

降雨对江子河小流域不同农作物措施坡面产流产沙的影响

张嘉懿¹, 汪军红², 程先富¹, 陈菁菁¹

(1.安徽师范大学地理与旅游学院,安徽 芜湖 241002; 2.霍山县水土保持试验站,安徽 六安 237266)

摘要:水土流失已成为我国主要的生态环境问题之一。基于安徽大别山区江子河小流域2012—2019年自然降雨径流泥沙观测资料,探讨雨型对不同农作物措施坡面产流产沙的影响,采用随机森林算法分析降雨因子与水沙之间的关系。结果表明,在不同场次降雨中,径流量、土壤流失量随降雨场次变化规律较一致,红薯措施产流量及土壤流失量较大,茶叶措施最小。降雨分为3类:A型降雨(低频率、长历时、大雨量、高雨强)、B型降雨(高频率、短历时、小雨量、低雨强)、C型降雨(较低频率、较长历时、中等雨量、较高雨强),对产流产沙的影响表现为A型>C型>B型。降雨量对产流的影响程度最高,土壤流失量受PI、PI₆₀及降雨量和I₃₀的影响,I₆₀对产流产沙的影响程度偏低,小于11%。各农作物措施小区的径流深和土壤流失量相关性显著且具有线性关系,土壤流失量的增速为红薯>桑树>茶叶>板栗>黄豆>油茶。研究结果可为坡面侵蚀预报模型的建立提供重要的理论依据,对安徽大别山区水土保持工作的开展和生态文明建设具有重要的理论价值和实践意义。

关键词:降雨;产流产沙;农作物措施;江子河小流域

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)02-0008-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.002

Effects of Rainfall on Slope Runoff and Sediment Yield Under Different Crop Measures in the Jiangzi River Minor Watershed

ZHANG Jiayi¹, WANG Junhong², CHENG Xianfu¹, CHEN Jingjing¹

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002;

2. Huoshan Water and Soil Conservation Monitoring Station, Lu'an, Anhui 237266)

Abstract: Soil and water loss has become one of the main ecological environmental problems in China. The observation data of natural rainfall, runoff and sediment in the Jiangzi River minor watershed from 2012 to 2019 were used to explore the influence of rainfall types on slope sediment yield and runoff under different crop measures. Random forest algorithm was used to obtain the relationships among rainfall factors, runoff and sediment yield. The results showed that the changes of runoff and soil loss were consistent with the rainfall. The runoff and soil loss under sweet potato were larger, and tea gave the smallest. The rainfall could be classified into three types: Type A was rainfall with low frequency, long duration, heavy rainfall and higher rainfall intensity, Type B with high frequency, short duration, small rainfall and low rainfall intensity, and Type C with lower frequency, longer duration, moderate rainfall, high rainfall intensity. The degree of influence on runoff and sediment yield was type A>type C>type B. Precipitation had the highest degree of influence on runoff. The soil loss was affected by PI, PI₆₀, P and I₃₀, and I₆₀ had a low degree of impact on runoff and sediment production, less than 11%. The runoff depth of each crop measure had a significant and linear correlation with soil loss, and the growth rate of soil loss was sweet potato>mulberry>tea>chestnut>soybean>oil tea. These results provided important theoretical basis for the establishment of slope erosion prediction model, and were of important theoretical value and practical significance for the soil and water conservation work and the construction of ecological civilization in the western Dabie mountains area of Anhui Province.

Keywords: rainfall; runoff and sediment yield; crop measures; Jiangzi River minor watershed

收稿日期:2020-08-30

资助项目:国家自然科学基金项目(41271516)

第一作者:张嘉懿(1997—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:jiayizhang5@163.com

通信作者:程先富(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事区域环境与自然灾害研究。E-mail:xianfucheng@sina.com

水土流失是限制当人类社会生存与可持续发展的全球性环境灾害,全世界有 $1/3$ 的土地受到严重侵蚀^[1]。2018年全国水土流失面积达273.69万km²,水土流失已成为我国最为严重的生态环境问题之一^[2]。在引起土壤侵蚀的众多因素中,自然驱动因素如降雨、坡度、坡长、植被等与土壤侵蚀的关系已经引起学者们的广泛关注^[3-6],其中降雨是水力侵蚀发生前提,降雨特征直接影响土壤侵蚀的速率^[7],通过对天然降雨或模拟降雨条件下径流泥沙的监测,揭示坡面土壤侵蚀的机理。Fang等^[8]在黄土高原地区使用K均值分类法把次降雨事件分为3类,高强度、短历时的降雨是造成当地土壤侵蚀的主要雨型;Liu等^[9]在种植不同植被的坡耕地进行研究时发现,降雨量是径流的主要影响因子;肖继兵等^[10]则认为,降雨复合因子对土壤侵蚀的影响大于单一降雨因子。植被截留雨滴和根系对土壤的固定作用可以改变降雨对土壤的滴溅和冲刷^[11],Lin等^[12]发现,小麦调水调沙能力较强,其径流和泥沙分别比裸地少43.8%~83.4%,86.7%~98.2%;也有研究^[13-15]认为,生长植被的坡地对土壤侵蚀有一定抑制作用,裸地水土保持效益较差。目前对降雨、下垫面影响坡面产流产沙的研究较多,针对降雨、农作物措施与土壤侵蚀影响作

用的研究较少。由于地形、地貌、气候、人为因素等影响,不同区域的水土流失机制不尽相同,因此需要探究不同区域土壤侵蚀的发生机制,因地制宜地采取水土保持措施。坡面作为流域的基本组成单元,同时也是土壤侵蚀的主要发生地。为此,本文以安徽大别山区江子河小流域的8个坡面径流小区为研究对象,基于2012—2019年的降雨、产流、产沙等资料,探究在不同农作物措施条件下自然降雨与产流产沙的关系,明晰各农作物措施的水土保持效益,以期为农作物配置模式、水土流失综合治理及预测模型的建立提供理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

江子河小流域位于安徽省六安市霍山县上土市镇江子河行政村(115°52'56"~115°55'41"E,31°06'37"~31°08'40"N),面积9.25 km²,海拔370~1 169.8 m,属北亚热带湿润季风气候,多年平均降水量1 423.3 mm,多年月平均气温14.8℃,年均蒸发量1 240.1 mm。土壤以砂质壤土为主,主要土地利用类型为林地、耕地和园地。江子河小流域综合观测站对降雨、径流、泥沙进行长期定点观测,共有8个径流小区,种植6种农作物,工程措施为坡改梯和坡耕地,具体情况见表1。

表1 径流小区参数

小区编号	处理代号	水平坡长/m	小区宽度/m	坡度/(°)	坡向	坡位	土壤类型	植被种类	工程措施
1	TY	20	5	19	WS	中	砂壤	油茶	坡改梯
2	TC	20	5	23	WS	中	砂壤	茶叶	坡改梯
3	GC	20	5	23	WS	中	砂壤	茶叶	坡耕地
4	TD	20	5	23	WS	中	砂壤	黄豆	坡改梯
5	GH	20	5	23	WS	中	砂壤	红薯	坡耕地
6	GS	20	5	23	WS	中	砂壤	桑树	坡耕地
7	GB	20	5	13	W	上	砂壤	板栗	坡耕地
8	GD	20	5	5	W	上	砂壤	黄豆	坡耕地

注:处理代号中第1个大写字母代表工程措施,T为坡改梯,G为坡耕地,第2个大写字母代表植被类型,Y为油茶,C为茶叶,D为黄豆,S为桑树,H为红薯,B为板栗。

1.2 数据来源与研究方法

采用江子河小流域综合观测站2012—2019年坡面径流小区降雨、径流、泥沙监测资料进行分析。试验数据均来自自然降雨事件,2012—2019年4—10月共有147场降雨发生产流,选取这147场降雨事件进行分析;径流量(m³)的测定在径流产生后,利用水尺读取各试验区集流池水深,再根据集流池底面积计算径流总量(m³);每次雨后观测分流桶和沉沙池中的水位,并从经人工搅拌的桶中提取1 000 mL的浑水水样,后将桶中的水放干,提取桶中和沉积于集流槽中的泥沙,经沉淀、过滤、烘干、称重,计算出小区侵蚀量。

使用Excel 2013进行数据整理,采用SPSS 24.0

软件进行统计学分析。采用K均值聚类法^[16]对147场降雨事件进行分类,对降雨类型分类结果作Kruskal-Wallis检验,并对各降雨类型的降雨特征值做两两比较,经Bonferroni校正后确定各雨型降雨特征值的关系,选取降雨量(P)、降雨历时(D)、降雨强度(I)将研究区降雨分为3类:A型降雨(低频率、长历时、大雨量、高雨强)、B型降雨(高频率、短历时、小雨量、低雨强)、C型降雨(较低频率、较长历时、中等雨量、较高雨强);基于Python3.7,scikit-learn库的随机森林^[17]算法得出降雨因子分别对产流产沙影响的特征重要性分数;运用相关系数和回归分析探究产流与产沙之间的关系。制图软件为GraphPad Prism 8.0。

2 结果与分析

2.1 不同农作物措施产流产沙对次降雨的响应

8个径流小区的径流量及土壤流失量随降雨场次变化规律较为一致(图1),总体上红薯措施的产流量及土壤流失量在不同场次降雨中最大;茶叶措施的产流量与土壤流失量在不同场次降雨中最小;桑树措施和板栗措施在不同场次降雨中的径流量和土壤流失量差别不大。由表2可知,在坡耕地上不同农作物措施产流量由大到小依次为红薯>板栗>桑树>黄豆>茶叶,产沙量呈现出红薯>桑树>板栗>黄豆>茶叶;坡改梯的3个径流小区的产流产沙均呈现出黄豆>油茶>茶叶的趋势,且TY仅产生径流,没有产生侵蚀。坡改梯黄豆措施的产流产沙量始终大于坡耕地黄豆措施,茶叶措施的产流产沙则受坡耕地影响更大。红薯产流产沙量较大可能是因为红薯在坡面

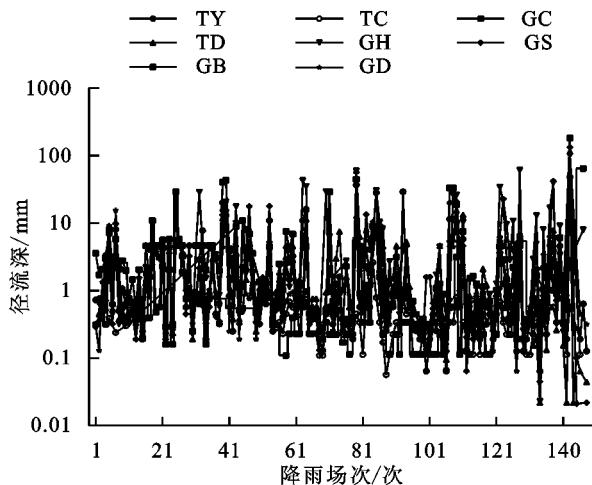


图 1 场次降雨不同农作物措施产流产沙量

表 2 不同农作物措施产流产沙状况

处理	平均 径流深/mm	平均径流 系数	平均含沙量 / (kg · m ⁻³)	平均土壤流失量 / (t · hm ⁻²)
TY	2.67	0.06	1.18	0.05
TC	0.84	0.02	—	—
GC	1.43	0.03	1.11	0.04
TD	3.66	0.09	1.78	0.09
GH	5.43	0.13	10.83	1.11
GS	4.42	0.11	4.15	0.35
GB	5.05	0.11	1.93	0.12
GD	2.76	0.07	1.24	0.05

2.2 不同农作物措施产流产沙对不同雨型的响应

2.2.1 降雨类型分类及特征 不同的农作物措施由于植株地上部分(植被覆盖度、株高等)、地下部分(根形态、根面积等)的差异^[18],以及不同类型降雨的降雨特征差异,往往导致不同农作物措施在不同雨型条件下的产流、产沙特性的差异^[19]。为进一步研究降雨对坡面径流泥沙的影响,使用 K 均值聚类法,选取降雨量(P)、降雨历时(D)、降雨强度(I)3个降雨特征指标对 147 场降雨事件进行分类,共分为 3 类。对

起垄栽培,不利于保水保土,并且根据当地耕作习惯,扦插红薯前要翻挖土壤扰动较深,扦插后小区植被覆盖度小,在这一阶段发生降雨会产生较强的土壤流失;桑树和板栗树根系发达,在非休眠期内树叶密度大,降雨部分被树冠截留蒸发,缓和了降雨对地表的直接冲击;茶叶措施的径流小区产流产沙量最小与种植方式和密植度有关,茶树按水平方向密植对径流和泥沙有一定的拦截作用,且降水通过树冠行成“冠流”渗入土壤,对土壤结构破坏较少,土壤侵蚀程度较轻。通过对不同农作物措施随降雨场次径流量与土壤流失量的变化可知,在同一场降雨中,各径流小区径流量增加,土壤流失量亦增加,且红薯措施小区的径流量和土壤流失量较高,茶叶措施较低,而不同农作物措施在不同场次降雨中径流量差异小,土壤流失量差异较大。

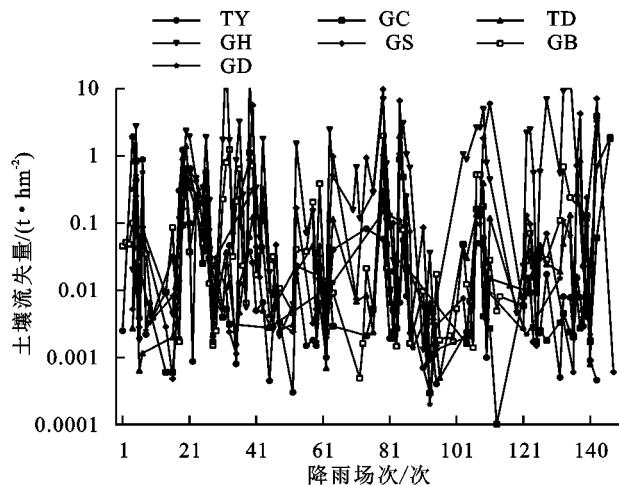


图 2 降雨类型分类结果

降雨类型分类结果作 Kruskal-Wallis 检验可得各雨型整体差异性显著,其中降雨量和降雨历时的置信水平 <0.01 ,降雨强度的置信水平 <0.05 ,并对各降雨类型的降雨特征值做两两比较,通过 Bonferroni 校正确定各雨型降雨特征值的关系。由表 3 可知,A 型降雨的发生频次最少,仅发生 13 次,占比 8.84%;B 型降雨发生频次最高,发生 101 次,占比 68.70%,是研究区的主要雨型;C 型降雨发生 33 次,占比 22.45%。A 型降雨平均降雨历时最长(26.23 h),平均降雨量最多(104.53 mm),降雨强度最大(5.95 mm/h);B 型降雨平均降雨历时、平均降雨量及降雨强度均为最低,分别为 12.02 h, 21.89 mm, 2.80 mm/h;C 型降雨的降雨历时、降雨量均高于 B 型降雨,其降雨强度与 A 型降雨差异较小。因此,A 型降雨具有发生频率低、降雨历时长、降雨量大、降雨强度大的特点;B 型降雨具有发生频率高、降雨历时短、降雨量小、降雨强度小的特点;C 型降雨是发生频率较低、降雨历时较长、降雨量中等、降雨强度较高的降雨类型。

表3 不同雨型的降雨特征

降雨类型	降雨历时/h	降雨量/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	次降雨量/mm	次降雨历时/h	次降雨强度/(mm·h ⁻¹)	频次/次	占总频次的比例/%
A型	26.23a	104.53a	5.95a	81.00~115.00	11.00~49.81	1.80~12.50	13	8.84
B型	12.02b	21.89b	2.80b	6.00~38.00	0.80~35.00	0.50~17.60	101	68.70
C型	17.30a	54.21c	5.00a	39.50~81.00	2.33~43.75	1.00~19.53	33	22.45

注:同列不同字母表示特征值差异性显著($P<0.05$)。

2.2.2 不同类型降雨条件下不同农作物措施的产流产沙特征 不同雨型条件下不同农作物措施的产流产沙规律不同,根据雨型划分各小区累积径流深及累积土壤流失量占总径流深和总土壤流失量的比值(图2)及产流产沙特征(图3)。在坡耕地上,不同雨型引起的坡面产流产沙累积量均呈现出A型>C型>B型的特征,A型降雨产生的径流深占各小区总径流深的38.18%~48.12%,产生的土壤流失量占各小区总土壤流失量的37.29%~64.93%;在坡改梯小区上,油茶措施和黄豆措施的产流产沙特征均为A型>C

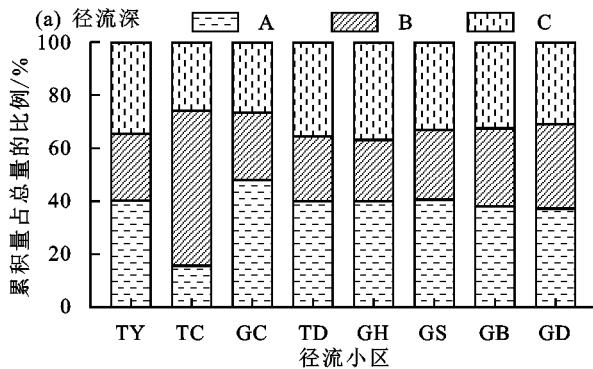


图2 不同降雨类型坡面累积径流深、土壤流失量占总量的比值

各径流小区在不同雨型、不同耕作措施和农作物种植措施下平均径流深和平均土壤流失量存在差异。在坡耕地径流小区,A型降雨和B型降雨引起的产流由大到小排序均呈现出红薯>板栗>桑树>黄豆>茶叶的特征,C型降雨的产流特征为红薯>桑树>板栗>黄豆>茶叶;各农作物措施的土壤流失量变化特征在A型和C型降雨影响下表现为红薯>桑树>板栗>黄豆>茶叶,B型降雨的土壤流失量变化特征为红薯>桑树>板栗>茶叶>黄豆。在坡改梯工程措施上,A型降雨和C型降雨的产流具有油茶>黄豆>茶叶的特征,B型降雨影响下的产流特征为黄豆>油茶>茶叶;A型降雨和B型降雨条件下黄豆措施的土壤流失量较油茶措施大,C型降雨油茶措施土壤流失量较大。

2.3 降雨因子对产流产沙影响的重要性分析

降雨特征是径流和侵蚀发生的关键驱动力^[20],为了进一步探究降雨与不同农作物措施小区产流产沙的关系,选取降雨历时(D)、降雨量(P)、降雨强度(I)、降雨侵蚀力(R)、最大30 min雨强(I_{30})、最大60 min雨强(I_{60})5个降雨因子及降雨量×降雨强度(PI)、降雨量×最大30 min雨强(PI_{30})、降雨量×最大60 min雨强(PI_{60})3

型>B型,在A型降雨影响下,油茶措施的径流深和土壤流失量分别占总量40.33%,51.89%;黄豆措施的产流产沙量分别占总量的40.09%,36.33%;茶叶措施的累积径流深在B型降雨中最大,是A型降雨产生径流的3.7倍,由于茶树植被覆盖度较高,枯枝落叶层较厚又是坡改梯,只产生径流,没有发生产沙。由此可见,A型降雨是引起坡耕地各农作物措施产流产沙的主要降雨类型,C型降雨次之;而在坡改梯小区上,油茶措施和黄豆措施受A型降雨影响较大,B型降雨则是导致坡改梯上茶叶措施产流的主导雨型。

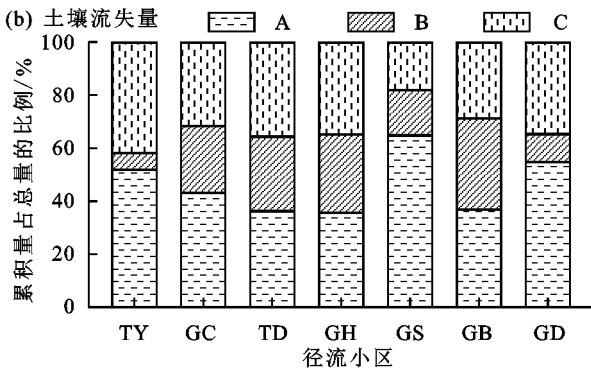


图3 不同降雨类型坡面累积径流深、土壤流失量占总量的比值

个降雨复合因子进行影响重要性评分。分别将各降雨因子及降雨复合因子作为输入变量,以径流深和土壤流失量作为输出变量,参数设置为默认,训练随机森林模型。从图4可以看出,总体上降雨量对产流的影响程度最高,降雨量对产流的重要程度最高可达47%。但茶叶措施的径流深受其他降雨因子影响,降雨历时对TC的影响略高于降雨量,降雨复合因子 PI_{60} 对GC的影响程度最大。不同农作物措施径流小区的土壤流失量受降雨因子影响程度不同,黄豆措施和坡改梯小区的油茶措施受 I_{30} 影响较大,GC、GS的土壤流失量分别受 PI_{60} 和降雨量的影响较大。 I_{60} 对产流产沙的影响程度偏低,均未超过11%。

2.4 不同农作物措施产流与产沙的关系

坡面土壤侵蚀的主要动力来源于降雨和坡面径流^[21],降雨引起坡面产流,与地面形成的薄层水流一起不断地剥蚀和搬运表层土壤^[22],因此,地表径流与土壤侵蚀也有着密切的联系。各农作物措施径流深与土壤流失量的Spearman相关系数分别为TY 0.887 **, GC 0.747 **, TD 0.691 **, GH 0.884 **,

GS 0.834^{**}, GB 0.815^{**}, GD 0.629^{**}, 均在 0.01 水平上显著相关。为进一步探究产流与产沙的关系, 绘制出各径流小区径流深与土壤流失量的散点图(图 5), 可以看出, 不同农作物措施的土壤流失量(Y)与径流深(X)之间存在线性关系, 即产沙量随产流量的增加而增加, 并拟合方程为 $Y=aX+b$ 。油茶措施、桑树措施、板栗措施和坡耕地黄豆措施的 R^2 在 83% 以上, 说明这些农作物措施的产沙 83% 以上是由径流决定, 采取减流措施可以有效抑制侵蚀的发生, 茶叶、红薯和坡改梯黄豆措施的 R^2 在 74% 以上。 a 值反映土壤流失量随径流量增加的速度, 由大到小依次为 GH>GS>GC>GB>TD>GD>TY。坡耕地上, 红薯措施的产沙量随产流量变化速度最快, 黄豆措施变化速率最小; 坡改梯上黄豆措施产沙随产流变化速率大于油茶措施。由此可见, 各农作物措施小区径流量对侵蚀量的影响程度不同, 产流和产沙的关系受工程措施和农作物种类等因素的影响。

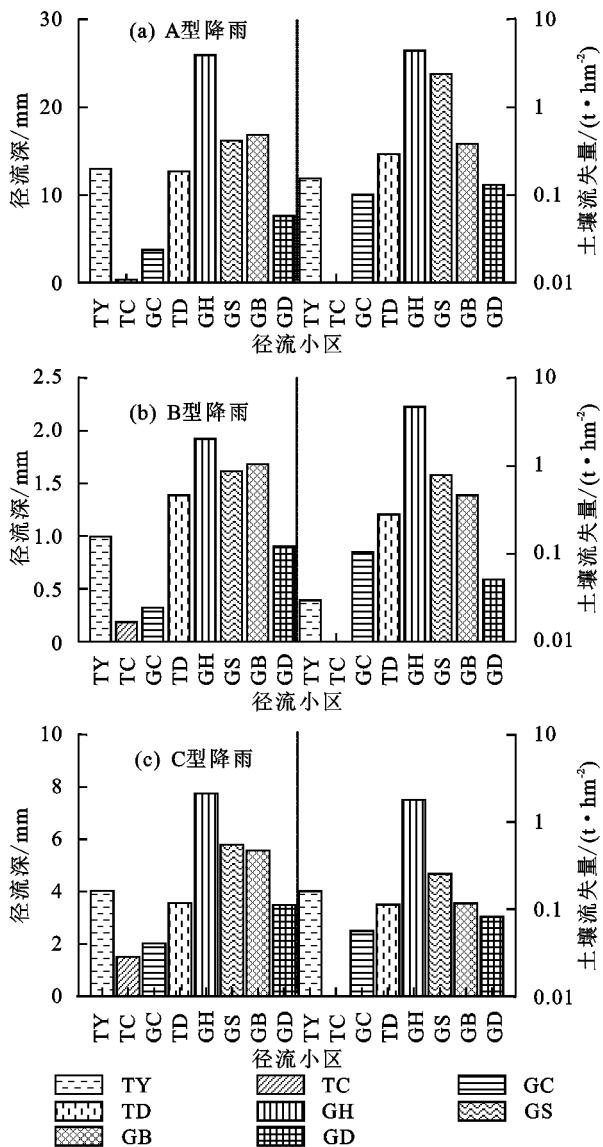


图 3 不同雨型条件下农作物产流产沙特征

3 讨论

通过江子河小流域径流小区的实测数据可以发现, 不同农作物措施坡面径流小区对降雨的响应不同, 水土保持效益也有所差异。总体上不同农作物措施径流量和土壤流失量随场次降雨变化规律较为一致, 土壤流失量差异较大, 这一结果与孙从建等^[19]研究黄土丘陵沟壑区不同农作物措施产流产沙规律及秦伟等^[23]在红壤区研究裸露坡地土壤侵蚀规律得出的结论一致, 但各小区侵蚀发生的程度有很大差别, 这和农作物的叶片形态、冠层结构有很大关联。由于农作物叶片较柔软, 在降雨滴落时易使叶片弯曲变形, 农作物冠层以下的土壤暴露, 从而增加土壤的侵蚀风险, 红薯植株较低, 冠层结构简单, 叶片抗击雨滴冲击能力差; 茶叶、桑树等具有成熟的冠层枝干结构, 对降雨的拦截作用较红薯好。通常高强度、大雨量的降雨类型易引起土壤侵蚀^[24-25], 朱楠等^[26]认为, 在北京延吉县降雨强度大、降雨量大、降雨历时长的降雨类型是坡面径流泥沙多的主要贡献雨型, 本文对降雨进行分类后得出了相同的结论, A 型降雨兼具大雨量和高雨强的特征, 并且长历时直接导致降雨对坡面的持续破坏, 虽发生频率低, 但单次降雨引起的产流产沙量大, 其带来的水土流失较严重。在坡耕地径流小区上, 所有农作物措施的产流产沙量均表现出 A 型>C 型>B 型的特征, 坡改梯小区上, 油茶措施和黄豆措施受 A 型降雨影响较大, B 类降雨则是导致坡改梯上茶叶措施产流的主导雨型。坡耕地小区上红薯措施受植被形态及耕作习惯等影响, 水土保持效益在各类型降雨条件下表现均不理想, A 型降雨多发生在 6—7 月红薯扦插时期, 降雨对松散的土壤冲击大; 桑树措施和板栗措施的产流产沙特征具有相似性; 茶叶措施水土保持能力较强, 但在高频率降雨影响下产流较多; 坡改梯小区黄豆措施产流产沙量较大, 黄豆植株较油茶和茶树低, 茎粗直, 降雨易流向土壤引起侵蚀。降雨因子对产流影响重要性分析的结果与 Liu 等^[9]和肖继兵等^[10]的结论基本一致, 在种植不同农作物的坡面径流小区, 降雨量是产流的主要影响因子, 降雨复合因子 PI 、 PI_{60} 及降雨量、 I_{30} 对坡面径流小区的土壤流失量均有影响, 而 I_{60} 对产流产沙的影响程度偏低。在坡面土壤侵蚀中, 土壤分离和泥沙搬运的主要动力来源于降雨和坡面径流^[21], 土壤侵蚀的发生离不开径流。孙从建等^[19]、朱燕琴等^[22]对地表径流和土壤流失量的研究表明, 地表径流和土壤流失量之间存在线性函数关系, 且模型的决定系数较高, 与本研究的结果相同, 说明径流量对土壤侵蚀起着至关重要的作用, 不同农作物措施土壤流

失量的增速不同,产流产沙的相互关系除降雨外还受

农作物类型、耕作习惯、工程措施等条件的影响。

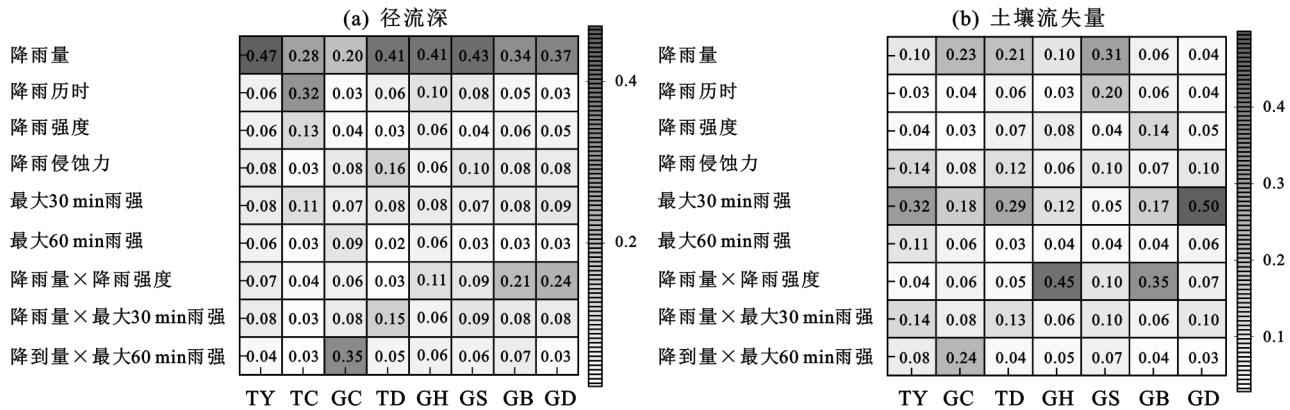


图4 降雨因子对产流产沙影响重要性评分

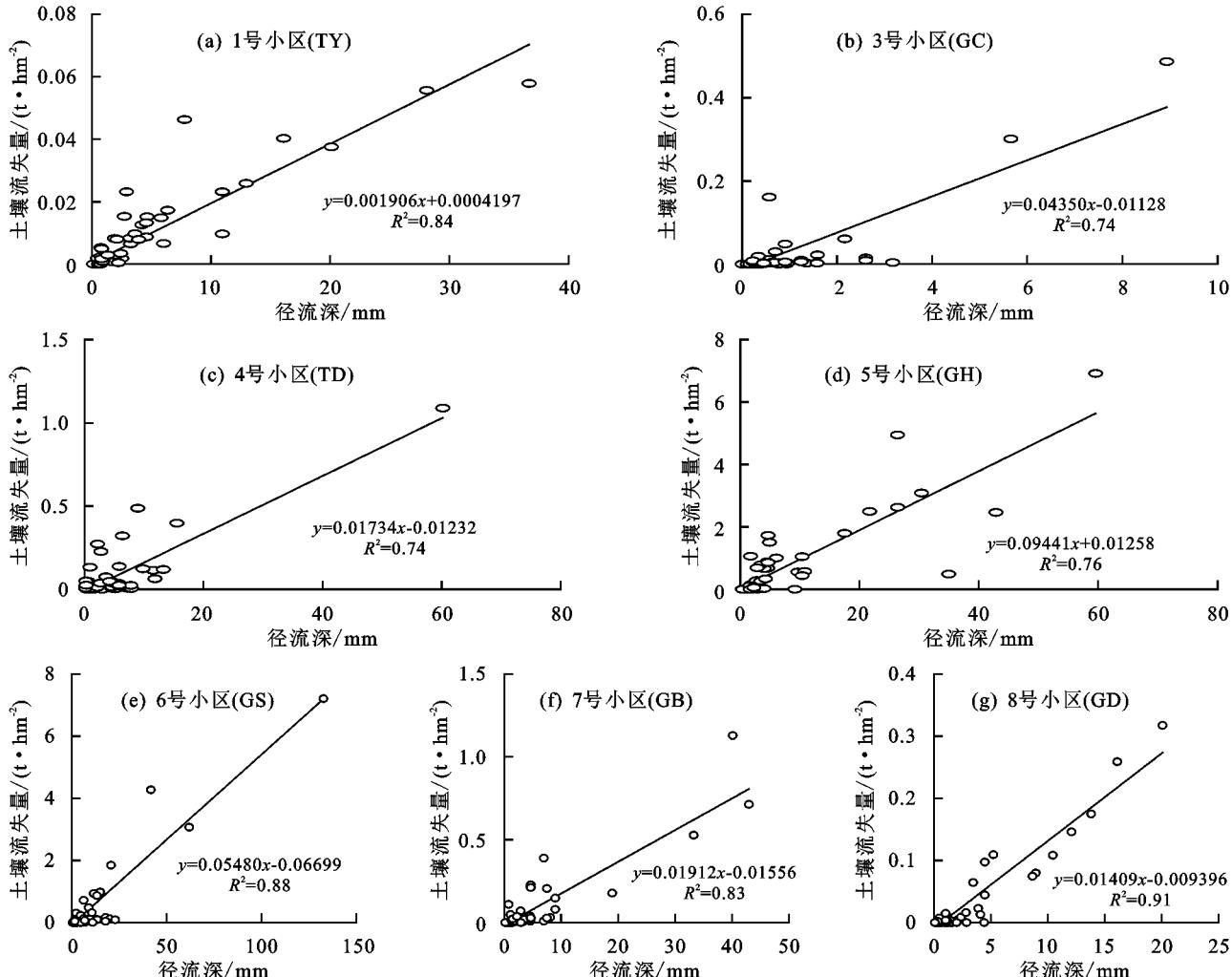


图5 不同农作物措施径流小区径流深与土壤流失量关系

4 结论

(1) 8个径流小区的径流量及土壤流失量随降雨场次变化规律较为一致,在不同场次降雨中径流量差异较小,土壤流失量差异较大。红薯措施产流量及土壤流失量较大,板栗和桑树的产流产沙量较为接近,茶叶措施最小。

(2) 不同农作物措施对降雨类型的响应不同,A型降雨是导致土壤侵蚀发生的主要雨型,C型降雨次

之,B型降雨发生频次高,是研究区的主要雨型。A型降雨对不同农作物措施的产流贡献占38.18%~48.12%,产沙量贡献达35.69%~64.93%,B型降雨是引起茶叶措施产流的主要降雨类型。

(3) 降雨量是影响产流的主要降雨因子,降雨复合因子PI、PI₆₀及降雨量、I₃₀对坡面径流小区的土壤流失量均有影响,I₆₀对产流产沙的影响程度偏低。

(4) 地表径流是土壤侵蚀发生的主要源动力,油

茶措施、红薯措施、茶叶措施、黄豆措施、桑树措施、板栗措施的土壤流失量均同径流深呈显著线性正相关，土壤流失量的增速为红薯>桑树>茶叶>板栗>黄豆>油茶。

本文研究了江子河小流域6种农作物措施小区的侵蚀产沙对降雨的响应，主要考虑降雨、农作物措施，后续研究应考虑植被覆盖度、土壤理化性质、人为因素等对水沙关系的影响，进一步补充资料，更好地预测皖西大别区的水土流失规律，为水土保持和生态环境保护工作提供科学依据。

参考文献：

- [1] 方怒放.小流域降雨—径流—产沙关系及水土保持措施响应[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [2] 邵永昌.安徽大别山区典型流域降雨径流产沙规律研究[D].南京:南京林业大学,2016.
- [3] 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):169-175.
- [4] 梁永哲,夏振尧,牛鹏辉,等.三峡库区小流域降雨入渗和产流产沙特征试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(2):28-32.
- [5] Wu L, Peng M L, Qiao S S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 3480-3487.
- [6] Li Y Y, Feng G, Tewolde H, et al. Soil, biochar, and nitrogen loss to runoff from loess soil amended with biochar under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125318.
- [7] 周晗.黄土区土壤侵蚀与养分流失对降雨因子、坡度的响应[D].太原:山西大学,2019.
- [8] Fang N F, Shi Z H, Li L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. Catena, 2012, 99(12): 1-8.
- [9] Liu P J, Zhao Z L, Xing Y, et al. Grey relational analysis on the effects of rainfall factors on runoff and sediment in the sloping farmland with different plants in the central south of Shandong province[J]. Meteorological and Environmental Research, 2011, 8: 52-55.
- [10] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西地区农耕坡地土壤侵蚀影响因素及相关关系[J].水土保持学报,2015,29(5):13-19.
- [11] 卜建霞,叶功富,尤龙辉,等.福建省长汀县不同土地利用方式降雨产流产沙特征[J].水土保持研究,2017,24(4):1-5.
- [12] Lin Q T, Xu Q, Wu F Q, et al. Effects of wheat in regulating runoff and sediment on different slope gradients and under different rainfall intensities[J]. Catena, 2019, 183: 104196.
- [13] Jaafar W Z W, Islam M R, Hin L S, et al. Assessment of rainfall-induced soil erosion on hillslope: A case study at the Guthrie Corridor Expressway, Malaysia[J]. Sustainable Water Resources Management, 2020, 6(2): 2999-3018.
- [14] 李华林,高华端,杨涛,等.凯掌喀斯特小流域不同植被措施的减沙功能[J].浙江农林大学学报,2017,34(4):687-694.
- [15] 李瑞,李勇,熊康宁,等.黔中喀斯特区典型土地利用方式及耕作措施的水土流失调控效应[J].水土保持通报,2017,37(6):136-140.
- [16] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.
- [17] 朱青,国佳欣,郭熙,等.基于随机森林算法的土壤侵蚀影响因子研究:以赣江上游流域为例[J].水土保持通报,2020,40(2):59-68.
- [18] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.
- [19] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究[J].水土保持研究,2020,27(2):99-103,111.
- [20] Julio C N S, Eunice M A, Pedro H A M, et al. Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region[J]. Water Resources Management, 2017, 31(1): 173-185.
- [21] 袁和第,信忠保,蒋秋玲,等.连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J].水土保持学报,2020,34(4):14-20,30.
- [22] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.
- [23] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [24] Liu Y J, Yang J, Hu J M, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term in-situ observation in the red soil region, Southern China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 457-467.
- [25] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90(3): 53-62.
- [26] 朱楠,张会兰,马超,等.北京延庆县雨型和坡面措施对水沙及污染物的影响[J].生态学杂志,2015,34(12):3509-3517.