~2016 年,其包含滑坡经纬度和发生年份,因此,本文利用该清单进行滑坡空间分布特征展示[图 1(b)]。从图 1(b)可以看出,相对而言,大屿山是 2001~2016 年香港滑坡最多的区域,原因可能是 20 世纪末至 21 世纪初大屿山进行了大规模土木建设,造成土壤相对松动,稳定性降低,遇强降雨极易发生滑坡。另外,若多日无滑坡、无降雨后突然发生滑坡,难以排除非降雨因素影响,因此,将 5 d 内没有降雨、前 4 d 没有滑坡而当日滑坡数量为 1 的情形,认定为非降雨因素影响的滑坡,这种滑坡不计入统计。排除上述情况后的年滑坡数见表 1。

表 1 2001~2016 年的年降雨量和年滑坡数统计结果
Table 1 Statistical Results of Yearly Rainfall and Yearly Landslide from 2001 to 2016

| 年份 | 年降雨量/mm | 年滑坡数 |
|------|---------|------|
| 2001 | 3 091.8 | 209 |
| 2002 | 2 490.0 | 103 |
| 2003 | 1 941.9 | 190 |
| 2004 | 1 738.6 | 69 |
| 2005 | 3 214.5 | 478 |
| 2006 | 2 627.8 | 188 |
| 2007 | 1 706.9 | 67 |
| 2008 | 3 066.2 | 717 |
| 2009 | 2 182.3 | 89 |
| 2010 | 2 371.7 | 204 |
| 2011 | 1 487.2 | 74 |
| 2012 | 1 924.7 | 163 |
| 2013 | 2 847.3 | 239 |
| 2014 | 2 638.3 | 233 |
| 2015 | 1 874.5 | 160 |
| 2016 | 3 026.8 | 225 |

香港日降雨量数据来自香港天文台。对于降雨数据,按照中国气象局定义^[18-19],日降雨根据不同量级被划分为小雨(日降雨量为 0.1~10.0 mm·d⁻¹)、中雨(10.0~25.0 mm·d⁻¹)、大雨(25.0~50.0 mm·d⁻¹)、暴雨(50.0~100.0 mm·d⁻¹)、大暴雨(100.0~200.0 mm·d⁻¹)和特大暴雨(200.0 mm·d⁻¹以上)。

2 分析方法

本文利用箱型图、矩阵热力图、散点图、线性回归方程对降雨和滑坡数据进行分析,并用有效自由度、学生 t 分布检验降雨和滑坡数据之间的相关显著性。箱型图可展示和分析数据序列分布特征,特别适合展示降雨等非正态分布数据的特征^[20-21]。本

文利用箱型图展示降雨与滑坡历史数据的分布,并计算相应的统计百分位数。前人常将一段时间内某百分位值作为阈值定义极端事件^[22-24],本文采用降雨及滑坡历史记录的 99%百分位值定义为降雨与滑坡的极端情形。将日降雨量与日滑坡数分别绘制于以月和日为横、纵坐标的矩阵中,对矩阵中不同数值予以不同颜色标注,形成矩阵热力图,分析一定时长日降雨量-日滑坡数变化。散点图以日降雨量为自变量,日滑坡数为因变量,分析降雨-滑坡之间的协相关关系,随后进行线性回归,计算协相关系数($\rho(\tau)$)。其表达式为

$$\rho(\tau)=\frac{\sum_{i=1}^{n-\tau}(r_i-\bar{r})(L_{i+\tau}-\bar{L})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-\tau}(r_i-\bar{r})^2\sum_{i=1}^{n-\tau}(L_{i+\tau}-\bar{L})^2}} \quad (1)$$

式中: n 为样本数; r_i 为日降雨量; $L_{i+\tau}$ 为日滑坡数; \bar{r} 为日均降雨量; \bar{L} 为日均滑坡数; τ 为滑坡滞后于降雨的时间;当 $\tau=0$ 时, $\rho(\tau)$ 就是降雨-滑坡的相关系数。

判定降雨和滑坡时间序列相关显著性可通过学生 t 分布来检验。其临界相关系数(r_{crit})为^[25]

$$r_{\text{crit}}=\frac{t_{1-\alpha/2,n^*}}{\sqrt{t_{1-\alpha/2,n^*}^2+n^*-2}} \quad (2)$$

式中: $t_{1-\alpha/2,n^*}$ 为显著性水平 α 和有效自由度 n^* 条件下的 t 值。

本研究置信区间取 95%,则 $\alpha=0.05$ 。其中, n^* 是两个随机变量之间的有效自由度^[26-28]。其表达式为

$$n^*=\frac{n}{\sum_{\tau=-\infty}^{+\infty}(\rho_{rr}(\tau)\rho_{ll}(\tau)+\rho_{rl}(\tau)\rho_{lr}(\tau))} \quad (3)$$

式中: ρ_{rr} 、 ρ_{ll} 分别是降雨量和滑坡数的自相关系数; ρ_{rl} 和 ρ_{lr} 分别是降雨量与滑坡数以及滑坡数与降雨量的协相关系数。

考虑降雨与滑坡的关系特点,在计算有效自由度时,取 τ 为 0~20 d。当 $|\rho(\tau)|>r_{\text{crit}}$ 时,可确定降雨与滑坡显著相关。通过计算两个变量之间的最大显著相关系数,可以确定 τ 值。

滑坡不仅受当日降雨影响,亦受前几日降雨影响^[11],因此,采用当日降雨量、前 1 d 降雨量、前 2 d 降雨量...为自变量,当日滑坡数为因变量,进行多元线性回归分析。其表达式为

$$L_{\text{fit}}=c+B_0r_0+\sum_1^kB_mr_m \quad (4)$$

式中: L_{fit} 是拟合滑坡数; c 是常数; B_0 是当日降雨量多元线性回归的拟合系数; r_0 是当日降雨量; B_m 是滑坡前 m 日降雨量多元线性回归的拟合系数; r_0 表

示当日降雨量; r_m 是滑坡前 m 日降雨量, $m=1,2,3,\cdots,k$ 。

多元线性回归方程拟合优度以判定系数 R^2 为评价标准, R^2 越接近 1 则越好。但判定系数 R^2 随着自变量的增加, 是一个单调不减的参数, 因此, 引入 R^2_{Adjusted} 用于确定最佳自变量个数, 抵消自变量数量对 R^2 的影响, 计算出最合理的多元线性回归方程^[29]。 R^2_{Adjusted} 表达式为

$$R^2_{\text{Adjusted}}=1-\frac{(1-R^2)(n-1)}{n-p-1} \tag{5}$$

式中: p 为自变量个数。

3 结果分析与讨论

3.1 日变化规律

根据收集到的香港日降雨数据、日滑坡数据, 首先绘制日滑坡数和日降雨量变化时间序列。图 2 展示了 2001~2016 年日降雨量和日滑坡数变化。香港气候为典型海洋性亚热带季风气候^[30], 每年 4 月至 9 月为汛期, 降雨较多, 其余月份降雨较少。从图 2 可以看出, 汛期滑坡数出现高峰, 非汛期为低谷。总体上, 每年降雨量有周期性变化, 滑坡数基本吻合这种周期性变化。图 3 为 2001~2016 年香港日降雨量和日滑坡数的统计箱型图(图 3)。从图 3 可以看出, 日滑坡数和日降雨量均为严重非正态分布。

位数 Q2、四分之三位数 Q3 都为 0 个, 有滑坡的天数占 22.7%; 相比之下, 同期日降雨量的 Q1、Q2 和 Q3 值分别为 0.00、0.01 和 1.70 mm, 有降雨天数占 37.3%, 并非所有降雨都会发生滑坡, 只有当降雨达到一定量级或者累积几日降雨达到一定量级时, 才可能发生滑坡。本文将 2001~2016 年降雨量和滑坡数的 99% 百分位数定义为降雨与滑坡的极端情形, 其 99% 百分位数分别是 103 mm 和 10 个, 因此, 定义 10 个滑坡为群发性滑坡。另外, 从图 2 发现, 滑坡数最多年份是 2005 年和 2008 年, 显著高于其他年份, 因此, 有必要对 2005 年和 2008 年做进一步分析。

对 2005 年和 2008 年日降雨量和日滑坡数进行统计, 按前述方法制作矩阵热力图(图 4、5)。从图 4 可以发现, 2005 年滑坡高峰期发生在汛期。2005 年发生 10 个以上日滑坡的日期集中在 6 月和 8 月, 5 月、7 月和 9 月亦有多次日滑坡数较多的记录。2005 年 5 月 8 日至 10 日, 连续 3 d 降雨 25 mm 以上, 包括大雨 1 d、暴雨 2 d; 与之对应, 5 月 9 日、10 日、11 日、12 日分别发生 1、2、2、3 个滑坡。在前几日降雨基础上, 5 月 15 日至 21 日, 连续 7 d 出现小雨及以上降雨, 包含 18 日至 20 日的 1 d 中雨、2 d 大雨, 导致 5 月 19 日至 21 日发生低于 10 个的连续滑坡。2005 年 6 月 15 日、16 日、17 日分别发生 4、

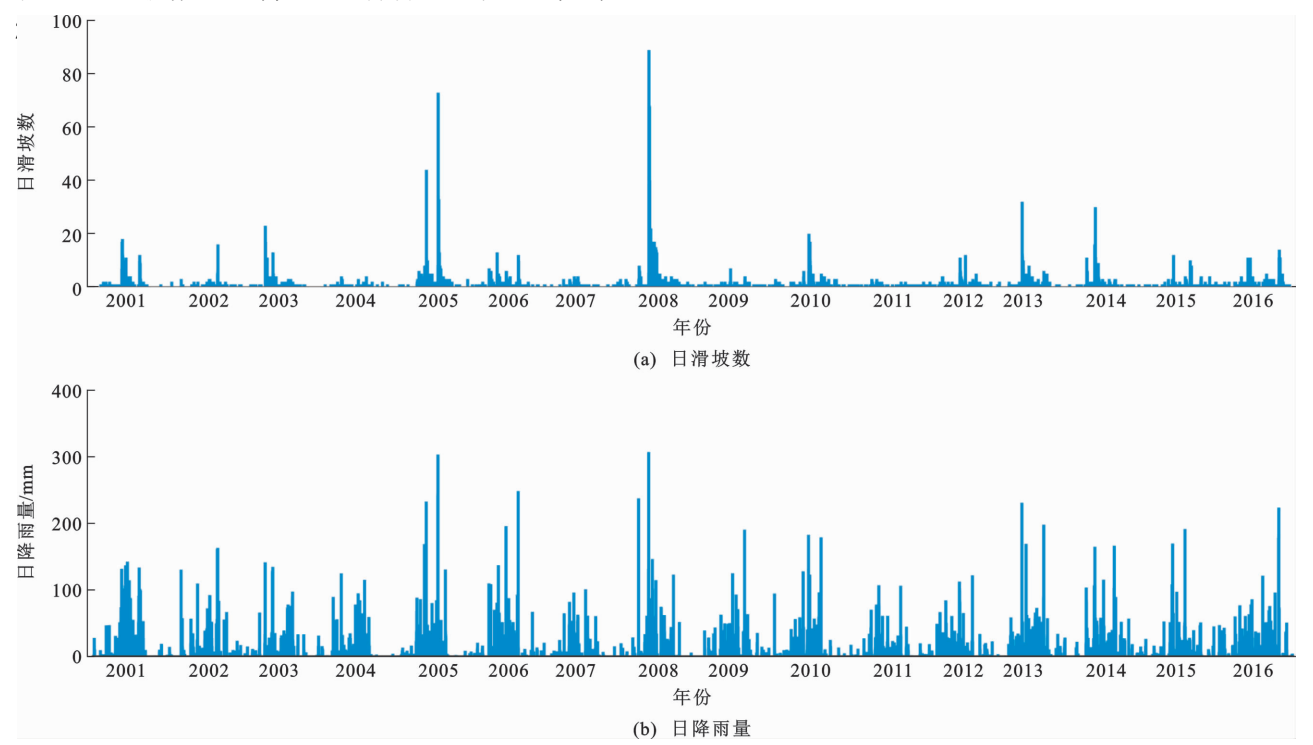


图 2 2001~2016 年日滑坡数和日降雨量时序柱状图

Fig. 2 Temporal Histograms of Daily Landslide and Daily Rainfall from 2001 to 2016

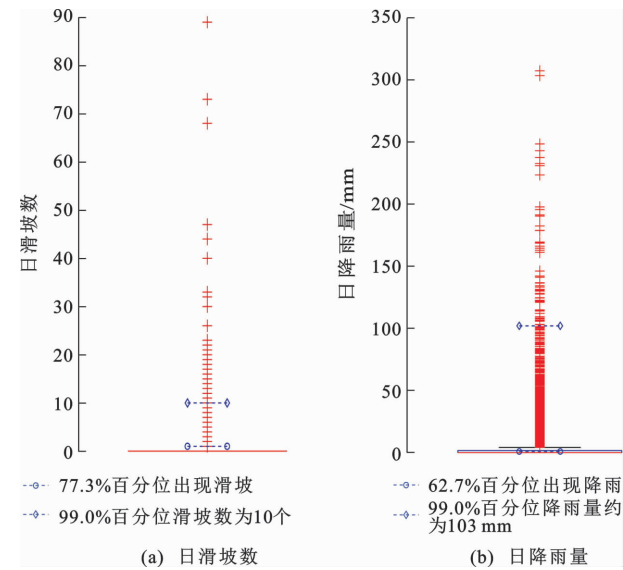


图 3 2001~2016 年日滑坡数和日降雨量统计箱型图

Fig. 3 Boxplots of Daily Landslide and Daily Rainfall from 2001 to 2016

8、5 个滑坡(连续 2 d 累计超过 10 个滑坡),是因为 6 月 14 日是 19.2 mm 的中雨,15 日是 168.5 mm 的大暴雨,16 日至 17 日连续大雨。6 月 20 日至 7 月 1 日的 12 d 中,除 6 月 28 日未下雨,其他日期连续降雨,其中 1 d 特大暴雨(24 日)、2 d 大暴雨(21 日

降雨量为 106.3 mm,23 日为 106.6 mm)、2 d 大雨(29 日为 31.8 mm,30 日为 47 mm)、2 d 中雨(26 日为 11.5 mm,1 日为 18.4 mm);与之对应,6 月 22 日至 7 月 1 日,除 6 月 26 日无滑坡记录,6 月 23 日、24 日、25 日记录到的滑坡数为 6、44、9 个,6 月 27 日、28 日、29 日、30 日记录到的滑坡数分别为 5、8、10、5 个。2005 年 8 月 18 日到 9 月 2 日的 15 d 中,除了 2 d 无滑坡记录,其他 13 d 均有数量不等的滑坡,其中 8 月 20 日至 26 日,除了 25 日 4 个滑坡,其他 6 d 滑坡均超过 10 个。引起 8 月滑坡集中的原因是降雨连续且降雨量超大。在前期 8 月 9 日到 18 日连续多日降雨的基础上,8 月 19 日至 20 日发生了两场特大暴雨,降雨量分别为 242.9 和 303.3 mm,并且在 20 日之后,仍然有几日中雨或小雨发生,造成 8 月 20 日至 24 日滑坡集中,各日滑坡数分别为 73、33、26、33、10 个。2005 年 7 月没有发生大暴雨,亦没有记录到 10 个以上的日滑坡或连续 2 d 累计 10 个以上的滑坡;2005 年 9 月 25 日记录到一次大暴雨,但因为前期降雨不多,所以 9 月没有引发群发性滑坡。

从图 5 可以看出:2008 年第一场大暴雨是 4 月

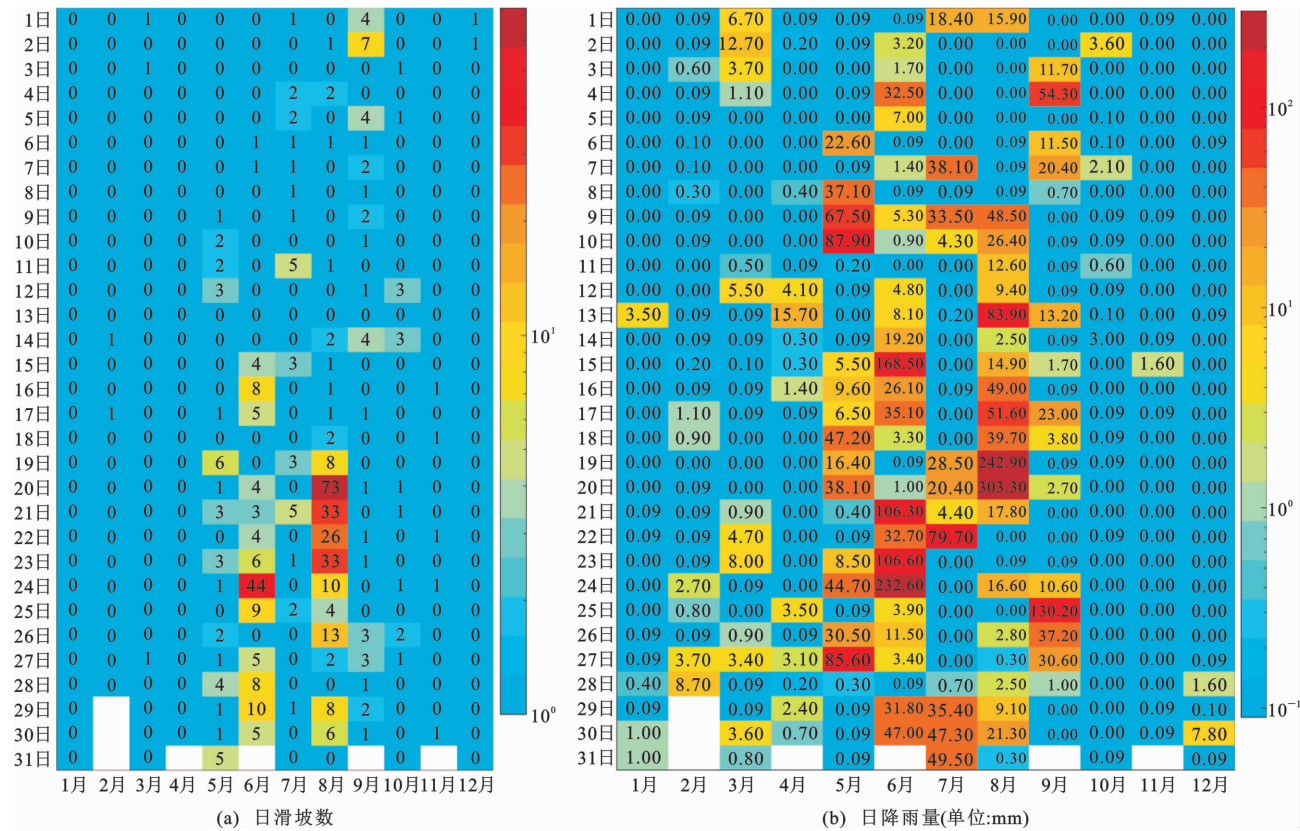


图 4 2005 年日滑坡数和日降雨量分布矩阵热力图

Fig. 4 Heat-map Matrixes of Daily Landslide and Daily Rainfall in 2005

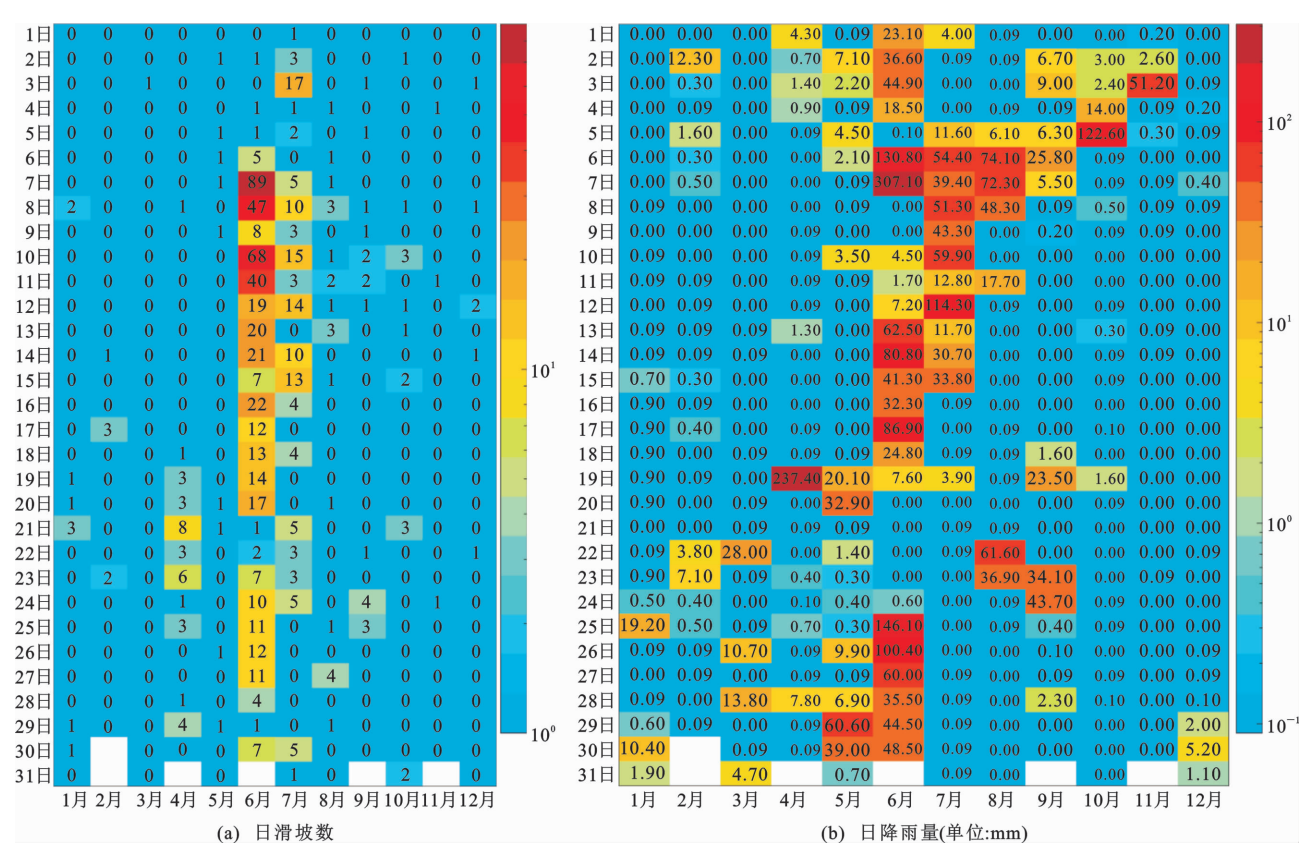


图 5 2008 年日滑坡数和日降雨量分布矩阵热力图

Fig. 5 Heat-map Matrixes of Daily Landslide and Daily Rainfall in 2008

19 日的 237.4 mm,因为前期降雨不多,土壤相对干燥,没有导致 10 个以上的日滑坡,但引发连续多日滑坡,4 月 19 日至 23 日总共记录到滑坡 23 个;5 月没有大暴雨发生,亦没有群发性滑坡发生;6 月 6 日和 7 日发生大暴雨(降雨量为 130.8 mm)和特大暴雨(307.1 mm),加之 6 月 10 日至 19 日连续降雨,导致 6 月 7 日至 20 日发生群发性滑坡,最大日滑坡数达 89 个,日滑坡数超过 10 个的天数有 12 d;在前期暴雨、大暴雨基础上,6 月 24 日至 7 月 1 日继续发生连续降雨,包括大暴雨 2 d,引发从 6 月 23 日至 7 月 3 日的连续滑坡,其中日滑坡数超过 10 个的天数有 5 d;7 月 5 日至 15 日连续 11 d 降雨,记录到大暴雨 1 d、暴雨 3 d,导致 7 月 5 日至 24 日超过 10 个日滑坡的天数有 5 d;8 月没有记录到大暴雨,亦没有群发性滑坡记录;9 月有 1 d 大暴雨(5 日降雨量为 122.6 mm),但前 10 d 累积降雨不多,因此,没有引发群发性滑坡。

对 2005、2008 年(图 4、5)降雨和滑坡分析可知,6 月至 8 月降雨集中期发生特大暴雨(日降雨量不低于 200 mm·d⁻¹)有 4 d,2005 年 6 月 24 日、8 月 19 日、8 月 20 日,2008 年 6 月 7 日依次发生 44、73、33、89 个群发性滑坡。2008 年 4 月 19 日发生特

大暴雨,因为不在降雨集中期,没有发生单日群发性滑坡,但发生连续多日累计 23 个滑坡。2001~2016 年超过 200 mm 日降雨量共有 8 d,其中 7 d 当日或次日发生 10 个以上滑坡,因此,在降雨量超过 200 mm 特大暴雨的条件下,发生群发性滑坡的概率为 7/8=87.5%。如果在 1 月至 5 月以及 9 月至 12 月发生单日暴雨(降雨量不低于 50 mm·d⁻¹)或大暴雨(降雨量不低于 100 mm·d⁻¹),不一定会发生群发性滑坡;但是,如果在 6 月至 8 月有连续降雨,并累积多日暴雨,则发生滑坡的概率非常高^[31-32]。

依据式(1)计算日滑坡数和日降雨量的协相关系数,得到相关系数 $\rho(0)$ 为 0.406,滞后 1 d 协相关系数 $\rho(1)$ 为 0.393,滞后 2 d 协相关系数 $\rho(2)$ 为 0.248,直到滞后 13 d 协相关系数 $\rho(13)$ 为 0.099;最大协相关系数为 $\rho(0)=0.406$,即当日滑坡发生受当日降雨影响最大。2001~2016 年,日观测样本数为 5 844 个,依据式(3)计算得到有效自由度 n^* 约为 2 722.9,查找对应学生 t 分布表,得到 $t_{1-0.05/2,2723}=1.96$,再根据式(2)计算得到 $r_{crit}=0.0375$,远远小于日滑坡数和日降雨量的相关系数(0.406),表明日滑坡数与日降雨量显著相关。依据式(4)计算当日滑坡数和当日降雨量的一元线性回

归方程,判定系数 R^2 为 0.165。该线性回归方程为

$$L_{\text{fit}}=0.054r_{(0)}+0.233$$

(6)

滑坡受到当日以及前几日降雨影响。依据式(4)进行多元线性回归计算,在选取前几日降雨量用于计算的过程中,发现当日与之前 13 d 的降雨量对当日滑坡数都有正影响,此时 R^2_{Adjusted} 最大,从第 14 日开始日降雨量的系数为负数, R^2_{Adjusted} 开始下降。从 R^2_{Adjusted} 变化来看(图 6),降雨前几日为 4 d 时出现拐点,增加前 5 d 降雨量至前 18 d 降雨量作为变量进行日滑坡数回归时, R^2_{Adjusted} 增加非常缓慢。因此,取当日以及前 4 d 降雨量作为自变量拟合当日滑坡数。其回归方程为

$$L_{\text{fit}}=0.038r_{(0)}+0.032r_{(1)}+0.008r_{(2)}+0.018r_{(3)}+0.018r_{(4)}-0.167$$

(7)

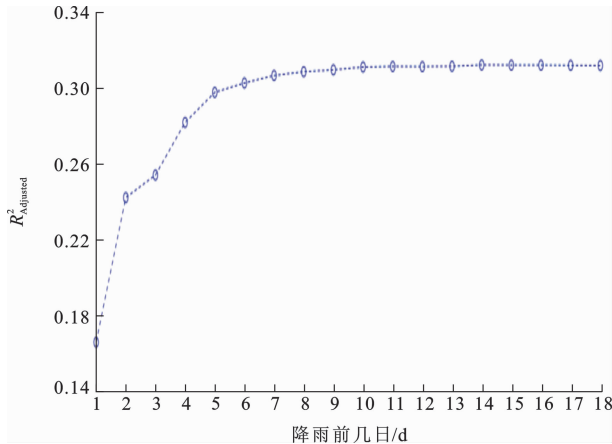


图 6 R^2_{Adjusted} 随前几日累积降雨量的变化
Fig. 6 Variation of the R^2_{Adjusted} Relative to the Rainfall on Previous Days

由式(7)可以看出,当日滑坡数主要受到当日、前 1 d 降雨量影响,当日降雨量对当日滑坡数影响的权重最大,前 1 d 降雨量影响权重较当日降雨量权重下降约 20%。实际滑坡数观测与根据降雨量拟合得到的滑坡数对比如图 7 所示,其线性回归判定系数 R^2 为 0.30。

值得一提的是,本文拟合分析了沙田、大帽山、横瀾岛等 3 个台站降雨数据^[33]与香港全域的历史滑坡数,判定系数 R^2 略低于利用香港天文台(位于九龙半岛)降雨历史数据拟合降雨量与滑坡数的关系,总体差别不大,说明使用香港天文台降雨历史数据研究香港降雨量与滑坡数的关系非常具有代表性。

3.2 月变化规律

图 8、9 为 2001~2016 年月均降雨量、月均滑坡数分布以及各年每月降雨量、每月滑坡数分布。从

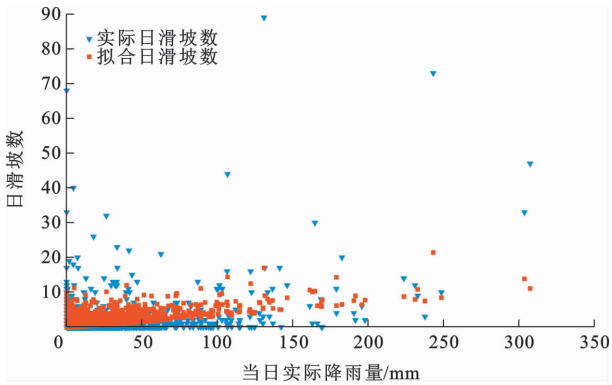


图 7 实际滑坡数与拟合滑坡数对比
Fig. 7 Comparison of Observed Landslide and the Fitted Landslide

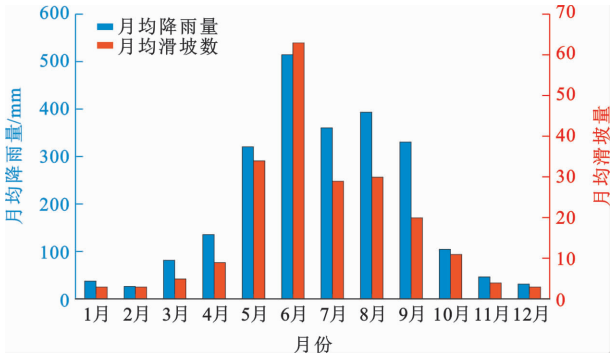


图 8 2001~2016 年月均降雨量与月均滑坡数柱状图
Fig. 8 Histogram of the Average Monthly Rainfall and Monthly Landslide from 2001 to 2016

月平均数据来看,月均降雨量出现双峰,从 1 月到 6 月呈现上升,7 月略有下降,8 月又略有回升,9 月至 12 月持续下降;月均滑坡数从 1 月到 6 月呈现上升趋势,7 月略下降,8 月又略上升,9 月到 12 月持续下降;月均降雨量、月均滑坡数变化规律相似(图 8)。月均降雨量和月均滑坡数最大值均出现在 6 月,但具体到每年,有最大月降雨量所在月份与最大月滑坡数所在月份不匹配的情况(图 9)。例如,2003 年 5 月最大日降雨量是 5 月 5 日的 141.1 mm,因前 2 d 有连续中雨,加上 5 日大暴雨,引发当日 23 个滑坡和次日 17 个滑坡;6 月虽然同样发生两场大暴雨(降雨量分别为 128.1 mm 和 134.3 mm),但其引发滑坡数不及 5 月(图 10)。滑坡灾害除外在降雨原因外,还跟滑坡体脆弱性有关,可能因为 2003 年 5 月降雨使得松动的土壤全部发生滑坡,剩下的土层比较坚实,或者滑坡处经过修复更加牢固,所以 2003 年 6 月滑坡较 5 月少。

月降雨量和月滑坡数变化趋势相似,汛期降雨多,滑坡通常也多。针对 2001~2016 年共 192 个月的滑坡和降雨数据,以 4 月至 9 月为汛期、其他月份

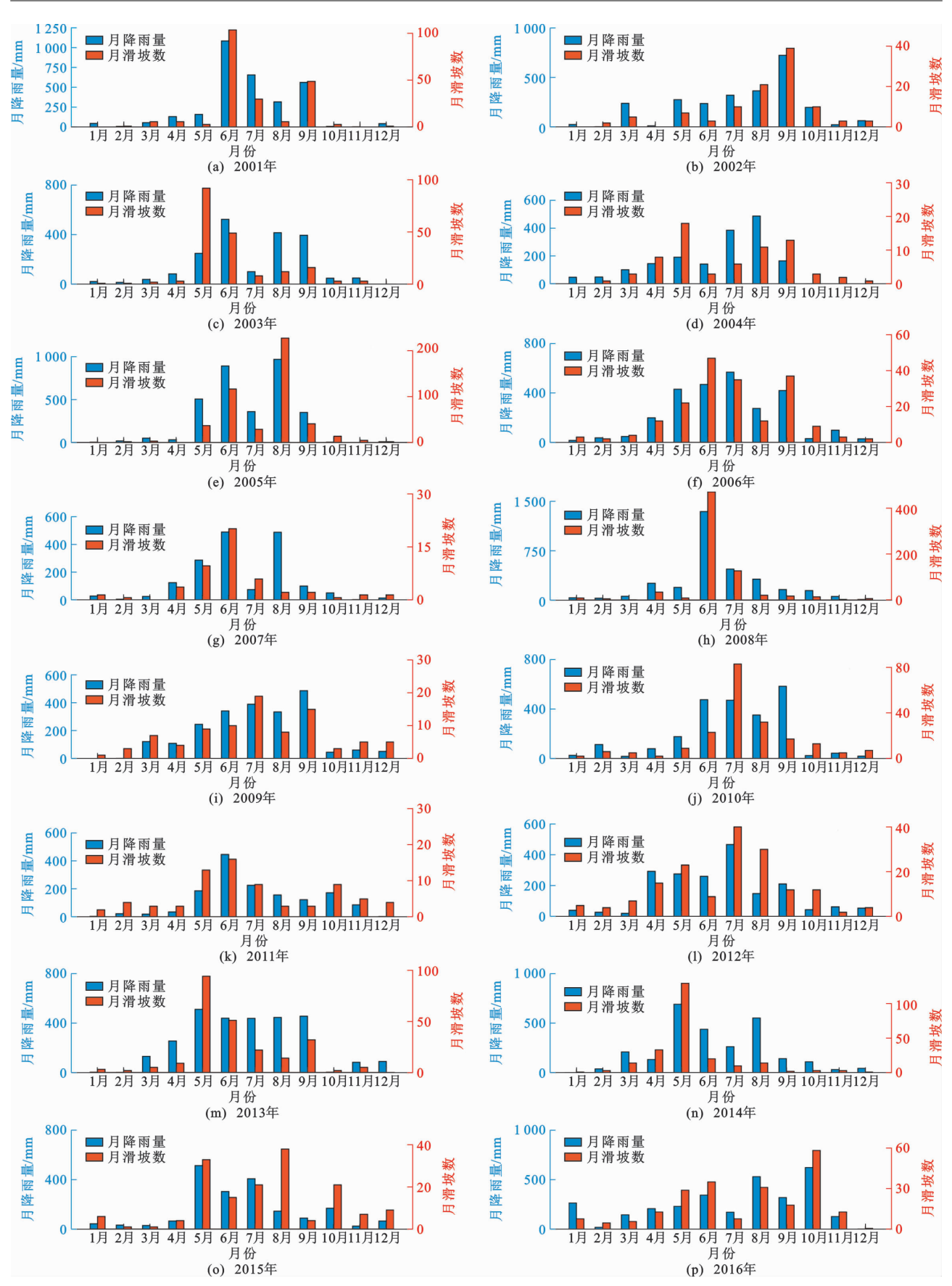


图 9 2001~2016 年月降雨量和月滑坡数柱状图

Fig. 9 Histograms of Monthly Rainfall and Monthly Landslide from 2001 to 2016

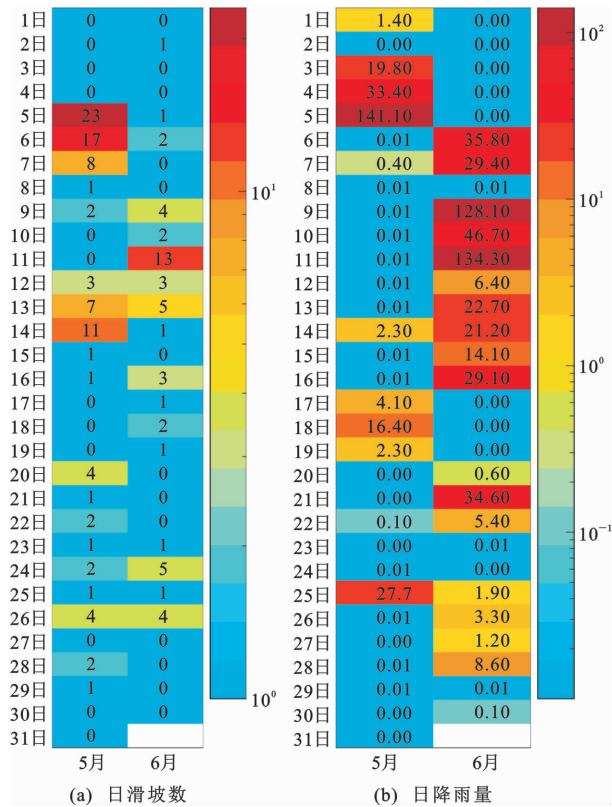


图 10 2003 年 5 月、6 月日滑坡数和日降雨量分布矩阵热力图

Fig. 10 Heat-map Matrixes of Daily Landslide and Daily Rainfall in May and June, 2003

为非汛期分别分析月降雨量与月滑坡数线性相关性(图 11)。其回归方程分别为

$$L_{\text{wet}}=0.183r_m-32.001 \tag{8}$$

$$L_{\text{dry}}=0.067r_m+0.989 \tag{9}$$

$$L=0.137r_m-9.494 \tag{10}$$

式中： r_m 为月降雨量； L 为月滑坡数； L_{wet} 表示汛期月滑坡数； L_{dry} 表示非汛期月滑坡数。

线性回归方程(10)的判定系数约为 0.515，月降雨量与月滑坡数的相关系数约为 0.718。汛期数据分布较为分散，而非汛期数据集中在小降雨量附近(图 11 坐标轴左下方)。上述 3 组回归方程表明，月降雨量和月滑坡数成正相关关系，即一般月降雨量越大，对应月滑坡数越大。

自然界中，上月降雨量、滑坡数基本与本月降雨量、滑坡数关系不大，因此，可以近似认为月降雨量与月滑坡数是两个独立的变量。其自由度为样本数减去 2，即 $16\times12-2=190$ 。根据学生 t 分布表，得到 $t_{0.975,190}=1.988$ 。再根据式(2)计算得到临界相关系数为 0.143 0，其小于月滑坡数与月降雨量的相关系数(0.718)，因此，月滑坡数与月降雨量之间同样显著相关。

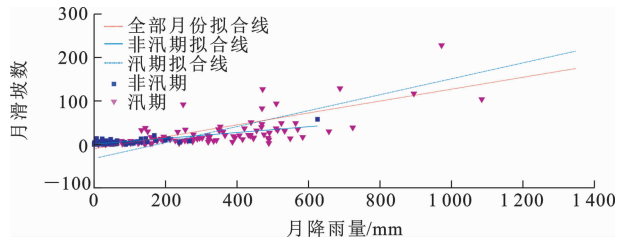


图 11 2001~2016 年月降雨量与月滑坡数之间的关系
Fig. 11 Relationship Between Monthly Rainfall and Monthly Landslide from 2001 to 2016

3.3 年变化规律

根据表 1 和图 12 的年滑坡数与年降雨量数据，进一步分析 2001~2016 年的年滑坡数和年降雨量变化。其线性回归方程为

$$L_{\text{year}}=0.202r_y-269.305 \tag{11}$$

式中： r_y 为年降雨量； L_{year} 为年滑坡数。

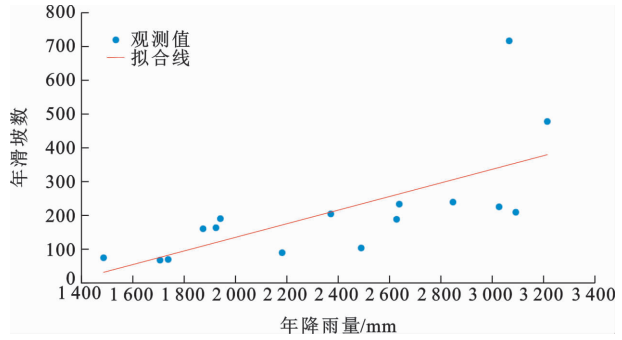


图 12 2001~2016 年的年降雨量与年滑坡数之间的关系
Fig. 12 Relationship Between Yearly Rainfall and Yearly Landslide from 2001 to 2016

由表 1 和图 12 可知，年降雨量与年滑坡数成正相关关系，判定系数约为 0.465，相关系数约为 0.682。年滑坡数最高是 2008 年的 717 个，该年降雨量为 3 066.2 mm，在 2001~2016 年排名第三；年降雨量最大是 2005 年的 3 214.5 mm，该年滑坡数为 478 个，在 2001~2016 年排名第二；年滑坡数最少是 2004 年的 69 个，该年降雨量为 1 738.6 mm，在 2001~2016 年排名倒数第三；年降雨量最低是 2011 年的 1 487.2 mm，该年滑坡数 74 个，在 2001~2016 年排名倒数第二。这些数据一定程度上说明在年尺度上，降雨量和滑坡数成强正相关关系。年滑坡数除受年降雨量影响外，也受其他外在因素影响，如土地开发和土建工程等。这些活动改变了土层应力环境，容易造成土层稳定性降低，成为滑坡隐患。针对上述外在因素的认识，有待收集更多系统性数据进行研究。

同样，上一年度滑坡数、降雨量对本年度滑坡数、降雨量影响不大，也可近似认为年滑坡数与年降

雨量是独立的变量,因此,时间序列自由度为样本数减去 2,即 $16-2=14$ 。根据学生 t 分布表,得到 $t_{0.975,14}=2.145$ 。再根据式(2)计算临界相关系数为 0.526 5,小于年滑坡数与年降雨量相关系数(0.682),因此,年滑坡数与年降雨量之间显著相关。

4 结 语

(1)2001~2016 年香港日滑坡数、月滑坡数、年滑坡数,与日降雨量、月降雨量和年降雨量成正相关关系,其相关系数分别是 0.406、0.718、0.682,并且均满足置信度 95% 以上的显著相关水平。2001~2016 年有滑坡的天数占 22.7%,有降雨的天数占 37.3%;根据 99% 百分位数得到日降雨量与日滑坡数极端值分别是 103 mm 和 10 个,因此,可以认定 10 个滑坡为群发性滑坡。在降雨量为 200 mm 以上特大暴雨的条件下,发生群发性滑坡的概率为 87.5%,即日滑坡数或连续 2 d 滑坡累计数超过 10 个的概率为 87.5%;当日滑坡数除与当日降雨量相关外,亦受前 13 d 累积降雨量影响,当日与前 4 d 累积降雨量对当日滑坡数影响明显,并且当日与前 1 d 降雨量影响权重最大,平均来说,当日降雨量的影响权重是前 1 d 降雨量影响权重的 1.2 倍。

(2)香港因降雨发生的滑坡最集中月份是 6 月。在降雨集中的 6 月至 8 月,当发生特大暴雨时,滑坡灾害比其他月份更严重,日滑坡数为 33~89 个。如果在 1 月至 5 月以及 9 月至 12 月发生单日暴雨或大暴雨,不一定发生群发性滑坡;但是如果在 6 月至 8 月发生暴雨或大暴雨,特别是连续多日降雨,发生群发性滑坡的概率高。

(3)本文只是针对降雨对滑坡造成的影响开展研究,诸如土地开发和土建工程等人为因素对滑坡的影响,需要收集更多系统性数据进行进一步研究。

图片由 ArcGIS10.6、illustrator2018 和 Matlab2017 绘制。香港土木工程拓展署 Waikin Leung 先生提供数据下载网址及咨询,在此表示感谢!

参考文献:

References:

[1] 房 浩,李 媛,杨旭东,等.2010~2015 年全国地质灾害发育分布特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):1-6.
FANG Hao, LI Yuan, YANG Xu-dong, et al. Distribution Characters of Geo-hazards in China During the Period of 2010 - 2015 [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 1-6.

[2] 中国气象局.珠海大暴雨致山体滑坡[EB/OL]. (2013-05-23)[2022-01-30]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xtpxw/201305/t20130523_214493.html.
China Meteorological Administration. Landslide Caused by Rainstorm in Zhuhai, Guangdong, China [EB/OL]. (2013-05-23)[2022-01-30]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xtpxw/201305/t20130523_214493.html.

[3] 南方都市报.肇庆高要山体滑坡致六人死亡[EB/OL]. (2014-03-31)[2022-01-30]. <https://view.inews.qq.com/a/GDC2014033100500102>.
Southern Urban Daily. Landslide Killing 6 Persons in Gaoyao Area of Zhaoqing, Guangdong, China [EB/OL]. (2014-03-31)[2022-01-30]. <https://view.inews.qq.com/a/GDC2014033100500102>.

[4] CLAGUE J J, STEAD D. Landslides: Types, Mechanisms and Modeling[M]. New York: Cambridge University Press, 2012.

[5] GAO L, ZHANG L M, CHEN H X. Likely Scenarios of Natural Terrain Shallow Slope Failures on Hong Kong Island Under Extreme Storms[J]. Natural Hazards Review, 2015, 18(1): B4015001.

[6] TANG D, LI D Q, CAO Z J. Slope Stability Analysis in the Three Gorges Reservoir Area Considering Effect of Antecedent Rainfall[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2017, 11(2): 161-172.

[7] 李 军,周成虎.香港地区滑坡体积与前期降雨关系分析[J].自然灾害学报,2002,11(2):37-45.
LI Jun, ZHOU Cheng-hu. Analysis of Relationship Between Landslide Volume and Antecedent Precipitation in Hong Kong[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2): 37-45.

[8] ZHANG L M, ZHANG S, HUANG R Q. Multi-hazard Scenarios and Consequences in Beichuan, China: The First 5 Years After the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Engineering Geology, 2014, 180: 4-20.

[9] KEEFER D, WILSON R, MARK R, et al. Real-time Landslide Warning During Heavy Rainfall [J]. Science, 1987, 238: 921-925.

[10] 魏 丽.暴雨型滑坡灾害形成机理及预测方法研究[D].南京:南京信息工程大学,2005.
WEI Li. Study on Mechanism and Predicting Method of Landslide Hazard Triggered by Extremely Heavy Rainfall [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2005.

[11] LUMB P. Slope Failures in Hong Kong[J]. Quarterly

- Journal of Engineering Geology, 1975, 8(1): 31-65.
- [12] KAY J N, CHEN T. Rainfall-landslide Relationship for Hong Kong[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 1995, 113(2): 117-118.
- [13] FINLAY P J, FELL R, MAGUIRE P K. The Relationship Between the Probability of Landslide Occurrence and Rainfall[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 811-824.
- [14] DAI F C, LEE C F. Frequency-volume Relation and Prediction of Rainfall-induced Landslides[J]. Engineering Geology, 2001, 59(3/4): 253-266.
- [15] GAO L, ZHANG L M, CHEUNG R W M. Relationships Between Natural Terrain Landslide Magnitudes and Triggering Rainfall Based on a Large Landslide Inventory in Hong Kong[J]. Landslides, 2018, 15(4): 727-740.
- [16] KO F W Y, LO F L C. Rainfall-based Landslide Susceptibility Analysis for Natural Terrain in Hong Kong: A Direct Stock-taking Approach[J]. Engineering Geology, 2016, 215: 95-107.
- [17] 孙喜艳, 伍志方, 梁巧倩, 等. 广东省不同等级小时强降水时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 102-109.
- SUN Xi-yan, WU Zhi-fang, LIANG Qiao-qian, et al. Analysis of Spatio Temporal Characteristics of Hourly Heavy Precipitation in Different Grades in Guangdong[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 102-109.
- [18] 刘海文, 丁一汇. 华北汛期日降水特性的变化分析[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 12-22.
- LIU Hai-wen, DING Yi-hui. Analysis of Daily Precipitation Characteristics over North China During Rainy Seasons[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1): 12-22.
- [19] 段广慧. 社会科学实用参考[M]. 武汉: 武汉出版社, 2014.
- DUAN Guang-hui. Social Science Practical Reference [M]. Wuhan: Wuhan Press, 2014.
- [20] KHALILI M, VAN NGUYEN V T. An Efficient Statistical Approach to Multi-site Downscaling of Daily Precipitation Series in the Context of Climate Change[J]. Climate Dynamics, 2017, 49(7): 2261-2278.
- [21] YEO M H, NGUYEN H L, NGUYEN V. Statistical Tool to Modeling of a Daily Precipitation Process in the Context of Climate Change[J]. Journal of Water and Climate Change, 2019, 12(1): 18-31.
- [22] TANK A M G, KONNEN G P. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-99[J]. Journal of Climate, 2003, 16(22): 3665-3680.
- [23] GRIFFITHS G M, CHAMBERS L E, HAYLOCK M R, et al. Change in Mean Temperature as a Predictor of Extreme Temperature Change in the Asia-Pacific Region [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(10): 1301-1330.
- [24] MCGREE S, HEROLD N, ALEXANDER L, et al. Recent Changes in Mean and Extreme Temperature and Precipitation in the Western Pacific Islands[J]. Journal of Climate, 2019, 32(16): 4919-4941.
- [25] MAIDMENT D R. Handbook of Hydrology[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [26] CHEN J, KUMAR P. Role of Terrestrial Hydrologic Memory in Modulating ENSO Impacts in North America[J]. Journal of Climate, 2002, 15(24): 3569-3585.
- [27] LI Q L, CHEN J. Teleconnection Between ENSO and Climate in South China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(4): 927-941.
- [28] THOMSON R E, EMERY W J. Data Analysis Methods in Physical Oceanography [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [29] DRAPER N R, SMITH H. Applied Regression Analysis[M]. New York: Wiley, 1998.
- [30] 董慧涵, 黄洁玫, 朱红梅. 香港气候的基本特征[J]. 广州师院学报(自然科学版), 1994(1): 42-49.
- DONG Hui-han, HUANG Jie-mei, ZHU Hong-mei. The Basic Characteristic of Hong Kong Climate[J]. Journal of Guangzhou Normal University (Natural Science Edition), 1994(1): 42-49.
- [31] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 278-282.
- LI Ai-guo, YUE Zhong-qi, TAN Guo-huan, et al. Soil Moisture and Suction Measurement and Its Effect on Slope Stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 278-282.
- [32] MAETELLONI G, SEGONI S, FANTI R, et al. Rainfall Thresholds for the Forecasting of Landslide Occurrence at Regional Scale[J]. Landslides, 2012, 9(4): 485-495.
- [33] ALI R, LI Q L, CHEN J, et al. The Spatial Characteristics of Hourly Rainfall Induced by Tropical Cyclones Along the South China Coast[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(11): e2020EA001623.