江西农业大学学报　2023,45(6)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　DOI:10.13836/j.jjau.2023144

何小武,肖屿昆,王艳艳,等.鄱阳湖流域次降雨等级及其对降雨侵蚀力的贡献[J].江西农业大学学报,2023,45(6):1588-1600.

HE X W,XIAO Y K,WANG Y Y,et al.Grade of single rainfall and its contribution to rainfall erosivity in Poyang Lake Basin[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(6):1588-1600.

鄱阳湖流域次降雨等级及其对降雨侵蚀力的贡献

何小武[1],肖屿昆[1],王艳艳[1],吴　星[1],李凤英[1],陈　娇[1],李文斌[1,2]

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院,江西 南昌 330045;2.江西省水利科学院,江西 南昌 330029)

摘要:【目的】降雨等级的划分有助于正确认识不同量级降雨对土壤侵蚀的影响,为水土流失防治决策提供科学依据。【方法】基于鄱阳湖流域16个气象站点1991—2020年的降雨数据,在日降雨等级划分标准的基础上,从土壤侵蚀动力角度出发,采用最小偏差法,分析次降雨与日降雨之间的对应关系,以确定次降雨等级。同时,利用时间序列分析方法(变差系数、倾向率、Mann-Kendall趋势检验)对各等级降雨进行年内、年际变化特征研究,分析该流域各等级次降雨对降雨侵蚀力的贡献。【结果】(1)次降雨中雨、大雨、暴雨的理论上限值分别为31.3 mm、64.6 mm、150.9 mm。(2)30年来鄱阳湖流域总降雨、非侵蚀性降雨和侵蚀性降雨的降雨场次均呈增加趋势,降雨总量和侵蚀性降雨量亦呈增长趋势,但非侵蚀性降雨量呈下降趋势。(3)各等级降雨在年内均呈现年初开始上升、至3—6月出现高值,随后呈总体下降趋势。(4)总降雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨等级次降雨侵蚀力密度随时间变化的倾向率分别为0.34、0.04、0.31、0.32和1.25 MJ/(hm^2·h·10a),均为正值。(5)中雨、大雨、暴雨、大暴雨对降雨侵蚀力的贡献率分别为17.17%、34.01%、34.89%、13.93%。【结论】(1)鄱阳湖流域次降雨的小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨划分的雨量值分别为0~14 mm、14~31 mm、31~65 mm、65~151 mm、≥151 mm。(2)流域总降雨场次和总降雨量均为增长趋势。其中,降雨场次的增加主要以非侵蚀性降雨(即小雨)的显著性增加为主,但非侵蚀性降雨量不增反减,总降雨量的增加均体现为侵蚀性降雨。(3)流域内各等级降雨具有明显的季节性分布特征,其中大暴雨具有异常的集中性。侵蚀性降雨主要发生在雨季(3—9月)。(4)流域的降雨侵蚀力主要取决于暴雨和大雨,各等级降雨对降雨侵蚀力的贡献率由大到小依次为暴雨、大雨、中雨、大暴雨。(5)各等级降雨侵蚀力密度均呈上升趋势,尤以大暴雨上升明显;7—9月为各等级降雨侵蚀力密度最高月份。

关键词:次降雨等级;划分;日降雨等级;贡献率;降雨侵蚀力;鄱阳湖流域

中图分类号:S157.1;S161.6　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

文章编号:1000-2286(2023)06-1588-13

Grade of Single Rainfall and Its Contribution to Rainfall Erosivity in Poyang Lake Basin

HE Xiaowu[1],XIAO Yukun[1],WANG Yanyan[1],WU Xing[1],
LI Fengying[1],CHEN Jiao[1],LI Wenbin[1,2]

收稿日期:2023-09-10　　**修回日期:**2023-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(42167045,31300594)和江西省"科技+水利"联合计划项目(2023KSG01004)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(42167045,31300594)and Jiangxi Province "science and technology + water conservancy" joint plan project(2023KSG01004)

作者简介:何小武,副教授,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,orcid.org/0009-0003-9907-4789,he-xw@163.com。

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: [**Objective**] The classification of rainfall grade is helpful to understand correctly the influence of different amount of rainfall on soil erosion and provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion. [**Method**] Based on the single rainfall data of 16 meteorological stations in Poyang Lake Basin from 1991 to 2020, and the classification standard of the meteorological daily rainfall grade, the minimum deviation method was used to determine the grade of individual rainfall. Meanwhile, time series analysis methods including coefficient of variation, trend rate, and Mann-Kendall trend test were used to study the intra-annual and inter-annual variations of rainfall of different grades. The contribution of each grade of single rainfall to rainfall erosivity was also analyzed. [**Result**] The results showed that: (1) The theoretical upper limits of moderate rain, heavy rain and rainstorm are 31.3 mm, 64.6 mm and 150.9 mm, respectively. (2) The number of total single rainfall, non-erosive single rainfall and erosive single rainfall increased in last 30 years, the amount of total rainfall and erosive individual rainfall also increased. However, the amount of non-erosive individual rainfall decreased. (3) The amount of all the grades of single rainfall increased from the beginning of the year, and reached the peak value between March and June. After that, the amount decreased totally. (4) The trend rate of total rainfall, moderate rainfall, heavy rainfall, rainstorm and individual heavy rainstorm were 0.34 MJ/(hm^2·h·10a), 0.04 MJ/(hm^2·h·10a), 0.31 MJ/(hm^2·h·10a), 0.32 MJ/(hm^2·h·10a) and 1.25 MJ/(hm^2·h·10a), respectively. (5) The contribution rate of moderate individual rainfall, heavy individual rainfall, individual rainstorm and individual heavy rainstorm were 17.17%, 34.01%, 34.89% and 13.93%, respectively. [**Conclusion**] (1) The threshold of individual rainfall value for light rain in Poyang Lake Basin was 0-14 mm, and that for moderate rain, heavy rain, rainstorm and heavy rainstorm was 14-31 mm, 31-65 mm, 65-151 mm and ≥151 mm, respectively. (2) The total number and amount of single rainfall in the basin have been increasing in recent 30 years. The significant increase of the number of non-erosive individual rainfall (that is light rain) was the main contribution to the total number of individual rainfall. The increase of total rainfall amount, however, was contributed by erosive individual rainfall because that the amount of non-erosive individual rainfall decreased. (3) Each grade of single rainfall in the basin had obvious uneven distribution characteristics during the year, and the heavy rainstorm had abnormal concentration. The erosive rainfall mainly occurred in monsoon season (March to September). (4) The rainfall erosivity in the basin was mainly contributed by individual rainstorm and heavy single rainfall. The order of contribution rate of single rainfall grade to rainfall erosivity was rainstorm > heavy rain > moderate rain > heavy rainstorm. (5) The rainfall erosivity density of each grade of individual rainfall had an upward trend, especially that of heavy rainstorm. The highest rainfall erosivity density for each grade of individual rainfall occurred in from July to September.

Keywords: grade of individual rainfall; classification; grade of daily rainfall; contribution rate; rainfall erosivity; Poyang Lake Basin

【研究意义】降雨是水力侵蚀的最主要驱动力。依据土壤侵蚀发生与否,降雨可分为侵蚀性降雨和非侵蚀性降雨两种。Wischmeier等[1]认为在一次降雨过程中,降雨量达到12.7 mm或历时15 min内的次降雨量达到6.4 mm时的降雨视为侵蚀性降雨。王万忠[2]采用频率分析法确定我国黄土高原区侵蚀性降雨的一般雨量标准为9.9 mm。Xie等[3]研究拟定了黄土高原侵蚀性降雨3个阈植标准,即一般雨量标准12 mm,平均雨强标准2.4 mm/h,以及最大30 min雨强标准13.3 mm/h。12 mm的一般雨量标准与美国的12.7 mm[1]接近,在我国得到广泛应用[4-6]。梁越和焦菊英[7]取大于某一雨量时相应累积产沙量占总产沙量的比例为95%的这一雨量值作为小流域产沙性的降雨标准,得出黄土高原各小流域产沙性降雨雨量标准在7.48~33.51 mm。田杏敏等[8]利用鄱阳湖流域10个水土保持监测站点共计49站年的观测资料进行修正,得出该流域侵蚀性降雨的一般雨量标准为14 mm。在侵蚀性降雨中,不同量级次降雨对土壤侵蚀的影响并不相同。要研究这种影响,首先需要对次降雨进行等级划分。【前人研究进展】由于黄土高原区

每年严重的土壤侵蚀往往以暴雨为主[2,9-10]，众多学者对该区域的暴雨标准划分进行了深入研究[9-13]。张汉雄和王万忠[11]以降雨在5 min内能产生坡面径流并引起土壤侵蚀为依据，确定0.78 mm/min为短历时降雨暴雨标准的初始强度，同时利用抛物线和椭圆方程在5 min暴雨标准值和1 440 min的气象暴雨标准雨量值之间进行插值，得到24 h内不同降雨时间的暴雨标准。王万忠[2]随后提出新的暴雨标准，认为暴雨引起的土壤侵蚀量应占侵蚀总量的90%以上，由此得出一般暴雨标准为12.4 mm，此时其土壤侵蚀模数在500 t/km^{2}以上，侵蚀性降雨场次占总侵蚀性降雨场次的70%。周佩华和王占礼[9]以产生地表径流为确定土壤侵蚀暴雨标准的原则，得到短历时（60 min内）不同时段的暴雨标准。王占礼和焦菊英[12]采用与文献[9]相同的原则进一步研究得到长历时（60~1 440 min）的土壤侵蚀暴雨标准。范兴科等[13]则在刘尔铭[10]和张汉雄[11]暴雨标准划分结果的基础上，采用指标判别法建立判别指标K与降雨量和降雨强度函数关系，以K值等于2作为暴雨等级划分的依据。

【本研究切入点】上述关于次降雨的暴雨划分研究成果中，不同学者对划分依据的选择有所不同，得到的结果也不一致，但均仅针对暴雨等级进行划分，未对“中雨”、“大雨”等降雨等级的划分进行研究。随着研究的深入，愈来愈多的学者[14-21]认识到降雨等级在土壤侵蚀研究中的重要性，并在未见次降雨等级划分研究报道的情况下，利用气象上的日降雨等级标准进行相关研究，甚至有研究[16-18]直接将日降雨等级标准应用于次降雨进行相关研究。【拟解决的关键问题】本研究以鄱阳湖流域为研究区域，以气象上日降雨量等级为基础，研究次降雨的降雨等级划分，并以此为依据，研究各等级次降雨的时间分布规律及其对降雨侵蚀力的贡献，为科学划分次降雨等级提供帮助，亦为正确认识不同量级次降雨对土壤侵蚀的影响及深入了解降雨侵蚀力机理提供帮助，为水土保持决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 流域概况

鄱阳湖流域位于24°29′~30°04′N、113°34′~118°28′E，东、西、南三面环山，赣江、抚河、信江、饶河及修河等汇集于北部的鄱阳湖，流域面积达16.2万 km^2，与江西省行政区域高度重合（图1）。流域属于亚热带湿润季风气候，因其所处地理位置及环境的独特性，具有明显的季节性和区域性变化，年均降水量为1 632 mm，降水丰富，但时空分布不均，时常发生洪涝灾害[22-24]。

1.2 数据来源

数据资料来源于江西省气象局。依据数据点尽量均匀分布于流域内、且年降雨量涵盖流域内高值区和低值区等原则，选取了瑞昌等16个气象站点1991—2020年的5 min间隔次降雨过程资料。各气象站点在流域内的分布如图1所示，基本情况见表1。

1.3 次降雨等级确定方法

参照我国日降雨等级划分标准[25]，将鄱阳湖流域的次降雨划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨5个等级。为了次、日降雨等级的对应匹配，以及体现不同等级次降雨对土壤侵蚀的影响，确定

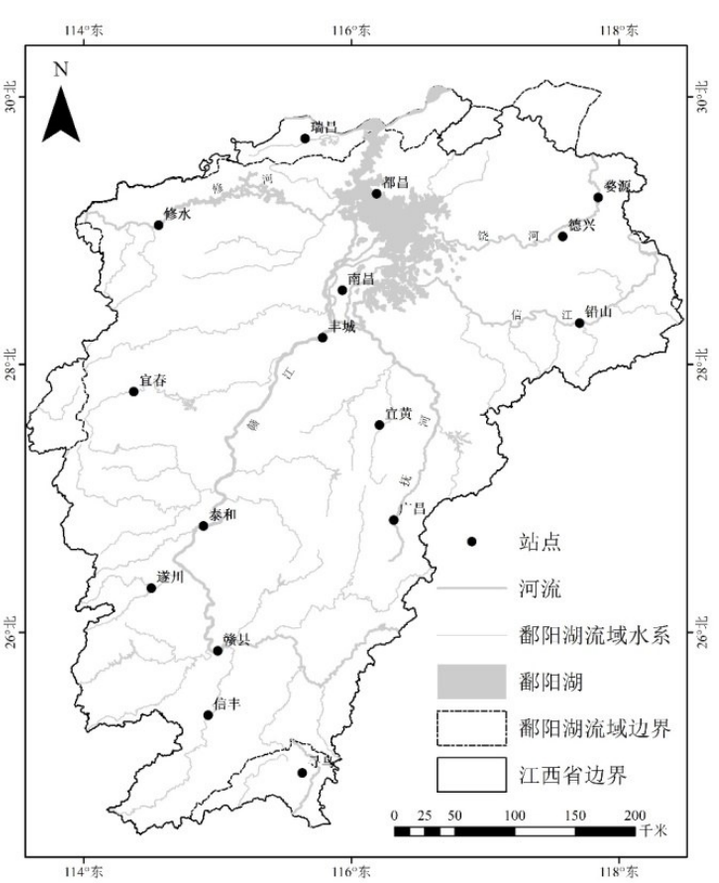


图1 鄱阳湖流域站点分布图

Fig.1 Situation of stations with individual rainfall data in Poyang Lake Basin

次降雨等级划分的依据为:次降雨与日降雨处于同一等级时,二者将有相等的降雨侵蚀力。考虑到鄱阳湖流域日降雨中 10 mm 以下的小雨等级恰好为非侵蚀性降雨,而流域的非侵蚀性次降雨雨量在 14 mm 以下[8],因此将小于该值的非侵蚀性次降雨定为次降雨的小雨等级。其余次降雨等级的划分采用“最小偏差法”[8,26]拟定。相关计算公式如下:

$$RD = \frac{R_{aae} - R_{aad}}{R_{aad}} \times 100\% \tag{1}$$

$$MRD = \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S} RD_{(s)} \tag{2}$$

$$R_{aae} = \frac{1}{Y}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{m=1}^{M} R_e \tag{3}$$

$$R_{aad} = \frac{1}{Y}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{k=1}^{K} R_d \tag{4}$$

式中:R_{aae}为站点的年均次降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h);R_{aad}为年均日降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h);S为站点数量,无量纲;Y为站点的统计年数,无量纲;M为站点一年中侵蚀性降雨的场次,无量纲;K为站点一年中侵蚀性日降雨的日数,无量纲;R_e为次降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h);R_d为日降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h)。降雨侵蚀力仅计算中雨及以上等级,其中R_e采用RUSLE2模型中降雨侵蚀力的计算方法,R_d以一日内所有降雨场次(或时段)的降雨侵蚀力之和计算,二者的计算详见文献[8,26]。

表 1　各气象站点 1991—2020 年降雨基本情况

Tab.1　Basic information of 16 stations with individual rainfall data from 1991 to 2020

所属子流域 Sub-watershed	站名 Station	经度/E Longitude	纬度/N Latitude	年均降水量/mm Annual average rainfall amounts	年均侵蚀性降雨场次 Annual average number of erosive rainfall events	最大次降雨量/mm Maximum rainfall
修河流域	瑞昌	115°40′	29°42′	1 413	29.6	428.3
Xiuhe watershed	修水	114°35′	29°02′	1 581	32.5	325.5
饶河流域	德兴	117°35′	28°57′	2 020	39.5	378.1
Raohe watershed	婺源	117°51′	29°16′	1 992	37.4	316.5
信江流域 Xinjiang watershed	铅山	117°42′	28°17′	1 901	37.9	484.9
	丰城	115°49′	28°13′	1 723	34.6	375.5
抚河流域	广昌	116°20′	26°51′	1 751	35.7	544.7
Fuhe watershed	南昌	115°55′	28°36′	1 548	31.3	418.9
	宜黄	116°14′	27°33′	1 829	38.4	288.2
	赣县	115°00′	25°52′	1 441	30.7	237.4
	遂川	114°30′	26°20′	1 458	32.2	250.5
赣江流域	泰和	114°55′	26°48′	1 431	30.5	315.2
Ganjiang watershed	信丰	114°56′	25°24′	1 469	31.3	198.6
	寻乌	115°39′	24°57′	1 612	32.7	297.8
	宜春	114°23′	27°48′	1 613	33.2	268.0
鄱阳湖滨区 Poyang Lakeside Region	都昌	116°12′	29°16′	1 471	29.4	302.2

1.4　降雨特征分析方法

本研究各等级次降雨的年际变化特征主要通过变差系数、倾向率、Mann-Kendall趋势检验统计量等指标表示。同时采用降雨集中度作为描述降雨年内分配不均匀性的指标,以降雨侵蚀力密度对发生水土流失的风险作进一步的评估。

利用EXCEL软件对降雨数据进行统计分析得出平均值、最大值、最小值和变差系数;采用一元线性回归斜率的10倍[27]表征各等级降雨场次、降雨量及降雨侵蚀力密度的年际变化速率(即倾向率);采用Mann-Kendall趋势分析法[28]分析各等级降雨场次/雨量变化趋势,通过Mann-Kendall趋势检验统计量Z值

判断该序列数据的变化趋势，当Z>0时表示呈上升趋势，Z<0表示呈下降趋势，Z的绝对值越大，说明该序列的变化趋势越显著，当|Z|>1.96时，说明该序列数据通过0.05的显著性检验。

基于月降雨量计算的降雨集中度公式[29]为：

$$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} Pi^2}{(\sum_{i=1}^{12} Pi)^2} \times 100 \quad (5)$$

式中：PCI为降雨集中度，无量纲；P_i为第i个月的降雨量，mm。PCI低于10表明月降雨量在年内分布较为均匀；在10至20表明月降雨量在年内具有明显的季节性分布特征；高于20表明月降雨量在年内分布具有异常的集中性。

降雨侵蚀力密度体现了降雨侵蚀力与降雨之间的关系[30]。一般而言，某区域的高强度密集型降雨事件越多，其降雨侵蚀力密度就更大，此时发生水土流失的风险也就更高。反之亦然[31]。月降雨侵蚀力密度是指月降雨侵蚀力与月降水量的比值，年均降雨侵蚀力密度是指年均降雨侵蚀力与年均降雨量的比值。月降雨侵蚀力密度的计算公式为：

$$RED_i = \frac{R_i}{P_i} \quad (6)$$

式中：RED_i为第i月的降雨侵蚀力密度，MJ/(hm²·h)；R_i为第i月的降雨侵蚀力，MJ·mm/(hm²·h)；P_i表示第i月的降雨量，mm。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性次降雨等级的划分

次中雨等级的阈值分析如表2所示。由于逐次增加0.1 mm的计算数据颇多，为简便起见，表中仅列出部分数据。当初步假定的中雨等级次降雨划分的上限值为25 mm时，MRD值为−39.2%，表明次、日降雨侵蚀力之间偏差较大，且初拟值偏小，因此需要提高。MRD值随着次降雨雨量模拟值的增大而增大。

表2 次中雨等级模拟阈值下的次、日降雨侵蚀力相对偏差

Tab.2 The relative deviation between individual rainfall erosivity and daily rainfall erosivity under the simulated threshold for moderate rainfall grade

站点 Station	R_d	R_e					RD				
	25 mm	25 mm	31 mm	31.2 mm	31.3 mm	32 mm	25 mm	31 mm	31.2 mm	31.3 mm	32 mm
德兴 Dexing	1 432.5	856.8	1 229.5	1 229.5	1 258.0	1 308.5	−40.2	−14.2	−14.2	−12.2	−8.7
都昌 Duchang	934.3	536.6	929.7	941.8	953.7	994.9	−42.6	−0.5	0.8	2.1	6.5
丰城 Fengcheng	1 259.8	718.3	1 208.1	1 222.5	1 231.3	1 286.2	−43.0	−4.1	−3.0	−2.3	2.1
赣县 Ganxian	1 448.0	965.7	1 522.1	1 541.0	1 568.1	1 618.4	−33.3	5.1	6.4	8.3	11.8
广昌 Guangchang	1 432.0	856.6	1 399.1	1 400.4	1 404.2	1 461.1	−40.2	−2.3	−2.2	−1.9	2.0
南昌 Nanchang	1 119.1	698.2	1 113.7	1 113.7	1 119.9	1 185.3	−37.6	−0.5	−0.5	0.1	5.9
铅山 Yanshan	1 290.0	735.1	1 166.8	1 190.3	1 209.2	1 261.5	−43.0	−9.6	−7.7	−6.3	−2.2
瑞昌 Ruichang	932.6	562.0	927.5	930.8	937.8	975.5	−39.7	−0.5	−0.2	0.6	4.6
遂川 Suichuan	1 409.3	920.9	1 622.7	1 622.7	1 632.2	1 730.8	−34.7	15.1	15.1	15.8	22.8
泰和 Taihe	1 254.6	822.1	1 412.1	1 422.4	1 423.1	1 464.2	−34.5	12.6	13.4	13.4	16.7
婺源 Wuyuan	1 322.6	708.7	1 118.6	1 121.3	1 121.3	1 144.3	−46.4	−15.4	−15.2	−15.2	−13.5
信丰 Xinfeng	1 589.7	1 054.5	1 664.6	1 680.6	1 713.6	1 785.7	−33.7	4.7	5.7	7.8	12.3
修水 Xiushui	1 296.4	750.4	1 084.4	1 092.6	1 107.9	1 150.4	−42.1	−16.3	−15.7	−14.5	−11.3
寻乌 Xunwu	1 588.8	1 032.4	1 686.7	1 734.6	1 736.6	1 832.1	−35.0	6.2	9.2	9.3	15.3
宜春 Yichun	1 200.8	724.9	1 209.7	1 209.7	1 217.2	1 258.0	−39.6	0.7	0.7	1.4	4.8
宜黄 Yihuang	1 525.5	892.2	1 442.1	1 485.4	1 496.9	1 585.6	−41.5	−5.5	−2.6	−1.9	3.9
MRD							−39.2	−1.5	−0.6	0.3	4.6

R_d、R_e单位为MJ·mm/(hm²·h)；RD、MRD单位为%。

The unit of R_d and R_e is MJ·mm/(hm²·h); The unit of RD and MRD is %.

当增加初拟值至 31 mm、31.2 mm、31.3 mm 与 32 mm 时，对应的 MRD 值分别为−1.5%、−0.6%、0.3% 和 4.6%。表明次降雨量在 31.2 mm 与 31.3 mm 范围内存在 MRD 值为 0 的情形。模拟的次中雨上限值为 31.3 mm 时，MRD 绝对值最小，该模拟值即为中雨等级次降雨划分的上限值。考虑到计算及习惯等方面的便利性，当采取四舍五入取整数 31 mm 作为中雨等级次降雨划分的上限值时，次、日降雨的降雨侵蚀力误差仅为 1.5%，差别不大。因此认定 31 mm 为次降雨在中雨等级的上限值。

以同样的方法计算次降雨在大雨、暴雨等级的上限值，部分结果如表 3 所示。次降雨大雨等级划分的上限值在 64.6~64.7 mm，按照四舍五入法则，取整数值为 65 mm。此时 MRD 值仅为 1.1%。次降雨暴雨等级划分的上限值在 150.9~151 mm，取整数值则为 151 mm。由此可以得出，次降雨在大暴雨等级下的划分结果为≥151 mm。

表 3　次大雨、暴雨等级模拟值下的次、日降雨侵蚀力平均相对偏差

Tab.3　The average relative deviation between individual rainfall erosivity and daily rainfall erosivity under the simulated threshold for heavy rainfall and rainstorm grade

雨量/mm Rainfall	次大雨等级 Individual heavy rainfall grade							次暴雨等级 Individual rainstorm grade						
	50	64	64.6	64.7	64.8	64.9	65	100	150	150.6	150.7	150.8	150.9	151
MRD/%	−37.6	−2.1	−0.2	0.4	0.6	0.9	1.1	−42.1	−1.2	−0.6	−0.2	−0.04	−0.04	0.1

依据上述次降雨等级的阈值划分结果，小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨等级的阈值范围分别为 0~14 mm、14~31 mm、31~65 mm、65~151 mm 及≥151 mm，此时计算出侵蚀性次、日降雨侵蚀力之间的关系如图 2 所示。各等级降雨的降雨侵蚀力数据系列均落在 1∶1 线附近，即各站点同一等级下的次降雨侵蚀力与日降雨侵蚀力值基本相等，这一关系图进一步证实了次降雨等级阈值划分的合理性与准确性。以下将采用上述结果分析流域内不同等级次降雨对降雨侵蚀力的贡献。

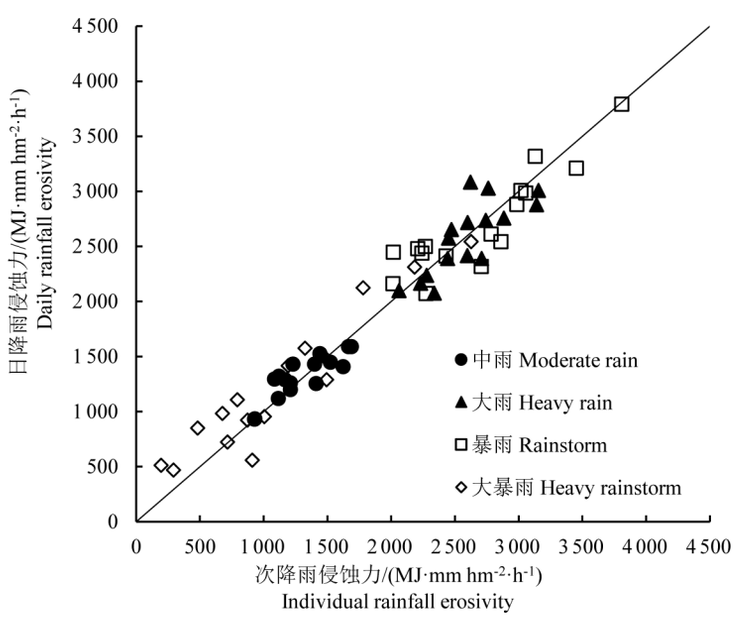


图 2　流域内各等级日、次降雨的降雨侵蚀力对比

Fig.2　Comparison of daily rainfall erosivity with individual rainfall erosivity for each grade in the basin

2.2　各等级次降雨的时间变化

2.2.1　各等级次降雨的年际变化趋势

鄱阳湖流域的年均降雨场次为 127.2 次，年均降雨量为 1 640.8 mm，其逐年变化如图 3、图 4 所示。近 30 年来，总降雨场次和总降雨量均为增长趋势，其增长率分别为 4.33 次/10a 和 46.13 mm/10a。侵蚀性降雨场次和侵蚀性雨量虽然亦为增长趋势，但其增长率不同于总降雨，分别为 1.03 次/10a 和 47.45 mm/10a。侵蚀性降雨场次的增长率低于总降雨场次，侵蚀性降雨量的增长率则超过总降雨量的增长率。这表明非侵蚀性降雨的场次亦为增加趋势，且其增长率（总降雨场次增长率与侵蚀性降雨场次增长率之差，即为 3.3 次/10a）大于侵蚀性降雨场次，但非侵蚀性降雨量则为递减趋势，其递减率为 1.32 mm/10a。利用 MK 趋势分析法进一步分析发现，小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和总降雨场次的 MK 检验统计量 Z 值分别为 2.05、0.54、1.05、0.62、0.54 和 1.43，均大于 0，表明各等级降雨场次年际变化均呈上升趋势。其中，小雨场次的 Z 值大于 1.96，呈显著上升趋势。各等级次降雨的降雨量 Z 值分别为−0.43、0.64、0.93、0.36、0.36 和 0.71，除小雨量表现为减少趋势外，其他等级雨量均为上升趋势。这进一步证明 30 年来，降雨场次的增加主要以非侵蚀性降雨（即小雨）的显著性增加为主，但非侵蚀性降雨量不增反减，总降雨量的增加均体现为侵蚀性降雨。

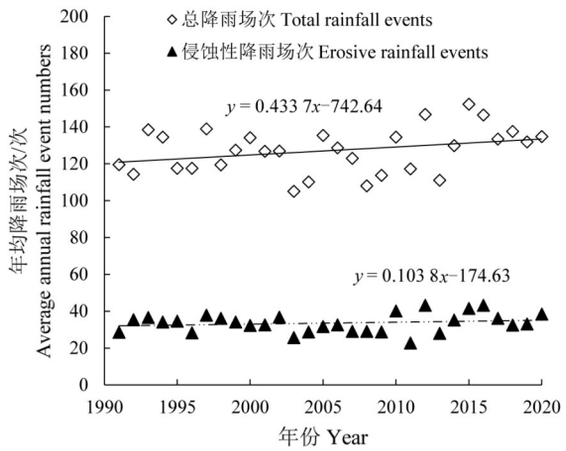


图3 鄱阳湖流域年均降雨场次逐年变化趋势

Fig.3 Trend of average annual rainfall event numbers in Poyang Lake Basin

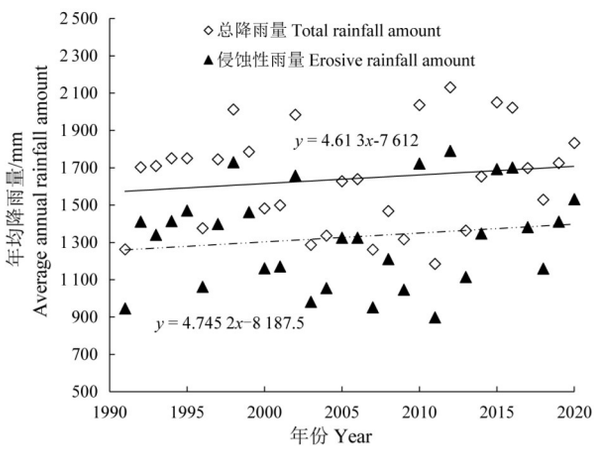


图4 鄱阳湖流域年均降雨量逐年变化趋势

Fig.4 Trend of average annual rainfall amounts in Poyang Lake Basin

对侵蚀性降雨中各等级次降雨占比进行进一步分析，结果如表4所示。在侵蚀性降雨中，降雨场次最多的为中雨等级，其占比达到54.75%；中雨在最多年份的占比为61.95%，最少年份亦有46.71%，变差系数仅为0.07，表明年际间中雨的降雨场次变化幅度在各等级中最小。大雨、暴雨、大暴雨的降雨场次占比分别为32.24%、11.48%、1.53%。大暴雨的占比最小，但其变差系数最大为0.55，表明大暴雨场次的年际波动幅度最大。在年际间降雨场次占比变化趋势方面，−0.78%/10a的倾向率表明中雨占比的变化趋势是减少的。大雨、暴雨、大暴雨的正倾向率值表明这些等级的降雨场次占比均为逐年增加。这表明大雨、暴雨和大暴雨等级的场次对总降雨的影响越来越大，中雨等级的影响力则有减小的趋势。其中，大雨场次的占比增加最大为0.47%/10a，大暴雨场次占比虽为增加，但增加量很小，仅为0.02%/10a。年际间等级降雨量占比的变化趋势与降雨场次占比的变化趋势基本一致，仅在最大值方面略有不同。中雨雨量占比为每10a减少0.71%；暴雨雨量占比每10a增加0.29%，为增加量最多的等级。由此亦说明30年来鄱阳湖流域的强降水事件在增加。

表4 鄱阳湖流域各等级侵蚀性降雨场次（降雨量）占比年际变化特征

Tab.4 Interannual variation characteristics of the proportion of erosive rainfall event numbers (rainfall amounts) in Poyang Lake Basin

指标 Index	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	暴雨 Rainstorm	大暴雨 Heavy rainstorm
平均值/% Mean value	54.75/29.43	32.24/36.22	11.48/26.60	1.53/7.75
最大值/% Maximum value	61.95/38.27	36.53/42.53	16.02/34.07	3.46/17.96
最小值/% Minimum value	46.71/20.48	26.79/27.91	6.68/17.01	0.22/1.17
变差系数 Coefficient of variation	0.07/0.14	0.08/0.10	0.21/0.16	0.55/0.52
倾向率 Inclination rate	−0.78/−0.71	0.47/0.28	0.28/0.29	0.02/0.13

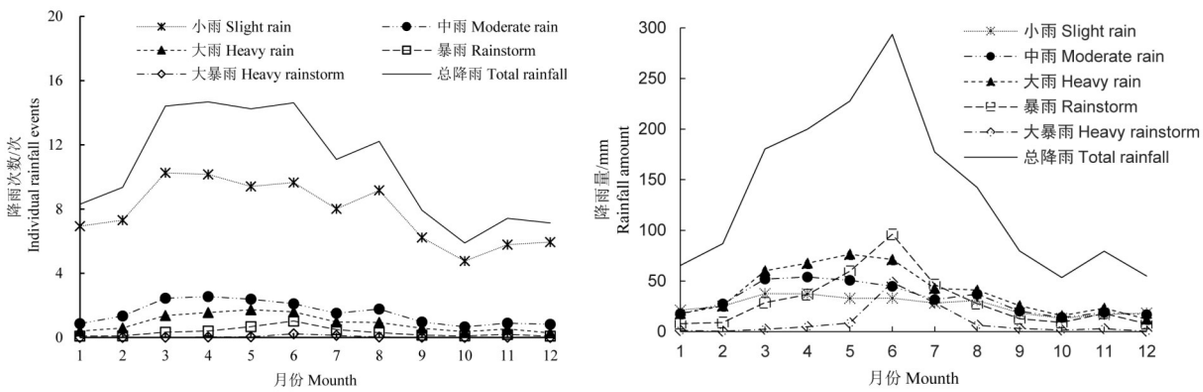
“/”后为侵蚀性降雨量相关数据。

Those after the “/” are the data related to amount of erosive rainfall.

2.2.2 *各等级次降雨的年内分配规律* 各等级降雨场次及雨量的年内分配如图5所示。在所有月份中，小雨场次对总降雨场次的贡献率均为最高，其后依次为中雨、大雨、暴雨和大暴雨。总降雨场次的年内变化受气候影响为年初开始上升，在3—6月出现高值区，随后开始呈总体下降趋势直到年末。各等级降雨的年内分配变化亦呈现先上升后下降趋势，但高值出现月份有所不同。小雨、中雨场次的年内分配趋势与总降雨场次的年内分配基本一致，高值主要出现在3—6月，且在8月存在小高值，表现出雨季中的双峰现象。略有不同的是小雨最高值出现在3月，中雨和总降雨出现在4月。小雨、中雨场次的年内分配趋势与总降雨基本一致的原因是该小雨的降雨场次占总降雨的73.54%，中雨的降雨场次占侵蚀性降

雨场次的54.75%,均明显高于其他降雨等级。大雨、暴雨、大暴雨均表现为单峰现象,其中大雨最高值出现在5月,暴雨和大暴雨则均出现在6月。所有等级降雨的场次最大值均出现在雨季(3—9月),且雨季中小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨场次占全年的比例分别为67.17%、74.97%、80.06%、85.40%、94.02%,表明各等级降雨的大部分场次均出现在雨季,且绝大多数大暴雨在雨季发生。

在降雨量方面,小雨的年内变化曲线较为平缓,在3月出现最大值;中雨、大雨等级降雨量的年内变化趋势基本一致,其最大值分别出现在4、5月;暴雨和大暴雨等级降雨量与总降雨量的年内分配基本一致,年内变化幅度均较大,最大值均出现在6月。雨季小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨等级的降雨量占全年的比例分别为69.85%、75.41%、80.32%、85.71%、94.41%。进一步分析各等级降雨集中度值,小雨到大暴雨等级及总降雨的PCI值分别为9.13、10.03、10.97、14.46、28.69和10.87。可以看出,随着降雨等级的提高,PCI值随之增大。小雨等级降雨集中度PCI值小于10,表明小雨等级降雨量在年内分布较为均匀;中雨、大雨和暴雨等级的PCI值均在10~20,表明该等级降雨量存在年内的季节性变化;大暴雨等级的PCI值最大且高于20,表明大暴雨等级降雨量在年内分布具有异常的集中性。流域内总降雨集中度值在10~20,表明鄱阳湖流域降雨量在年内具有明显的季节性分布特征。



(a)降雨场次　　(b)降雨量

(a)Numbers of individual rainfall　　(b)Amounts of individual rainfall

图5　鄱阳湖流域不同次降雨等级降雨场次及降雨量的年内分配

Fig.5　Intra-annual distribution of numbers and amounts for each individual rainfall grade in Poyang Lake Basin

2.3　等级次降雨对降雨侵蚀力的影响

2.3.1　*各等级次降雨侵蚀力密度的年际变化趋势*　由于降雨侵蚀力与侵蚀力密度之间具有较强的一致性和相互代表性[32],本文以侵蚀力密度研究流域内侵蚀力变化特征。1991—2020年鄱阳湖流域总降雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨等级次降雨侵蚀力密度随时间的推移均有上升趋势(图6),其倾向率分别为0.34,0.04,0.31,0.32,1.25 MJ/(hm^2·h·10a),体现出随着降雨等级的提高、降雨侵蚀力密度增加越明显的趋势。整体上,虽然鄱阳湖流域降雨侵蚀力密度增长趋势较为缓慢,但年际间的变化波动较大,各年份的降雨侵蚀力密度值大部分介于4~7 MJ/(hm^2·h)。各等级降雨侵蚀力密度在年际上的增加规律表明侵蚀性降雨越来越集中,雨强增大趋势明显,尤其突出在高等级的降雨。大暴雨雨量的增加趋势远不及大雨、暴雨的一半,但降雨侵蚀力密度倾向率却大近4倍,表明大暴雨对降雨侵蚀力的影响强度最大。

2.3.2　*各等级次降雨侵蚀力密度的年内分配规律*　近30年来,流域各等级月平均次降雨侵蚀力密度在0.71~13.08 MJ/(hm^2·h)。由降雨侵蚀力密度的年内分配结果(图7)可知,各等级降雨侵蚀力密度在年内变化幅度较大,各月份总体上由大到小依次为大暴雨、暴雨、大雨、中雨,总降雨基本介于中雨和大雨之间。各等级的年内降雨侵蚀力密度高值区均集中在4—9月,其年内分布整体上较降雨量偏后集中。其中,中雨、大雨和暴雨侵蚀力密度最大值均出现在8月,其年内分布规律也基本一致;大暴雨侵蚀力密度最大值在9月;总降雨侵蚀力密度最大值则出现在7月。降雨侵蚀力密度的年内分配与降雨量并不同步,尤其表现在最大值方面。各等级降雨量最大值分布在4—6月,降雨侵蚀力最大值在5—8月,降雨侵

蚀力年内高值区出现时间晚于降雨量高值区，造成侵蚀力密度高值区在年内的出现时间推后，最大值在7—9月出现。由于降雨侵蚀力密度测量的是单位降雨的侵蚀力，所以7—9月的高侵蚀力密度值表明该流域在7—9月的侵蚀力最强，主要以持续时间短的高强度降雨事件（如暴雨）为主。

2.3.3 各等级降雨对降雨侵蚀力的贡献 不同等级的次降雨对降雨侵蚀力的贡献不同（图8）。从整个鄱阳湖流域来看，16个站点侵蚀性降雨的贡献均表现为：暴雨和大雨对降雨侵蚀力的贡献较大，大暴雨和中雨对降雨侵蚀力的贡献较小。从流域平均看，各等级降雨对侵蚀力的贡献由大到小表现为：暴雨、大雨、中雨、大暴雨，各自的贡献率分别为34.89%、34.01%、17.17%、13.93%。尽管一次大暴雨的降雨侵蚀力大于其他等级的降雨，但由于其

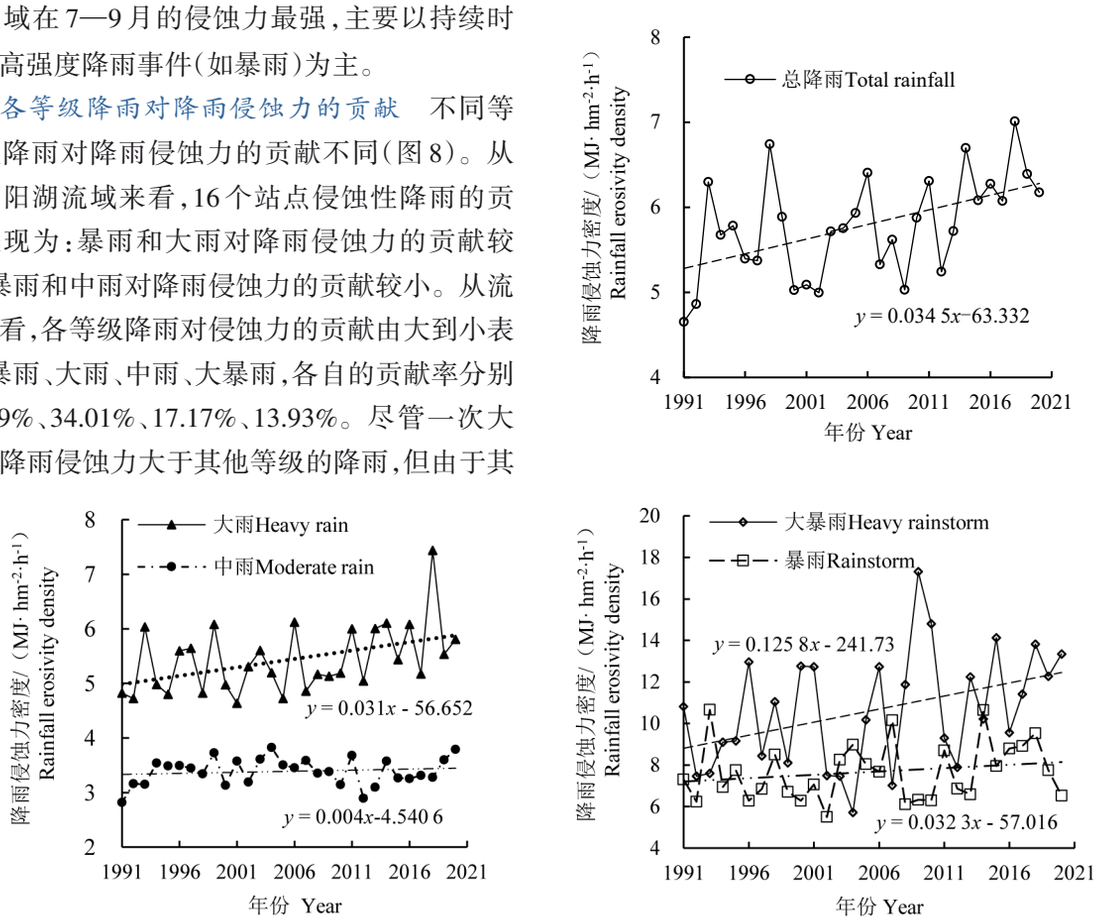


图6 鄱阳湖流域各等级次降雨侵蚀力密度变化

Fig.6 Changes of rainfall erosivity density for each grade of individual rainfall in Poyang Lake Basin

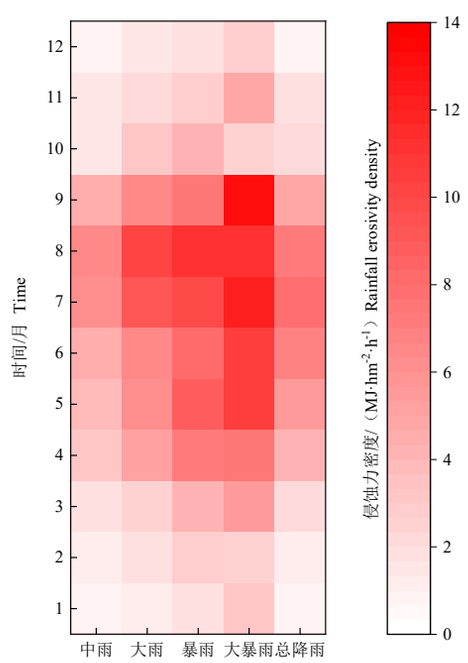


图7 鄱阳湖流域等级次降雨侵蚀力密度的年内分配

Fig.7 Intra-annual distribution of erosivity density for each grade of individual erosive rainfall in Poyang Lake Basin

发生的次数及总雨量均远远小于其他等级降雨,从而导致其对降雨侵蚀力的贡献率最小。这亦表明该流域的降雨侵蚀力主要取决于暴雨和大雨。

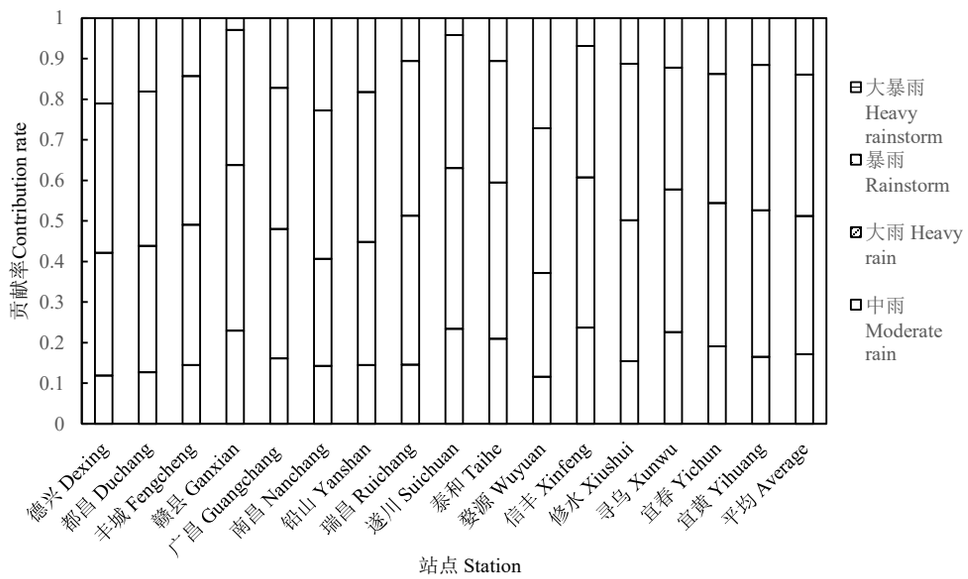


图 8　不同等级的侵蚀性降雨对降雨侵蚀力的贡献

Fig.8　Contribution rate of each grade individual erosive rainfall to rainfall erosivity

3　讨　论

由次降雨等级划分结果可知,日降雨标准下的各降雨等级阈值与之对应的次降雨等级阈值有较大的差别,两个标准下对应等级阈值的差值在4~51 mm。产生这种差异的原因是次、日降雨之间的不匹配关系。次、日降雨的降雨关系一般分为4种类型,即I型为1日内有且只有1次完整降雨,II型为1 d内有2次或2次以上的完整降雨,III 型为1 d内发生不到1次降雨,以及IV 型为上述3种类型外的其他类型降雨[8,26]。鄱阳湖流域内超过50%的降雨为III型降雨[8],意味着多数次降雨被分配到2 d或以上。这导致大量较高等级次降雨在日降雨等级划分中可能被划分为较低等级。这种阈值差距表明次降雨与日降雨之间的差别,进一步证明了划分次降雨等级的重要性。依据RD值判断得到各站点的次降雨等级划分的结果并不相同。通过对16站点平均值MRD来反映流域的总体情况,统一了流域等级划分阈值,有利于流域的各项工作。图2显示出了MRD值判别的准确性。依据日降雨等级标准将鄱阳湖流域次降雨依次划分至大暴雨等级,而没有划分特大暴雨等级,是由于流域内特大暴雨出现的场次很少,数据量小,以致无法将特大暴雨这一等级进行精准的划分。由于次、日降雨的差异,研究得出的等级次降雨及降雨侵蚀力特征无法与以往等级日降雨的相关结果进行详细、深入地比较讨论,但在总体规律方面仍有一致性。依据本研究数据得出的降雨及降雨侵蚀力总体规律与已有对赣江流域的研究结果[33]基本一致。流域内各等级侵蚀性次降雨的降雨场次总体上由多到少依次为中雨、大雨、暴雨、大暴雨的趋势,与何绍浪等[21]得出的各等级侵蚀性降雨日数比例的结果一致,由此说明该流域次降雨等级的划分较为准确、合理。从各等级降雨对降雨侵蚀力的贡献看,中雨虽然发生频率高,对侵蚀的贡献并不大;大暴雨有很强的侵蚀力密度,但发生场次少;暴雨及大雨处于相对较大发生频率,且对降雨侵蚀力的贡献最大[34],因此应更多关注该两等级次降雨引起的土壤侵蚀问题。

各等级次降雨特征的年内分配规律与流域的气候特点密不可分。鄱阳湖流域因青藏高原高大地形的动力和热力强迫的影响,从3月开始进入雨季,出现春季连续的阴雨天气[35]。这一阶段,无论降雨场次还是降雨量,均以中、小雨为主,侵蚀力密度值不高,土壤侵蚀危险性较小。5月中旬前后至6月底左右,南海季风暴发,流域出现季风降水盛期[36-37],各等级降雨的降雨场次和降雨量均处于高值区,尤以高等级降雨增加为重,亦为年内降雨侵蚀力最大值期。同时该时期长历时降雨占比增多[38],因此降雨侵蚀力虽高,侵蚀力密度却未达到最大。此时应防范大量降雨导致的土壤侵蚀风险。7—9月期间,随着夏季风活

动以及在西太平洋副热带高压控制和影响下，进入盛夏季节，降雨主要与台风和局地雷雨有关，为短历时降雨的高发期。该时期虽然各等级降雨量有所下降，但侵蚀力密度却为年内最高。因此预防短历时强降雨带来的土壤侵蚀风险是这一时期的主要任务。10月以后至翌年3月，受新西伯利亚和蒙古冷高压的共同影响[39]，各等级降雨的降雨场次及雨量偏少，侵蚀力密度亦处于年内最低水平，侵蚀风险总体处于较低水平。

气候变化影响水汽输送、引起降雨变化，亦影响不同时间和区域的水蚀特征[40-41]。在各等级降雨的年际变化趋势方面，中小等级降雨占比下降、大雨及以上等级降雨占比上升，以及侵蚀力密度、尤其是高等级降雨侵蚀力密度大幅上升的趋势，均显示出流域的降雨向短历时高强度降雨方向发展[42]。这一气候变化趋势对未来降雨侵蚀力的影响值得深入探索。

4 结 论

利用鄱阳湖流域16气象站点的次降雨数据，对流域次降雨等级划分进行研究分析，主要得出以下结论：

（1）鄱阳湖流域小雨等级的次降雨量<14 mm，中雨等级的次降雨量在14~31 mm，大雨等级的次降雨量在31~65 mm，暴雨等级的次降雨量在65~151 mm，大暴雨等级的次降雨量≥151 mm。

（2）流域总降雨场次和总降雨量均为增长趋势。其中，降雨场次的增加主要以非侵蚀性降雨（即小雨）的显著性增加为主，但非侵蚀性降雨量不增反减，总降雨量的增加均体现为侵蚀性降雨。

（3）流域内各等级降雨具有明显的季节性分布特征，其中暴雨具有异常的集中性。侵蚀性降雨主要发生在雨季（3—9月），中雨、大雨、暴雨和大暴雨的场次和雨量的年内最大值出现在4—6月；总降雨场次最大值在4月，总降雨量最大在6月。

（4）各等级降雨对降雨侵蚀力的贡献大小依次为暴雨、大雨、中雨、大暴雨，流域的降雨侵蚀力主要取决于暴雨和大雨。

（5）各等级降雨的侵蚀力密度均呈上升趋势，其中尤以大暴雨上升明显；7—9月为各等级降雨侵蚀力密度值最高月份。

致谢：江西省水利厅服务项目（JXZS201811-J004）同时对本研究给予了资助，江西省气象科学研究所章毅之正高级工程师提供了帮助，谨致谢意！

参考文献 References：

[1] WISCHMEIER W H，SMITH D D.Predicting rainfall erosion losses：a guide to conservation planning[M].Washington D C：USDA Agricultural Handbook，1978：537.

[2] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究Ⅲ：关于侵蚀性降雨的标准问题[J].水土保持通报，1984，4(2)：58-63.
WANG W Z.Study on the relations between rainfall characteristics and loss of soil in Loess Region III：Standard of erosive rainfall[J].Bulletin of soil and water conservation，1984，4(2)：58-63.

[3] XIE Y，LIU B Y，NEARING M A.Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms[J].Transactions of the ASABE，2002，45(6)：1843-1847.

[4] 章文波，谢云，刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学，2002，22(6)：705-711.
ZHANG W B，XIE Y，LIU B Y.Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J].Scientia geographica Sinica，2002，22(6)：705-711.

[5] 王爱娟，李智广，刘峰.长江上游水蚀区降雨侵蚀力的时空分布特征[J].水土保持通报，2013，33(1)：8-11.
WANG A J，LI Z G，LIU F.Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity for water erosion district in upper reaches of Yangtze River[J].Bulletin of soil and water conservation，2013，33(1)：8-11.

[6] 吴洁玲，查轩，陈世发，等.1951—2018年韶关不同量级降雨侵蚀力变化[J].水土保持学报，2021，35(4)：21-26.
WU J L，ZHA X，CHEN S F，et al.Variations of rainfall erosivity of different magnitudes in Shaoguan from 1951 to 2018[J].Journal of soil and water conservation，2021，35(4)：21-26.

[7] 梁越，焦菊英.黄土高原小流域产沙性降雨标准分析[J].中国水土保持科学，2019，17(3)：8-14.
LIANG Y，JIAO J Y.Analysis on rainfall standards while sediment occurring in small watersheds on the Loess Plateau[J].Science of soil and water conservation，2019，17(3)：8-14.

[8] 田杏敏,李凤英,何小武,等.鄱阳湖流域日降雨的侵蚀性雨量标准研究[J].水土保持学报,2021,35(3):185-189.
TIAN X M,LI F Y,HE X W,et al.Study on daily erosive rainfall standard in the Poyang Lake Basin[J].Journal of soil and water conservation,2021,35(3):185-189.

[9] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J].水土保持通报,1987,7(1):38-44.
ZHOU P H,WANG Z L.Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau[J].Bulletin of soil and water conservation,1987,7(1):38-44.

[10] 刘尔铭.黄河中游降雨特性初步分析[J].水土保持通报,1982,2(1):31-34+5.
LIU E M.Preliminary analysis of rainfall characteristics in the Middle Reaches of the Yellow River[J].Bulletin of soil and water conservation,1982,2(1):31-34+5.

[11] 张汉雄,王万忠.黄土高原的暴雨特性及分布规律[J].水土保持通报,1982,2(1):35-44.
ZHANG H X,WANG W Z.Characteristics and distribution of rainstorm in the Loess Plateau[J].Bulletin of soil and water conservation,1982,2(1):35-44.

[12] 王占礼,焦菊英.黄土高原长历时土壤侵蚀暴雨标准初探[J].水土保持通报,1992,12(3):25-28.
WANG Z L,JIAO J Y.A preliminary discussion on the criterion of long duration rainstorm for soil erosion in the Loess Plateau[J].Bulletin of soil and water conservation,1992,12(3):25-28.

[13] 范兴科,吴普特,冯浩.暴雨的判定方法和评价指标[J].中国水土保持科学,2003,1(3):72-75.
FAN X K,WU P T,FENG H.Decision method and index of rainstorm[J].Science of soil and water conservation,2003,1(3):72-75.

[14] 李巧媛.1962~2011年湖南各量级降水的年变化特征[J].干旱气象,2012,30(3):353-359.
LI Q Y.Characteristics of annual variation of different level precipitation from 1962 to 2011 in Hu′nan Province[J].Journal of arid meteorology,2012,30(3):353-359.

[15] 郑江坤,杨帆,王文武,等.不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):38-45.
ZHENG J K,YANG F,WANG W W,et al.Effects of tillage measures on runoff and sediment yield of farmland under different rainfall levels[J].Science of soil and water conservation,2018,16(1):38-45.

[16] 胡伟,翟星雨,李浩,等.黑土区农地集水区次降雨径流与输沙特征研究[J].土壤与作物,2019,8(4):405-414.
HU W,ZHAI X Y,LI H,et al.Characteristics of runoff and sediment yield for rainfall events of farmland catchment in black soil region[J].Soils and crops,2019,8(4):405-414.

[17] 任雨之,郑江坤,付滟,等.不同耕种模式下降雨等级对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(3):90-98.
REN Y Z,ZHENG J K,FU Y,et al.Effects of rainfall levels on runoff and sediment yield of slope farmland in purple soil under different tillage and crop patterns[J].Science of soil and water conservation,2020,18(3):90-98.

[18] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33+40.
LI Z X,LI Q Y,HOU X L,et al.Characteristics of soil and water loss under different natural rainfall grades of pinus massoniana forest with different canopy density[J].Journal of soil and water conservation,2020,34(1):27-33+40.

[19] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.
XU L,ZHANG D,XIANG Y G,et al.Runoff and sediment yield of sloping farmland in purple soil area of the Lower Jinsha River under different tillage measures[J].Mountain research,2020,38(6):851-860.

[20] 葛波,杜妍,常猛,等.不同降雨等级下杉木林土壤含水率和侧向流变化特征[J].水土保持研究,2019,26(2):161-166.
GE B,DU Y,CHANG M,et al.Soil water content and lateral rheology of cunninghamia lanceolata forest under different rainfall levels[J].Research of soil and water conservation,2019,26(2):161-166.

[21] 何绍浪,何小武,李凤英,等.近60年来江西省各等级侵蚀性降雨与降雨侵蚀力的关系[J].水土保持研究,2018,25(2):8-14.
HE S L,HE X W,LI F Y,et al.Relationship between erosive rainfall and rainfall erosivity of each rainfall grade in Jiangxi Province in recent 60 years[J].Research of soil and water conservation,2018,25(2):8-14.

[22] 鄱阳湖研究编委会.鄱阳湖研究[M].上海:上海科学技术出版社,1988:13-117.
Poyang Lake Research Editorial Committee.Poyang Lake research[M].Shanghai:Shanghai Science and Technology Press,1988:13-117.

[23] 殷剑敏,苏布达,陈晓玲,等.鄱阳湖流域气候变化影响评估报告[M].北京:气象出版社,2011:10-22.
YIN J M,SU B D,CHEN X L,et al.The impact assessment report on climate change in Poyang Lake Basin[M].Beijing:Meteorological Press,2011:10-22.

[24] 曾瑜,厉莎,胡煜彬.1961—2014年鄱阳湖流域降雨侵蚀力时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2019,35(1):106-114.
ZENG Y,LI S,HU Y B.Spatial-Temporal variation of distribution of rainfall erosivity in the Poyang Lake Basin during 1961-2014[J].Journal of ecology and rural environment,2019,35(1):106-114.

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.降水量等级:GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
General Administration of Quality Supervision,Inspection And Quarantine Of The People's Republic Of China,China National Standardization Management Committee.Precipitation grade:GB/T 28592—2012[S].Beijing:China Standards Publishing House,2012.

[26] XIE Y,YIN S Q,LIU B Y,et al.Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J].Journal of hydrology,2016,535:547-558.

[27] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.1961—2014年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):136-143.
GU C J,MU X M,GAO P,et al.Characteristics of temporal variation in precipitation and temperature in the Loess Plateau from 1961 to 2014[J].Journal of arid land resources and environment,2017,31(3):136-143.

[28] SANG Y F,WANG Z G,LIU C M.Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time series[J].Journal of hydrology,2014,510:293-298.

[29] OLIVER J E.Monthly precipitation distribution:A comparative index[J].The professional geographer,1980,32(3):300-309.

[30] KINNELL P I A.Event soil loss,runoff and the universal soil loss equation family of models:a review[J].Journal of hydrology,2010,385(1/2/3/4):384-397.

[31] PANAGOS P,BALLABIO C,BORRELLI P,et al.Rainfall erosivity in Europe[J].Science of the total environment,2015,511:801-814.

[32] ZHU D Y,XIONG K N,XIAO H.Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of southern China,1960-2017[J].Catena,2021,197(1):104977.

[33] LI X,YE X.Variability of rainfall erosivity and erosivity density in the Ganjiang River Catchment,China:characteristics and influences of climate change[J].Atmosphere,2018,9(2):48.

[34] ZHU D Y,XIONG K N,XIAO H,et al.Variation characteristics of rainfall erosivity in Guizhou Province and the correlation with the El Nio Southern Oscillation[J].Science of the total environment,2019,691(C):835-847.

[35] 万日金,吴国雄.江南春雨的时空分布[J].气象学报,2008,66(3):310-319.
WAN R J,WU G X.Temporal and spatial distribution of the spring persistent rains over southeastern China[J].Acta meteorologica Sinica,2008,66(3):310-319.

[36] LAU K M,SONG Y.Climatology and interannual variability of the southeast asian summer monsoon[J].Advances in atmospheric sciences,1997,14(2):141-162.

[37] WANG B,LIN H.Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon[J].Journal of climate,2002,15(4):386-398.

[38] 吴琼,张传江,马锋敏,等.鄱阳湖流域雨季不同时期降水历时相关特征变化[J].气象与环境科学,2022,45(3):69-75.
WU Q,ZHANG C J,MA F M,et al.Changes in duration-related characteristics in different periods of rainy season in Poyang Lake Basin[J].Meteorological and environmental sciences,2022,45(3):69-75.

[39] 江西省地方志编纂委员会.江西省志丛书:江西省气象志[M].北京:方志出版社,1997:5-27.
Jiangxi Provincial Local Records Compilation Committee.Jiangxi provincial chronicles series:Jiangxi provincial meteorology[M].Beijing:Fangzhi Press,1997:5-27.

[40] XU Y,XU C H,GAO X J,et al.Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st century[J].Quaternary international,2009,208(1/2):44-52.

[41] SUN W Y,MU X M,SONG X Y,et al.Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China)during 1960 - 2013 under global warming[J].Atmospheric research,2016,168:33-48.

[42] STOCKER T F,QIN D,PLATTNER G K,et al.Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J].Climate change,2013,5:1-1552.