降雨特征对低山丘陵区典型小流域水土流失的影响

张真真[1]，单延功[1]，郭红丽[2]，陈家栋[1]，陈 霞[3]，龚 畅[1]，徐 飞[1]

(1. 江苏省水文水资源勘测局南京分局，江苏 南京 210008；
2. 江苏省水文水资源勘测局，江苏 南京 210008；3. 江苏省水土保持生态环境监测总站，江苏 南京 210005)

摘 要：[目的] 探究降雨特征对南京市低山丘陵区典型小流域水土流失的影响，为低山丘陵区尺度上产汇流分析及水土保持综合治理提供理论支撑。[方法] 以南京市低山丘陵区桥头小流域为研究对象，利用 2015—2018 年 156 场降雨事件的水文泥沙数据，运用 K-均值聚类法对降雨类型进行划分，采用 LSD 多重比较法分析不同雨型的特征，建立主要指标的多元拟合回归方程，探讨不同降雨条件下小流域产流产沙特性。[结果] ①降雨量、30 min 最大雨强(I_{30})，降雨侵蚀力是桥头小流域产流产沙的重要影响因素，小流域的 156 场降雨事件中，主要以降雨量＜75 mm，I_{30}＜20 mm/h 且径流系数＜0.2，含沙量＜1 g/L 的水沙特征为主。②降雨类型分为Ⅰ(小雨量、小雨强)，Ⅱ(大雨量、中雨强)，Ⅲ(中雨量、小雨强)，Ⅳ(中雨量、大雨强)，Ⅴ(小雨量、中雨强)5 种，Ⅰ雨型发生频率最高，Ⅳ雨型发生频次最低。③Ⅱ，Ⅳ雨型的产流产沙能力均高于其他雨型，Ⅲ雨型次之，Ⅰ，Ⅴ雨型最小。Ⅰ，Ⅲ，Ⅴ雨型的产水产沙特性差异不显著。④产沙模数和洪峰流量多元回归方程拟合效果较好，拟合回归系数 R^2 都在 0.75 以上且通过显著性检验，回归方程可用于相关指标的定量计算。[结论] 降雨量，I_{30}，降雨侵蚀力是桥头小流域产流产沙的重要影响因素；不同雨型的降雨特征差异性显著，Ⅱ，Ⅳ雨型是区域产流产沙的主要雨型；利用多元回归方程可以进行指标定量计算。

关键词：小流域；水土流失；降雨类型；低山丘陵区

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)04-0032-07 **中图分类号**：S157.1

文献参数：张真真，单延功，郭红丽，等. 降雨特征对低山丘陵区典型小流域水土流失的影响[J]. 水土保持通报，2020，40(4)：32-38. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.005；Zhang Zhenzhen, Shan Yangong, Guo Hongli, et al. Effects of rainfall characteristics on soil and water loss of small watershed in low mountains and hills area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 32-38.

Effects of Rainfall Characteristics on Soil and Water loss of Small Watershed in Low Mountains and Hills Area

Zhang Zhenzhen[1], Shan Yangong[1], Guo Hongli[2], Chen Jiadong[1], Chen Xia[3], Gong Chang[1], Xu Fei[1]

(1. *Nanjing Branch of Jiangsu Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Nanjing, Jiangsu* 210008, *China*; 2. *Jiangsu Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Nanjing, Jiangsu* 210008, *China*; 3. *Jiangsu Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring General Station, Nanjing, Jiangsu* 210005, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of rainfall on soil and water loss of small watershed were analyzed in low mountains and hills area of Naning City in order to provide some theoretical basis for analyzing rainfall-runoff characteristics and managing comprehensively in low hill area. [Methods] Runoff and sediment data from 2015 to 2018, and 156 rainfall events were used in this study. Rainfall events were classified by using K-means clustering algorithm. The characteristics of different rainstorm patterns were analyzed by adopting LSD multiple comparison method. And multiple fitting regression equation of main indicators was established to explore runoff and sediment yield characteristics of small watershed under different rainfall conditions. [Results] ① The precipitation, I_{30}, and rainfall erosion force were the important influence factors of small watershed runoff and sedimentation characteristics. Among 156 flood events in the small watershed, the main characteristics were rainfall ＜75 mm, I_{30}＜20 mm/h, the runoff coefficient ＜0.2, and the sediment

收稿日期：2020-04-15 **修回日期**：2020-05-28
资助项目：国家自然科学基金项目："黏弹性管道水力瞬变动力学行为及流固耦合机制研究"(51808102)
第一作者：张真真(1991—)，女(汉族)，江苏省南京市人，硕士研究生，研究方向为水文水资源。Email：823148695@qq.com。

concentration <1 g/L. ② The rainfall events were classified into five rainstorm patterns as pattern Ⅰ (low P, low I_{30}), pattern Ⅱ (high P, medium I_{30}), pattern Ⅲ (medium P, low I_{30}), pattern Ⅳ (medium P, high I_{30}), pattern Ⅴ (low P, medium I_{30}). The frequency of pattern Ⅰ was the highest, while the frequency of pattern Ⅳ was the lowest. ③ The runoff and sediment yield of pattern Ⅱ and pattern Ⅳ were higher than that of other patterns, followed by pattern Ⅲ, and pattern Ⅰ and pattern Ⅴ were the least. There was no obvious difference among the runoff and sedimentation characteristics of pattern Ⅰ, pattern Ⅲ, and pattern Ⅴ. ④ The multiple fitting regression equation of modulus of sediment yield and peak discharge had the best simulating effect. The correlation coefficients (R^2) was higher than 0.75 and passed the test of significance. The equation could be used to calculate various indexes quantitatively. [Conclusion] The precipitation, I_{30}, and rainfall erosion force were important influence factors to small watershed runoff and sedimentation characteristics. The rainfall characteristics of different rain patterns were significantly different. Pattern Ⅱ and pattern Ⅳ were the main rainfall pattern causing the runoff of small watersheds. Quantitative indicators could be calculated by multiple regression equation.

Keywords: small watershed; soil erosion; rainstorm patterns; low mountains and hills area

小流域是我国水土流失综合治理的基本单元,流域短时间内地形地貌与土壤特征相对稳定,无人为影响下植被覆盖不会发生明显变化,因此短期内降雨是引起小流域土壤侵蚀的主要动力和重要因素[1-3]。降水的时程雨型是指降雨过程中雨量随历时的分配,雨型对入渗、径流和侵蚀过程有重要影响[4-5]。降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨特征是区域产流产沙的重要影响因素[6-9]。近年来,国内外相关学者[10-13]对降雨特征与区域产流产沙之间的相关性进行了分析。王万忠[14]研究了黄土地区降雨特性与土壤流失关系,发现 10～30 min 最大降雨量的瞬时雨率是与土壤流失量的相关性较为密切的降雨参数;周璟等[15]针对武陵山区女儿寨小流域 77 场典型降雨径流观测的研究结果表明,降雨量与径流深和产沙模数呈现较为显著的线性相关性;杨云斌等[16]降雨量和历时对农地小流域产流的影响更大,雨强分布对封禁小流域产流的影响更大;晏清洪等[17]以黄土区小流域为研究区,分析了不同降雨类型条件下流域水土流失特征,结果表明次降雨量和最大 30 min 雨强是影响流域产流输沙的主要降雨特征;何杨洋等[18]通过研究北京市密云县石匣小流域分析了密云水库上游流域的降雨、产流产沙特征发现降雨量、降雨强度与产流、产沙之间具有明显的相关关系。通过相关学者的研究成果发现,不同研究区的降雨特征与产流产沙的相关性也有所不同,因此,针对不同研究区分析降雨特征与产流产沙相关性是十分必要的。目前,针对江苏省南京市水土流失方面的研究主要为水土流失监测手段和水土侵蚀时空分布特征等。例如,马力等[19]建立了基于 USLE 原理和 3S 技术的水土流失定量监测方法,邵方泽等[20]利用 RUSLE 模型分析了南京市 2006—2014 年水土侵蚀时空分布特征。但对于南京市低山丘陵区小流域降雨特性与产流产沙相关性分析方面的研究较少,因此,本文通过对南京市低山丘陵区小流域 2015—2018 年 156 场降雨事件进行统计分析,根据降雨特性划分不同雨型,对不同雨型下的产流产沙特性进行分析,探讨相关性,以期为水土保持综合治理提供科学依据。

1　研究区概况

南京市溧水区桥头小流域位于江苏省南京市溧水区东部低山丘陵区的秦淮河支流溧水二干河上游,汇入溧水区方便水库。桥头小流域总流域面积为 3.1 km^2,东经 119°10′05″,北纬 31°40′28″,年平均温度 15.5 ℃,流域长度 10.71 km,以坡度<3°的平坡为主,占比 44.5%,沟壑密度 3.45 km/km^2,土地利用结构以耕地为主,占比 41.87%,流域内人口约 1 350人。桥头小流域属于亚热带季风气候区,气候温暖湿润,降雨量较丰沛,多年平均降水量 1 107.3 mm,降雨多集中在汛期。洪涝灾害主要是受梅雨、台风雨影响,梅雨通常发生在 6—7 月,其特点是总量大,历时长,范围广;台风雨多发生在 8—9 月,其特点是雨强大,历时短,降雨范围相对较小。2013 年桥头小流域水土保持综合观测站纳入全国水土保持动态监测与公告项目。

南京市东部丘陵区主要分布在溧水区,平均海拔 70.4 m,主要土壤类型为黄棕壤和水稻土,土地利用类型包括耕地、园地、林地、农用地。南京市属亚热带季风气候区,雨量丰富,一年中汛期降雨集中,降水量约占全年总降水量的 60%左右,对南京市水土流失影响较大。暴雨极易对裸露表土形成严重的水力侵蚀,较陡的坡面还会发生小规模重力侵蚀。丘陵地区地形起伏较大,加剧了径流对地表土壤的冲刷侵蚀作

用，遇降雨容易产生沟蚀和面蚀；岗地虽然地形起伏不大，但大多为第四纪下蜀黄土，并早已开发成农田和果、茶园，地表多为栽培植被，遇降雨易造成细沟状面蚀和深沟侵蚀。根据《南京市水土保持规划(2016—2030 年)》，南京市 2011—2015 年水土流失定量监测成果显示，南京市全市年平均土壤流失量 1.68×10^6 t(其中轻度 3.60×10^5 t，中度 2.94×10^5 t，强烈 2.76×10^5 t，极强烈 3.65×10^5 t，剧烈 3.73×10^5 t)。

2 数据来源及研究方法

本文选取近 4 a 连续观测的气象水文泥沙等数据进行分析。桥头小流域 2015—2018 年水文泥沙数据来源于国家水土保持基础信息平台建设水土保持监测点——南京市溧水区方便水库小流域水土流失监测点，卡口站位于方便水库上游入库河流司家瓦河上游位置的浮山桥，控制上游流域面积 3.1 km^2，监测项目包括降水量、水位、流速、含沙量等，通过流量计算公式得出断面径流量及输沙量等数据。2015—2018 年南京市桥头小流域年径流量和年输沙量详见表 1。

表 1 2015—2018 年南京市桥头小流域年径流量和年输沙量

年份	年径流量/(10^4 m·s^{-1})	年输沙量/t
2015	95.6	1 031.2
2016	246.3	1 801.0
2017	78.5	2 605.7
2018	59.0	924.8

雨量观测使用现场安装的江苏省水文局雨量站遥测终端，降雨数据通过无线传输发送到遥测平台上，每天从平台上下载当日雨量，每月下载降雨过程数据，并运用软件进行降雨量、雨强、I_{30} 以及降雨侵蚀力等指标计算；流量监测用流速仪法监测，在断面上设立 3 条垂线，分别测量水位和流速，计算流量；泥沙样品按照《泥沙测验规范》要求，采用烘干法处理，采集的样品经沉淀、浓缩后倒入烘杯烘干、冷却后称重，计算得出垂线平均含沙量。

为探讨桥头小流域降雨及产流产沙特性，借助 SPSS 20.0 对水文泥沙数据进行描述统计分析、皮尔逊相关性分析、K-均值聚类分析、最小显著差异法(LSD)方差分析、多元线性回归分析等统计分析。本文数据来源于卡口站浮山桥断面监测成果，分析使用的 12 个变量为：降雨历时(D，min)；雨量(P，mm)；最大 30 min 雨强($I_{30\,max}$，mm/h)；降雨侵蚀力(R，MJ·mm/(hm^2·h))；洪峰流量(Q_{max}，m^3/s)；径流深(H，mm)；径流系数(R_c)、含沙量(C，g/L)；产沙模数(M_s，t/hm^2)；前 7 d 降雨量($P_{7\,d}$，mm)；前 3 d 降雨量($P_{3\,d}$，mm)；前 1 d 降雨量($P_{1\,d}$，mm)。

3 结果分析

3.1 不同降雨类型分析

降雨量和 I_{30} 对流域产水产沙都有重要影响，为分析出不同降雨类型对小流域水沙的影响程度，按照 Perruchet 提出的分类标准[24]，利用 K-均值聚类将 156 场降雨事件分为 5 类，分类结果详见表 2。桥头小流域降雨类型可分为Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，Ⅴ共 5 种雨型，降雨量中心值由大到小依次为Ⅱ，Ⅳ，Ⅲ，Ⅴ，Ⅰ，I_{30} 中心值由大到小依次为Ⅳ，Ⅴ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅰ。Ⅰ雨型降雨量中心值为 12.93 mm，为所有雨型中最小，I_{30} 中心值为 5.79 mm/h，为所有雨型中最小，可定义为小雨量、小雨强；Ⅱ雨型降雨中心值为 148.8 mm，I_{30} 中心值为 25.96 mm/h，可定义为大雨量、中雨强；Ⅲ雨型降雨中心值为 75.27 mm，I_{30} 中心值为 21.34 mm/h，可定义为中雨量、小雨强；Ⅳ雨型降雨中心值为 86.75 mm，I_{30} 中心值为 60.92 mm/h，可定义为中雨量、大雨强；Ⅴ雨型降雨中心值为 33.47 mm，I_{30} 中心值为 28.45 mm/h 可定义为小雨量、中雨强。小流域 5 种雨型发生频次由大到小依次为Ⅰ，Ⅴ，Ⅲ，Ⅱ，Ⅳ，其中，小雨量、小雨强的Ⅰ雨型发生频率最高，共发生 96 场次，占总场次的 61.54%，其次为小雨量、中雨强的Ⅴ雨型，共发生 40 场，占总场次的 25.64%，而大雨量、中雨强的Ⅱ雨型和中雨量、大雨强的Ⅳ雨型发生频次较低，分别为 6 场和 2 场，占总场次的 3.85%，1.28%。

表 2 降雨类型统计特征

降雨类型	降雨量中心值/mm	范围/mm	I_{30} 中心值/(mm·h^{-1})	范围/(mm·h^{-1})	频次	占总降雨比例/%
Ⅰ	12.93	0.5～36.5	5.79	0.5～27.19	96	61.54
Ⅱ	148.8	138～286	25.96	3.9～58.41	6	3.85
Ⅲ	75.27	52.5～93	21.34	1.3～32.25	12	7.69
Ⅳ	86.75	77.5～96	60.92	46.32～75.52	2	1.28
Ⅴ	33.47	15.5～54	28.45	7.05～64.45	40	25.64

3.2　流域水沙变化特征

侵蚀性降雨是指能够引起土壤侵蚀的降雨,本次研究中仅针对侵蚀性降雨事件进行分析。经统计,2015—2018 年南京市桥头小流域共发生 156 场侵蚀性降雨事件,对 9 个变量进行描述性统计分析,分析结果详见表 3。从表 3 可知,桥头小流域最小降雨量为 5.0 mm,发生在 2018 年 5 月 10 日,最大降雨量为 286.0 mm,发生在 2016 年 5 月 20 日,平均降雨量为 52.4 mm,超过平均雨量的降雨事件共 21 场,占所有降雨事件的 13.46%。I_{30} 最大值为 65.45 mm/h,发生在 2017 年 6 月 1 日,降雨量为 33.0 mm,降雨历时为 40 min,I_{30} 最小值为 3 mm/h,发生在 2016 年 10 月 30 日,降雨量为 17.0 mm,降雨历时较长,为 885 min。径流深变化范围为 0.40～398.40 mm,平均值为 24.73 mm,径流深超过 5 mm 的降雨事件有 30 场,占所有侵蚀性降雨事件的 43.48%。径流系数变化范围为 0.01～0.94,平均值为 0.29,径流系数大于 0.1 的降雨事件有 53 场,占所有侵蚀性降雨事件的 76.81%。最小含沙量为 0.01 g/L,最大含沙量为 6.17 g/L,平均值为 0.77 g/L,超过含沙量平均值的降雨事件有 22 场,占所有侵蚀性降雨事件的 31.88%。按年累计统计,年均产沙模数为 5.8 t/hm^2 (2015—2018 年);按降雨场次统计,156 场侵蚀性降雨事件的平均产沙模数为 0.33 t/hm^2,超过平均值的降雨事件有 12 场,占所有侵蚀性降雨事件的 17.39%,产沙模数最大值为 5.07 t/hm^2,发生在 2017 年 8 月 7 日。

对 156 场降雨事件的 9 个变量进行皮尔逊相关性分析,结果详见表 4。根据皮尔逊相关性分析结果,降雨量与降雨侵蚀力、洪峰流量、径流深、产沙模数、I_{30},含沙量在 $p<0.01$ 水平上显著相关,与径流系数在 $p<0.05$ 水平上显著相关,表明降雨量是桥头小流域产流产沙的重要影响因素。I_{30} 与降雨侵蚀力、洪峰流量、含沙量在 $p<0.01$ 水平上显著相关,与径流深、径流系数、产沙模数在 $p<0.05$ 水平上显著相关,表明 I_{30} 是桥头小流域产流产沙的重要影响因素。降雨侵蚀力与洪峰流量、径流深、产沙模数、径流系数、含沙量在 $p<0.01$ 水平上显著相关,与洪峰流量、径流深、产沙模数的相关系数均在 0.5 以上,表明降雨侵蚀力是影响区域产流产沙的重要因素。$P_{7\,d}$ 与洪峰流量、径流深在 $p<0.05$ 水平上显著相关、$P_{3\,d}$ 与洪峰流量在 $p<0.01$ 水平上显著相关、与含沙量在 $p<0.05$ 水平上显著相关,这表明前期降雨量对流域降雨产流产沙能力具有显著影响。

表 3　降雨事件描述性统计特征

参数	极小值	极大值	均值	标准差
D	15	4565	1108	983
P	5.0	286.0	52.4	49.2
$I_{30\,max}$	3.00	65.45	23.18	15.35
R	3.01	2 179.70	342.94	460.50
Q_{max}	0.15	9.75	1.62	2.08
H	0.40	398.40	24.73	54.09
R_c	0.01	0.94	0.29	0.227
C	0.01	6.17	0.77	1.10
M_s	0	5.07	0.33	0.80
$P_{7\,d}$	0	159.5	33.5	32.4
$P_{3\,d}$	0	96	17.1	24.2
$P_{1\,d}$	0	65.5	5.7	11.0

注:D 为降雨历时(min);P 为雨量(mm);I_{30}max 为最大 30 min 雨强(mm/h);R 为降雨侵蚀力〔MJ·mm/(hm^2·h)〕;Q_{max}为洪峰流量(m^3/s);H 为径流深(mm);R_c 为径流系数;C 为含沙量(g/L);Ms 产沙模数(t/hm^2);$P_{7\,d}$为前 7 d 降雨量(mm);$P_{3\,d}$为前 3 d 降雨量(mm);$P_{1\,d}$为前 1 d 降雨量(mm)。

表 4　皮尔逊相关系数矩阵

项目	D	P	$I_{30\,max}$	R	Q_{max}	H	R_c	C	M_s	$P_{7\,d}$	$P_{3\,d}$	$P_{1\,d}$
D	1											
P	0.751**	1										
$I_{30\,max}$	−0.044	0.403**	1									
R	0.451**	0.863**	0.689**	1								
Q_{max}	0.592**	0.840**	0.445**	0.790**	1							
H	0.648**	0.854**	0.275*	0.759**	0.842**	1						
R_c	0.296*	0.317*	0.247*	0.380**	0.409**	0.349**	1					
C	0.167	0.375**	0.353**	0.391**	0.433**	0.231	0.169	1				
M_s	0.455**	0.716**	0.299*	0.666**	0.700**	0.676**	0.273*	0.702**	1			
$P_{7\,d}$	−0.094	0.072	0.112	0.2	0.304*	0.252*	0.097	0.176	0.179	1		
$P_{3\,d}$	−0.085	0.085	0.179	0.21	0.326**	0.144	0.067	0.312*	0.211	0.756**	1	
$P_{1\,d}$	0.047	0.229	0.167	0.371**	0.157	0.135	0.032	0.078	0.057	0.318*	0.471**	1

注:** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

由于降雨量和降雨强度存在明显差异，因而对流域产流、产沙的影响也会有显著差异[21-23]。为分析降雨量、I_{30}对桥头小流域产流产沙特性的影响程度，绘制降雨事件中降雨量、I_{30}与含沙量、径流系数的对应关系图(见图 1)。最大径流系数为 0.94，对应的降雨量为 140 mm，I_{30}为 45.3 mm/h，前 7 d 降雨量为89.5 mm，土壤的体积含水量为 50.3%(土壤深度 30 cm)，表明前期较为充分的降雨已使土壤含水量增大，再遇暴雨形成径流；最大含沙量为 6.17 g/L，对应的降雨量为 138 mm，I_{30}为 37.26 mm/h，前 7 d 降雨量为 66.5 mm，土壤处于湿润状态，为土壤侵蚀活动提供了基础。当降雨量＜75 mm，I_{30}＜20 mm/h 时，径流系数主要在 0.2 范围内，含沙量主要在 1 g/L 范围内；当降雨量位于 75～125 mm 之间，I_{30}位于 20～40 mm/h 之间时，径流系数大致在 0.17～0.34 之间，含沙量大致在 1～2 g/L 之间；当降雨量介于 125～286 mm，I_{30}介于 40～65 mm/h 之间时，径流系数大致在 0.34～0.94 之间，含沙量大致在 2～4.5 g/L 之间。

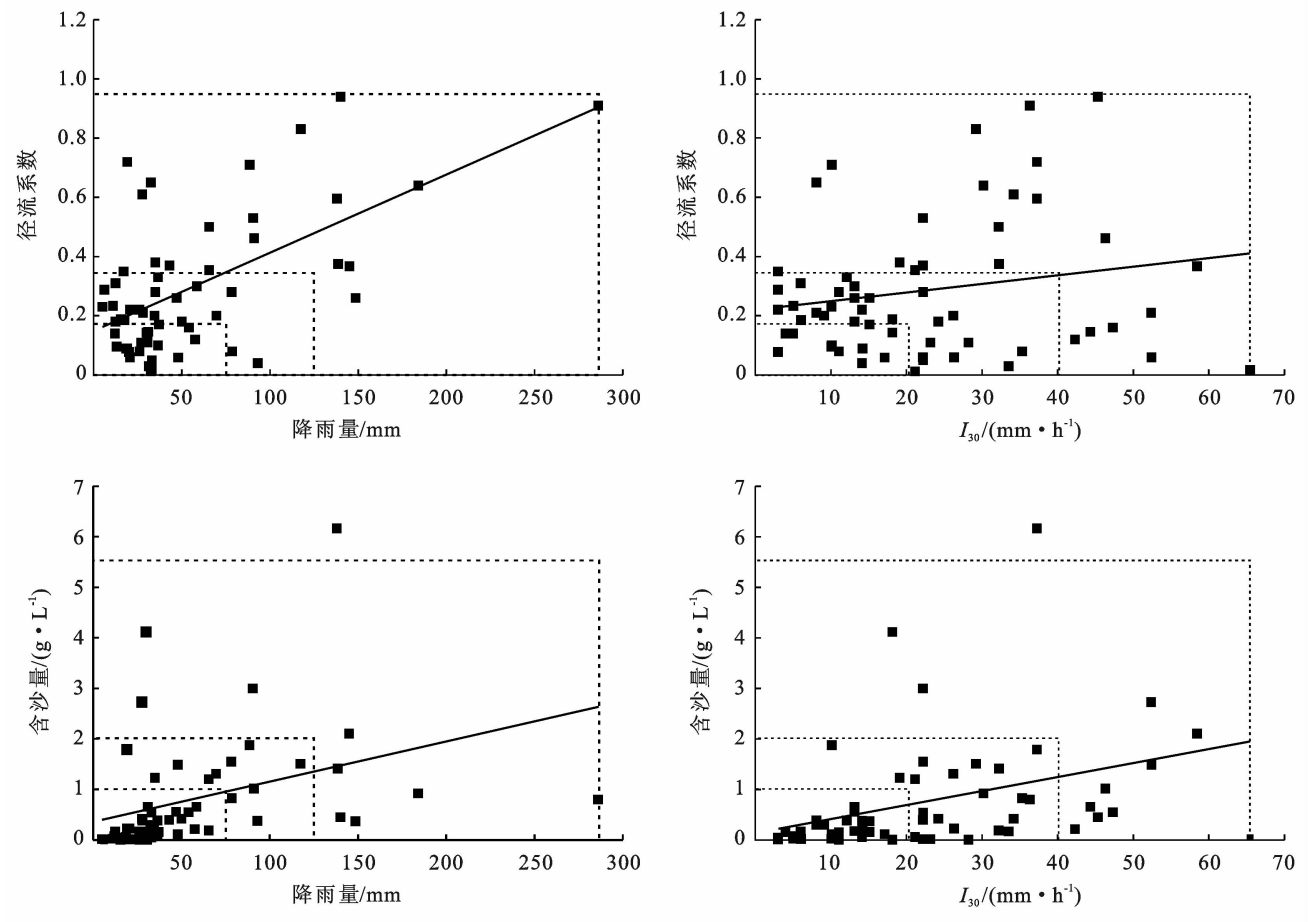


图 1 降雨量、最大 30 min 雨强(I_{30})与含沙量、径流系数对应关系

3.3 不同降雨类型对流域水沙的影响

统计桥头小流域在 5 种不同雨型下的累计降雨量、累计含沙量、累计径流量占总量的比例，统计结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，Ⅴ雨型的累计含沙量最高，为 29.29%，但累计径流量较小，为 8.41%。Ⅳ雨型的累计径流量最高，达 47.18%，而累计降雨量和累计含沙量较低。Ⅱ雨型累计雨量占降雨总量的比例最高，为 32.59%，同时，累计含沙量和累计径流量也较高，分别为 22.82%，32.97%。Ⅰ雨型的累计降雨量、累计含沙量、累计径流量在所有雨型中都为最小。

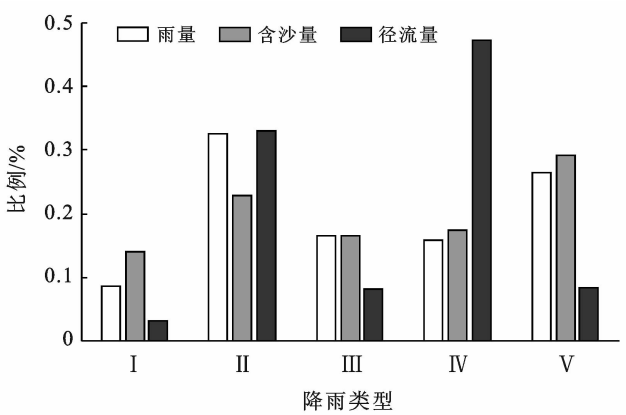
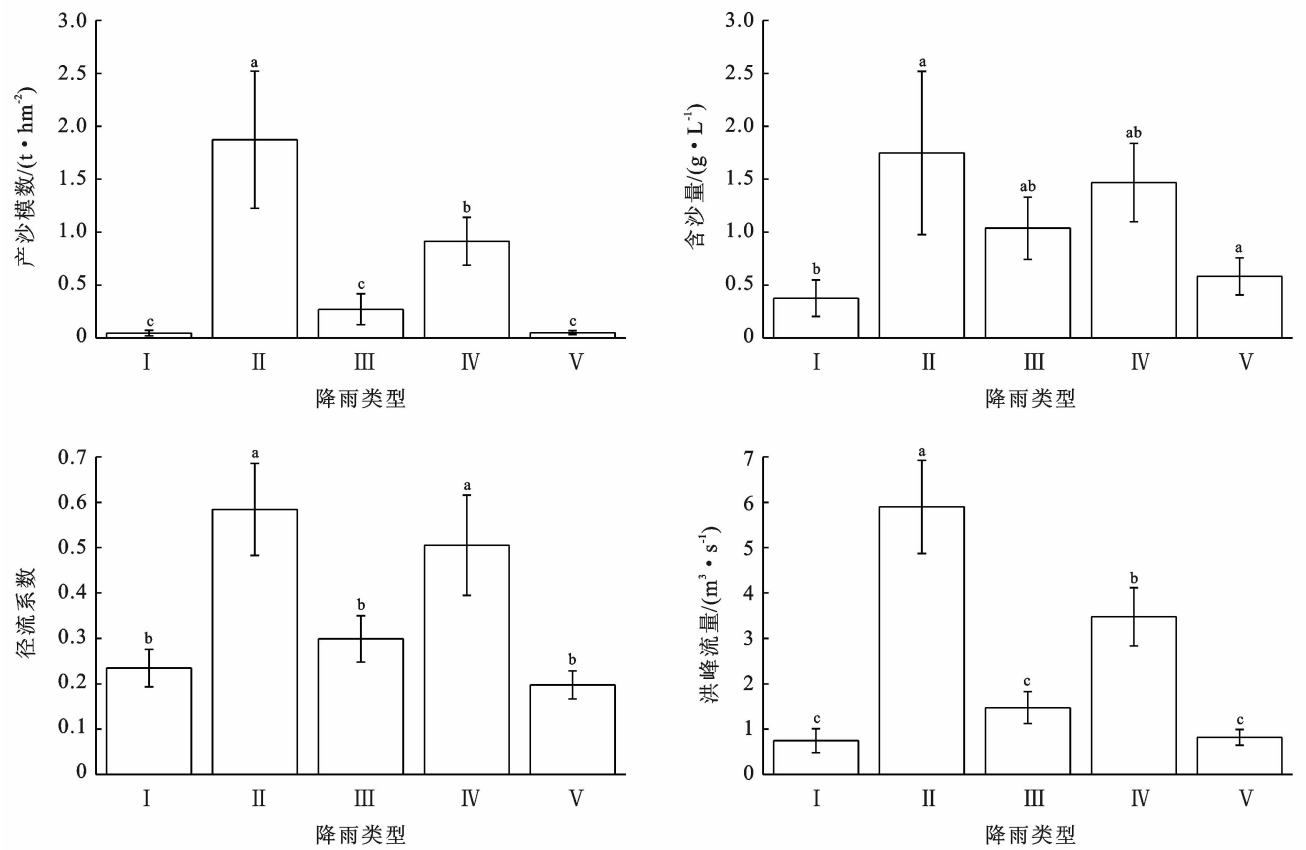


图 2 不同降雨类型下累计降雨量、累计含沙量、累计径流量所占比例

为分析桥头小流域在不同降雨类型下的产流产沙变化特征,利用最小显著差异法(LSD)方差分析不同降雨类型之间的产沙模数、含沙量、径流系数、洪峰流量在统计上的差异性,分析结果见图 3。根据图 3 可知,5 种降雨类型下,Ⅱ,Ⅳ雨型的产沙模数分别与Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型在统计上具有显著性差异,但Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型之间差异性不显著。Ⅱ,Ⅳ雨型产沙模数相对其他雨型较大,分别为 1.87,0.91 t/hm^2,Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型的产沙模数较低。含沙量由大到小依次为Ⅱ,Ⅳ,Ⅲ,Ⅴ,Ⅰ,Ⅰ雨型的含沙量仅与Ⅱ雨型在统计上具有显著性差异,与Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ雨型都没有显著性差异。含沙量表征了流域产流量和输沙量之间的关系,Ⅱ雨型的含沙量最大,为 1.74 g/L,Ⅰ雨型最小,为 0.37 g/L,由此可知,Ⅱ雨型对桥头小流域水沙关系有明显影响,是导致桥头小流域产沙的主要雨型。Ⅱ,Ⅳ雨型的径流系数与Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型在统计上具有显著性差异,而Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型之间不具有显著性差异,径流系数表征了流域降雨产流能力,Ⅱ雨型的径流系数最大,为0.58,表示在Ⅱ雨型下产流能力最强,其次为Ⅳ雨型,径流系数为 0.51,其他雨型下径流系数均小于 0.5,产流能力较弱。Ⅱ,Ⅳ雨型的洪峰流量分别与Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型在统计上具有显著性差异,但Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型之间差异性不显著。Ⅱ雨型条件下洪峰流量最大,为 5.89 m^3/s,其次为Ⅳ雨型,洪峰流量为 3.47 m^3/s。



注:图中不同小写字母表示不同降雨类型在 $p<0.05$ 水平上差异性显著。

图 3　不同降雨类型下小流域产流产沙特性

对影响小流域水土流失的产沙模数和洪峰流量 2 个主要指标进行多元逐步回归拟合,选取与主要指标相关性较高的指标进行拟合,拟合结果详见表 5。根据拟合回归结果可知,拟合优度 R^2 都在 0.75 以上,表明模型拟合程度较高,拟合效果较好,数据方差 F 反映回归方程的显著性检验,拟合回归方程的 $F>$ FINV(k,$n-k-1$)=2.74,表明各个解释变量对因变量有显著影响。F 对应的显著性水平 sig. 均小于 0.05,认为回归方程是有价值的。与产沙模数相关性较大的指标为降雨量、含沙量、径流深,对应的标准化回归系数为 0.197,0.535 和 0.386,影响程度由大到小依次为含沙量、径流深、降雨量。与洪峰流量相关性较大的指标为径流深、含沙量、I_{30},对应的标准化回归系数为 0.720,0.237,0.189,影响程度由大到小依次为径流深、含沙量、I_{30}。

表 5　主要指标的拟合回归方程

拟合回归方程	R^2	F	sig.
$M_s=0.39C+0.006H+0.003P-0.275$	0.763	74.08	0.001
$Q_{max}=0.028H+0.449C+0.026I_{30}+0.002$	0.788	85.11	0

4 结 论

(1) 降雨量、I_{30},降雨侵蚀力与其他指标在 $p<0.01$,$p<0.05$ 水平上显著相关,是桥头小流域产流产沙的重要影响因素。区域 156 场降雨事件中,主要以降雨量<75 mm,I_{30}<20 mm/h 且径流系数<0.2,含沙量<1 g/L 的水沙特征为主。

(2) 区域降雨类型分为Ⅰ(小雨量、小雨强)、Ⅱ(大雨量、中雨强)、Ⅲ(中雨量、小雨强)、Ⅳ(中雨量、大雨强)、Ⅴ(小雨量、中雨强)5 种,Ⅰ雨型发生频率最高,共发生 96 场,占总场次的 61.54%,Ⅳ雨型发生频次较低,仅发生 2 场,占总场次 1.28%。

(3) Ⅱ雨型的累计雨量占降雨总量的比例最高,为 32.59%,Ⅴ雨型的累计含沙量最高,为 29.29%,但累计径流量较小,为 8.41%。Ⅳ雨型的累计径流量最高,达 47.18%。Ⅰ雨型的累计降雨量、累计含沙量、累计径流量在所有雨型中都为最小。Ⅱ,Ⅳ雨型的洪峰流量、含沙量、径流系数、产沙模数均高于其他雨型,Ⅲ雨型次之,Ⅰ,Ⅴ雨型最小。Ⅱ雨型的产流能力和输沙能力最大,其次为Ⅳ雨型,Ⅰ,Ⅲ,Ⅴ雨型的产水产沙特性差异不显著。

(4) 产沙模数和洪峰流量多元回归方程拟合效果较好,拟合回归系数 R^2 都在 0.75 以上且通过显著性检验,回归方程可用于相关指标的定量计算。对产沙模数影响较大的指标为含沙量、径流深、降雨量,对洪峰流量影响较大的指标为径流深、含沙量、I_{30}。

[参 考 文 献]

[1] 齐实,李月. 小流域综合治理的国内外进展综述与思考[J]. 北京林业大学学报,2017,39(8):1-4.

[2] 余新晓,张学霞,李建牢,等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J]. 生态学报,2006,26(1):1-8.

[3] 张洪江,张长印,赵永军,等. 我国小流域综合治理面临的问题与对策[J]. 中国水土保持科学,2006,14(1):132-135.

[4] 王万忠,焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征[J]. 地理学报,2002,57(2):210-212.

[5] 王万忠,焦菊英. 黄土高原坡面产流产沙过程变化的统计分析[J]. 水土保持通报,1996,16(5):21-28.

[6] 张学权. 典型强降雨下不同植被类型水土保持特征分析[J]. 成都大学学报(自然科学版),2014,33(3):294-296.

[7] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.

[8] 陈鹏飞,陈丽华,王宇,等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流、产沙的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(3):199-204.

[9] 殷水清,王杨,谢云,等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展,2014,25(5):617-623.

[10] 方怒放. 小流域降雨—径流—产沙关系及水土保持措施响应[D]. 湖北 武汉:华中农业大学,2012.

[11] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 土壤通报,2011,42(3):721-725.

[12] 张光辉,梁一民. 模拟降雨条件下人工草地产流产沙过程研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):56-59.

[13] Morin E, Goodrich D C, Maddox R A. Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response [J]. Advances in Water Resources, 2006,29(6):843-860.

[14] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报,1983,3(4):7-13.

[15] 周璟,张旭东,何丹,等. 武陵山区女儿寨小流域次降雨径流与产沙特征[J]. 中国水土保持科学,2011,9(1):33-38.

[16] 杨云斌,张建军,李梁,等. 晋西黄土区降雨过程对小流域产流的影响[J]. 北京林业大学学报,2019,41(3):105-107.

[17] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(2):169-171.

[18] 何杨洋,王晓燕,段淑怀,等. 密云水库上游流域次降雨坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报,2015,31(24):134-139.

[19] 马力,卜兆宏,梁文广,等. 基于 USLE 原理和 3S 技术的水土流失定量监测方法及其应用研究[J]. 土壤学报,2019,56(3):603-614.

[20] 邵方泽,张慧,缪旭波. 基于 RUSLE 模型的南京市 2006—2014 年水土侵蚀时空分布特征[J]. 江苏农业科学,2017,45(17):264-269.

[21] 程甜甜,李赛,张兴刚,等. 山东药乡小流域降雨径流关系研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):34-37.

[22] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等. 孤山川流域 1980s 以来次降雨—产流—产沙变化[J]. 水土保持通报,2015,35(3):23-29.

[23] 张志强,王盛萍,孙阁,等. 流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展[J]. 生态学报,2006,26(7):2356-2364.

[24] Perruchet C. Constrained agglomerative hierarchical classification [J]. Pattern R ecognition, 1983,16(2):213-217.