重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析

张　珍[1]，李世海[1]，马　力[2]
(1. 中国科学院 力学研究所，北京　100080；2. 重庆市气象局，重庆　400000)

摘要：详细分析了重庆地区几十年内的 577 个滑坡的降雨与滑坡的历史资料，并对重庆地区的水文地质条件作了较为详细的介绍，然后从滑坡的时间分布、滑坡与日降雨量及暴雨的关系、滑坡与降雨发生时间的比较、滑坡发生的前 10 d 内有降雨的天数与连续降雨的天数的比较等方面详细研究了降雨与滑坡的关系，得出了几个有益的结论。研究结果表明：滑坡的活动强度与雨量的大小成正比，滑坡基本发生在降雨之后的 4 d 内；暴雨与滑坡的关系很密切，降暴雨的当天发生滑坡的可能性很大；当选取 3 mm 作为降雨开始入渗的界限时，如果连续 3 d 有降雨那么滑坡发生的可能性相对来说会很大。

关键词：岩土力学；滑坡；降雨；水文地质条件；历史资料；暴雨
中图分类号：TU 47　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－6915(2005)17－3185－07

PROBABILITY ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN LANDSLIDE AND RAINFALL IN CHONGQING AREA

ZHANG Zhen[1]，LI Shi-hai[1]，MA Li[2]
(1. *Institute of Mechanics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100080，*China*；
2. *Chongqing Meteorological Bureau*，*Chongqing* 400000，*China*)

Abstract：Historical data of landslide and rainfall of 577 landslides in several decades are analyzed and the hydrogeology conditions in Chongqing area are introduced in detail. The relationship between rainfall and landslide is investigated in respects of time distribution，intraday rainfall，rainstorm，comparison of time between landslides and rainfall，and comparison between the days with rainfall and those with continuous rainfall within ten days before the landslide；and several conclusions are drawn which prove that the relationship between rainfall and landslide is close. The quantity of landslide has direct ratio with rainfall. Landslide usually occurs within four days after a rainfall and within one day after a rainstorm. On the assumption that rainfall begins to infiltrate into soil when rainfall is 3 mm，if there is 3-day continuous rainfall，the possibility of landslide is very high.

Key words：rock and soil mechanics；landslide；rainfall；hydrogeology conditions；historical data；rainstorm

1　引　言

滑坡产生于特定的地质环境中，是在以重力为主的自然营力作用下或在人类工程活动影响下发生发展的斜坡变形运动，是常见的自然地质灾害之一，并具有数量多、规模大、分布广、发生频繁、危害严重等特点。产生滑坡的主要条件为：一是地质条件和地貌条件，这是滑坡发展的内在因素；二是内外营力和人为作用的影响，这是滑坡发生的诱发因

收稿日期：2005－02－24；**修回日期：**2005－04－25
基金项目：国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412703)；中国科学院重要方向性项目(KJCX2－SW－L1)；“长江三峡库区蓄水后土石混合体库岸稳定性评价方法研究”项目
作者简介：张　珍(1980－)，女，硕士，2001 年毕业于长安大学地质工程系工程地质专业，主要从事流体力学方面的研究工作。E-mail：zhangzhen497321@163.com。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

素。在众多的诱发因素中，水是最重要的因素。水在滑坡中的作用主要表现在：软化、潜蚀岩土，降低软弱结构面的强度，增大孔隙水压力，使处于极限平衡状态的滑坡体产生滑动；同时，多次的干湿状态交替变化使得岩土体开裂，产生了大量的裂隙，为地表水的入渗提供了良好的通道，加速了滑坡的发生[1~3]。于是在滑坡发生的地形地质条件已具备的情况下，水就成了诱发滑坡的重要因素，而水的补给方式主要是大气降水。据统计降雨类型的滑坡约占滑坡总数的 70%，同时调查表明降雨类型的滑坡中 95%的滑坡发生于雨季[4]。降雨诱发的滑坡(通常称为降雨滑坡)在世界上分布最广，发生频率最高，在诸类滑坡中给人类造成的危害最大。因而对降雨滑坡的预测预报应极为重视。

国内外已经有许多研究者对降雨与滑坡的关系进行了探索研究[5~13]，他们采用不同的方法或模型研究了具体的某个地区发生滑坡时的临界降雨强度或降雨持续的时间，从雨量上定量地预报了滑坡的发生。由于滑坡是具有区域性的自然灾害，并且在滑坡的发生过程中还有很多不确定的因素无法在模型中得到反映，因此很难通过建立降雨－滑坡数学模型来十分准确地预报滑坡的发生。本文采用概率统计的方法，对重庆地区已经发生的 577 个滑坡的降雨资料进行了统计分析，从时间上和雨量上详细地研究了降雨与滑坡二者间的概率关系。

重庆市位于四川盆地的东南部，地形以丘陵低山为主，长江自 WS 向 EN 纵贯全境，流程 710 km，流域面积大于 50 m^2 的河流有 443 条，构成嘉陵江、长江两大水系和若干小水系，重庆地区的气候为中亚热带湿润季风型气候，因此，这里降雨充沛，且多为暴雨。重庆年平均降水量为 975.1～1 301.7 mm，年平均相对湿度为 77%～83%，十分有利于岩石的风化。重庆地区的水文地质条件较为简单，地下水多为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水。沿江岸的土质滑坡、崩积坡和人工堆积层透水性强，地下水的动态变化受降雨及两江水位变化的影响很大，在枯水期内不含水或水位埋深大；洪水期时接受降雨及江水补给，堆积体大部分处于饱水状态。1998 年的洪灾使得重庆市 1 098 处发生了危害较大的滑坡泥石流等灾害，受灾人口达 8 万余人，死伤 50 人，直接经济损失 6.1 亿元。可见滑坡对重庆地区的经济建设和社会发展构成了严重的威胁，如果能找出滑坡与降水间的关系，并据此来预报滑坡，就能把损失降低到最低程度。

2　滑坡与降雨量的关系

2.1　滑坡与当日降雨量的关系

根据表 1 中的标准对滑坡发生当天的降雨量进行了雨型分类，接下来研究了雨型与滑坡数二者间的关系。

表 1　滑坡数与当日降雨量的关系

Table 1　Relationship between landslides and intraday rainfall

雨型	滑坡数/个	占总滑坡数的比例/%
0	164	28.4
小雨，(0，10) mm	96	16.6
中雨，[10，25) mm	81	14.1
大雨，[25，50) mm	49	8.5
暴雨，[50，∞) mm	187	32.4

由表 1 中可知，有 164 个滑坡发生的当天没有降雨，占总滑坡数的 28.4%。16.6%的滑坡发生的当天降小雨，14.1%的滑坡发生的当天降中雨，8.5%的滑坡发生的当天降大雨，但当天降暴雨的滑坡数占总滑坡数的 32.4%。可见滑坡的发生受两方面的影响，一是前期的累计降雨量，虽然 28.4%的滑坡发生的当天没有降雨，但在这些滑坡发生的前 10 d 内都有降雨，经统计近 70%的滑坡在发生前 10 d 内至少降过一次大雨及大雨以上的雨；二是暴雨，有 32.4%的滑坡发生的当天降了暴雨，可以看出滑坡与暴雨的关系十分密切。

2.2　滑坡发生前每日降雨量的比较

通过对滑坡发生前 10 d 内每天的降雨情况进行统计研究(详见图 1)，发现 577 个滑坡中，在滑坡发生前的第 10 d 降雨以小雨为主的滑坡约占 53%，在随后的第 9～3 d 小雨所占的比例有所减小，但减小的幅度不大，占总数的比例为 30%～40%，在滑坡发生的前 3 d 里(包括滑坡发生的当天)小雨所占的比例呈直线下降，滑坡发生当天小雨约占 16%。中雨主要集中在滑坡发生前的第 6～8 d 和滑坡发生的前 2 d。大雨在滑坡发生的前 7 d 内呈波状分布，占总数的比例在 10%以下波动，到了滑坡发生的前 3 d 大雨占总数的比例稳定在 10%上下。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

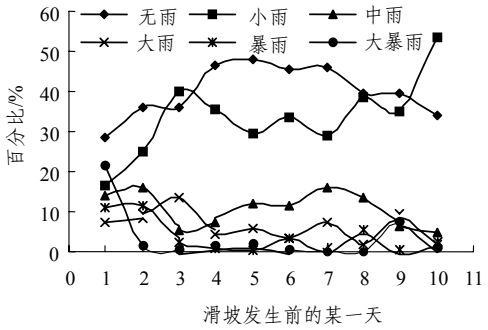

图 1　滑坡发生前每日降雨量情况的比较

Fig.1　Comparison of everyday rainfall before landslide

暴雨(日降雨量为[50～100]mm)在滑坡发生前的第 8 d 和第 6 d 所占的比例较高，分别在 6%和 5%左右，在滑坡发生的前 2 d 降暴雨的滑坡占总滑坡数的比例高达 11%。大暴雨(日降雨量为[100，∞]mm)主要集中在前 2 d，1 d 是滑坡发生前的第 9 d，比例约为 8%，另 1 d 是在滑坡的当天，比例高达 21%。

总之，在滑坡发生的前 8 d 内，小雨和中雨二者所占的比例一直都很高且相对稳定，而暴雨在滑坡发生的前 2 d 比例一直居高不下，大暴雨在滑坡发生的当天比例更是出奇的高。可见在滑坡发生的过程中，小雨、中雨是基础，暴雨、大暴雨是诱发因素。

2.3　滑坡与暴雨的关系

在研究滑坡数与当日降雨量关系的时候发现，32.4%的滑坡发生的当天降了暴雨，因此，很有必要单独研究滑坡与暴雨之间的关系。

经统计 577 个滑坡中有 315 个在滑坡发生前的 10 d 内至少降过 1 次暴雨。首先来研究暴雨次数与滑坡数之间的关系，由表 2 可知，滑坡发生的前 10 d 内降过 1 次暴雨的滑坡有 186 个，占总滑坡数的 32.2%；10 d 内降过 2 次暴雨的滑坡有 115 个，占总滑坡数的 19.9%；10 d 内降过两三次暴雨的滑坡比较少。可见，一两次的暴雨就足可以诱发一次滑坡。下面来研究滑坡与 1 次暴雨间的关系，由表 3 可知，186 个滑坡中有 43.5%的滑坡发生在暴雨的当天，16.1%的滑坡发生在暴雨后的第 7 d，10.8%的滑坡发生在暴雨后的第 5 d。因此，降过 1 次暴雨后，滑坡有可能在暴雨的当天发生，也有可能滞后几天发生，但当天发生的可能性更大些。接下来看看滑坡与 2 次暴雨间的关系，分析表 4 中的数据发现，115 个滑坡中 39.1%的滑坡发生在连续的 2 次暴雨之后，其中发生在暴雨结束当天的滑坡占到 115 个滑坡的 36.5%。115 个滑坡中 2 次暴雨中间间隔 7 d 的滑坡有 43 个，占 115 个滑坡的 37.4%，43 个滑坡中又有 40 个滑坡的 2 次暴雨分别发生在滑坡发生前的第 8 d 和滑坡发生的当天。可见，连续的 2 次暴雨结束的当天发生滑坡的可能性非常的大，其次是中间间隔 7 d 的 2 次暴雨，在第 2 次暴雨结束的当天也非常可能发生滑坡。

表 2　滑坡发生的前 10 d 内降暴雨的天数

Table 2　Number of rainstorm days in ten days before the occurrence of landslide

滑坡发生的前 10 d 内降暴雨的天数/d	滑坡数/个	占 577 个总滑坡数的比例/%
1	186	32.2
2	115	19.9
3	12	2.1
4	2	0.3

表 3　滑坡发生前的 10 d 内有 1 d 降暴雨的情况

Table 3　Specific condition of one rainstorm in ten days before the occurrence of landslide

滑坡发生前的第几天在降暴雨	滑坡数/个	占 186 个滑坡数的比例/%
0	81	43.5
1	15	8.1
2	9	4.8
3	8	4.3
4	8	4.3
5	20	10.8
6	3	1.6
7	30	16.1
8	2	1.1
9	10	5.4

注：在第 1 栏中，0 表示滑坡发生的当天，1 表示滑坡发生前的第 1 d，依此类推。

综上所述，暴雨与滑坡的关系很密切。一两次的暴雨就可以诱发一次滑坡，从概率的角度来说，降暴雨的当天发生滑坡的可能性很大。

3　滑坡与降雨在时间上的关系

3.1　滑坡的时间分布

影响滑坡的因素很多，但对于重庆地区来说，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4　滑坡发生前的 10 d 内有 2 d 降暴雨的具体情况

Table 4　Specific conditions of two rainstorms within ten days before the occurrence of landslide

2 次暴雨间隔的天数/d	2 次暴雨具体的降雨时间	滑坡数/个		占 115 个滑坡数的比例/%	
0	滑坡发生前的第 0，1 d	42	45	36.4	39.1
	滑坡发生前的第 1，2 d	1		0.9	
	滑坡发生前的第 5，6 d	1		0.9	
	滑坡发生前的第 6，7 d	1		0.9	
1	滑坡发生前的第 0，2 d	7	10	6.1	8.7
	滑坡发生前的第 2，4 d	2		1.7	
	滑坡发生前的第 3，5 d	1		0.9	
2	滑坡发生前的第 0，3 d	7	11	6.1	9.5
	滑坡发生前的第 1，4 d	4		3.4	
3	滑坡发生前的第 0，4 d	1	1	0.9	0.9
4	滑坡发生前的第 0，5 d	2	4	1.7	3.5
	滑坡发生前的第 1，6 d	1		0.9	
	滑坡发生前的第 4，9 d	1		0.9	
5	滑坡发生前的第 1，7 d	1	1	0.9	0.9
7	滑坡发生前的第 0，8 d	40	43	34.8	37.4
	滑坡发生前的第 1，9 d	3		2.6	

注：在第 2 栏中，0 表示滑坡发生的当天，1 表示滑坡发生前的第 1 d，依此类推。

该地区降雨量充沛，在滑坡发生的地形地质条件已具备的情况下，水在滑坡形成、发生过程中的作用显得尤为重要。对 577 个滑坡进行时间分类得到滑坡的年内时间分布图(见表 5，图 2)。

表 5　月份与滑坡数的关系

Table 5　Relationship between landslides and month

月份/月	滑坡数/个	占总滑坡数的比例/%
1	2	0.3
2	1	0.2
3	3	0.5
4	14	2.4
5	27	4.7
6	88	15.3
7	248	43.0
8	147	30.2
9	15	2.6
10	3	0.5
11	2	0.3
12	0	0.0

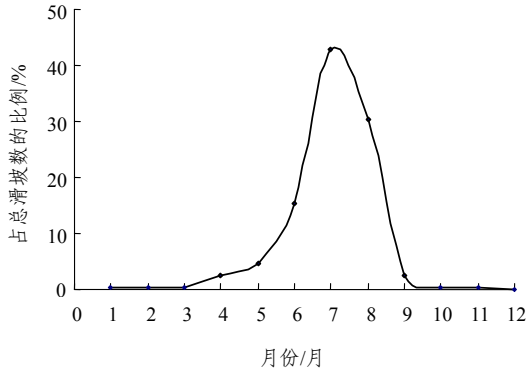

图 2　月份与滑坡数的关系

Fig.2　Relationship between landslides and month

由表 5，图 2 可知，滑坡数与月份有着良好的对应关系。滑坡主要发生在 4～9 月份，占总滑坡的 98.2%，这段时间正好是 1 a 中降水集中的时期。洪水期(6～8 月)内的滑坡数占总滑坡数的比例高达 88.5%，7 月份发生滑坡的次数最高，共 248 次，占总滑坡数的 43.0%。可见滑坡数在 1 a 内随月份、季节的更替而不断变化，呈现出明显的以 7 月份为对

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

称轴的分布规律。滑坡发生的概率和滑坡数量与雨量大小成正比，雨量大时滑坡数量也多。文[14，15]也论证了这个观点。通过上面的分析发现滑坡与降水二者之间的关系非常密切，水在滑坡形成、发生的过程中起着非常重要的作用。

3.2　距离滑坡发生最近的 1 次降雨发生的时间

设距离滑坡发生最近的 1 次降雨发生在滑坡发生前的 10 d 内的某 1 d $B_n(0\leqslant n\leqslant 9)$为一个事件，来研究这个事件 B_n 的概率，任意 2 d 是否会降雨是相互独立的，且同 1 d 里降雨与不降雨是互不相容的，即：

B_0 表示距离滑坡发生最近的一次降雨发生在滑坡发生的当天(即滑坡发生的当天有降雨，而不考虑滑坡发生前的第 1～9 d 有没有降雨)；

B_1 表示距离滑坡发生最近的一次降雨发生在滑坡发生前的第 1 d(滑坡发生的当天没有降雨，滑坡发生前的第 1 d 有降雨，不考虑滑坡发生前的第 2～9 d 有没有降雨)；

⋮

⋮

B_9 表示距离滑坡发生最近的一次降雨发生在滑坡发生前的第 9 d(滑坡发生当天至滑坡发生前的第 8 d 没有降雨，滑坡发生前的第 9 d 有降雨)。

A_0 表示滑坡发生的当天有降雨；

$\bar{A}_0$ 表示滑坡发生的当天没降雨；

A_1 表示滑坡发生前的第 1 d 有降雨；

$\bar{A}_1$ 表示滑坡发生前的第 1 d 没有降雨；

⋮

⋮

A_9 表示滑坡发生前的第 9 d 有降雨；

$\bar{A}_9$ 表示滑坡发生前的第 9 d 没有降雨，且有

$$A_0\cap\bar{A}_0=\Phi,\ \cdots,\ A_9\cap\bar{A}_9=\Phi$$

则距离滑坡发生最近的一次降雨发生在滑坡发生前的 10 d 内某 1 d 的概率(根据乘法原理)为

$$P(B_i)=(A_0)(A_1)\cdots(A_{i-1})A_i\cdots(A_{i+1}\overline{A}_{i+1})\cdots$$
$$(A_9\overline{A}_9)/[(A_0\overline{A}_0)\cdots(A_9\overline{A}_9)]=2^{9-i}/2^{10}=2^{1-i}$$

且有

$$P(B_0)=50\%,\quad P(B_1)=25\%,$$
$$P(B_2)=12.5\%,\quad \cdots,\quad P(B_9)=0.098\%$$

由此可知，$P(B_0)>P(B_1)>\cdots>P(B_9)$，越接近滑坡发生的当天，降雨的概率越大。表 6 统计了距离滑坡发生最近的 1 次降雨是在滑坡发生前的第几天的情况。

通过对表 6，图 3 中的数据和曲线进行分析发现，有些滑坡发生在降雨的当天，有些滑坡发生在降雨结束后的第 1，2，3 d 等等，有明显的滞后性。降雨当天发生的滑坡有 413 个，占总滑坡数的 72%。降雨结束后的第 1 d 发生的滑坡有 55 个，占总数的 9.5%，发生在降雨结束后 4 d 内的滑坡占滑坡总数的 96.9%，由此可知滑坡基本发生在降雨之后的 4 d 内。总之，距离滑坡最近的 1 次降雨发生的时间越接近于滑坡发生的时间，滑坡数越多。前面的概率分析已经表明越接近于滑坡发生的时间，降雨的概率就越大。把概率分析与统计结果联系起来得出一个结论：降雨的概率越大，发生滑坡的可能性越高。进一步论证了在滑坡的发生过程中水的重要性。

表 6　距离滑坡发生最近的 1 次降雨发生的时间

Table 6　Time of nearest rainfall before the occurrence of landslide

距离滑坡发生最近的 1 次降雨是在滑坡发生前的第几天	符合条件的滑坡数/个	频率/%
0	413	72.0
1	55	9.5
2	39	6.8
3	31	5.4
4	18	3.2
5	4	0.7
6	1	0.2
7	2	0.3
8	7	1.2
9	4	0.7

注：0 为距离滑坡发生最近的一次降雨是在滑坡发生的当天，1 为距离滑坡发生最近的一次降雨是在滑坡发生前的第 1 d，依次类推。

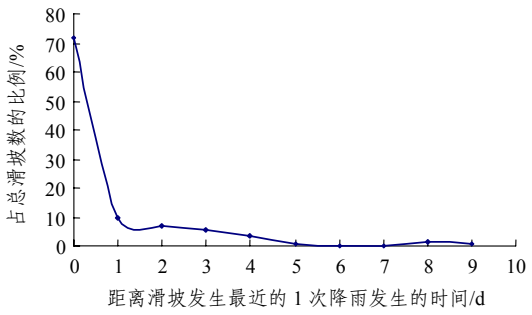

图 3　距离滑坡发生最近的 1 次降雨的比较

Fig.3　Comparison of the nearest rainfall before the occurrence of landslide

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 滑坡发生的前 10 d 内有降雨的天数与连续降雨的天数的比较

当降雨强度小于或等于入渗率的时候，降雨全部渗入到了土体中；当降雨强度大于入渗率的时候，会有一部分雨水在坡面上汇集形成坡面径流。从两方面进行研究，1 个出发点是滑坡发生的前 10 d 内有降雨的天数(见图 4)。若把 0 或 1 mm 作为降雨开始入渗的界限，可知相应的曲线上有 2 个峰值；把 2 或 3 mm 作为降雨开始入渗的界限，滑坡发生的前 10 d 内有 4 d 降雨的滑坡最多，约占滑坡总数的 26%；把 4 或 5 mm 作为降雨开始入渗的界限，滑坡发生的前 10 d 内有 3 d 降雨的滑坡最多，分别约占总滑坡数的 21%和 28%。第 2 个出发点是滑坡发生的前 10 d 内连续降雨的天数(见图 5)。当分别把 0，1，2 或 3 mm 作为降雨开始入渗的界限时，在滑坡发生的前 10 d 内连续降雨的天数为 3 d 时，发生的滑坡最多，分别约占总滑坡数的 25%，37%，30%和 37%。把 4 或 5 mm 作为降雨开始入渗的界限时，连续降雨的天数为 1，2 d 时，发生的滑坡数最多。

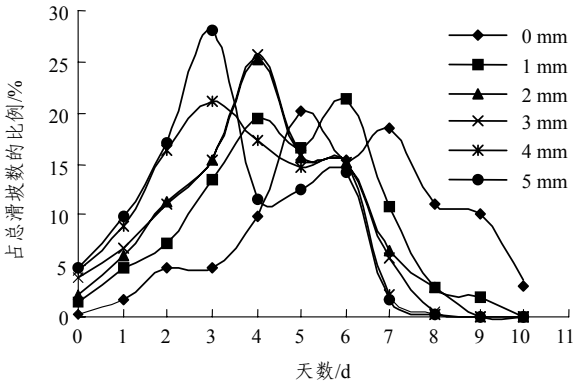

图 4　滑坡发生的前 10 d 内有降雨的天数

Fig.4　Days with rainfall in ten days before landslide

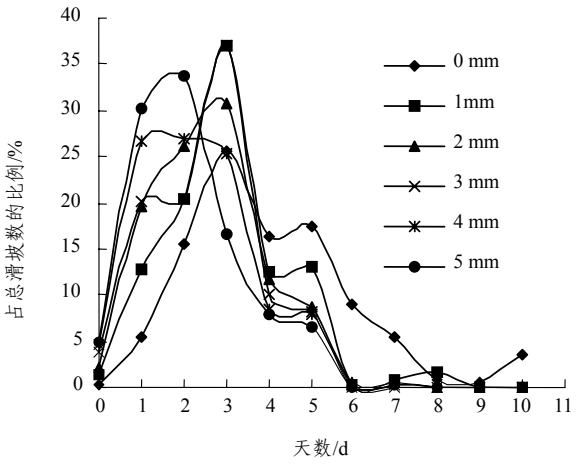

图 5　滑坡发生的前 10 d 连续降雨的天数

Fig.5　Days with continuous rainfall within ten days before landslide

现在把这一个方面联合起来进行研究。综合上面的分析，选取 3 mm 作为降雨开始入渗的界限(详见图 6，表 7)。发现在滑坡发生的前 10 d 内有 4 d 在降雨且其中有 3 d 在连续降雨这种情况下发生的滑坡占 577 个总滑坡的 17%。其次是滑坡发生的前 10 d 内有 5 d 在降雨且其中有 3 d 在连续降雨，这种情况下发生的滑坡占总滑坡数的 9.9%。可见如果连续 3 d 有降雨，且在这 3 d 的前后 5 d 内又有 1 到 2 次的降雨，那么发生滑坡的可能性相对来说会很大。

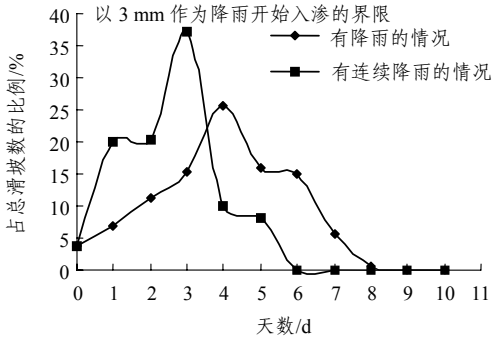

图 6　有降雨的天数与连续降雨的天数的比较

Fig.6　Comparison between the days with rainfall and the days with continuous rainfall

表 7　有降雨的天数与连续降雨的天数的比较

Table 7　Comparison between the days with rainfall and the days with continuous rainfall

10 d 内有降雨的天数/d	10 d 内连续降雨的天数/d	滑坡数/个	占总滑坡数的比例/%
3	1	33	5.7
3	2	42	7.3
3	3	14	2.4
4	1	5	0.9
4	2	38	6.6
4	3	98	17.0
5	2	5	0.9
5	3	57	9.9
6	2	7	1.2
6	3	42	7.3

4　结　论

本文对重庆地区 577 个已经发生的滑坡的历史

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

降雨资料进行了详细的统计分析，从滑坡与降雨量，滑坡与暴雨，滑坡与降雨在时间上的关系等方面研究了该地区滑坡与降水间的关系。得到以下几点结论：

(1) 滑坡主要集中在雨季，滑坡的活动强度与雨量的大小成正比，雨量多时滑坡的数量也多。滑坡与滑坡发生前 4 d 的降雨有着密切的关系，滑坡基本发生在降雨之后的 4 d 内。如果连续 3 d 有降雨，且在这 3 d 的前后 5 d 内又有 1，2 次的降雨，那么发生滑坡的可能性相对来说会很大。

(2) 暴雨与滑坡的关系很密切，一两次的暴雨就可以诱发一次滑坡，1 次暴雨结束后，滑坡有可能在暴雨的当天发生，也有可能滞后几天发生，但当天发生的可能性更大些。连续的 2 次暴雨结束的当天发生滑坡的可能性很大，其次是中间间隔 7 d 的 2 次暴雨，在第 2 次暴雨结束的当天也非常可能发生滑坡。

参考文献(References)：

[1] 汪益敏，陈页开，韩大建，等. 降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(6)：920－924.(Wang Yimin，Chen Yekai，Han Dajian，et al. Case study on influence of rainfall permeation on slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(6)：920－924.(in Chinese))

[2] 黄　涛，罗喜元，邬　强，等. 地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(16)：2 671－2 675.(Huang Tao，Luo Xiyuan，Wu Qiang，et al. Model testing study on slope stability under environment of surface water permeation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(16)：2 671－2 675.(in Chinese))

[3] 汤连生，张鹏程，王　洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(19)：3 337－3 341.(Tang Liansheng，Zhang Pengcheng，Wang Yang. On fracture strength of rocks with cracks under water action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(19)：3 337－3 341.(in Chinese))

[4] 张先发，李明华，张小刚. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系[J]. 地理，1995，8(3)：102－106.(Zhang Xianfa，Li Minghua，Zhang Xiaogang. The relationship between rainstorm and landslip in upper reaches of Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences，1995，8(3)：102－106. (in Chinese))

[5] 谢守益，徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报，1999，32(1)：21－23.(Xie Shouyi，Xu Weiya.Catastrophe analysis of rainfall-induced landslides[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering，1999，32(1)：21－23.(in Chinese))

[6] 龙　辉，秦四清，万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(4)：502－508.(Long Hui，Qing Siqing，Wan Zhiqing.Catastrophe analysis of rainfall-induced landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21(4)：502－508.(in Chinese))

[7] 林孝松，郭　跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学，2001，16(2)：87－92.(Lin Xiaosong，Guo Yue. Research of coupling relation between landslides and rainfall[J]. Jouranl of Catastrophology，2001，16(2)：87－92.(in Chinese))

[8] 柳　源. 滑坡临界暴雨强度[J]. 水文地质工程地质，1998，25(3)：43－45.(Liu Yuan. Critical precipitation of landslide[J]. Hydrogeology and Engineering geology，1998，25(3)：43－45.(in Chinese))

[9] Brand E W，Premchitt J，Philipson H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[A]. In：Proceedings of 4th International Symposium on Landslides[C]. Toronto：[s. n.]，1984. 377－384.

[10] Kim S K，Hong W P，Kim Y M. Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea[A]. In：Landslides[C]. Rotterdam：A A Balkema，1991. 989－994.

[11] 黄玲娟，林孝松. 滑坡与降雨研究[J]. 湘潭师范学院学报，2002，24(4)：55－62.(Huang Lingjuan，Lin Xiaosong. Study on landslide related to rainfall[J]. Journal of Xiangtan Normal University，2002，24(4)：55－62.(in Chinese))

[12] 丁继新，尚彦军，杨志法，等. 降雨型滑坡预报新方法[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(21)：3 738－3 743.(Ding Jixin，Shang Yanjun，Yang Zhifa，et al. New method of predicting rainfall-induced landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(21)：3 738－3 743.(in Chinese))

[13] Peierson T C，Iverson R M. Ellen S D. Spacial and temporal distribution of shallow landsliding during intense rainfall，Southeastern Oshu，Hawaii[A]. In：Landslides[C]. Rotterdam：A A Balkema，1991. 1 393－1 398.

[14] Kay J N，Chen T. Rainfall-landslide relationship for Hong Kong[A]. In：Proceedings of Institute of Civil Engineer[C]. [s. l.]：[s. n.]，1995. 117－118.

[15] Lumb P. Slope failure in Hong Kong[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology，1975，8(9)：31－65.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net