2019年10月，第25卷，第5期，772-778页
October 2019，Vol. 25，No.5， pp. 772-778

高 校 地 质 学 报
Geological Journal of China Universities

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019055
引用格式：燕晓莹，阎长虹，郜泽郑. 2019.镇江地区降雨导致滑坡规律统计分析[J]. 高校地质学报，25（5）：772-778

镇江地区降雨导致滑坡规律统计分析

燕晓莹[1,2]，阎长虹[1]，郜泽郑[1]

1. 南京大学 地球科学与工程学院，南京 210023；
2. 南京大学 金陵学院，南京 210089

摘要：江苏镇江地区地属丘陵地带，近年来由于气候变化，调查资料显示镇江地区短时强降雨或持续时间较长的降雨经常诱发大量浅层滑坡，降雨是区内滑坡主要影响因素，造成了较大的经济损失。文章通过对镇江地区300多个山体边坡进行详细现场环境地质调查，结合收集气象资料，对该地区的滑坡与降雨相关参数的关系进行统计分析，得到了降雨量与降雨持续时间对滑坡数量的变化关系。确定了镇江地区降雨阈值*I*–*D*曲线，并将分析结果与其他地区进行了对比分析，研究成果可为镇江地区滑坡治理和预警预报提供依据。

关键字：镇江地区；降雨；滑坡；统计分析
中图分类号：P642.22　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-7493（2019）05-772-07

Statistical Analysis of Landslides Law Caused by Rainfall in Zhenjiang Area

YAN Xiaoying[1,2]，YAN Changhong[1]，GAO Zezheng[1]

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. Jinling College, Nanjing University, Nanjing 210089, China

Abstract: Zhenjiang is located in a hilly area in Jiangsu Province. In recent years, investigation data shows that short-term strong rainfall or long-lasting rainfall in Zhenjiang area often induced a large number of shallow landslides. So, rainfall is the main influencing factor of landslides in Zhenjiang area, which has caused great economic losses. In this paper, more than 300 mountain slopes in Zhenjiang area were investigated in detail, and the relationships between landslides and rainfall related parameters were analysed based on meteorological data. The relationships between rainfall, duration and the number of landslides were obtained. The *I*–*D* curve of rainfall threshold in Zhenjiang area was determined, and the analysis results were compared with those in other areas. The research results provided a basis for landslide control, early warning and prediction in Zhenjiang area.

Key words: Zhenjiang area; rainfall; landslide; statistical analysis

First author: YAN Xiaoying, Ph.D. Candidate; E-mail: jshayxy@126.com

镇江地处江苏省西南部，位于宁镇山脉东段，在大地构造单元处于下扬子台缘宁镇断褶隆的东段，地层自震旦系至第四系均有分布，第四系下蜀黄土的覆盖面积占全市陆地总面积的二分之一左右（刘东生和安芷生，1992）。全境总面积3840 km^2，南北宽76.9 km，东西长95.6 km，其中丘陵山地占总面积的51.1%，境内具有宁镇、茅山、丹阳3条山系，宝华、茅山等17条山脉，大

收稿日期：2019-06-26；**修回日期：**2019-07-06
基金项目：江苏省自然科学基金资助项目（SBK2019020709）
作者简介：燕晓莹，女，1987年生，博士研究生，地质工程专业，主要从事城市环境岩土工程研究；E-mail: jshayxy@126.com

小山体有235座，享有“城市山林”美誉。受地形、地貌影响，该地区为地质灾害高频发生区，例如1991年6~7月，由于连续强降雨，市区内21座山体发生滑坡近200处，造成511间房屋、厂房被毁，由于滑坡地点位于人口密集地带，造成较大直接损失，并给附近居民生活带来很大的影响。2003年7月，据完全统计，因受连续暴雨影响，镇江市区有58处山体发生较大规模滑坡，受灾群众超过2000人。2011年8月底和2013年6月，连续暴雨导致市区出现3处滑坡，紧急转移群众数十余户，人数近百人。2015年6~7月，跑马山公园内在持续降雨后多处山体发生群发性滑坡险情，由于附近住宅密集，周围群众生命财产受到严重威胁。根据调查结果，镇江地区的大多数滑坡虽规模不大，但由于地处人口密集地带，多年来造成的损失不可估量。每年汛期，处理滑坡及相关问题成为当地社会的一个重大事件。

根据对市区范围内已发生的大、小滑坡调查，发现镇江地区滑坡类型中，大多为降雨所致，降雨型滑坡占比最多、分布最广、危害最重、频率最高，所造成的损失最重。因此需深入研究降雨诱发滑坡发生机制和降雨阈值，为滑坡地质灾害管理与治理提供科学依据（黄润秋等，2005）。

降雨导致山体滑坡涉及降雨入渗过程中的土—水相互作用问题，国内、外众多学者对此进行了大量的试验研究。基于数据统计分析结果，Ohlmacher（2007）和Schulz等（2009）研究指出，滑坡灾害受降雨过程的影响较大，仅在地震等极端条件下地质灾害的发生受降雨过程的影响较小。通过非饱和土试验研究，建立了饱和—非饱和渗流方程，基于此提出了非饱和土体抗剪强度公式和非饱和土边坡稳定性分析（Fredlund，1997,1987）。基于Galerkin有限元法，Alonso（1995）分析了土体性质、雨强、雨型和土体渗透性对边坡安全系数的影响。Campbell（1974）研究加利福尼亚中南部地区降雨与滑坡关系时，认为降雨与滑坡有一定关系，首次提出滑坡临界累积降雨量。Aleotti（2004）对意大利西北部地区105次降雨引起的滑坡事件分析，得出降雨阈值*I–D*曲线。降雨入渗的过程除了受非饱和土体的土—水作用机理影响外，还受降雨强度和降雨持续时间的影响。詹良通等（2002）以浅层残积土滑坡为对象，分析了雨型、土体渗透性、土体力学参数、坡角、土层厚度等因素对降雨阈值*I–D*曲线的影响。

镇江地区由于其特殊的地理、地质和气象环境，其滑坡问题在江苏境内比较典型，社会关注程度和投入高，社会影响大，因此对滑坡形成机理、主要影响因素和预警预报的研究成果有着较大的实践意义。本文在对镇江地区进行全面野外滑坡调查和资料收集基础上，对镇江地区降雨导致滑坡发育规律进行统计，分析降雨因子（年、月、日降雨量）与滑坡关系，确定镇江地区滑坡降雨阈值*I–D*曲线，为该地区滑坡治理和滑坡预警预报提供依据。

1　镇江地区气候及基本地质条件

区域地质资料和现场调查结果表明，镇江地区丘陵主要由宁镇、茅山山脉形成，分布在句容西部、丹徒北部和丹阳沿江地带，海拔高度20~437.2 m，呈现阶梯状，山体周围为黄土堆积而成，高程20~30 m，最高阶梯为剥蚀面，高程340~437.2 m，后者主要分布于句容中东部和南部、丹徒南部，同样呈现阶梯状地形，海拔高度10~360 m。岩性主要为下蜀组黄土、中风化—强风化火成岩和沉积岩组成，滑动面多为一层流塑状态的粘性土，或出现在下蜀土之中，或发生在下蜀土下部，基岩的残积风化层土中（崇婧等，2012）。2016至2018年间，课题组对镇江地区的边（滑）坡进行了详细的调查，收集了大量的第一手资料，数据统计结果显示，边坡岩土层的分类主要受风化程度控制，自上而下依次为残坡积土，全~强风化岩，中风化岩以及最下层基岩，风化界面随坡面起伏而略有变化，土体滑坡滑动面一般位于残坡积土中或与全风化岩的交界面处，其深度为2~6 m，表层土体结构相对较松散，易于地表水入渗，形成浅层土质滑坡。根据野外调查，一般边坡都在10~30 °之间，少数坡度达到40 °。岩石滑坡大多由于降雨入渗导致岩石强风化后结构面或岩体力学性质下降，发生滑坡，滑体深度一般不超过10 m。

镇江地属亚热带季风气候区，温暖湿润，雨量充足，夏季降水比较集中，多暴雨。6~7月份进入梅雨季，约19 d，常年降雨量为1315 mm，最大年降雨量为2836 mm，日最大降雨为263 mm，历史上12小时最大降雨量为183 mm。月降雨量分配

极不均匀，其中6~9月占年降雨量60%，常年降雨天数为119天，6~7月份暴雨主要为梅雨暴雨，8~9月份主要为台风暴雨，镇江地区短时强降雨或持续时间较长的降雨入渗，使下蜀土浸泡松软，内聚力降低，容重增加，土体重量加大，促使土体沿滑面向下滑动。大量雨水沿岩石裂缝贯入经常诱发滑坡发生，是区内滑坡主要影响因素。

镇江市区的地理位置导致了“城在山中，山在城中”的独特环境，人口密集，建筑物重要性程度高，故即使滑坡规模不大，但破坏导致的后果严重，滑坡治理和预警预报的重要性程度高于一般边坡。

2 镇江地区降雨滑坡调查统计

由于镇江地区特殊的地貌和气候条件，使得研究区地质灾害频发，尤其滑坡，具有群发性、危害大、分布广等特点，成为镇江地区最为主要的地质灾害类型。近年来，针对该地区滑坡治理要求，对研究区内所有边坡进行现场调查、统计，根据实地调查结果，确定研究区内具有滑坡隐患的边坡点有330个（图1），根据对边坡高度、坡度等几何参数和周围建（构）筑物调查，结合已有地质资料和勘察报告，确定其中存在安全隐患的边坡高达86%。

已有滑坡资料显示，这些存在安全隐患的边坡中，大多由于降雨引起，少部分是由于工程活动引起，为典型的降雨型滑坡灾害。为了更好了解降雨对滑坡的影响规律，本文根据调查结果和收集数据对年、月、日降雨量对滑坡的影响进行了统计分析。

2.1 年降雨量对滑坡的影响

研究区年降雨量与滑坡频度具有很好的相关性，这里将滑坡频度定义为当年滑坡总数占统计滑坡总数的百分比。本文统计了镇江地区1991~2017年26年间年降雨和滑坡情况（图2），年降雨量在676~2221 mm之间波动，其中最多为2221 mm（2015年），最少为676 mm（1994年），平均为1242 mm。结合上述降雨后的滑坡数量，进行统计发现，当降雨量小于1242 mm时，滑坡发生频度相对较低，如1994~2002年间，年平均降雨量为1006 mm, 9年间仅有少量滑坡发生，发生频度不到6%，远小于平均水平。

当降雨量小于1242 mm时，研究区滑坡的数量和频率很低，滑坡数量占统计所有滑坡数量不到5%。当降雨量大于1242 mm，小于1564 mm时，滑坡发生率不到10%，当降雨量多于1564 mm时，滑坡发生率大大提高，几乎达到了65%以上。其中1991、2003、2015和2016这4年内，年降雨量均大于1564 mm，研究区发生了大量滑坡，占总滑坡数量80%，并且多处出现群发性滑坡。其中1991年6~7月降雨量达到了历史罕见的1906 mm，从6月13日狮子山北西坡发生滑坡开始，到7月11日北固山滑坡为止，全市范围内21座山体发生破坏，滑坡点达80余处，摧毁房屋500多间，估计损失高达3亿元。故认为研究区滑坡发生概率与年降雨量具有一定关系，当年降雨量超过平均年

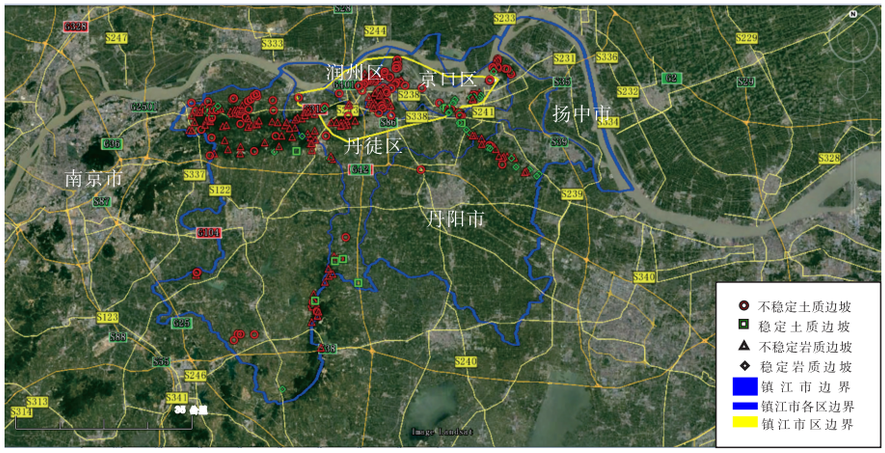


图1 边坡及滑坡灾害隐患点分布图

Fig. 1 Distribution Map of Potential Dangerous Points of Slope and Landslide Disasters

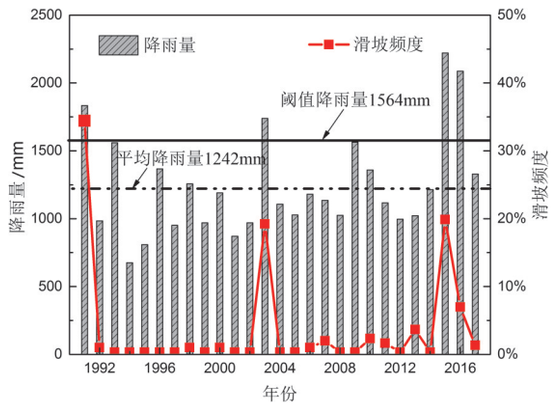


图2　年降雨量与滑坡数量对应关系

Fig. 2　Relationship between Landslide and annual rainfall in Zhenjiang

降雨量时，滑坡发生概率较低。当降雨量超过1564 mm时，滑坡事件快速增加。

2.2　月降雨量对滑坡的影响

分析研究区近26年月降雨量数据和滑坡发生月份统计结果（图3），当月降雨量大时，滑坡发生频度对应增大，二者具有很好的相关性。

镇江地区6~8月份降雨量占全年52%，统计结果发现，接近81.7%的滑坡发生在6~8月份。这一时间段是镇江地区典型的梅雨季节，降雨多、强度大，间有出现连续多日的强降雨，所以诱发滑坡的概率也大大增加，且发生群发性滑坡数量大。如2003年7月4~12日期间，连续降雨，雨量共计达到373 mm，虽然总降雨量不大，但造成市区58处山体滑坡，经济损失巨大。

而2003年10月降雨量占全年降雨量的5%，但滑坡发生占比却高达9%，这是因为10月份天气

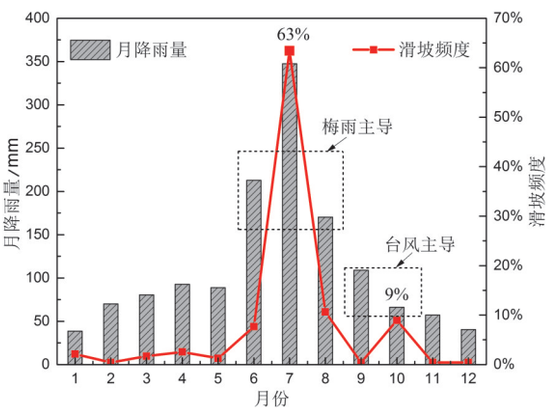


图3　滑坡与月降雨量对应关系

Fig. 3　Relationship between Landslide and Monthly Rainfall

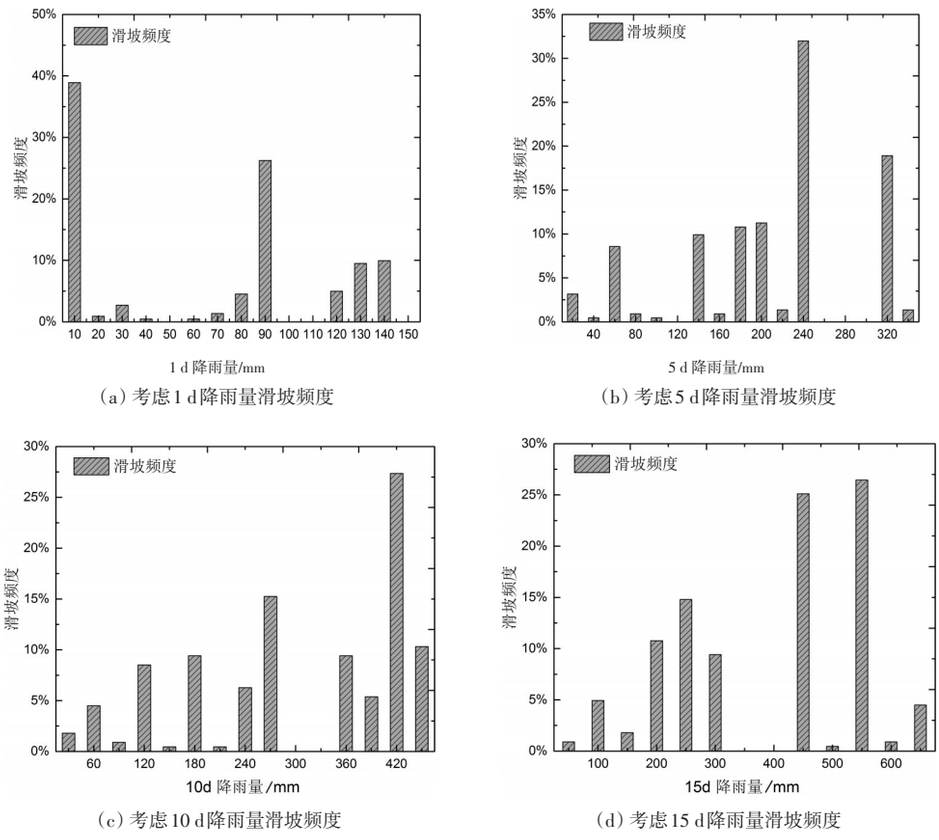
主要受台风的影响，降雨天数虽少，但降雨强度大，经常出现暴雨—大暴雨天气，诱发边坡发生浅层滑动；再如2016年10月26日出现暴雨天气，半天降雨量高达87.4 mm，市区多处山体发生滑坡，仅跑马山公园山体就出现滑坡点10余处。这些统计数据表明，降雨造成滑坡除了跟降雨量有关外，降雨持续时间的影响程度同样较大。持续多日的降雨，虽然降雨量偏小，但入渗水量不一定比短期的强降雨入渗量小。

2.3　日降雨量对滑坡的影响

为了认识滑坡与日降雨量关系，本文根据调查统计结果分析了累积1 d、5 d、10 d和15 d降雨量与滑坡频度关系见图4，总体上来说随着前期降雨量持续时间的增加，累积降雨量越多，滑坡发生概率越大。图4a曲线呈现“双峰”结构，滑坡与日降雨量关系不明显，例如日降雨量为20 mm时，滑坡频度接近40%，而日降雨量为90 mm时，滑坡频度接近30%，这是因为二者破坏类型不一致，前者主要为连续多日小—中雨诱发的滑坡，后者为短时强降雨诱发的浅层滑坡。图4b, c, d分别考虑累积5d、10d、15 d降雨量条件下滑坡频度与降雨关系，可以发现滑坡发生概率峰值随着降雨日数的延长向后移动，例如滑坡发生频度最大时，5 d降雨量主要为240 mm，而10 d和15 d降雨量增加为420 mm和550 mm，其中10 d降雨量与15 d降雨量相差不大，分析认为这一现象时由于10 d降雨量已经使绝大数稳定性差的边坡发生破坏。对比图4不同情况的统计结果可以发现，随着考虑降雨天数的增加，累积降雨量不断增大，虽然降雨量增加的幅度逐渐降低，但滑坡频度却降低幅度小，这说明滑坡发生概率主要受前期降雨量影响，10 d以后降雨对稳定性好的边坡影响不大。

3　降雨特征对滑坡影响规律

统计结果表明，镇江地区的降雨型滑坡跟降雨量和降雨持续时间之间存在着非常明显的关联性。这一关系通常可以采用降雨阈值这一指标来进行分析，降雨阈值是诱发滑坡发生的临界降雨量，由Caine（1980）首先进行具体阐述，并统计分析了世界不同地区滑坡与降雨量的关系，提出了浅层滑坡的降雨阈值关系，降雨强度与降雨持时曲线为：$I=14.82D^{-0.39}$，其中I代表降雨强度



(a) 考虑1 d降雨量滑坡频度　(b) 考虑5 d降雨量滑坡频度

(c) 考虑10 d降雨量滑坡频度　(d) 考虑15 d降雨量滑坡频度

图4　滑坡与日降雨量对应关系

Fig. 4　Relation between Landslide and Daily Rainfall

(mm/h)、D代表降雨持时(h)，I–D曲线是研究降雨阈值应用最广泛的方法。

目前降雨阈值研究方法主要有两种：第一为理论分析法，基于数值分析法，结合降雨入渗、坡体应力状态变化以及边坡失稳机制研究，分析得出的物理性降雨阈值(Guzzetti et al.，2007)；第二种方法为经验法，即基于大量滑坡事件与降雨数据的宏观统计，分析得出的经验性降雨阈值。所以经验性降雨阈值是依靠大量的滑坡与降雨数据得出，不需要严谨的物理数学方法推导，而且数据易收集，准确性比较大。本文通过现场调查获得了大量的镇江地区降雨滑坡数据，故本文运用经验性降雨阈值方法对镇江地区降雨型滑坡的降雨阈值进行研究，以期得到镇江地区滑坡降雨阈值I–D曲线。

本文共收集1990~2018年间研究区降雨引起的滑坡点221起，剔除非降雨因素导致滑坡事件11起，最终选取有效镇江地区降雨诱发的滑坡统计事件210起，这些滑坡主要发生在每年的6~9月份，其中1991年6~7月、2003年7~8月、2015年7~8月、2016年6~7月之间持续强降雨诱发了大量的群发性滑坡，部分代表性较强的滑坡与降雨情况如表1所示。

降雨阈值是诱发滑坡发生的临界降雨，目前最常用的阈值表达式是降雨强度与降雨持时曲线，表达式为：$I=\alpha\times D^{\beta}$，I为降雨强度(mm/h)，短时强降雨一般取峰值强度，长历时一般取平均强度；D为降雨持续时间(h)，根据镇江地区历史降雨资料，最长降雨持续时间为20 d，故本文在进行降雨阈值分析时，考虑降雨持续时间为，考虑3 d、5 d、10 d、15 d、20 d。

根据镇江地区滑坡与降雨统计资料，选取研究区210处滑坡样本点中，大多分布于市区和句容地区山体，其中市区占比80%以上，如图5(对数坐标)和表1是滑坡样本点分布区域和相关参数。对于每一具体滑坡样本发生前15 d内，从降雨开

表1　镇江地区滑坡与降雨情况(部分)

Table1　Landslide and Rainfall in Zhenjiang Area (Part)

滑坡日期	地点	15 d内暴雨次数	最大日降雨量/ mm	降雨强度*I*/(mm/h)	降雨持时*D*/ h	滑坡数量
2018-7-5	观音山	1	123	10.25	12	1
2016-7-4	跑马山	2	122	2.82	108	多处
2016-7-1	京畿巷	1	133	3.83	36	1
2015-6-2	盛世花园	1	120	3.78	36	1
2013-6-26	花园新村	0	55	2.1	60	1
2003-7-4	金山	2	113	9.5	12	多处
1991-7-14	云台山	5	92	1.71	360	多处
1991-7-13	跑马山	5	92	2	288	多处
2015-6-30	跑马山	3	142	3.04	108	多处

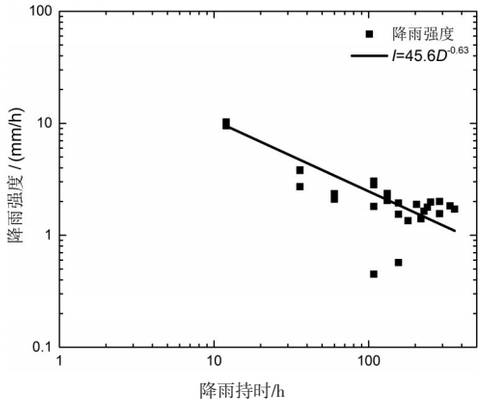


图5　镇江地区经验性*I–D*曲线

Fig. 5　Empirical *I–D* curve in Zhenjiang area

始到滑坡发生之间的时间为降雨持时，降雨强度为连续降雨事件内的平均降雨强度。将所选用滑坡样本对应的降雨持时和降雨强度绘制在双对数坐标系中，进行降雨强度与降雨持时关系分析，并采用非线性幂函数拟合方法得出两者关系曲线，即降雨阈值*I–D*曲线。理论上，每次降雨时间的指标值位于该曲线上方，即发生滑坡的可能性极大，而位于该曲线下方的降雨事件导致滑坡的可能性则较小。因此，该曲线可为地区性滑坡的预警预报提供一定参考依据。

根据统计分析和拟合结果，得到镇江地区经验性降雨阈值曲线为$I=45.6D^{-0.63}$，其中1 h≤*D*≤500 h。阈值曲线高于Caine（1980）得出的全球区域滑坡下限降雨阈值*I–D*曲线（$I=14.82D^{-0.39}$），略高于浙江地区滑坡降雨阈值*I–D*曲线（$I=34.24D^{-0.59}$）（麻土华等，2011）。由于Caine (1980)得出的是全球范围内滑坡下限降雨阈值，为滑坡发生的下限条件，远低于镇江、浙江等区域性降雨阈值，同时镇江与浙江地区地形和气候特点相似，均受梅雨和台风天气影响严重，但浙江受台风的影响大于镇江，对比两者*I–D*曲线表达式可知，二者曲线斜率相近，变化规律大致相同，但降雨持时相同时，引起滑坡发生的降雨强度上镇江地区显得更大，故镇江地区降雨阈值*I–D*曲线略高于后者。

由图5可知，降雨强度与降雨持时呈现幂函数关系，降雨强度越大，滑坡发生时间越短；降雨强度越小，滑坡发生时降雨持时越大。这一拟合结果虽纯粹为理论性结论，但滑坡统计资料中可以找到大量对应的实例，例如2003年7月，当日降雨量高达113 mm，平均降雨强度为9.5 mm/h，滑坡发生时降雨持时为12 h，而当平均降雨强度为3.04 mm/h时，滑坡发生时降雨持时为108 h。表明降雨强度大时，坡体表面快速饱和并可能造成坡面低洼处积水，表层土体力学性能快速降低，从而诱发浅层滑坡，而降雨强度小时，雨水慢慢入渗到坡体更深处，从而诱发生更深层次的滑坡。

4　结论

本文以镇江地区降雨诱发型滑坡为研究对象，在滑坡发育统计规律基础上，分析了降雨特征与滑坡频度的关系，分析得出镇江地区滑坡降雨阈值*I–D*曲线，主要研究成果如下：

（1）镇江土体滑坡滑动面一般位于残坡积土中或与全风化岩的交界面处，属于浅层土质滑坡，岩石滑坡大多由于降雨入渗导致岩石强风化后结构面或岩体力学性质下降，发生滑坡。

（2）当年降雨量大于1564 mm时，滑坡频度大大增加，且伴随有群发性滑坡的可能，随着考虑前期降雨天数的增加，累积降雨量越高，滑坡频度越高。

（3）分析滑坡与降雨关系结果表明，镇江地区滑坡降雨强度标准化阈值曲线为$I=45.6D^{-0.63}$。

参考文献(References):

崇婧，李徐生，杨达源. 2012. 镇江市边坡地质灾害及其防治对策[J]. 岩土力学，33(4): 872-880.

黄润秋，徐则民，许模. 2005. 地下水的致灾效应及异常地下水流诱发地质灾害[J]. 地球与环境，(3): 1-9.

刘东生, 安芷生. 1992. 黄土·第四纪地质·全球变化（第三集）[C]. 北京：科学出版社：122-127.

麻土华，李长江，孙乐玲，等. 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.

詹良通，李鹤，陈云敏，等. 2002. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强—历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学，17(1): 20-25.

Aleotti P. 1995. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. Engineering Geology, 73(3-4): 247-265.

Alonso E, Gens A and Lioret A. 2004. Effect of rain infiltration on the stability of slopes [J]. Unsaturated Soils, (1): 241-249.

Campbell R H. 1974. Debris floes originating from soil slips during rainsforms in southern California [J]. Engineering Geology, 7: 339-349.

Caine N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. Geogr. Ann. A., 162: 23-27.

Fredlund D G. 1997. 非饱和土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社：20-25.

Fredlund D G. 1987. Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction [A]// Slope Stability. Anderson M G and Richards K S, New York: Wiley: 113-144.

Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 98(3-4): 239-267.

Ohlmacher G C. 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides [J]. Engineering Geology , 91 (2): 117-134.

Schulz W H, Kean J W and Wang G H. 2009. Landslide movement in southwest Colorado triggered by atmospheric tides [J]. Nature Geoscience, 2(12): 863-866.