

连云港市低山丘陵区侵蚀性降雨特征及产流产沙规律

陶淑芸, 刘沂轩, 程建敏, 王桂林

(江苏省水文水资源勘测局 连云港分局, 江苏 连云港 222004)

摘要: [目的] 分析不同降雨特征和不同下垫面条件下江苏省连云港市低山丘陵区土壤侵蚀产流产沙规律, 为当地水土流失防治和提高水土保持效益提供科学依据。[方法] 以黑林水土保持监测点为研究对象, 采用 K 均值聚类法对当地 2013—2020 年侵蚀性降雨类型进行分类, 识别侵蚀性降雨特征, 采用灰色关联法分析该监测点 5 个坡面径流小区降雨量、产流量、产沙量之间的相关性, 通过双累积曲线法比较不同下垫面条件下产流产沙能力差异, 分析人类活动对地表扰动的水土保持效应。[结果] ① 侵蚀性降雨主要发生在汛期, 以 I 型(小雨量、小雨强)降雨为主, 频次占比 66%, 其次为 II 型(中雨量、中雨强)降雨和 IV 型(大雨量、中雨强)降雨, III 型(大雨量、大雨强)降雨最少; ② 产沙量与降雨量和径流深密切相关, 相关系数分别为 0.64~0.85, 0.61~0.86; ③ III 型降雨引起的次降雨含沙量最大, IV 型降雨引起的土壤流失总量最大; ④ 农地的产沙能力最大, 林地次之, 自然荒地最小, 减少地表土壤的人为扰动, 横向起垄种植, 选择覆盖度高的植物更有利于提高当地的水土保持效益, 总体上林地水保效益优于农地。⑤ 不同下垫面间产流产沙差异随着雨量和雨强的增大逐渐减小。[结论] 连云港市低山丘陵区侵蚀性降雨主要发生在汛期, 不同雨型不同下垫面间产流产沙特征差异明显, 林地水保效益优于农地。

关键词: 侵蚀性降雨; 产流产沙; 下垫面; 低山丘陵区; 江苏省连云港市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0033-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 陶淑芸, 刘沂轩, 程建敏, 等. 连云港市低山丘陵区侵蚀性降雨特征及产流产沙规律[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 33-41. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.005; Tao Shuyun, Liu Yixuan, Cheng Jianmin, et al. Characteristics of erosive rainfall and its effects on runoff and sediment yield in a low mountain and hilly area of Lianyungang City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 33-41.

Characteristics of Erosive Rainfall and Its Effects on Runoff and Sediment Yield in a Low Mountain and Hilly Area of Lianyungang City

Tao Shuyun, Liu Yixuan, Cheng Jianmin, Wang Guilin

(Lianyungang Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Lianyungang, Jiangsu 222004, China)

Abstract: [Objective] The effects of different rainfall characteristics and different underlying surface conditions on soil erosion and sediment yield were determined in a low mountain and hilly area of Lianyungang City, Jiangsu Province, in order to provide a reference for local soil and water loss prevention and improvement of soil and water conservation benefits. [Methods] Local erosive rainfall types from the Heilin soil and water conservation monitoring point from 2013 to 2020 were classified by the K -means clustering method. The characteristics of erosive rainfall were identified and the correlations among rainfall, runoff, and sediment yield of five slope runoff plots at the monitoring point were analyzed by the grey correlation method. Differences in runoff and sediment yield capacity due to different underlying surface conditions were compared by the double accumulation curve method, and the soil and water conservation effects of human activities on surface disturbance were analyzed. [Results] ① Erosive rainfall mainly occurred during the flood season, mainly from type I (small rainfall and light rainfall intensity) rainfall events, accounting for 66% of the rainfall frequency, followed by type II (medium rainfall and medium rainfall intensity) rainfall events and type IV (large rainfall and medium rainfall intensity) rainfall events. Type III (large rainfall and heavy rainfall intensity)

收稿日期: 2021-10-25

修回日期: 2022-02-05

资助项目: 江苏省水利科技项目“淮北土石山区多尺度水土流失遥感监测技术研究与应用”(2014032)

第一作者: 陶淑芸(1984—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面的工作。Email: taosy@126.com。

rainfall events were the least frequent type of rainfall events; ② Sediment yield was closely related to rainfall and runoff depth, and the correlation coefficient ranges were 0.64~0.85 and 0.61~0.86. respectively; ③ The runoff and sediment yield of secondary rainfall caused by type III rainfall were the largest, and the total amount of soil loss caused by type IV rainfall was the largest; ④ The sediment yield capacity of agricultural land was the largest, followed by forest land. The sediment yield capacity of natural wasteland was the smallest. Reducing the artificial disturbance of surface soil, horizontal ridging and planting, and selecting plants with high coverage were more conducive to improving local soil and water conservation benefits. On the whole, the soil and water conservation benefits of forest land were greater than those of agricultural land. ⑤ The differences in runoff and sediment yield due to different underlying surfaces decreased gradually with increasing rainfall and rainfall intensity. [Conclusion] Erosive rainfall mainly occurred during the flood season in a low mountain and hilly area of Lianyungang City. There were obvious differences in the characteristics of runoff and sediment yield due to different rainfall types and underlying surfaces, and the benefits of forest land to soil and water conservation were greater than those of agricultural land.

Keywords: erosive rainfall; runoff and sediment yield; underlying surface; low mountain and hilly; Lianyungang City, Jiangsu Pvoine

连云港市位于江苏省北部,属于中国土壤侵蚀类型分区中的北方土石山区,土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,当地山地和丘陵区的土壤多为在各种岩层上形成的薄壳状土层,土层较薄且其下为渗透性较差的基岩,原始植被破坏后易引起土壤侵蚀。区域土地利用结构以耕地为主,约占 51%,其中低山丘陵区的耕地以坡耕地为主。当地季风气候明显,降雨集中在夏秋,且多发暴雨,加剧地方水土流失。2018 年全市水土流失面积 440.37 km²,主要分布在连云港市西北部低山丘陵区,目前已列入江苏省水土流失重点治理区。水土流失造成土壤肥力降低、土地沙石化,影响农业生产和生态环境^[1],是人类长期关注的一个重要环境问题^[2]。连云港市低山丘陵区坡耕地的水土流失主要来自于坡面侵蚀,其影响因素分为自然因素和人为因素两大类,其中自然因素主要有降雨、径流、地形、土壤、植被等,人为因素指人类活动对侵蚀的促进和抑制作用,两类因素相互作用,影响坡面水土流失程度。目前人类活动难以控制调节降雨,但可以通过改变地形、植被、土地利用方式等措施,来影响土壤的水力侵蚀效果,以达到改善水土流失的目的。研究表明侵蚀性降雨和下垫面情况对水土流失有重要影响^[3-4]。其中降雨是坡面水土流失的主要动力,是影响流域产流产沙的主要因素^[5],下垫面不同的土地利用方式,地表植物种类、覆盖度、种植方式和耕作措施也是影响水土流失的重要原因^[6-7],因此研究降雨特征规律及其对径流泥沙的作用,分析不同植物措施的水土流失情况,对水土流失治理及水土保持工程的开展具有重要意义^[8-11]。但目前众多学者研究区主要在黄土高原区^[6,11-14]、喀斯特地区^[15-17]、紫色土

区^[18-19]、南方红壤区^[20-21]、土石山区等^[22-23]全国水土流失关注度较高的区域,研究数据来源于实验室内人工模拟降雨或者 3~5 a 内天然降雨条件下的定位观测,对江苏省连云港市低山丘陵区的相关研究较为匮乏。因此本研究在连云港市开展长期径流小区试验,模拟当地坡耕地种植措施,基于径流小区 2013—2020 年长系列观测资料,分析当地降雨特征和不同下垫面对流域产流产沙的影响,研究人类活动的水土保持效应,旨在为该类地区水土流失防治工作提供理论参考。

1 研究区概况

连云港市赣榆区黑林水土保持监测点位于苏鲁交界处,沂蒙山余脉东南低山丘陵区,北纬 35°01′56″,东经 118°52′42″,属于北方土石山区中的鲁中南低山丘陵土壤保持区。该监测点所处淮河流域为温带湿润、半湿润大陆性季风型气候,雨热同期,季相明显。多年平均气温 14 ℃,多年平均降雨量 900.9 mm,雨量年内分布不均,夏季多,冬季少,70%以上集中于 6—9 月。监测点土壤为沙质壤土;周边植被作物多为地瓜、花生、玉米、黄豆等;主要自然优势草种有白茅、狗尾草、棒头草、牛筋草等。

2 研究方法

2010 年水利部水土保持监测中心组织开展“全国水土保持监测网络和信息系统建设二期工程”建设,黑林径流小区作为该项目水土保持监测站点之一,主要开展低山丘陵区水土流失监测任务。

2.1 径流小区设计

径流小区为标准水蚀监测小区,共设置 5 个坡面径流小区,规格为长 20 m,宽 5 m,坡度为 6°(表 1)。

2010 年建成后撂荒 2 a,于 2013 年 1 月 1 日启动观测。径流小区下垫面以当地作物耕作习惯为原则进行布设,分为农地、林地和自然荒地,农地分别种植花生、地瓜和黄豆,每年种植一季,5 月翻耕播种,10 月

收割,林地种植茶树,荒地处于自然撂荒状态,长有当地优势草种。5 个小区汇、分流机制统一,降水产流经坡面汇流进入汇流槽后,1/3 水流进入分水池,分水池水深大于 0.3 m 时,1/5 水流进入集流池。

表 1 径流小区基本特征参数

序号	土地利用	植被	种植措施	坡长/ m	宽度/ m	坡度/ (°)	坡向/ (°)	土壤 类型	植被 覆盖度/%	有机质 含量/%	平均土壤 含水量/%	作物产量/ (kg·hm ⁻²)
1	农地	花生	起垄种植	20	5	6	225	砂质壤土	23~55	7.6	18.4	1 371
2	农地	地瓜	等高种植	20	5	6	225	砂质壤土	5~65	8.7	30.2	17 500
3	农地	黄豆	等高种植	20	5	6	225	砂质壤土	18~95	8.2	29.0	1 625
4	林地	茶树	等高种植	20	5	6	225	砂质壤土	75	8.0	31.6	
5	荒地	杂草	撂荒	20	5	6	225	砂质壤土	5	13.2	34.2	

2.2 监测方法

径流小区按照《全国水土流失动态监测与公告项目实施方案》要求,开展监测工作,监测指标包括降雨(降雨量、降雨历时、降雨强度、侵蚀性降雨量)、泥沙、径流量、含沙量、侵蚀量、植被盖度、土壤水分、作物测产等项目。其中降雨监测全年采用翻斗式遥测自记雨量计进行观测,分辨率为 0.5 mm,采样周期为 5 min;径流量通过测量每场降雨后集流池和分流池中的水位后,由公式计算得出;泥沙采用人工采集样品后,烘干监测泥沙含量;灌草作物盖度、植被平均高度采用目估法进行观测获得。

2.3 数据分析方法

对 2013—2020 年降雨数据进行统计,分析当地降雨特征,对侵蚀性降雨进行 K 均值聚类分析^[13-14],识别侵蚀性降雨类型及其特点,统计在不同雨型条件下各径流小区产流量和产沙量,采用灰色关联法^[24-25]分析降雨量、产流量、产沙量三者的相关性,通过双累积曲线法^[5,26-27]比较不同径流小区累积产沙量对累积降雨量的响应,分析相同雨型下不同下垫面的产沙能力差异,以及人类活动对地表扰动的水土保持效应。

3 结果与分析

3.1 年降雨特征分析

对黑林监测点 2013—2020 年月均降雨量进行统计分析(图 1),降雨主要集中在汛期,5—10 月的降雨量达全年总降雨量的 84.6%,其中 7—8 月降雨量占全年的 52.1%。侵蚀性降雨量占年总降雨量的 57.6%,主要集中在 6—9 月,其中 7 月平均侵蚀性降雨量最大,达 180.8 mm,占该月总降雨量的 75%,8 月侵蚀性降雨量占比最大,为 77%。最大月侵蚀性降雨量发生在 2020 年 7 月,达 361.0 mm。8 a 间总

共发生侵蚀性降雨 88 次,主要集中在 7—8 月,占总次数的 64.8%,其中 7 月发生侵蚀性降雨次数最多,总共 31 次,占 35.2%,最大月侵蚀性降雨次数发生在 2020 年 7 月,为 6 次。7 月是侵蚀性降雨产生频次和侵蚀性降雨量都最高的月份。

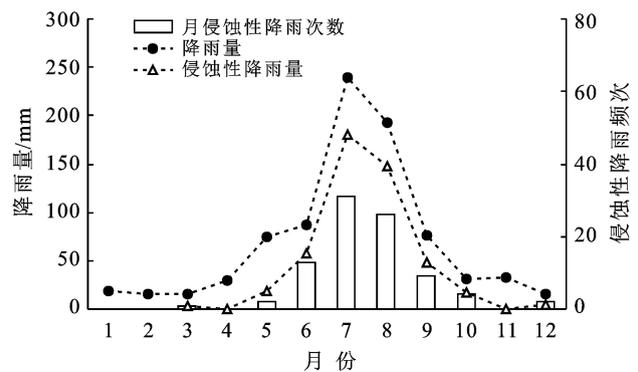


图 1 黑林监测点 2013—2020 年月均降雨量及频次分布

3.2 侵蚀性降雨 K 均值聚类分析

为分析不同降雨条件下径流小区产流产沙情况,对 2013—2020 年 88 场侵蚀性降雨进行分类。本研究选用 K 均值聚类分析法对降雨进行分类,该算法在整个数组中选择 K 个数据作为初始聚类中心,然后计算每个数据与初始中心的距离,并按距离的大小将数据分为 K 个聚类,接着重新计算每个聚类内所有数据的平均值,将其作为新的聚类中心,由此反复迭代,直至聚类中心稳定^[28-31]。侵蚀性降雨的特征参数主要有雨量、雨强、降雨历时以及降雨侵蚀力,其中前三者均为监测数据,降雨侵蚀力 R 是降雨物理特征的函数,采用 RUSLE 经验模型中的经典参数计算方法^[32-33],其计算公式为:

$$R = EI_{30} \quad (1)$$

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r) \quad (2)$$

$$e_r = 0.29[1 - 0.72\exp(-0.082i_r)] \quad (3)$$

式中: E 为次降雨的总动能(MJ/hm^2); $r=1, 2, \dots, n$ 表示次降雨过程按雨强分为 n 个时段; P_r 为第 r 时段雨量(mm); e_r 是每一时段的单位降雨动能 [$\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$]; i_r 是第 r 时段雨强(mm/h)。

选取降雨量、最大 30 min 雨强(I_{30}), 降雨侵蚀力 R 这 3 个参数, 将侵蚀性降雨分为 4 类, 分别为 I 雨型、II 雨型、III 雨型和 IV 雨型。分类结果详见表 2。I 雨型组中心雨量 27.0 mm, 中心 I_{30} 为 21.1 mm/h, 中心降雨侵蚀力 139.2 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 为小雨量小雨强型降雨; II 雨型组中心雨量 44.3 mm, 中心 I_{30} 为 60.8 mm/h, 中心降雨侵蚀力 655.8 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 为中雨量中雨强型降雨; III 雨型组中心雨量 107.3 mm, 中心 I_{30} 为 89.6 mm/h,

中心降雨侵蚀力 2 534.1 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 为大雨量大雨强型降雨; IV 雨型组中心雨量 97.0 mm, 中心 I_{30} 为 34.6 mm/h, 中心降雨侵蚀力 874.4 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 为大雨量中雨强型降雨。4 种降雨中, I 雨型发生频率最高, 所占比例为 65.9%, III 雨型发生频次最低, 比例为 4.5%, 4 种降雨发生频次由高到低排序为: I 雨型 > II 雨型 = IV 雨型 > III 雨型。

对 K 均值聚类分析结果进行单因素方差分析, 检验结果详见表 3。3 个变量的组间均方差大于组内均方差, 各特征值差异显著 ($p < 0.05$)。对不同雨型各特征值间差异进行多重比较分析, 结果如图 2 所示。I, II 雨型分别与 III, IV 雨型在雨量上有显著性差异, 但 III, IV 雨型间差异不显著; I, III 雨型分别与 II, IV 雨型在降雨侵蚀力上有显著性差异, 但 II, IV 雨型间差异不显著; 4 种雨型在 I_{30} 上全都差异显著。

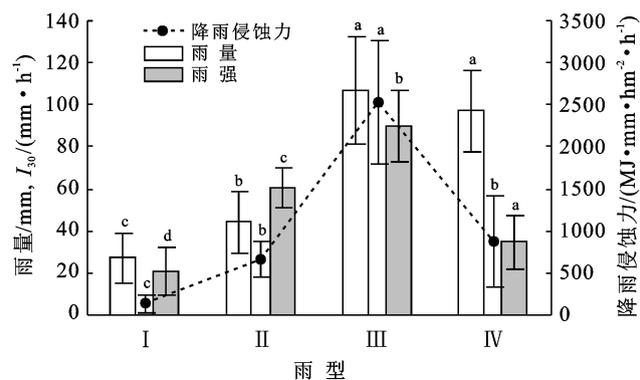
表 2 黑林水土保持监测点侵蚀性降雨 K 均值聚类分析结果

雨型	中心雨量/mm	雨量范围/mm	中心 $I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	I_{30} 范围/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	中心降雨侵蚀力/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	降雨侵蚀力范围/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	频次	比例/%
I	27.0	8.0~55	21.1	4.0~45.3	139.2	8.0~376.3	58	65.9
II	44.3	24.5~80.5	60.8	46.3~80.6	655.8	355.6~1 077.3	13	14.8
III	107.3	80.0~132.5	89.6	64.5~102.7	2 534.1	1 996.6~3 609.2	4	4.5
IV	97.0	74.0~132.0	34.6	18.1~56.4	874.4	337.0~2 342.3	13	14.8

表 3 黑林水土保持监测点 K 均值聚类分析结果方差分析

降雨参数	聚类			误差			F	p
	df	SS	MS	df	SS	MS		
雨量	3	69 260	23 087	84	17 596	209	110.21	0.000
I_{30}	3	31 000	10 333	84	11 417	136	76.03	0.000
降雨侵蚀力	3	25 842 155	8 614 052	84	6 292 150	74 907	115.00	0.000

注: df 为自由度, SS 为离均差平方和, MS 为均方, F 为 F 统计量, p 为显著性。



注: 图中不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 监测点聚类分析各雨型特性差异

3.3 不同雨型产流产沙特性分析

不同雨型下各径流小区平均径流深、含沙量和土

壤流失量如图 3 所示。4 种雨型的降雨量和降雨侵蚀力排序均为: III > IV > II > I, 平均次降雨径流深排序为: III > IV > II > I, 平均次降雨含沙量排序为: III > II > I > IV, 平均次降雨土壤流失量排序为: III > IV > II > I, 土壤流量总量排序为: IV > I > II > III。III 雨型发生频次最低, 但其雨量和降雨侵蚀力最大, 产流量和产沙量也最大, 平均次降雨径流深 24.9 mm, 平均次降雨含沙量 12.7 g/L, 平均次降雨土壤流失量 0.672 t/hm², 2013—2020 年土壤流失总量 13.45 t/hm²。I 雨型发生频次最高, 雨量和降雨侵蚀力最小, 产流量和产沙量最小, 平均次降雨径流深 2.0 mm, 平均次降雨含沙量 5.3 g/L, 平均次降雨土壤流失量 0.123 t/hm², 2013—2020 年土壤流失总量 33.70 t/hm²。发生频次较低的 IV 型(大雨量中雨强)降雨, 所造成的

土壤流失总量最大,达 38.92 t/hm²,可能与其降雨历时长有关。I 雨型(小雨量小雨强)尽管造成的次土

壤流失量最小,但发生频次最高,因此土壤流失总量也较高,仅次于IV雨型。

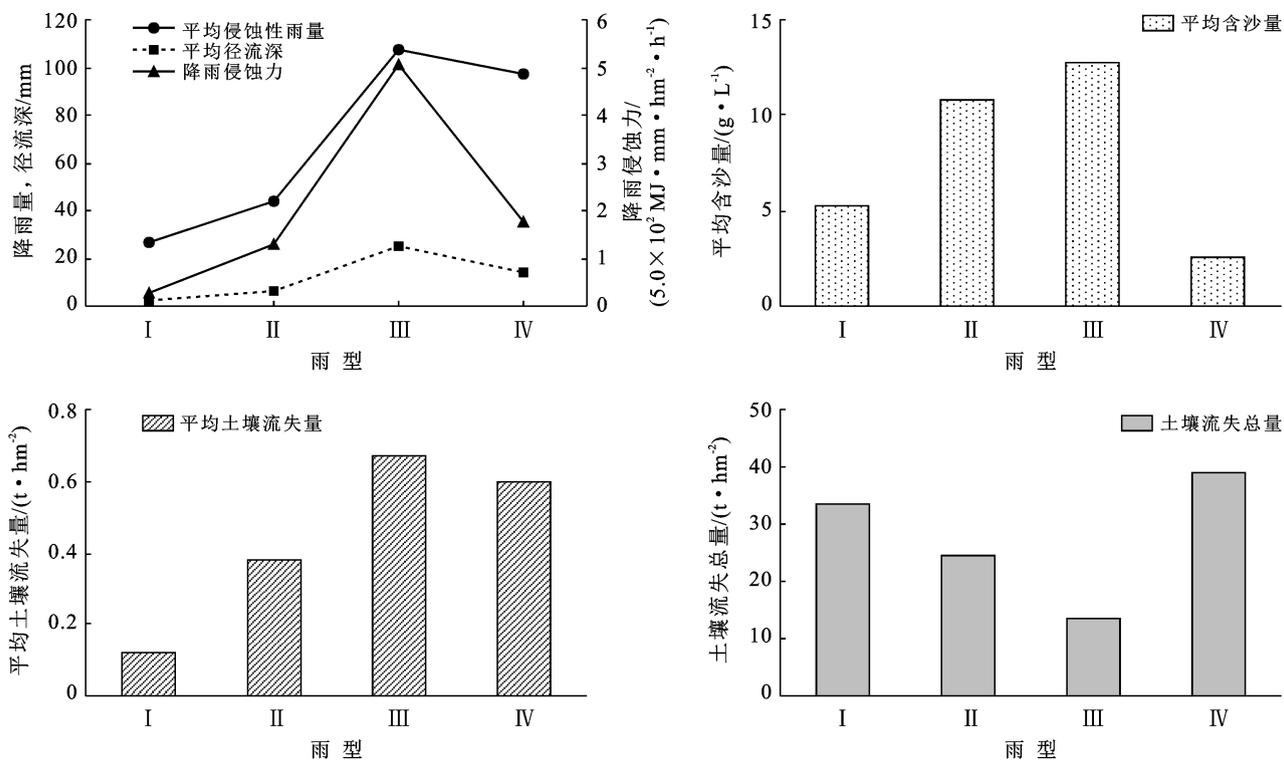


图 3 监测点不同雨型下产流产沙特征

3.4 次降雨产流量、产沙量相关性分析

对各径流小区在不同雨型下产沙量与降雨量、产沙量与径流深进行灰色相关性分析,结果详见表 4。不同径流小区的产沙量与降雨量、产沙量与径流深均有很好的相关性,相关系数最小为 0.61,最大为 0.86。I 雨型下,荒地小区产沙量与降雨量、径流深的灰色相关系数最高,分别为 0.85,0.86。在 I 雨

型和IV雨型下,各小区产沙量—径流深灰色相关系数大于产沙量—降雨量灰色相关系数,表明雨强较小时,地表径流与产沙量的相关性较降雨更大些。在 II 雨型和 III 雨型下,各小区产沙量—径流深灰色相关系数小于产沙量—降雨量灰色相关系数,表明雨强增大后,降雨量—产沙量较降雨量—地表径流更具相关性。

表 4 监测点不同雨型条件下次降雨量、产流量、产沙量的灰色相关分析

径流小区	产沙量—降雨量相关系数				产沙量—径流深相关系数			
	I 雨型	II 雨型	III 雨型	IV 雨型	I 雨型	II 雨型	III 雨型	IV 雨型
茶树	0.75	0.64	0.77	0.62	0.76	0.61	0.69	0.68
地瓜	0.84	0.78	0.78	0.77	0.86	0.74	0.70	0.83
花生	0.83	0.73	0.79	0.74	0.85	0.70	0.71	0.75
黄豆	0.75	0.73	0.75	0.69	0.75	0.70	0.69	0.79
荒地	0.85	0.65	0.80	0.71	0.86	0.65	0.72	0.79

3.5 不同下垫面产沙能力分析

对各径流小区不同雨型下累积降雨量和累积含沙量作双累积曲线并进行拟合(图 4),拟合方程(表 5)的斜率表示径流小区累积降雨量对产沙量的影响。由图 4—5 可见,不同雨型下各下垫面的拟合曲线趋势大致相同,产沙能力排序依次为:地瓜 > 黄豆 >

花生 > 茶树 > 荒地,地瓜、黄豆、花生、茶树的产沙能力分别是荒地的 3.2,2.8,2.5 和 2.0 倍。影响本试验径流小区各下垫面自身性质的因素有土地利用类型、耕作方式、植被种类、植被覆盖度等,从产沙能力的差异出发,逐一分析各因素的影响方式、影响作用和影响程度。

从不同的土地利用类型来看,农地的产沙能力最大,林地次之,荒地最小,农地产沙能力是林地的 1.4 倍,是荒地的 2.8 倍。荒地产沙最少,主要原因是处于自然状态的荒地没有经过人为活动干扰,表层土壤结构良好,且当地优势草种生长旺盛,也起到了一定的保水保土作用,使降雨和径流难以轻松剥离和冲刷土壤颗粒^[34]。而径流小区在种植农作物后,种植期内进行翻土播种除草收割,表层土扰动明显,土壤团块稳定性降低,更易被降雨和径流侵蚀。农作物收割后地表裸露,雨滴直接落在表层土壤上,加剧了土壤孔隙结构的破坏,土壤颗粒更易被径流冲刷,造成产沙能力增大。这与同为北方土石山区的山东沂蒙山区径流小区产流产沙研究结果是一致的^[23]。林地(茶树)常年种植,无须翻土,地表相对农地的人为扰动较小,且灌木从树冠对降雨具有一定的截留和缓冲作用,因此其产沙能力小于农地。

从相同土地利用类型的不同植物种类来看,研究

区地瓜、黄豆和花生 3 种农作物中,花生产沙能力最小,主要原因是花生种植是采用横向起垄的耕作方式,对地表径流和泥沙产生了一定截留作用,说明农作物耕作方式对水土流失影响较大。地瓜和黄豆耕作方式均为原坡面等高种植,降雨产生径流后,汇集成汩顺坡流下,更易冲刷土壤颗粒,因此保水保土效果次于起垄种植,产沙能力较大。研究区农作物生长过程中地瓜的覆盖度小于黄豆,产沙能力地瓜大于黄豆,说明相同的耕作方式下,植被覆盖度越高,阻挡降雨对地表土壤的直接侵蚀作用越大,其保水保土效果越好。

统计各影响因素产沙能力之间的差异,结果详见表 6。由表 6 可知,各因素表现为:不同土地利用类型间变异系数>不同耕作方式间变异系数>不同植被覆盖度间变异系数,可见不同土地利用类型对产沙能力影响的差异较大,不同植被覆盖度对产沙能力影响的差异较小。

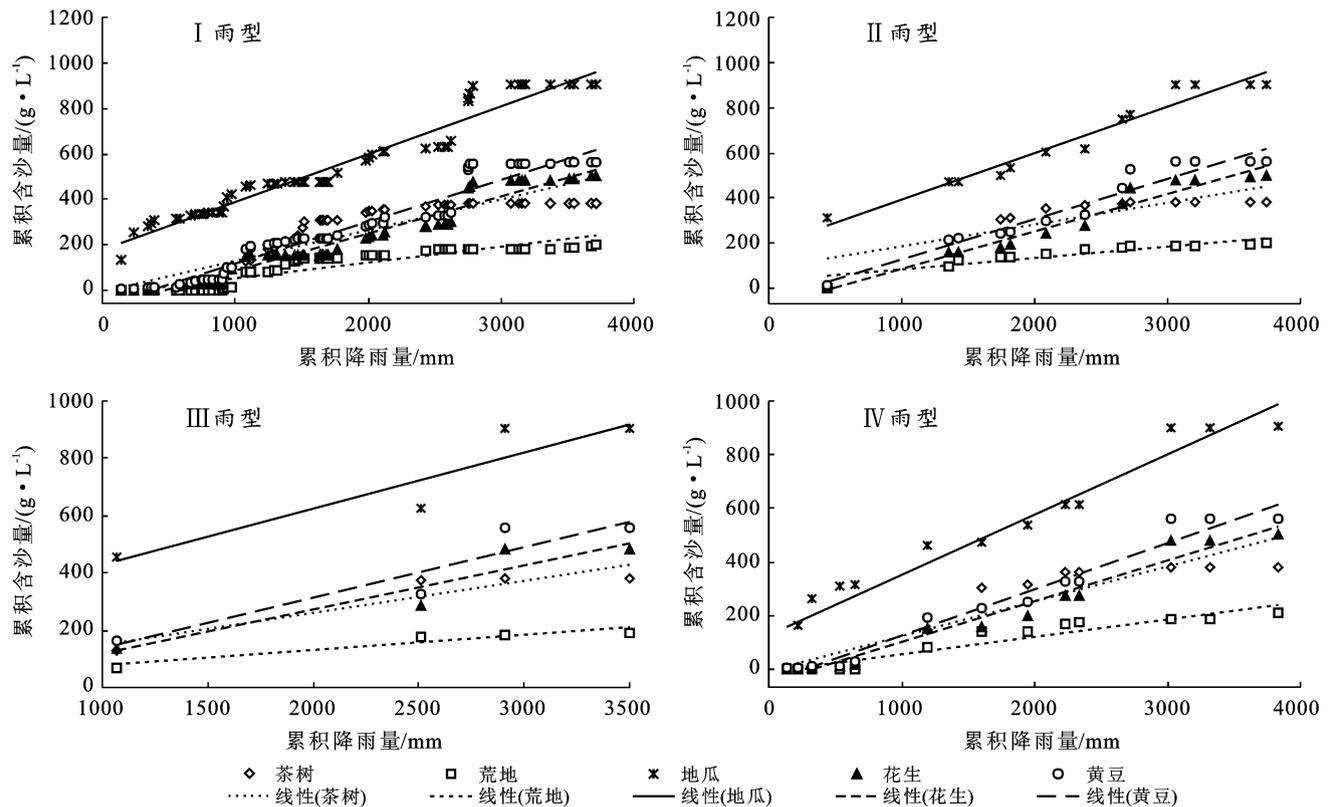


图 4 不同雨型下降雨量—产沙量双累积曲线

表 5 降雨量—产沙量双累积曲线线性拟合方程

土地利用	线性拟合方程	R^2
地瓜	$y=0.212\ 6x+170.94$	0.944 6
黄豆	$y=0.182\ 5x-61.781$	0.947 6
花生	$y=0.162\ 2x-71.837$	0.952 5
茶树	$y=0.129\ 5x+1.997\ 1$	0.838 0
荒地	$y=0.066x-7.747\ 6$	0.856 6

表 6 不同影响因素的产沙能力差异分析

项目	影响因素		
	土地利用类型	耕作方式	植被覆盖度
标准偏差	0.060	0.025	0.021
变异系数	0.472	0.141	0.108

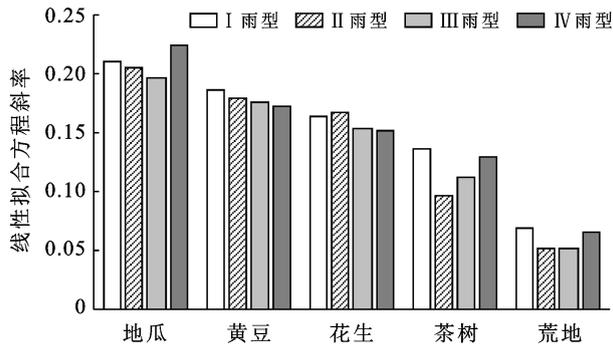


图5 不同雨型下各径流小区产沙能力

3.6 人类活动对地表扰动的水土保持效应分析

径流小区内荒地天然原生态坡面,生长当地优势草种,平均土壤含水量34.2%,土壤容重 1.27 g/cm^3 ,土壤孔隙度52.3%,土壤有机质含量13.2%,其地表土壤无人类活动扰动,以此作为背景对照组,分析林地、农地和荒地三者产流产沙差异,结合植物生长期的种植过程及其对土壤性质的影响,讨论人类活动对地表扰动的水土保持效应。由图6可见,荒地径流深最小,产流中的含沙量最低,土壤流失量最少;林地茶树径流深最大,含沙量较低,综合起来土壤流失量较少;农地径流深介于两者之间,但含沙量最高,因此土壤流失量最大。

林地种植茶树,为灌木丛,种植期间多有浇水、除草、修剪,平均土壤含水量31.6%,土壤容重 1.57 g/cm^3 ,土壤孔隙度40.8%,土壤有机质含量7.97%,植被覆盖度全年保持在75%左右。农地分别种植地瓜、黄豆和花生,汛期生长,种植期间进行除草喷药等田间管理,收割后地表裸露。其中地瓜生长期为5—10月,土壤耕作深度10—20 cm,平均土壤含水量30.2%,土壤容重 1.48 g/cm^3 ,土壤孔隙度44.3%,土壤有机质含量8.74%,植被覆盖度保持在5%~65%左右;

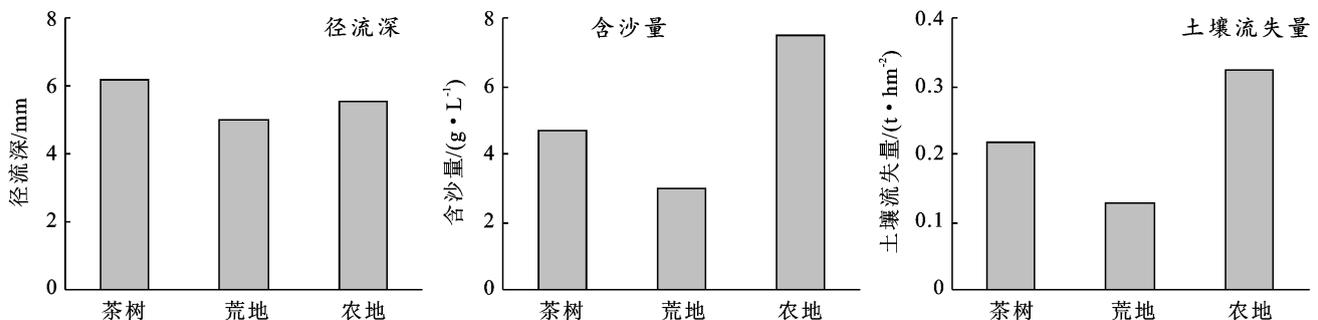


图6 不同下垫面平均次降雨径流深、含沙量和土壤流失量

3.7 不同雨型下各下垫面产流产沙差异分析

采用非参数检验法分析不同下垫面间产流产沙

黄豆生长期为5—9月,土壤耕作深度约3 cm,平均土壤含水量29.0%,土壤容重 1.45 g/cm^3 ,土壤孔隙度45.5%,土壤有机质含量8.2%,植被覆盖度保持在18%~95%左右;花生生长期为5—9月,横向起垄种植,土壤耕作深度10—15 cm,平均土壤含水量18.4%,土壤容重 1.45 g/cm^3 ,土壤孔隙度45.3%,土壤有机质含量7.6%,植被覆盖度保持在23%~55%左右。

人类活动扰动过的土地与自然荒地土壤性质理化指标上有明显差异。荒地土壤容重低,孔隙度大,降水入渗性能好,产流较少,土壤有机质含量高,土壤团聚体水稳定性指数高,土壤抗蚀性高,产流中的含沙量最少,因此整体土壤流失量最低。人类种植耕作活动扰动地表,土壤孔隙度减小,植物生长消耗使土壤有机质含量减少,土壤团聚体水稳定性指数降低,土壤抗蚀性降低,更易发生水土流失。农地和林地在土壤结构上也存在明显差异,农地土壤孔隙度比林地较高,土壤含水量较林地低,土壤渗透性强,表明种植农作物能在一定程度上改善土壤结构,提高降雨入渗率,由此造成林地产流量高于农地。但林地产流中的含沙量低于农地,可能与农地每年进行翻土播种收割等耕作活动有关,农地相对于林地土壤扰动较大,造成其土壤团聚体稳定性不如林地,更易被径流冲刷侵蚀,且林冠对降雨有一定的截留和缓冲作用,并能降低地表土壤的溅蚀,使农地含沙量高于林地,由此综合作用,造成农地土壤流失最高。

综上所述,种植农作物能在一定程度上改善土壤结构,提高土壤水分入渗能力,降低坡面产流量,但长期耕作减少了土壤有机质含量,降低了土壤团聚体水稳定性指数和土壤抗蚀性,增大了土壤侵蚀风险;林地土壤抗侵蚀性指标较好,种植茶树能有效降低产流中的含沙量,从而减少土壤流失总量;天然荒地土壤抗侵蚀性指标最高,土壤流失总量最少。

在统计上的差异性, I雨型下不同下垫面间产流产沙的差异性极显著($p < 0.01$),其他雨型下不同下垫面

间产流产沙没有显著性差异($p>0.05$)。其中径流深的显著性检验 p 值大小排序为:Ⅲ>Ⅱ>Ⅳ>Ⅰ,与雨强大小变化规律一致,说明不同下垫面间产流的差异性随雨强增大而减小。含沙量的显著性检验 p 值大小排序为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,与雨量和降雨侵蚀力大小变化规律一致,说明不同下垫面间含沙量的差异性随雨量和降雨侵蚀力增大而减小。土壤流失量的显著性检验 p 值大小排序为:Ⅳ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ,是径流量和含沙量相互作用的结果,与雨量、雨强和降雨侵蚀力变化规律均不一致。

分析其原因,在Ⅰ雨型条件下,各下垫面之间的产流产沙具有极显著性差异,这可能是由于小雨量小雨强下降雨侵蚀中的溅蚀作用比较明显,植被林冠层截留、土壤表层的渗蓄填注作用也比较明显,因此各下垫面间产流产沙差异表现得较为显著。随着雨量和雨强的增大(Ⅲ雨型),有可能发生超渗产流,当雨量增大到形成一定深度的坡面径流后,雨滴难以直接滴溅于土壤表面,水层具有消能作用,从而对雨滴滴溅形成一定的缓冲作用,此时主要由坡面径流产生面蚀,各下垫面间差异的影响不再显著。

4 结论

(1) 连云港市低山丘陵区黑林监测点侵蚀性降雨主要集中在汛期,其中7月侵蚀性降雨产生频次和侵蚀性降雨总量最高。2013—2020年总共发生侵蚀性降雨88次,侵蚀性降雨量占总降雨量的57.6%。

(2) 侵蚀性降雨分为4类:Ⅰ雨型(小雨量、小雨强)、Ⅱ雨型(中雨量、中雨强)、Ⅲ雨型(大雨量、大雨强)和Ⅳ雨型(大雨量、中雨强)。发生频次排序为:Ⅰ>Ⅱ=Ⅳ>Ⅲ,次降雨侵蚀力排序为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,平均次降雨径流深排序为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,平均次降雨含沙量排序为:Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅳ,平均次降雨土壤流失量排序为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,土壤流失总量排序为:Ⅳ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ。发生频次最低的Ⅲ雨型,次雨量、降雨侵蚀力、产流量和产沙量最大;发生频次最高的Ⅰ雨型,次雨量、降雨侵蚀力、产流量和产沙量最小;发生频次较低的Ⅳ雨型造成的土壤流失总量最大。

(3) 研究区内降雨量、产流量与产沙量均有较好的相关性。雨强较小时,径流深对土壤侵蚀的影响作用较降雨量更大;雨强增大后,降雨量对土壤侵蚀的影响作用较径流深更大。

(4) 相同降雨条件下,产沙能力排序依次为:地瓜>黄豆>花生>茶树>荒地,农地的产沙能力最大,林地次之,荒地最小;农地中横向起垄种植的花生

产沙能力小于原坡面种植的农作物;同样原坡面种植的地瓜和黄豆中,覆盖度高的黄豆产沙能力小于地瓜。减少地表土壤的人为扰动,横向起垄种植,选择覆盖度高的植物更有利于提高水土保持效益。

(5) 种植农作物能在一定程度上改善土壤结构,降低坡面产流量,但增大了土壤侵蚀风险;林地土壤抗侵蚀性指标较好,种植茶树能有效降低产流中的含沙量,从而减少土壤流失总量;天然荒地土壤抗侵蚀性指标最高,土壤流失总量最少。林地减沙效应较好,农地有一定减流效应,总体上林地水保效益优于农地。

(6) 在小雨量和小雨强下,不同下垫面之间的产流产沙差异显著,随着雨量和雨强的增大,不同下垫面之间的产流产沙差异逐渐减小。

[参 考 文 献]

- [1] 孙习稳,李晓妹.水土流失是我国最严重的公害[J].国土与自然资源研究,2002(4):36-38.
- [2] 才业锦.重庆市水土保持措施效应及小流域治理范式评价[D].重庆:西南大学,2010.
- [3] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [4] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.
- [5] 寇馨月,黄俊,姜学兵,等.不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):27-31,38.
- [6] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析[J].自然资源学报,2019,34(7):1405-1416.
- [7] 李锡泉,田育新,袁正科,等.湘西山地不同植被类型的水土保持效益研究[J].水土保持研究,2003,10(2):123-125,157.
- [8] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等.降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J].北京林业大学学报,2010,32(4):161-168.
- [9] Derek B B, James R K, Sally S, et al. Reviving urban streams: Land use, hydrology, biology and human behavior [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004,40(5):1351-1364.
- [10] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010,467(7311):43-51.
- [11] 张晓明,余新晓,武思宏,等.黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化对径流产沙的影响[J].北京林业大学学报,2007,29(6):115-122.
- [12] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵区坡面产流产沙的影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):

- 173-178.
- [13] 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): 105-114.
- [14] 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(2): 58-63.
- [15] 谢波, 杨广斌, 李亦秋, 等. 黔中喀斯特山地侵蚀性降雨特征及其侵蚀响应[J]. 生态科学, 2021, 40(3): 222-230.
- [16] 杨青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9-16.
- [17] 张琳卿, 覃莉, 刘忠仙, 等. 黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 15-21, 30.
- [18] 辛伟, 朱波, 唐家良, 等. 紫色土丘陵区典型坡地产流及产沙模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 31-35.
- [19] 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.
- [20] 王小博, 朱永清, 吴宜进, 等. 不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 6-11.
- [21] 汪邦稳, 肖胜生, 张光辉, 等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239-243.
- [22] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 等. 太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 5-11.
- [23] 林锦阔, 李子君, 许海超, 等. 降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 7-12, 19.
- [24] 林和平, 刘丁慧, 鲍乃源. 灰色相关分析及其应用研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2007, 25(1): 84-90.
- [25] 赵阳, 余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 39-45.
- [26] 冉大川, 刘斌, 付良勇, 等. 双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J]. 人民黄河, 1996, 18(6): 24-25.
- [27] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51.
- [28] 陶莹, 杨锋, 刘洋, 等. K 均值聚类算法的研究与优化[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(6): 90-92.
- [29] Abdeyazdan M. Data clustering based on hybrid K -harmonic means and modifier imperialist competitive algorithm [J]. Journal of Supercomputing, 2014, 68(2): 574-598.
- [30] Hung C H, Chiou H M, Yang Weining, et al. Candidate groups search for K -harmonic means data clustering [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(24): 10123-10128.
- [31] 罗军锋, 锁志海. 一种基于密度的 K -means 聚类算法[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(10): 28-31.
- [32] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland and east of the Rocky Mountains [M]. USDA, ARS: Agriculture Hand Book, 1965.
- [33] 杨轩, 李丹丹, 吕玮玮, 等. 降雨侵蚀力模型研究进展[J]. 现代农业科技, 2019(14): 199-202, 206.
- [34] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85-90.

(上接第 17 页)

- [23] 温林生, 邹芹, 万媛媛, 等. 森林流域水文过程研究进展[J]. 绿色科技, 2021, 23(6): 153-156, 161.
- [24] 袁勤, 崔向新, 乔荣. 砭砂岩区不同人工林对土壤理化性质的影响[J]. 北方园艺, 2013(18): 52-55.
- [25] 盛后财, 郭娜, 琚存勇, 等. 胡桃楸人工林降雨截留分配效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(7): 128-133.
- [26] 刘龙. 砭砂岩区 3 种林地持水性能与林木耗水规律研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [27] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 等. 不同立地条件下坡面水土流失的差异性试验研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 222-224.
- [28] 冯志倩, 娄永才, 齐星圆, 等. 汇流强度、坡度及侵蚀泥沙颗粒分形对工程堆积体坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 127-134.
- [29] 郭军权, 王文龙. 坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 87-92, 212.
- [30] 于国强, 贾莲莲, 朱冰冰, 等. 不同坡位的植被缓冲带对坡面侵蚀产沙来源的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 9-13.
- [31] 刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6): 140-146.