

基于不同降雨特征的空闲坡耕地产流产沙特征解析

宋月君, 谢颂华, 廖凯涛

(江西省水利科学院, 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029)

摘要: 阐明空闲坡耕地产流产沙特征, 可为坡耕地水土资源综合治理提供科学依据。以第四纪红黏土发育红壤为研究对象, 采用野外径流小区长期定位试验的方法, 分析天然降雨条件下的空闲坡耕地产流、产沙特征及其对降雨特征的响应机制。结果表明: 空闲坡耕地的土壤侵蚀等级为强烈等级以上, 产流、产沙存在逐年降低趋势, 与年降雨历时存在一定的负相关, 但不显著; 产流、产沙主要集中在4-9月, 可分别占到全年总量的96.73%和99.35%; 小雨雨型几乎无产流、产沙, 暴雨雨型以上降雨的产流、产沙贡献率大, 其贡献率均在80%以上; 降雨量、降雨历时、降雨动能以及降雨侵蚀力对产流的驱动模型呈二次曲线函数关系, 最大30 min雨强的驱动模型则呈幂函数关系; 降雨动能、降雨侵蚀力以及最大30 min雨强对产沙的驱动模型均呈现幂函数关系, 而降雨量和降雨历时的驱动模型分别为一次线性函数和二次曲线函数关系, 产流驱动模型的可决系数均大于产沙驱动模型, 产流与产沙的关系表现为幂函数关系。

关键词: 第四纪红黏土; 空闲坡耕地; 降雨特征; 产流产沙; 驱动模型

中图分类号: TV12; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0016-07

Characteristics of runoff and sediment yield in vacant sloping farmlands under different rainfall conditions

SONG Yuejun, XIE Songhua, LIAO Kaitao

(Jiangxi Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: Clarifying the characteristics of runoff and sediment yield in vacant farmlands on slopes can shed some light on the comprehensive management of water and soil resources of sloping farmlands. Taking the red soil developed from Quaternary red clay as the research object, the characteristics of runoff and sediment yield of a plot of vacant sloping farmland under natural rainfall conditions and the response mechanism to rainfall characteristics were analyzed by long-term field runoff plot positioning test. The results show that the soil erosion of the vacant sloping farmland was above the high erosion level, and the runoff and sediment yield decreased insignificantly year by year, which was negatively related to the duration of annual rainfall. The runoff and sediment yield were mainly concentrated to the period of April – September, accounting for 96.73% and 99.35% of the total annual amount, respectively. There was almost no runoff and sediment yield in small rainfall type, whereas the rainstorm type and above contributed largely to the runoff and sediment yield, with the contribution rate all exceeding 80%. The driving model of rainfall, rainfall duration, rainfall kinetic energy and rainfall erosivity on runoff yield showed quadratic function relationship, and the driving model of maximum 30-minute rainfall intensity was power function relationship. The driving models of rainfall kinetic energy, rainfall erosivity and maximum 30-minute rainfall intensity on sediment yield showed power function relationship, whereas the driving models of rainfall and rainfall duration was linear function and quadratic function relationship, respectively. The determinable coefficients of runoff driving models were all greater than those of sediment driving models,

收稿日期:2020-06-18; 修回日期:2020-12-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407602); 国家自然科学基金项目(41967011); 江西省自然科学基金项目(20181BAB203024); 江西省重点研发计划项目(20171BBG70059); 江西省水利科技计划项目(KT201616)

作者简介:宋月君(1982-),男,山东垦利人,博士,高级工程师,研究方向为土壤侵蚀与防治。

通讯作者:谢颂华(1978-),男,江西赣州人,博士,教授级高级工程师,研究方向为水土流失防治与治理。

and the runoff and sediment yield showed power function relationship.

Key words: Quaternary red clay; vacant sloping farmland; rainfall characteristics; runoff and sediment yield; driving model

1 研究背景

土壤侵蚀是全球范围内的环境问题,据《2019 年中国水土保持公报》数据显示,我国现有水土流失面积 $271.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中水力侵蚀面积 $113.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,占到了国土总面积的 11.82%。全国水土流失面积中,坡耕地占 6.7%,年均土壤侵蚀量近 $15 \times 10^8 \text{ t}$,是水土流失的主要策源地^[1-4]。南方红壤区坡耕地面积占该区域旱地面积的 70% 以上^[5],其分布面积广,开发利用程度高,是我国重要的名、优、特农产品生产基地。然而在自然以及人为因素的双重影响下,极易造成严重的水土流失^[6]。南方红壤区坡耕地土壤侵蚀问题受到国内外学者越来越多的关注^[4,7]。目前,关于坡耕地水土保持防治的研究,主要集中在生物、工程、耕作以及化学措施等方面^[7-14]。空闲裸露坡耕地是坡耕地综合开发的物质基础,摸清其土壤侵蚀规律以及机理可为坡耕地综合整治提供相关依据,当前研究发现,红砂岩发育的裸露坡耕地的径流系数可达 60% 以上,短历时、雨强大的降雨类型产流、产沙量可占总量的 50% 以上^[11];通过对红壤区裸露坡地不同侵蚀性降雨的产沙规律以及贡献率分析,可实现典型裸露坡地水土流失防御设计暴雨特征值的推算^[12]。相关学者虽对裸露坡地的产流、产沙做过相关研究,但是其研究的重点仍主要在与水土保持措施的效益对比以及侵蚀性降雨估算方面,而对于其自身的产流、产沙规律以及影响因子分析还有待进一步深入探讨。

鉴于此,本文结合南方红壤区坡耕地农作物开发的地形地貌特征,以第四纪红黏土发育红壤为研究对象,采用野外径流小区长期定位试验的方法,分析了天然降雨条件下的空闲坡耕地产流、产沙特征及其对降雨特征的响应机制,可为坡耕地土壤侵蚀估算以及水土保持综合防治提供依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于江西水土保持生态科技园内,该园区总面积 80 hm^2 。位于 $115^\circ 42' 38'' \sim 115^\circ 43' 06'' \text{ E}$ 和 $29^\circ 16' 37'' \sim 29^\circ 17' 40'' \text{ N}$ 之间,属亚热带季风气候区,气候温和,四季分明,雨量充沛,光照充足,且雨热基本同期。多年平均降雨量为 $1\,350.9 \text{ mm}$,因受季风影响而在季节分配上极不均匀,具有明显的干

季和湿季。最大年降雨量为 $1\,807.7 \text{ mm}$,最小年降雨量为 865.6 mm ^[13-15]。地貌类型为浅丘岗地,海拔在 $30 \sim 100 \text{ m}$ 之间,坡度多为 $5^\circ \sim 25^\circ$ 。土壤为发育于母质主要是泥质岩类的风化物、第四纪红黏土的红壤^[16]。

2.2 试验设计

试验小区位于江西水土保持生态科技园一期,修建于 2011 年。园区内共设计 3 个 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽)的坡耕地裸露标准径流小区,小区水平投影面积为 100 m^2 ,坡度均为 10° ,小区周边设有围埂,围埂埋深 45 cm ,出露地表 30 cm ,小区下面配备有矩形集水槽,接纳小区径流及泥沙,并引入到径流桶内。径流桶内配有水位尺以及雷达水位计用以测定集流桶水位。径流、泥沙样品的试验观测均按照《水土保持试验规范》(SL 419—2007)进行。在小区周围设置自记雨量计记录降雨数据。试验观测期为 2013 年 1 月—2016 年 12 月。

2.3 数据获取与分析

(1)降雨数据:主要通过江西水土保持生态科技园气象观测场内安装的自记雨量计进行测定,间隔大于 6 h 的降雨为 1 次降雨事件^[18],降雨数据主要包括降雨量(P ,单位: mm)、平均雨强(I_{ave} ,单位: mm/h)、最大 30 min 雨强(I_{30} ,单位: mm/h)、降雨动能(E ,单位: MJ/hm^2)、降雨侵蚀力(EI_{30} ,单位: $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$)以及降雨历时(T ,单位: h)等^[12]。降雨动能(E)主要采用 Foster(1981)^[19]提出的降雨动能公式进行计算。

(2)产流数据:主要用径流深(F)来表示,具体换算公式如下^[18]:

$$F = V \cdot 1000 / S \quad (1)$$

式中: F 为径流深, mm ; V 为产流体积, m^3 ; S 为试验小区面积, m^2 。

(3)产沙数据:主要用单位面积侵蚀量(Es)来表示,具体换算公式如下^[18]:

$$Es = V \cdot C \cdot 1000 / S \quad (2)$$

式中: Es 为单位面积侵蚀量, t/km^2 ; C 为采集径流泥沙浓度, kg/m^3 。

3 结果与分析

3.1 降雨分布特征

图 1 为研究区观测期内年际降雨及多年月际降

雨特征,表 1 为研究区观测期内年降雨特征值各月平均分配比例。分析图 1(a)可知,研究区 2013 – 2016 年多年平均降雨量为 1 664.7 mm,其中 2015 年降雨量最大,为 1 889.7 mm, 2013 年降雨量最小,为 1 336.4 mm,年际降雨量变异系数为0.145 9;年内降雨量充沛,多年平均降雨场次为 131.5 次。由图 1(b)和表 1 可以看出,观测期多年月平均降雨量主要集中在 4 – 7 月份,占多年平均降雨量的 60.97%,其中以 6 月份最大,为 310.28 mm,1 月份最小,为 31.23 mm,年内降雨量分布呈现弱双峰型降雨趋势;从各月的降雨场次上来看,主要集中在 3 – 7 月份,与降雨量的集中月份基本一致,其中降雨次数以 3 月份和 5 月份的最多,综合降雨量以及降雨场次分布特征可见,每年的 4 – 7 月份,为坡耕地坡面土壤侵蚀主要发生时段。

气象部门所采用的单场降雨等级分类标准(如表 2 所示)已在大量文献资料中被引用^[20-21],表 3 为根据该标准分析得到的各年不同雨型降雨场次特征表。如表 3 所示,观测期内共有小雨 287 场次,中雨 121 场次,大雨 56 场次,暴雨 47 场次,大暴雨 13 场次,无特大暴雨。然而小雨雨型降雨量仅占到了总降雨量

的 6.73%,大雨及其以上的雨型降雨量则占到了总降雨量的 77.52%,其中,60 场暴雨和大暴雨雨型的降雨量就占到了总降雨量的 58.40%。可见从整个年降雨周期来看,大雨以上的降雨对坡面土壤侵蚀的贡献率较大,特别是暴雨以上的雨型。图 2 为研究区观测期内不同雨型各月份平均降雨量分配图,从图 2 可以看到,暴雨以上雨型主要发生在 5 – 9 月份,并主要表现为短时强降雨型以及长时段连绵降雨型为主。

3.2 产流、产沙特征

3.2.1 年际产流、产沙特征 图 3 为研究区观测期内各年小区径流深和侵蚀模数,由图 3 可以看出,空闲坡耕地试验小区年径流深主要在 218.72 ~ 382.36 mm 之间,变异系数为 0.271 7,平均径流深为 279.28 mm;侵蚀模数在 3 139.85 ~ 10 216.49 t/(km² · a)之间,变异系数为 0.535 8,波动性较大,平均年土壤侵蚀模数为 6 717.38 t/(km² · a),为土壤侵蚀强烈等级,并存在逐年降低的趋势,这可能与裸露坡面经过多年的降雨侵蚀,其坡面表层土壤疏松层逐渐被流失殆尽,加之降雨造成了坡面微地貌变化,经过多场次降雨,其坡面地表糙度发生了改变,同时受到各年降雨特征的影响所致。

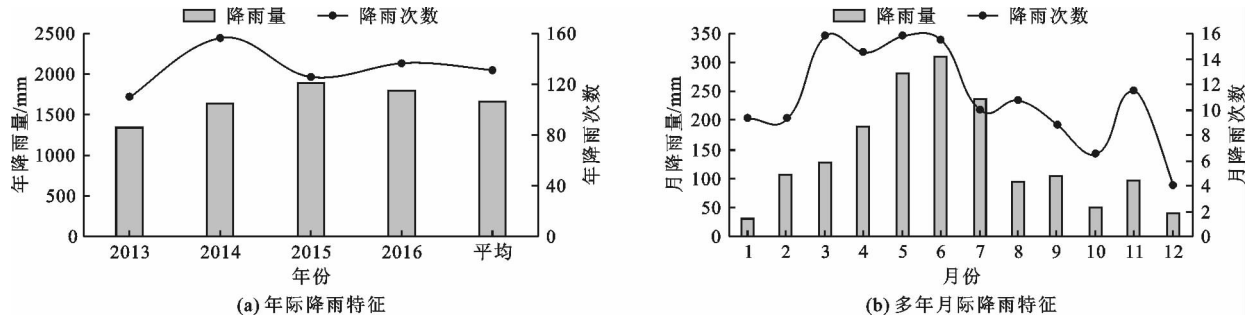


图 1 研究区观测期内年际降雨及多年月际降雨特征

表 1 研究区观测期内年降雨特征值各月平均分配比例

项目	各月平均分配比例/%											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
降雨量占全年降雨量比例	1.88	6.44	7.63	11.30	16.85	18.64	14.18	5.62	6.19	2.94	5.88	2.44
降雨次数占全年降雨次数比例	7.03	7.03	11.98	11.03	11.98	11.79	7.60	8.17	6.65	4.94	8.75	3.04

表 2 降雨等级划分标准

	mm					
级别	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
12 h 降雨量	小于 5	5 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 70	70 ~ 140	大于 140
24 h 降雨量	小于 10	10 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	大于 200

表 3 研究区观测期内各年不同雨型降雨场次特征表

年份	小雨		中雨		大雨		暴雨		大暴雨	
	场次	降雨量/ mm	场次	降雨量/ mm	场次	降雨量/ mm	场次	降雨量/ mm	场次	降雨量/ mm
2013 年	58	93.7	33	337.9	9	209.5	6	328.4	4	366.9
2014 年	85	122.6	41	276.5	22	492	9	380.2	2	264.0
2015 年	67	109.6	24	189.7	12	295.5	19	944.6	4	350.3
2016 年	77	113.7	23	224.5	13	251.4	13	608.7	3	570.5
合计	287	439.6	121	1028.6	56	1248.4	47	2261.9	13	1551.7

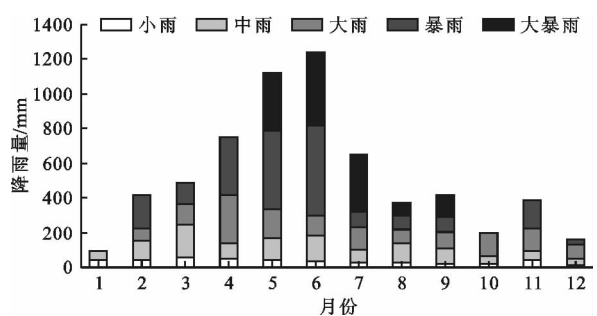


图 2 研究区观测期内不同雨型各月份平均降雨量分配

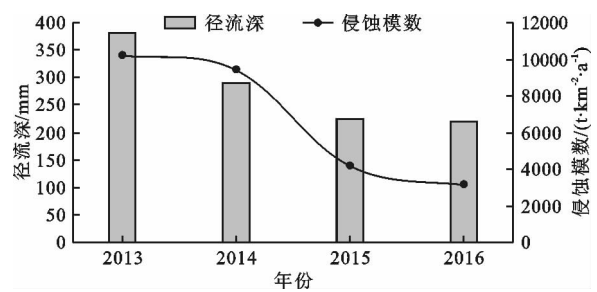


图 3 研究区观测期内各年小区径流深和侵蚀模数

通过相关性分析,年降雨历时与年径流深及土壤侵蚀模数的相关系数 r 分别为 -0.9011 和 -0.8997 , 两者之间虽然存在一定的负相关性,但相关性均不显著($P > 0.05$),其中,径流深与土壤侵蚀模数的相关系数 r 为 0.9050 ,两者存在正相关,但相关性也不显著($P > 0.05$)。

3.2.2 产流、产沙特征 图 4 为研究区观测期内平均各月径流深和单位面积侵蚀量分布图,由图 4 可以看到,径流深以及单位面积侵蚀量主要集中在汛期(4-9 月份),其产生的径流深和单位面积侵蚀量分别占到了全年的 96.73% 和 99.35%,结合图 2 中的不同雨型在各月份的分布情况来看,在年初的 1-2 月和年末的 10-12 月,虽然月内有一定的降雨量,但是主要以小雨型为主,以至于整个月内未产流、产沙,而汛期内短时强降雨对于坡面的土壤侵蚀贡献率较为突出。通过年内月时间尺度的降雨特征

与径流深和单位面积侵蚀量的关系分析来看,月尺度内的径流深和单位面积侵蚀量不仅仅受到降雨量的影响,其月内的雨型组成以及降雨历时特征对其影响更为突出。

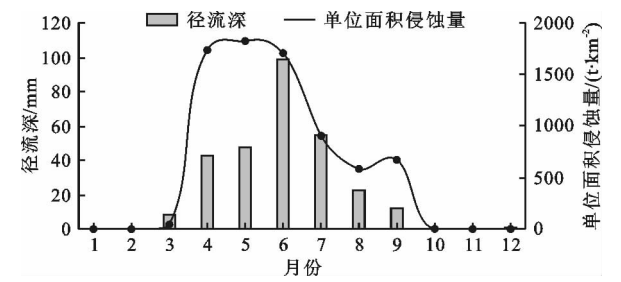


图 4 研究区观测期内平均各月径流深和单位面积侵蚀量分布

3.2.3 不同雨型坡面产流、产沙特征 图 5 为研究区观测期内各年不同雨型径流深和单位面积侵蚀量。由图 5 可以看出,各年份小雨型几乎均无产流、产沙,暴雨及其以上雨型的径流深和单位面积侵蚀量分别占到了全年总量的 74.06% ~ 95.09% 和 50.00% ~ 95.31%,暴雨及其以上的雨型对于坡面产流、产沙的贡献率极大,其产流、产沙的多年平均贡献率分别为 88.43% 和 82.99%。

3.3 基于单场降雨的坡面产流、产沙驱动分析

为了更好地诠释坡面产流、产沙的主要驱动机制,选取 94 场典型侵蚀性降雨数据,主要从降雨历时(T)、降雨量(P)、平均雨强(I_{ave})、降雨侵蚀力(EI_{30})、降雨动能(E)以及最大 30 min 雨强(I_{30})等降雨特征角度出发,开展不同降雨特征对坡面产流、产沙的驱动分析。表 4 为径流深以及单位面积侵蚀量与降雨特性因子的相关系数表。

由表 4 可以看到,在产流方面,以降雨动能(E)的相关系数最高,其次是降雨量(P)和降雨侵蚀力(EI_{30}),再者是降雨历时(T)和最大 30 min 雨强(I_{30}),平均雨强(I_{ave})无显著性相关;在产沙方面,以降雨动能(E)相关性最大,其次是降雨量(P)和降雨侵蚀力(EI_{30}),再者是最大 30 min 雨强和降雨

历时(T),平均雨强(I_{ave}) 相关系数最小,且无显著性。通过对比产流、产沙方面各降雨特征因子的相关系数发现,产流方面的相关系数普遍大于产沙方面,可见降雨的坡面产流驱动要大于产沙驱动关系,坡面产沙是在降雨溅蚀以及坡面径流联合驱动作用下发生的,这也是产沙相关系数较低的主要原因。

3.3.1 单场降雨坡面产流的降雨特征因子驱动模型 主要从呈极显著性相关的降雨量、降雨历时、最大 30 min 雨强、降雨动能以及降雨侵蚀力角度出发,进行单场降雨坡面产流驱动模型的建立分析。图 6 为不同降雨特征与产流的关系驱动模型图。

表 4 径流深以及单位面积侵蚀量与降雨特性因子的相关系数

降雨特性因子	径流深	单位面积侵蚀量
降雨历时(T)	0.51 **	0.21 *
降雨量(P)	0.86 **	0.52 **
平均雨强(I_{ave})	0.07	0.19
降雨侵蚀力(EI_{30})	0.81 **	0.51 **
降雨动能(E)	0.89 **	0.56 **
最大 30 min 雨强(I_{30})	0.41 **	0.35 **

注:“**”表示 $P < 0.01$,极显著相关;“*”表示 $P < 0.05$,显著相关。

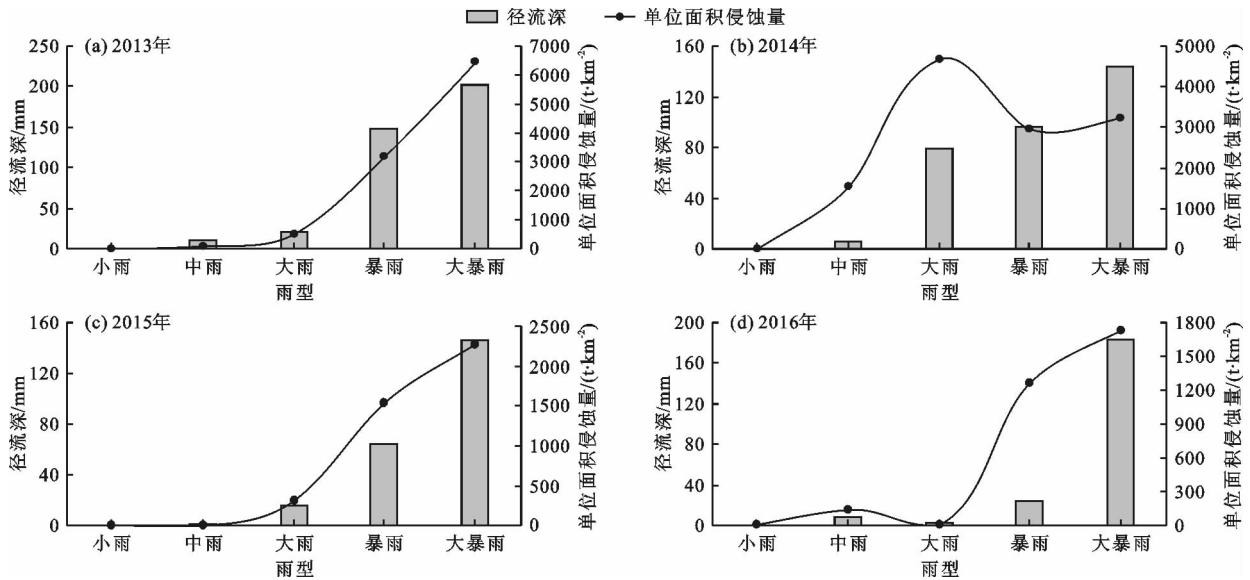


图 5 研究区观测期内各年不同雨型径流深和单位面积侵蚀量

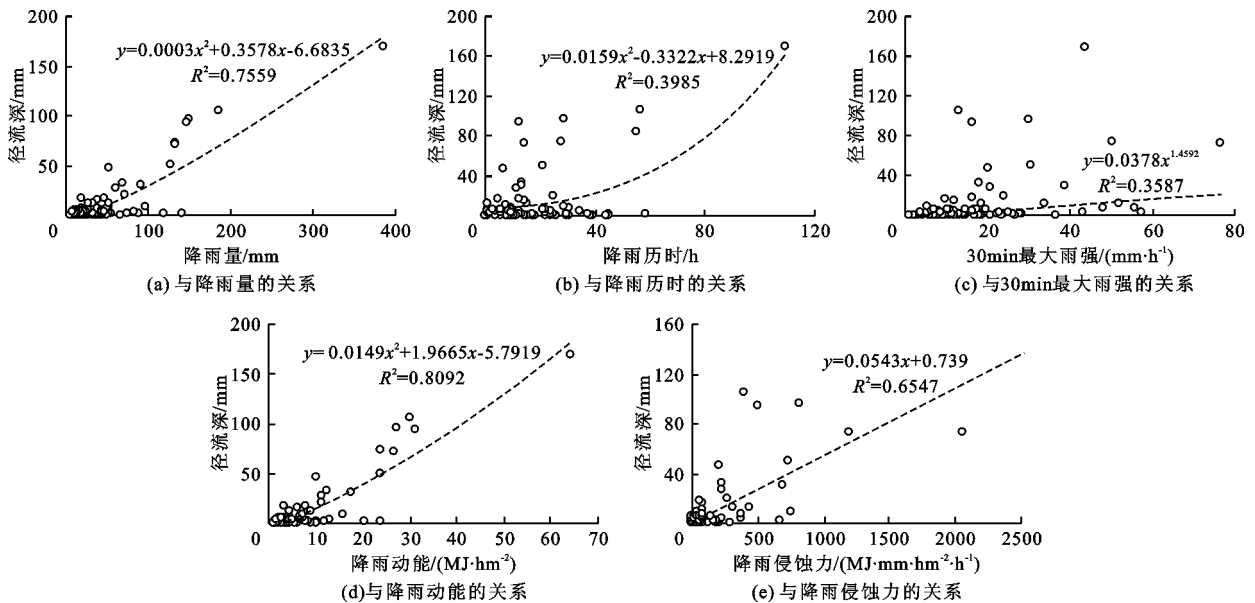


图 6 不同降雨特征与产流的关系驱动模型

由图 6 可见,降雨量、降雨历时及降雨动能的坡面产流驱动模型均呈二次曲线函数关系;降雨侵蚀

力的坡面产流驱动模型呈直线函数关系;最大 30 min 雨强的坡面产流驱动模型呈幂函数关系,统计分析中的 P 值均小于 0.05,表明各因素与坡面产流存在显著的线性关联,完全满足统计学范畴。通过对其可决系数的对比可以发现,降雨动能的可决系数最大,为 0.809 2,其次是降雨量和降雨侵蚀力,可决系数分别为 0.755 9 和 0.654 7,再次是降雨历时,可决系数为 0.398 5,降雨动能对于坡面产流贡献最为突出。

3.3.2 单场降雨坡面产沙的降雨特征因子驱动模型 图 7 为不同降雨特征与产沙的关系驱动模型图。由图 7 可见,降雨量的坡面产沙驱动模型呈较弱的一次线性函数关系;降雨历时的坡面产沙驱动模型呈较弱的二次曲线函数关系;最大 30 min 雨强、降雨动能以及降雨侵蚀力的坡面产沙驱动模型均为幂函数关系,其可决系数分别为 0.363 7、0.317 8 和 0.417 4,可见降雨侵蚀力对坡面产沙的趋势更加一致。

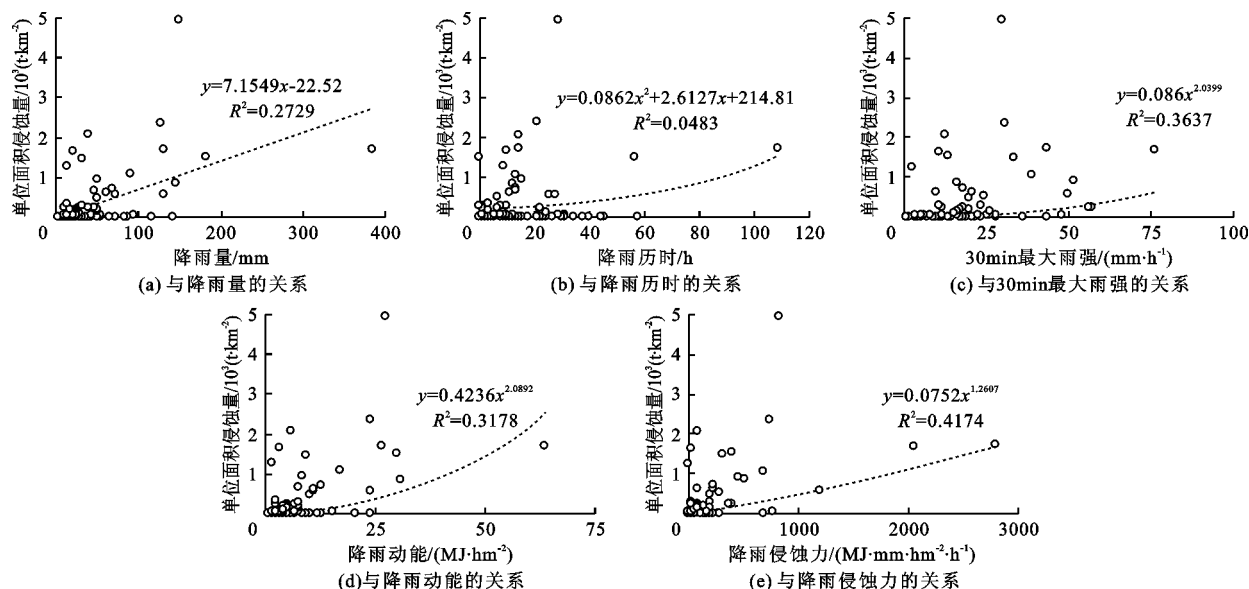


图7 不同降雨特征与产沙的关系驱动模型

3.3.3 单场降雨坡面产流与产沙关系 图 8 为产流与产沙的关系驱动模型图。由图 8 可以看出,产流量(径流深)与产沙量(单位面积侵蚀量)呈幂函数关系,其可决系数为 0.702 5。与降雨特征因子相比,地表径流对坡面产沙的贡献率最大。

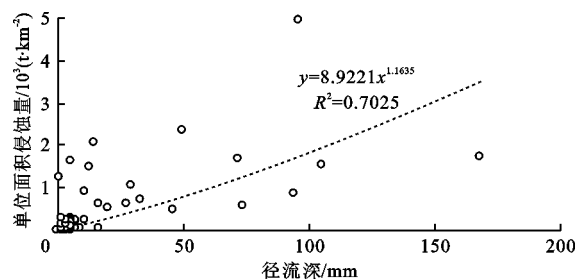


图8 产流与产沙的关系驱动模型

4 结论

(1)空闲坡耕地的土壤侵蚀等级为强烈等级以上,土壤侵蚀等级存在逐年降低的趋势,与年降雨历时存在一定的负相关,但相关性不显著;产流、产沙主要集中在每年 4-9 月,可分别占到全年总量的

96.73% 和 99.35%;小雨型几乎无产流、产沙,暴雨雨型及其以上降雨对产流、产沙的贡献率大,贡献率均超过 80%。

(2)搭建了空闲坡耕地产流、产沙的降雨特征因子驱动模型,其中,降雨量、降雨历时及降雨动能对坡面产流的驱动模型呈二次曲线函数关系,降雨侵蚀力对坡面产流的驱动模型呈直线函数关系,最大 30 min 雨强的驱动模型则呈幂函数关系;降雨动能、降雨侵蚀力以及最大 30 min 雨强的产沙驱动模型均呈现幂函数关系,而降雨量和降雨历时的产沙驱动模型分别为一次线性函数和二次曲线函数关系。

(3)空闲坡耕地的产流驱动模型的可决系数均大于产沙驱动模型,产流与产沙的关系表现为幂函数关系,地表径流对坡面的冲刷以及泥沙的搬运作用不容忽视,这也为后期的水土保持防治措施提供了相应的技术参考,即需注重坡面产流过程的调控与阻断降雨打击地表的有效集成,从而调控坡面的水土流失,这样才能最大限度地减少坡面土壤的侵蚀程度及其带来的危害。

参考文献:

- [1] 魏永霞, 张忠学, 赵雨森. 坡耕地水土保持理论与技术研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [2] 马 璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [3] 宋月君, 黄炎和, 杨 洁, 等. 南方典型土壤坡面产流产沙过程对 PAM 的响应[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 279-287.
- [4] 施 政. 坡耕地坡面土壤侵蚀动态监测技术研究进展[J]. 科技创新导报, 2018, 15(35): 202-204+256.
- [5] 袁久芹, 梁 音, 曹龙熹. 红壤坡地香根草植物篱产流产沙过程模拟[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(4): 14-20.
- [6] 袁久芹, 梁 音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.
- [7] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 41-45.
- [9] 夏海江, 杜尧东. 聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 14-17.
- [10] 许 峰, 张光远. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失影响[J]. 水土保持学报, 1999(2): 23-29.
- [11] 段 剑, 王凌云, 肖胜生. 红砂岩侵蚀区典型水土流失治理模式减流减沙效应[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 230-236.
- [12] 涂安国, 谢颂华, 李 英, 等. 长期野外监测红壤裸露坡地侵蚀性降雨分布及产沙分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 137-143.
- [13] 房焕英, 谢颂华, 黄鹏飞, 等. 江西省生产建设项目弃土弃渣土壤侵蚀定量研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 131-137.
- [14] 张靖宇, 杨 洁, 王昭艳, 等. 红壤丘陵区不同类型梯田产流产沙特征研究[J]. 人民长江, 2010, 41(14): 99-103.
- [15] 张靖宇. 红壤丘陵区不同类型梯田水土保持效益研究[D]. 江西农业大学, 2011.
- [16] 汪邦稳, 方少文, 沈 乐, 等. 赣北红壤区坡面水系工程截流拦沙控污效应分析[J]. 人民长江, 2013, 44(5): 95-99.
- [17] 郑海金. 赣北红壤坡面水土保持措施保水减沙作用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [18] 宋月君, 黄炎和, 杨 洁, 等. 赣中第四纪红壤区马尾松林下水土流失特征及防治成效分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 119-125.
- [19] FOSTER G R, MCCOOL D K, RENARD K G, et al. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1981, 36(6): 355-359.
- [20] 谢颂华, 曾建玲, 杨 洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 81-86.
- [21] 胡建民, 宋月君, 杨 洁, 等. 南方红壤区马尾松林下水土流失与降雨量关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 82-87.

