

大别山区不同降雨和植被条件下梯地产流产沙特征

江雯¹, 汪军红², 孙鹏^{1,3}, 汪文², 乔欣瑞¹, 简宁杰¹, 韩乐薇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 霍山 237266; 3.北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:大别山区是国家水土保持重点建设工程的主要区域之一,为探究不同时间尺度下不同降雨等级和植被类型对产流产沙影响,基于霍山县水土保持试验站2011—2018年的试验小区自然降雨及产流产沙量观测数据进行了定量分析。结果表明:(1)在次降雨事件的时间序列分析中,2011—2018年次降雨存在雨量更大、雨势更急的趋势,茶叶相对于黄豆等其他植被,具有显著的保沙能力,且其减沙效益高于减流效益,8年的黄豆种植使得土壤侵蚀愈发严重。(2)在99%的置信水平下,黄豆的产沙风险是茶叶的21.29倍。(3)随着降雨等级提升,产沙风险也逐步提升,其中暴雨和大暴雨产沙风险较其他降雨等级显著提升。(4)茶叶出现产沙与瞬时雨强相关,雨强对产沙的重要性高于雨量,黄豆多由产流而导致产沙,雨量对产沙的重要性高于雨强,各因子对茶叶的评价平均精度高于黄豆。(5)黄豆处于三叶期—开花期和结荚期—成熟期时具有较好的保水保沙效益,而三叶期—开花期产流产沙峰值主要由于高水平的雨量雨强导致。研究结果较好地显示了茶叶和黄豆在不同降雨及生长状态下的产流产沙特征及影响因素,可为大别山地区以减少水土流失为目的的植被种植与管护提供科学依据。

关键词:产流产沙; 植被类型; 降雨等级; 生长期; 大别山区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0028-08

Study on Runoff and Sediment Characteristics of Terrace Land Under Different Rainfall and Vegetation Conditions in Dabie Mountain

JIANG Wen¹, WANG Junhong², SUN Peng^{1,3}, WANG Wen²,

QIAO Xinrui¹, JIAN Ningjie¹, HAN Lewei¹

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

2.Huoshan Soil and Water Conservation Experimental Station, Huoshan, Anhui 237266, China; 3.Key Laboratory of Environmental Evolution and Natural Disasters, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Dabie Mountain area is one of regions of the national soil and water conservation key construction projects. In order to explore the effects of different rainfall grades and vegetation types on runoff and sediment yield under different time scales, a quantitative analysis was carried out based on the observed data of natural rainfall, runoff and sediment yield from 2011 to 2018 in Huoshan Soil and Water Conservation Experimental Station. The results are as follows. (1) In the time series analysis of the rainfall events, the rainfall in 2011—2018 had a trend of heavier rainfall and more rapid rainfall. Compared with other vegetation such as soybeans, tea trees had significant sediment retention capabilities. Moreover, the benefits of sediment reduction were higher than the benefits of runoff reduction. Eight years of soybean planting had made soil erosion worse. (2) At the 99% confidence level, the sediment production risk of soybeans was 21.29 times that of tea plants. (3) As the rainfall level increased, the risk of sediment production gradually increased. Among them, the risk of torrential rain and heavy downpour has increased significantly compared with other rainfall levels. (4) The occurrence of sediment production in tea plants was related to the instantaneous rainfall intensity, and the rain intensity was more important for sediment generation than the amount of rainfall. Sediment generation was mostly caused by runoff in soybean fields, and the amount of rainfall was more important for sediment than rainfall intensity. The average accuracy of tea plant evaluation was higher than that of soybean.

收稿日期:2020-12-22

修回日期:2021-01-27

资助项目:国家重点研发计划项目“不同温升情景下区域气象灾害风险评估”(2019YFA0606900);安徽高校协同创新项目(GXXT2019047);国家自然科学基金项目(41601023,41771536);安徽省自然科学基金(1808085QD117)

第一作者:江雯(1999—),女,安徽黄山人,硕士研究生,主要从事水土流失研究方面工作。E-mail:344542889@qq.com

通信作者:孙鹏(1986—),男,山东青岛人,教授、博士生导师,主要从事于气象水文学和水土保持方面研究工作。E-mail:sun68peng@163.com

(5) Soybeans had better water and sediment retention benefits when they were in the phases of three-leaf period-flowering period and pod-bearing period-maturity period, while the peak of runoff and sediment yield during the three-leaf period-flowering period was mainly caused by heavy rainfall. These results show the characteristics and influencing factors of runoff and sediment production of tea and soybeans under different rainfall levels and growth conditions, and can provide a scientific basis for vegetation planting and protection in Ta-pieh mountain area for the purpose of reducing soil and water losses.

Keywords: runoff and sediment yield; vegetation types; rainfall level; growth period; Dabie Mountain Region

水土资源作为人类生存发展中最重要的自然资源,其安全已成当今最受关注的环境问题之一^[1]。水土流失是我国重大的环境问题^[2],不仅阻碍人类发展、加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,也是面源污染发生的重要形式和运输载体,是生态环境进一步恶化的主要助推力^[3]。大别山集中连片特困区是集老区、山区和欠发达地区于一体的典型区域,面临着脆弱生态环境和经济贫困的双重压力^[4],且是国家水土保持重点建设工程的主要区域之一^[5]。据统计,当前大别山区的水土流失总面积达 9 520 km²,水土流失引起土方流失总量为 2 726.5 万 t,平均每年侵蚀的模数达到 2 864 t/km²^[6]。

国内大量学者针对水土流失的研究表明,植被覆盖的增加是减少水土流失的主要因素^[7-8],植被覆盖有效降低雨滴能量来减少冲刷作用^[9],且根系的物理固结作用亦增强了土壤抗侵蚀能力^[10-11],人工植被的覆盖是控制和减少水土流失的重要途径^[12-13]。不同类型和结构形态植被的水土保持功能不一,而多层次、多类型植被比单一植被或不覆盖植被更具水土保持优势。因此,探讨不同植被类型的产流产沙特征,寻找最适宜的植被类型与种植模式^[14-15],对保护生态环境、提高经济效益等具有重要理论与现实意义。

除植被外,降雨也是水土流失的关键因素^[16]。降雨模式特征诸如历时、雨量、雨强等决定了地表的水文过程^[17]。杜轶等^[18]发现在汾河上游地区,随着雨量的增加,植被小区的径流调控率和泥沙调控率均呈现下降趋势,而当雨量相近时,随着雨强增加,径流调控率和泥沙调控率下降明显。Peng 等^[19]发现在喀斯特石漠化地区,仅在降雨强度大于 30 mm/h 时才会发生地表径流,地下径流在所有降雨强度条件下都会发生。Duan 等^[20]采用 K-means 法对自然降雨事件进行聚类分析,发现低强度和长历时的降雨能充分产生地下径流,从而使得表层土壤免受侵蚀。黄萱^[21]通过聚类分析,发现暴雨时空格局引起的径流和泥沙差异很大,李瑞等^[22]在 4 a 连续观测的基础上,分析泮洋水小流域月际产流无显著差异,但 6 月的产沙显著高于 1 月、2 月、3 月、12 月,其他月份间的产沙无显著差异;受年度降雨影响,产流产沙量也

发生较大变化^[23-24]。这些研究综合分析了各降雨因子及不同降雨类型水土流失之间的变化关系,揭示了研究区的产流产沙的主导降雨因子及降雨类型。

现有研究主要从最终产流产沙量来讨论不同类型降雨或降雨因子之间的差异,基于试验区多年连续观测数据的在不同降雨等级下的不同作物水土保持效应研究相对匮乏,且鲜有关关注植物不同生长阶段对产流产沙的影响^[21]。据此,本文选取两种当地主要的经济和粮食作物即茶叶和黄豆,基于霍山县水土保持试验站 2011—2018 年观测资料,探讨逐降雨场次、年份、季节、月份等时间尺度下两种植被的产流产沙特征,定量比较降雨等级和植被类型对产沙的贡献;并运用 ROC 曲线来度量产流量和各降雨因子对最终产沙的重要性;此外,根据当地黄豆种植规律,定量探讨其不同生长阶段的产流产沙特征。以期为安徽大别山区作物种植保障经济收益的同时保障生态效益的目标提供理论支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省六安市的江子河小流域,地处大别山腹地、江淮分水岭北坡,属淮河流域淠河水系,水土流失严重,以水力侵蚀为主,水土流失面积共计 3.43 km²,占小流域总面积的 36.99%。此为亚热带向温带、湿润带向半湿润带的过渡地段,降雨充沛且年际变化大,是安徽大别山区暴雨中心,平均海拔 775 m,平均无霜期 240 d,年均气温 14.8℃,年均蒸发量 1 240.05 mm,年均降雨量 1 423.3 mm,土壤以砂壤为主,土层厚度空间变异性大(图 1)。

1.2 径流小区布设

江子河小流域水土流失综合观测在霍山县水土保持试验站(115°59'9"—115°59'20"E,31°08'43"—31°09'09"N)进行。该站始建于 1981 年,下设气象园、径流场和控制站,其地质土壤、气候条件及地表状况等基本代表安徽大别山区特征。我们选取 2011—2018 年标准径流小区展开水土流失定位观测,坡度为 23°,小区规格为 5 m×20 m,水平投影面积为 100

m², 试验期间所有活动均由当地农户按照传统种植方式进行经营管理(表 1)。

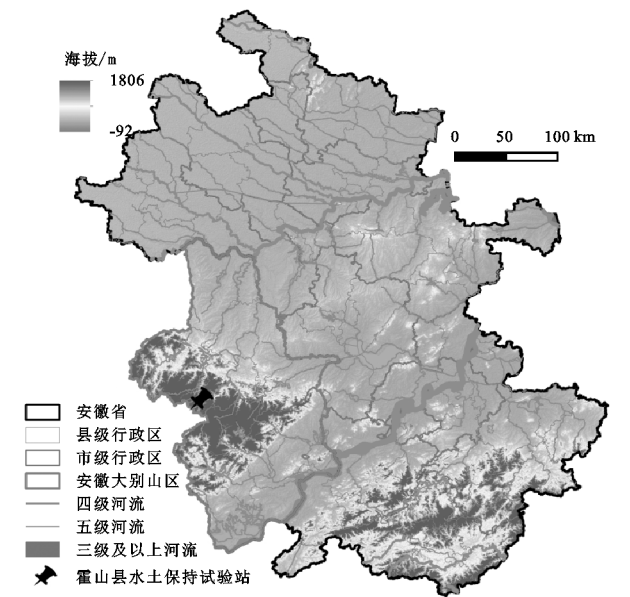


图 1 研究区地理位置示意图

表 1 霍山水土保持试验站径流小区基本情况

小区 编号	坡度	坡向	坡位	土壤 类型	小区 面积/m ²	植被 种类
T ₂	23°	WS	中	砂壤	100	茶树
T ₄	23°	WS	中	砂壤	100	黄豆

1.3 指标观测与计算

试验主要使用 3554 WD 翻斗式自记雨量计进行降雨的实时跟踪监测,记录间隔为 5 min,同时人工记录降雨起止时间及降雨期间雨势变化等,以便二者相互验证;小区产流通过观测分(集)流桶水位,计算次降雨产流量;小区产沙通过测定产流含沙量,计算小区次降雨泥沙流失量。泥沙采样时,将分(集)流桶浑水充分搅匀,以 1 000 ml 广口取样瓶收集,采用铝盒烘干法测定水样含沙量。

次降雨总动能 E 的计算公式^[25-27]为:

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r)$$
 (1)

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72e^{(-0.082i_r)}]$$
 (2)

降雨侵蚀力 $R_{\text{次}}$ 计算公式为:

$$R_{\text{次}} = E \cdot I_{30}$$
 (3)

式中: $R_{\text{次}}$ 表示次降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h)]; E 表示一次降雨总动能(J/m²); I_{30} 表示最大 30 min 雨强(mm/h); n 表示一次降雨过程按断点雨强分为 n 个时段; $r=1,2,3,\dots,n$; e_r 表示某时段单位降雨动能; P_r 表示对应时段雨量(mm); i_r 表示第 r 时段的断点雨强。

本文次降雨指连续不断的一个降雨事件。因降雨时断时续,一天可能会发生多场,如果出现的两场降雨的间歇不足 6 h,则作为一场降雨过程,间歇时

间若大于 6 h,则视为两场降雨过程^[28]。此外,本文中,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—2 月为冬季。

1.4 降水事件筛选

共筛选出降雨事件 184 场次,依据中国气象局中央气象台的日降雨强度划分标准^[29]及相关研究^[30-31]对 2011—2018 年内所有统计降雨分级。其中 24 h 内降雨量小于 10 mm 的降雨场次为小雨,仅 2 场,占比 1.09%;24 h 内雨量介于 10~25 mm 之间的降雨场次为中雨,共计 49 场,占比 26.63%;雨量介于 25~50 mm 的场次为大雨,共计 83 场,占比 45.11%;雨量介于 50~100 mm 的场次为暴雨,共计 36 场,占比 19.57%;雨量介于 100~250 mm 的场次为大暴雨,共计 14 场,占比 7.61%;雨量大于等于 250 mm 的场次为特大暴雨,无该等级降雨。

由图 2 看出,5 种等级降雨事件分布聚集在 5 个相对集中的区域,由左下至右上倾斜,斜率随着降雨等级的提高而增大,其中大暴雨相对分散;相邻降雨等级间,暴雨、大雨和中雨边界略有交错,大暴雨、暴雨之间相距较远、边界清晰。由此说明,大暴雨的次降雨特征变化最大,与其他等级降雨差异明显,暴雨、大雨和中雨的次降雨特征具有一定相似性。

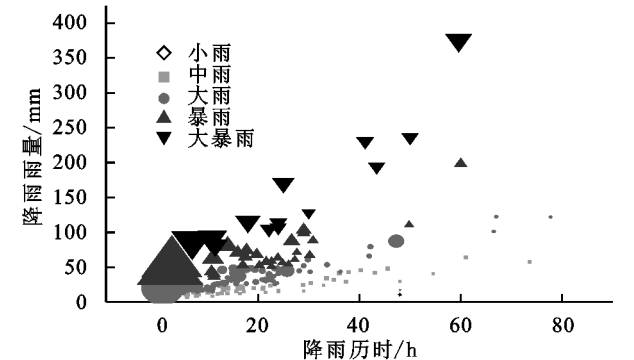


图 2 不同等级降雨

1.5 研究方法

1.5.1 非参数检验法 非参数检验是一种与总体分布状况无关的检验方法,它不依赖于总体分布的形式,不考虑被研究对象为何种分布及分布类型是否已知^[32]。当样本观测值的总体分布类型未知或知之甚少,无法肯定其性质,不具备参数检验的应用条件时,非参数检验极具应用价值。本文分别采用 Mann-Whitney U 检验和 Kruskal-Wallis 检验分别定量分析植被和降雨等级对产流产沙的影响。

1.5.2 趋势分析 本文运用累计滤波器法、一元线性法、滑动平均法、二次九点平滑法及三次平滑法等 5 种趋势分析方法,将 2011—2018 年 184 场次降雨事件作为时间序列进行探究,分析其变化趋势。

1.5.3 二项逻辑回归模型 因变量为降雨事件导致产沙与否,是二分类变量,故本文采用二项逻辑回归模型来对结果进行测度,定量表现降雨等级和植被类型对产沙风险的影响。

1.5.4 ROC 曲线 ROC 曲线亦称为感受性曲线^[33],已被广泛应用于灾害危险性评估结果精度分析^[34]、模型精度比较分析^[35]等方面。各因子对最终结果的判断通过曲线下面积(AUC)进行衡量,AUC 越接近于 1(总面积值在 0~1),则该因子的判别结果越好。本文采用 ROC 曲线对导致产沙的各影响因子进行重要性分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被与降雨等级条件下产流产沙特征

将 2011—2018 年 184 场次降雨事件进行分析,黄豆的次产流产沙量组内差异均明显大于茶叶,黄豆次产流产沙量平均值(分别为 0.211 m³,0.212 kg)远高于茶叶次产流产沙量平均值(分别为 0.023 m³,0.004 kg),且明显呈现较为明显的右偏态分布。经 Mann-Whitney 检验,其显著性 *p* 值均小于 0.001,拒绝零假设,说明在不同植被条件下产流量和产沙量差异极显著。

Mann-Whitney 检验只能用于两组之间的比较,为进一步分析不同降雨等级的产流产沙的差异,进行 Kruskal-Wallis 检验,其显著性 *p* 值均小于 0.001。结果表明,在不同降雨等级下产流量和产沙量差异极显著,大暴雨和暴雨导致的产流产沙量显著高于其他等级降雨,与李宗勋等^[30]对不同等级降雨下的马尾松水土流失特征的研究一致。暴雨和大暴雨之间以及小雨、中雨、大雨之间导致的产流产沙没有显著差异。

2.2 不同时间尺度的产流产沙特征研究

2.2.1 次降雨事件的时间序列分析 本文运用累计滤波器法、一元线性法、滑动平均法、二次九点平滑法及三次平滑法等方法,对 2011—2018 年 184 场次降雨事件的各降雨变量及产流产沙量作为时间序列进行探究,分析其变化趋势,5 种方法都选用置信水平为 95%的临界值的非参数统计检验作为显著性检验标准,结果见表 2。各降雨因子均呈现不显著增加趋势,表现出雨量更大,雨势更急的特征。茶叶和黄豆的产流量也都为不显著增加,产流量随着降雨的变化而呈现增加趋势,而二者的产沙量分别呈现显著减少和显著增加趋势,说明茶叶具有极好的保沙功能,减沙效益高于其减流效益,与 Chen 等^[36]的研究一致。同时,多年的黄豆种植使得土壤流失愈发严重。

2.2.2 年尺度下不同植被产流产沙分析 由图 3 年

尺度下不同植被产流产沙趋势图可知,黄豆的产流产沙量和茶叶的产流量随着年份增长总体呈现上升趋势,茶叶产沙量较为平缓,基本接近于 0。2016 年是两种作物产流量总值和平均值相差最大的年份,分别为 7.207 m³,0.271 m³。查阅试验站记录,2016 年大暴雨和暴雨场次最多,降雨量较其他年份异常增多且分布集中,全年降水量 2 122.7 mm(该站观测的多年平均年降水量为 1 549.9 mm),为多年平均值的 1.4 倍,降水日数共计 154 d,7 月份连续 8 d 降雨,累计雨量达 555.5 mm,土壤水量饱和,使得黄豆产流异常增多。2018 年和 2013 年分别为两种作物产沙量总值和平均值相差最大的年份,分别为 8.530 kg 和 0.317 kg。2013 年为大暴雨场次最多的年份,共计 4 场,其他年份仅 1~2 场;而 2018 年是平均雨强和最大 30 min 雨强最高的年份,分别为 7.93 mm/h 和 41.76 mm/h,可见,大雨强是增大产沙量的重要原因。

表 2 次降雨事件各变量趋势分析及显著性检验

参数	累计滤波	一元	滑动	二次九点	三次	非参数
	器法	线性法	平均法	平滑法	平滑法	
<i>T</i>	+	+	+	+	+	不显著
<i>P</i>	+	—	+	+	+	不显著
<i>I</i>	+	+	+	+	+	不显著
<i>I</i> ₃₀	+	+	+	+	+	不显著
<i>I</i> ₆₀	+	+	+	+	+	不显著
茶叶产流量	+	+	+	+	+	不显著
茶叶产沙量	—	—	—	—	—	显著
黄豆产流量	+	+	+	+	+	不显著
黄豆产沙量	+	+	+	+	+	显著

2.2.3 季节和月尺度下不同植被产流产沙分析 从季节尺度看,黄豆产流产沙量及黄豆与茶叶产流产沙量之差均为夏季>春季>秋季>冬季,黄豆的产流产沙量始终大于茶叶(图 4)。计算可得,各季节的降雨场次为夏季>春季>秋季>冬季,大暴雨、暴雨、大雨、中雨 4 种等级降雨的场次分别占全年的 85.71%,61.11%,42.17%,32.65%,在不考虑小雨的情况下,均居于四季之首。可见,降雨的多少和类型对产流产沙具有直接重要的作用,极端强降雨对水土保持具有非常强的破坏作用^[37]。

从月份尺度看,黄豆的产流产沙量总体呈现先上升后下降的趋势,8 月为全年峰值,也是两种植被产流产沙相差最大的月份,且该月降雨集中、降雨侵蚀力平均值[1 200.223 MJ·mm/(hm²·h)]和总值[30 005.578 MJ·mm/(hm²·h)]远超其他月份(图 5)。查阅田间管理记录可知,8 月会对黄豆小区喷洒除草剂并辅以人工除草,扰动地表,使得 8 月成为黄豆全年产流产沙最大值。因此,建议减少 8 月对各小

区的清理和扰动。茶叶整体变化较缓,4—6 月为全年产流产沙较高的时期,查阅田间管理记录可知,这 3 个月份会进行茶叶的采摘和茶树的修剪,如此一

来,缩短了冠层截留达到饱和的时间,减少了冠层截留量,对于削弱降雨对地表击溅、减小产流产沙量等的作用有所降低。

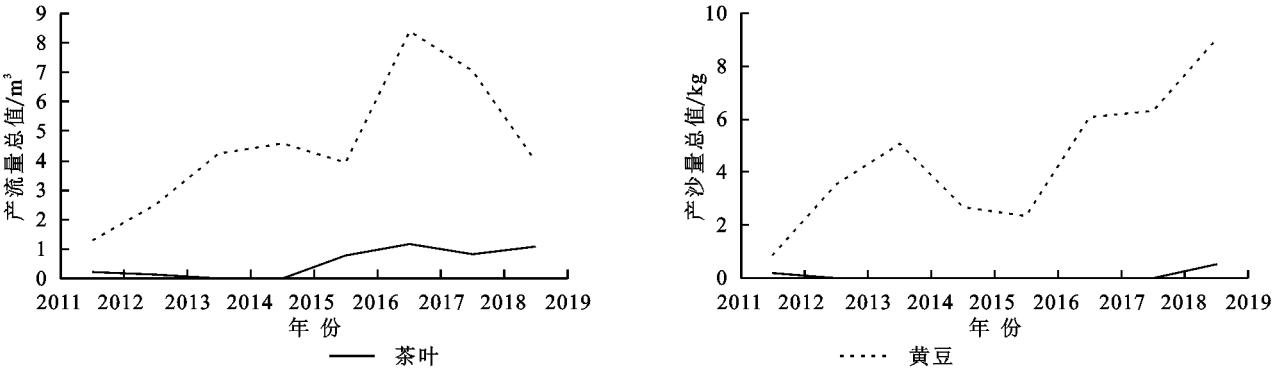


图 3 年尺度下不同植被产流产沙趋势

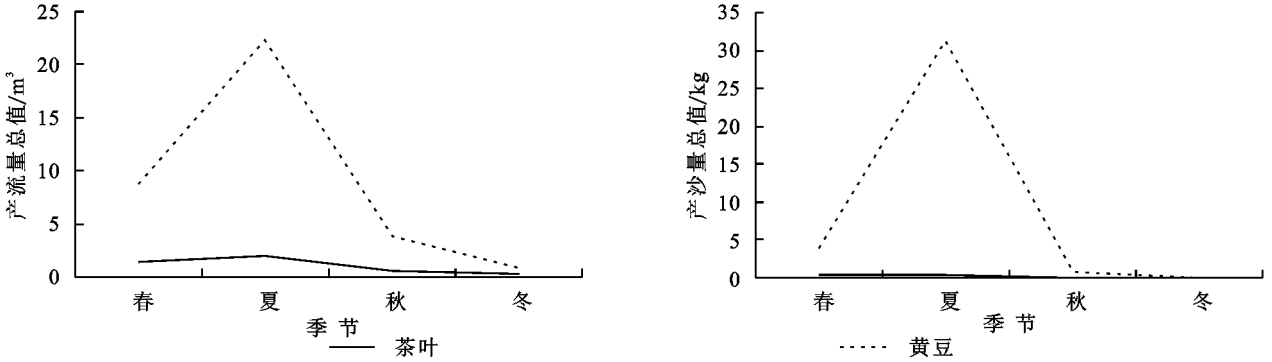


图 4 季节尺度下不同植被产流产沙

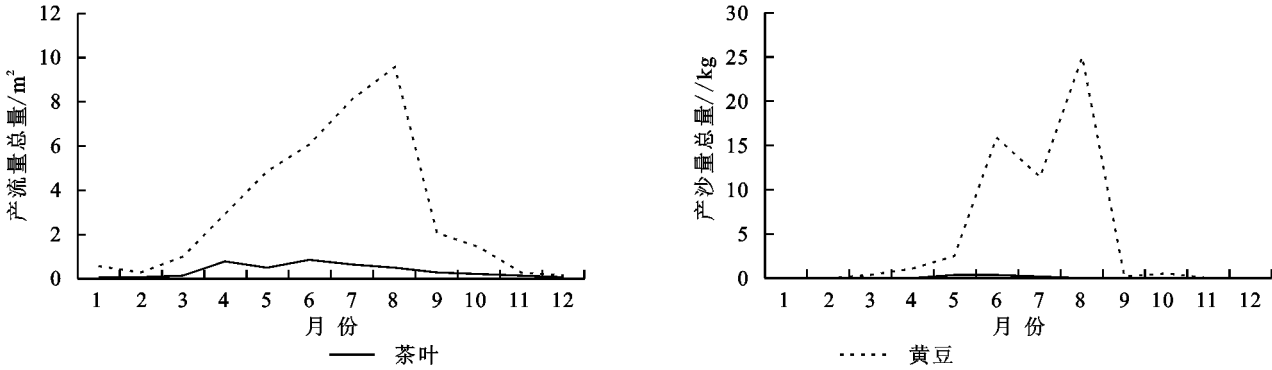


图 5 月份尺度下不同植被产流产沙

2.3 不同植被与降雨等级影响下的产流产沙

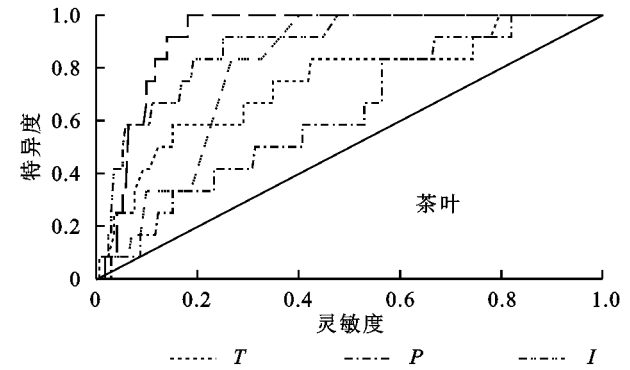
本文以降雨事件是否最终导致产沙作为因变量,降雨等级和植被类型作为自变量,建立二项逻辑回归模型。结果显示,降雨等级和植被类型均通过了 95% 显著性检验。降雨等级的差异对于最终产沙具有显著影响,随着降雨等级的提升,产沙的风险也逐步提升,尤其是暴雨和大暴雨,其产沙风险较其他降雨等级显著提升,分别是中雨的 19.706 倍和 25.903 倍。而高强度降雨会超过植被的承载力和入渗能力,在遭遇高强度、大范围的降雨时,直接形成的地表径流极容易导致土壤侵蚀^[38]。因此,在改善水土流失状况、保护和开发当地土壤资源的同时,应重视其产生的影响。

黄豆的产沙风险是茶叶的 21.29 倍,显示出茶叶优越的水土保持功能。黄豆属一年生植物,在种植前与收获后有较长一段时间地表处于裸露状态,平均盖度不高,而植被覆盖度是影响水土流失的最重要因子之一^[39],且其生长过程对土壤的扰动大,在降雨集中且雨量和雨强均处于较高水平时期,雨滴的溅蚀力强,不仅使土壤结皮难以形成^[40],还大大增加了土壤表面径流的稳流强度,提高了输沙能力,同时造成地表板结,减少雨滴入渗^[41],因此造成的水土流失量大。而茶树地盖度好,常年维持在 70%~80%,大大增强了其对雨水的截持能力,降低土壤的侵蚀速率^[42]。基于此,黄豆可采取与玉米等作物 2:2 等其

他方式间作种植^[43]或选取纳米碳^[44]土壤改良剂促进黄豆根系生长、减少土壤侵蚀和控制养分流失^[45]或采取等高沟垄、横坡垄作^[46]等耕种模式,以收获更高的生态和经济效益。

2.4 不同植被类型产沙量的影响因素定量分析

本文运用产流量(W)及各降雨因子(降雨历时 T ,降雨雨量 P ,平均雨强 I 及最大 30 min 雨强 I_{30})分别单独评价茶叶和黄豆两种植被类型出现产沙事件的精度,运用 ROC 曲线,展现各因子对于最终产沙事件的重要性大小。



由图 6 可知,对于茶叶而言, I_{30} 的评价精度最好,其曲线下面积 AUC 为 0.920, P 的评价效果最差,其 AUC 仅为 0.627,可见,茶叶出现产沙与瞬时雨强相关,雨强对产沙的重要性高于雨量;而对于黄豆而言, W 的评价精度最好,其 AUC 为 0.874, T 评价效果最差,其 AUC 仅为 0.593,则黄豆多由产流而导致产沙,雨量对产沙的重要性高于雨强;总体而言,各因子均能对最终产沙事件作出较好预测和评判,对茶叶(AUC 平均值为 0.795)的评价精度高于黄豆(AUC 平均值为 0.761)。

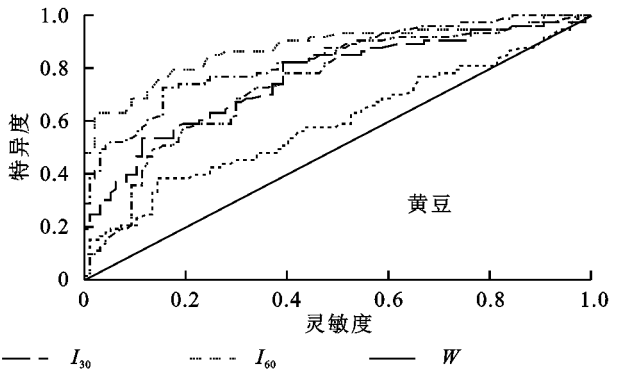


图 6 ROC 曲线

2.5 黄豆不同生长阶段产流产沙对比分析

查阅 2011—2018 年逐年田间管理记录,可知研究区大豆每年 6 月下旬播种,10 月中上旬收割,可能会因气温、降水等因素提早或推迟。联合国粮农组织将作物生长期划分为 4 个阶段:生长初期、快速发育期、生长中期和生长后期^[47],据此,本文将大豆生长期划分为:播种—三叶期、三叶期—开花期、开花期—结荚期、结荚期—成熟期等 4 个阶段,各生长阶段日期及历时见表 3。三叶期—开花期产流产沙量平均值在黄豆几个生长阶段中均为最高,在播种—三叶期产流产沙量会出现一定的极端值,仅有结荚期—成熟期的产流产沙量低于裸土期(图 7)。

表 3 黄豆各生长期所处日期及历时

生长阶段	日期	历时/d
播种—三叶期	06-26—08-02	38
三叶期—开花期	08-03—08-25	23
开花期—结荚期	08-26—09-17	23
结荚期—成熟期	09-18—10-10	23
播种—成熟期	06-26—10-10	105

表 4 黄豆不同生长期出现的各等级降雨场次

生长阶段	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
播种—三叶期	8	14	10	3
三叶期—开花期	4	9	2	3
开花期—结荚期	1	9	6	1
结荚期—成熟期	5	9	1	0
裸土期	28	43	16	0

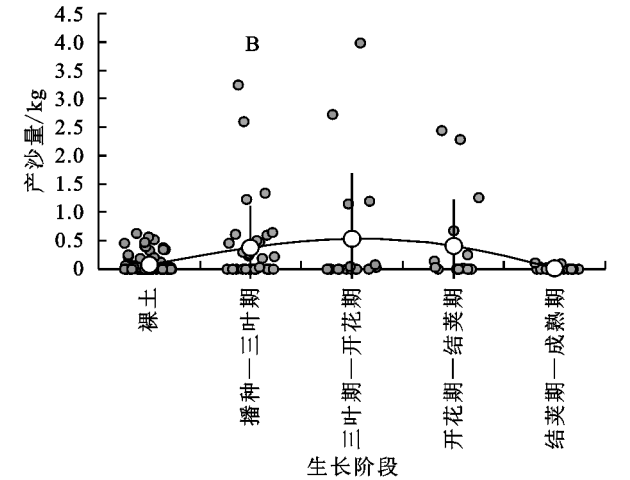
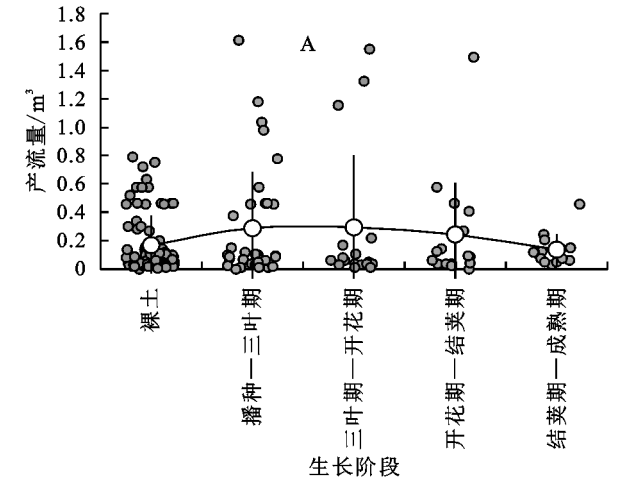
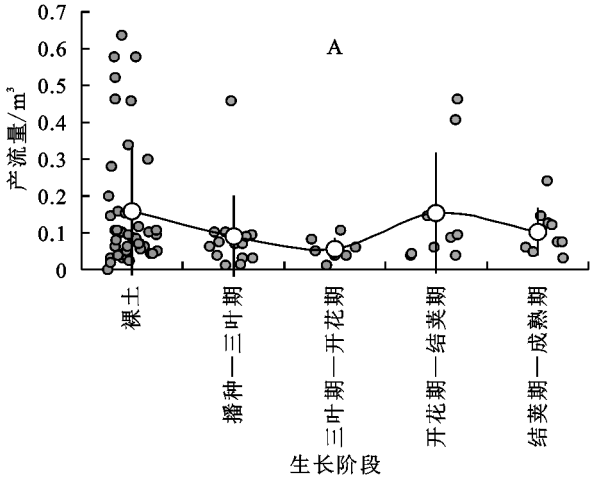


图 7 一般情况下黄豆各生长阶段产流产沙量

计算各生长期的降雨侵蚀力可知,开花期—结荚期降雨侵蚀力最强,远高于裸土期等其他生长阶段。因此,在该阶段应尽量减少或避免对小区的扰动,或采取其他保护措施以减少产流产沙。

由表 4 可知:在大雨条件下,各生长阶段均有一定的降雨场次,且雨强处于较高水平,可一定程度削弱土壤结皮对最终产沙的影响^[48],故选取大雨条件下的降雨事件进行研究。见图 8A,产流量总体呈现先减少后增加的趋势,研究表明,土壤的抗冲性和抗蚀性随着大豆生长期的推进均是先增强后减弱^[49],三叶期—开花期是产流量最少的生长阶段,4 个生长阶段均低于裸土期,表明大豆的覆盖可减缓降雨侵蚀力,有利于入渗^[40],具有一定的减流效应^[50]。



据王计磊等^[49]的研究,结荚期—成熟期土壤抗侵蚀能力最强,播种—三叶期最弱,安徽大别山地区以水力侵蚀为主,坡面产流是产沙的主要动力之一,土壤产流量的大小是影响产沙量变化的主要因素之一^[35],产流量越大,产沙量一般也越大^[2],而三叶期—开花期产流量为黄豆生长期中最少的一个阶段,这也导致了该阶段出现的产沙量较少。

见图 8B,就产沙量而言,三叶期—开花期和结荚期—成熟期低于裸土期,结荚期—成熟期为最低。不难看出,黄豆处于三叶期—开花期和结荚期—成熟期时具有较好的保水保沙效益,结合图 7—8,三叶期—开花期产流产沙的峰值主要由于高水平的雨量雨强造成的强大的降雨侵蚀力导致。

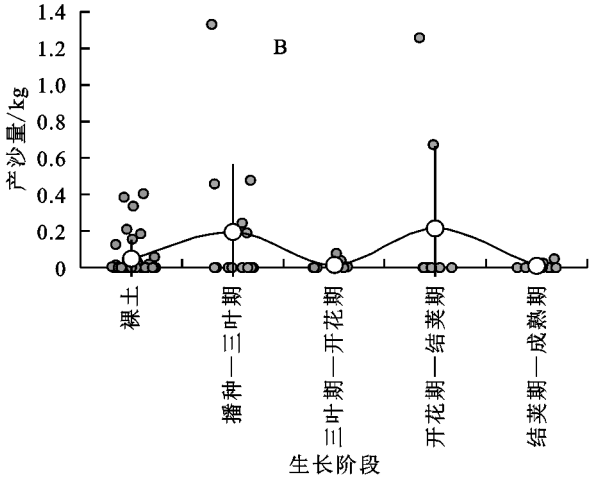


图 8 大雨条件下黄豆各生长阶段产流产沙量

3 结论

降雨方面:(1) 从不同尺度降雨来看,在次降雨事件的时间序列分析中,各降雨因子及两种作物产流量呈现不显著上升趋势,茶叶和黄豆产沙量分别呈现显著下降和显著上升趋势,表明茶叶较好的保沙功能,且其保沙效益高于保水效益,而多年的黄豆种植导致土壤侵蚀愈发严重。在年尺度分析中,黄豆的产流产沙量和茶叶的产流量随着年份增长总体呈现上升趋势,茶叶产沙量较为平缓,基本接近于 0,2016 年是两种作物产流量总值和平均值相差最大的年份,2013 年和 2018 年分别为两种作物产沙量总值和平均值相差最大的年份。在季节尺度分析中,黄豆与茶叶的产流产沙之差为夏季>春季>秋季>冬季。在月份尺度分析中,黄豆的产流产沙量总体呈现先上升后下降的趋势,8 月为全年峰值,也是两种植被产流产沙相差最大的月份,建议减少 8 月对各小区的清理和扰动,以减少水土流失量。(2) 从降雨等级来看,随着降雨等级的提升,产沙的风险也逐步提升,暴雨

和大暴雨的产沙风险较其他降雨等级显著提升,分别是中雨的 19.706 倍和 25.903 倍。(3) 从降雨因子来看,茶叶出现产沙与瞬时雨强相关,雨强对产沙的重要性高于雨量,黄豆多由产流而导致产沙,雨量对产沙的重要性高于雨强。各因子对茶叶的评价精度高于黄豆。植被方面:植被类型的差异对于最终产沙具有显著影响,黄豆的产沙风险是茶叶的 21.29 倍,且相同条件下,黄豆的产流产沙量均远高于茶叶。

参考文献:

[1] 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.
[2] 李小辉,贾本有,范子武,等.典型植被对水土流失影响的小区试验研究[J].水利水电技术,2019,50(2):95-100.
[3] 常松果,胡雪琴,史东梅,等.不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):34-40.
[4] 刘晶晶.集中连片特困区生态环境脆弱性评价研究[D].武汉:华中师范大学,2019.
[5] 邢伟,胡续礼,张荣华,等.淮河流域国家水土保持重点

- 工程土壤侵蚀防控效果[J].中国水土保持科学,2016,14(2):137-146.
- [6] 王甦生.大别山区水土保持现状及对策[J].河南科技,2018,648(15):154-155.
- [7] 吴光艳,金平伟,钟雄,等.南方红壤区植被盖度对水土流失影响初探[J].亚热带水土保持,2016,28(4):1-4.
- [8] Sun D, Zhang W, Lin Y, et al. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age[J]. *Forest Ecology & Management*, 2018,422:1-10.
- [9] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J].生态学报,2019,39(7):2416-2425.
- [10] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerdà A. Contribution of rain-drop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,583:382-392.
- [11] Zhou Z C, Shanguan Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. *Pedosphere*, 2008,18(1):131-136.
- [12] 白雪莲,郑海颖,王理想,等.砒砂岩黄土区植被盖度对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2020,40(11):3776-3784.
- [13] Anache J A A, Flanagan D C, Srivastava A, et al. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,622:140-151.
- [14] 周梦玲,郭建斌,周金星,等.丹江口库区喀斯特坡地不同植被覆盖类型的产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2020,18(2):77-83.
- [15] 王志印,曹建生.中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展[J].中国生态农业学报:中英文,2019,27(9):1319-1331.
- [16] 陈洋,张海东,于东升,等.南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响[J].农业工程学报,2020,36(5):150-157.
- [17] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting eco-hydrological processes in semiarid landscapes[J]. *Ecology*, 2005,86(2):288-297.
- [18] 杜轶,郭青霞,郭汉清,等.汾河上游不同土地利用方式对坡地水土流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):44-51.
- [19] Peng X D, Dai Q H, Li C L, et al. Role of underground fissure flow in near-surface rainfall-runoff process on a rock mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Engineering Geology*, 2018,243:10-17.
- [20] Duan J, Yang J, Tang C, et al. Effects of rainfall patterns and land cover on the subsurface flow generation of sloping Ferralsols in southern China[J]. *Plos One*, 2017,12(8):e0182706.
- [21] 黄萱.植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [22] 李瑞,陈康,刘瑞禄,等.基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产流产沙特征[J].农业工程学报,2019,35(11):139-147.
- [23] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.
- [24] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.喀斯特小流域坡面与流域降雨产流产沙特征[J].水土保持研究,2017,24(1):1-6.
- [25] Zhao X N, Huang J, Wu P T, et al. The dynamic effects of pastures and crop on runoff and sediments reduction at loess slopes under simulated rainfall conditions[J]. *Catena*, 2014,119:1-7.
- [26] 朱强,陈秀万,樊启祥,等.基于 TRMM 的降雨侵蚀力计算方法[J].中国科学:技术科学,2011,41(11):1483-1492.
- [27] 付滢,郑江坤,任雨之,等.降雨与植被变化对川中丘陵区典型小流域侵蚀产沙的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(4):67-74.
- [28] Huff F A. Time distribution of rainfall in heavy storms[J]. *Water Resources Research*, 1967,3(4):1007-1019.
- [29] 孔锋,方建,吕丽莉,等.1961—2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征[J].热带地理,2017,37(4):473-483.
- [30] 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.
- [31] 孔锋,薛澜,郭君.气候工程对中国不同等级降雨结构的可能影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1397-1410.
- [32] 陈永刚,丁丽霞,葛宏立,等.基于 Mann-Whitney 非参数检验和 SVM 的竹类高光谱识别[J].光谱学与光谱分析,2011,31(11):3010-3013.
- [33] 牛全福,陆铭,李月锋,等.基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):48-56.
- [34] 王卫东,何卓磊,韩征,等.基于深度信念网络的滑坡敏感性评价[J].东北大学学报:自然科学版,2020,41(5):609-615.
- [35] 张志沛,魏在豪.基于加权信息量模型的滑坡灾害易发性评价:以灞桥区为例[J].科学技术与工程,2020,20(9):3492-3500.
- [36] Chen J, Xiao H, Li Z, et al. How effective are soil and water conservation measures(SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,735:139517.
- [37] 王林华,马波,吴发启.黄土区不同生长期大豆坡耕地的入渗特征[J].中国水土保持科学,2015,13(4):15-24.

流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):22-26.

[19] 盘礼东,李瑞,黎庆贵,等.黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J].水土保持学报,2021,35(1):9-16.

[20] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.

[21] 罗为群,蒋忠诚,韩清延,等.岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J].中国水土保持,2008,2008(012):46-49.

[22] Bai X Y, Zhang X B, Chen H. Using Cs137 fingerprint technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in karsts region of Southwest China[J]. Land Degradation and Development, 2010,21(5):1-6.

[23] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. Geomorphology, 2015,250:1-14.

[24] Wang Chenfeng, Wang Bin, Wang Yunqi, et al. Impact of near-surface hydraulic gradient on the interrill erosion process [J]. European Journal of Soil Science, 2020,71(4):598-614.

[25] 杨青森,郑粉莉,温磊磊,等.秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持通报,2011,31(2):1-5.

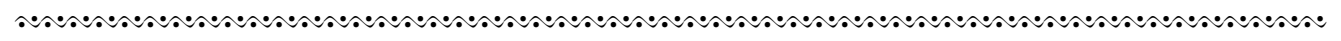
[26] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J].水土保持研究,2007,15(4):1-3.

[27] 刘柳松,任红艳,史学正,等.秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):108-112.

[28] 赵雨森,魏永霞.坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J].中国水土保持科学,2009,7(6):86-90.

[29] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.

[30] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review[J]. Hydrological Processes, 2010,19(14):2815-2844.



(上接第 35 页)

[38] 韩丹丹,穆兴民,高鹏,等.极端降水条件下大理河流域水沙特征对比分析[J].中国水土保持科学,2019,17(6):61-68.

[39] 陈妙金,汪小钦,吴思颖.基于随机森林算法的水土流失影响因子重要性分析[J].自然灾害学报,2019,28(4):209-219.

[40] 马波,由政,吴发启,等.种植大豆条件下土壤结皮对坡耕地径流和侵蚀产沙的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(3):16-23.

[41] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.

[42] Diyabalanage S, Samarakoon K K, Adikari S B, et al. Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the Central Highlands of Sri Lanka[J]. Applied Geography, 2017,79:103-114.

[43] 李铁,湛芸,何丙辉,等.天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用[J].水土保持学报,2019,33(3):27-35.

[44] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].农业工程学报,2017,33(2):116-124.

[45] 孙金伟,张冠华,杨贺菲,等.坡耕地水土流失防治新材料 W-OH 固化剂对大豆和玉米生长特性的影响[J].长江科学院院报,2019,36(3):37-39,45.

[46] 任雨之,郑江坤,付滢,等.不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(2):32-40.

[47] 姜浩.大豆干旱胁迫的水氮利用及不同水文年型的灌溉制度研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.

[48] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.

[49] 王计磊,吴发启.不同生长期大豆坡耕地土壤抗侵蚀能力特征[J].土壤学报,2016,53(6):1389-1398.

[50] 徐宁,吴发启,杨一凡,等.大豆调节坡耕地径流和泥沙作用研究[J].水土保持学报,2020,34(3):42-48.