

裸露砒砂岩区人工林地侵蚀特征及其侵蚀量模拟研究

秦富仓¹, 董晓宇¹, 杨振奇²

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 研究裸露砒砂区天然降雨条件下不同类型人工林地的侵蚀特征, 为裸露砒砂区植被建设和减轻泥沙入黄提供科学指导。[方法] 以裸露砒砂岩区广泛栽植的油松人工林、山杏人工林、沙棘人工林和柠条人工林以及草地和裸地为研究对象, 采用径流小区监测的手段, 对各类型样地的年内天然降雨以及土壤侵蚀量进行监测。[结果] ①依据研究的年内降雨数据, 裸露砒砂岩区区长历时的暴雨和中到大雨的情况下, 瞬时雨量呈现双峰趋势, 累积降雨量呈梯式增长规律; 短历时的暴雨和小到中雨的瞬时雨量呈单峰趋势, 累积降雨量分别呈 S 形和线性增长趋势; ②裸露基岩坡面侵蚀较为严重, 总产流量达 28.48 L, 总土壤侵蚀量达 31.85 t/(hm²·a), 有植被的坡面总产流量在 9.8~18.41 L 之间, 总土壤侵蚀量在 1.67~10.14 t/(hm²·a) 之间。各类型人工林地的产流量随着降雨类型的变化并无统一规律; 但土壤侵蚀量均呈现: 裸地>草地>柠条林>山杏林>油松林>沙棘林的规律。油松林和沙棘林地的产流量和土壤侵蚀量均呈极显著相关关系, 相关系数分别 0.929, 0.893; 各类型样地的平均雨强和 I_{30} 均与土壤侵蚀量呈显著相关关系, 相关系数高于 0.595。③各类型人工林地降雨量分别与径流量、土壤侵蚀量呈多元线性 ($R^2 > 0.771$) 的关系。降雨产流模型的 Nse 值高于 0.62, 除柠条人工林外降雨产沙模型的 Nse 值高于 0.57, 表明模型精度相对较高。[结论] 在裸露砒砂岩区侵蚀性降雨条件下, 人工林地降雨、产流与产沙均存在一定的函数关系且人工林地的侵蚀量小于裸露坡面的侵蚀量。

关键词: 裸露砒砂岩区; 人工林; 侵蚀产沙; 侵蚀调控

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0009-09

中图分类号: S157.1, S715.3

文献参数: 秦富仓, 董晓宇, 杨振奇. 裸露砒砂岩区人工林地侵蚀特征及其侵蚀量模拟研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 9-17. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.002; Qin Fucang, Dong Xiaoyu, Yang Zhenqi. Erosion characteristics and its simulation of erosion amount for an artificial forest in an exposed feldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 9-17.

Erosion Characteristics and Its Simulation of Erosion Amount for an Artificial Forest in an Exposed Feldspathic Sandstone Area

Qin Fucang¹, Dong Xiaoyu¹, Yang Zhenqi²

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. Institute of Pastoral

Water Conservancy Science, Ministry of Water Resources, Huhhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The rainfall characteristics and water and sediment control ability of different types of artificial forestland in an exposed feldspathic sandstone area were determined in order to provide guidance for vegetation construction in the study area and for sediment reduction into the Yellow River. [Methods] The annual natural rainfall and soil erosion of plots on *Pinus tabulaeformis*, *Apricot*, *Hippophae rhamnoides*, and *Caragana korshinskii* plantations, and on grassland and bare land were monitored by means of runoff plot monitoring. [Results] ① Under the condition of long duration heavy rain and moderate to heavy rain in an exposed feldspathic sandstone area, instantaneous rainfall presented a double peak trend, and cumulative

收稿日期: 2021-11-24

修回日期: 2022-03-03

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金重大项目“黄河流域砒砂岩区重力侵蚀机理研究”(2021ZD07); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0075); 国家自然科学基金重大项目(41967008); 内蒙古自治区科技兴蒙行动重点专项(KJXM-EEDS-2020005); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0052)

第一作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事土壤侵蚀及水土保持等方面的研究。Email: qinfuc@126.com。

通讯作者: 杨振奇(1993—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与荒漠化防治等方面的研究。Email: 843296578@qq.com。

rainfall increased in a ladder pattern. The short duration rainstorm and the instantaneous rainfall of a light to moderate rain showed a single peak trend, and the cumulative rainfall showed an S shape and a linear increasing trend, respectively. ② The erosion of exposed bedrock slopes was serious, with a total runoff of 28.48 L and a total soil erosion of 31.85 t/(hm² · a). The total runoff of vegetation slopes was between 9.8 and 18.41 L, and the total soil erosion was between 1.67 and 10.14 t/(hm² · g). There was no uniform rule for the yield and discharge for different types of artificial forestland with change in rainfall type. However, the amount of soil erosion followed the order of bare land > grassland > *Caragana korshinskii* > *Apricot* > *Pinus tabulaeformis* slightly > *Hippophae rhamnoides* forests. The yield and discharge of *Pinus tabulaeformis* forest and *Hippophae rhamnoides* forest were significantly correlated with soil erosion, with correlation coefficients of 0.929 and 0.893, respectively. The mean rainfall intensity and I_{30} were significantly correlated with soil erosion, and the correlation coefficients were greater than 0.595. ③ The relationship between rainfall and erosion of different types of artificial forestland conformed to a multiple linear equation ($R^2 > 0.771$). The Nse of the rainfall and runoff model was greater than 0.62. The Nse of the rainfall and sediment production model was greater higher than 0.57, except for the *Caragana korshinskii* plantation. It showed that the model accuracy was relatively high. [Conclusion] Under erosive rainfall conditions in a bare feldspathic sandstone area there is a certain functional relationship between rainfall, runoff, and sand production in forest plantation land, and the erosion on forest plantation land is smaller than on bare slope.

Keywords: exposed feldspathic sandstone area; plantation; erosion and sediment yield; erosion control

黄河流域的部分地区生态环境形势依旧严峻,特别是分布于黄河流域粗泥沙集中来源区的裸露砒砂岩区水土流失最为剧烈,生态环境最为恶劣^[1-3]。该区年内降雨多集中在夏末秋初,降雨引发的水力侵蚀是该区最为主要的侵蚀形式之一,多年来政府及有关部门大力开展林草工程使得裸露砒砂岩区的水力侵蚀状况有了明显的改善^[4-5],并且针对该区植被和土壤侵蚀特征的关系进行了大量的研究。杨振奇等^[6]通过对比砒砂岩区不同类型人工林地减流减沙能力,得出营造人工植被可以有效防治裸露砒砂岩区坡面的水土流失问题,并且沙棘人工林的减沙能力最强。陈鹏等^[7]通过对比研究砒砂岩区的不同类型灌草分布格局坡面的侵蚀状况,并认为植被措施可以显著改善坡面土壤侵蚀状况,不同灌草格局的径流量以及产沙量均值分别比裸坡降低了 44% 和 65%。白雪莲等^[8]对砒砂岩区植被盖度和土壤侵蚀模数的关系进行了分析,明确了土壤侵蚀模数与植被盖度的抛物线型关系。王伦江等^[9]通过小区径流冲刷试验,分析不同苜蓿密度下砒砂岩陡坡产流产沙特性规律,结果表明苜蓿覆盖下的砒砂岩陡坡主要在径流冲刷前期产沙,并呈现单峰形式,并得出苜蓿减小砒砂岩陡坡径流量的结论。此外,还有张喜旺等^[10]从空间尺度研究了砒砂岩区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响,从流域尺度为砒砂岩区域侵蚀治理提供了一定的数据支持。综上所述,众多学者对砒砂岩区植被和土壤侵蚀的关系方面做了大量研究,而针对该研究区域的常见的如油松(*Pinus tabuliformis*)、沙棘

(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)以及山杏(*Armeniaca sibirica*)等人工林地的土壤侵蚀研究并不多见,且对于天然降雨条件下的裸露基岩区坡面人工林地侵蚀特征及其与降雨的关系的研究也鲜见报道。因此,本文在分析裸露砒砂岩区不同类型降雨特征的基础上,对比不同类型人工林地侵蚀特征,并基于监测数据得出降雨和产流产沙关系模型,以为裸露砒砂岩区植被建设和土壤侵蚀治理,以及黄河流域的生态保护和高质量发展提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗西部暖水乡圪秋沟流域,地理坐标为 39°42′—39°50′N, 110°25′—110°48′E。研究区北高南低,是典型的丘陵沟壑区,山高沟深,岩石裸露程度较高,属于裸露砒砂岩区。属于中温带半干旱大陆性季风气候区,其特点是冬季寒冷且漫长,夏季炎热且短促,春秋变化最为明显,年平均气温 6.5℃,多年平均降雨量 400 mm,年最大降雨量为 640.2 mm,年最小降雨量为 144.3 mm,雨季主要集中在 6—9 月,多年日照时数为 2 900 ~ 3 200 h,无霜期 148 d,年平均风速 3.4 m/s。研究区表土较薄,土壤结构疏松,富含石灰,地势起伏较大,沟壑纵横,水土流失严重。自然植被稀疏,植被主要以人工植被为主,主要树种有柠条、沙棘、油松、山杏、侧柏(*Platycladus orientalis*)等,草本主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

2 材料与方法

2.1 人工林地选取

裸露砒砂岩分布最多的人工造林树种为沙棘、柠条、油松和山杏,因此,本文于2019年选取了裸露砒砂岩区坡面林龄相同,坡度坡向一致的这4种类型的人工林地,建立径流小区进行土壤侵蚀监测,同时选取立地条件一致的草地和裸露砒砂岩坡面作为对照。人工林样地基本情况详见表1。

表1 人工林样地基本情况表

径流小区规格	树种	林龄	坡度	坡向	树高/m	冠幅/m
2 m×5 m	油松	10 a	斜坡	阳坡	2.26±0.54	1.78±0.95
	沙棘				1.33±0.62	1.45±0.55
	柠条				1.35±0.41	1.80±0.59
	山杏				2.65±0.91	2.19±0.77

2.2 径流小区布设

由于裸露砒砂岩区地貌较为破碎,因此以实际地形条件为前提,在不同类型样地内分别设置6处规格为2 m×5 m的径流小区。四周使用2块长5 m宽0.5 m厚2.5 mm的钢板和1块长2 m宽0.5 m厚2.5 mm的钢板,用皮锤打入地下30 cm作为隔水墙,地上外露20 cm,用于分隔小区内外径流,为防止边界渗水,在钢板插入地下时避免边界有植物根系等杂物阻挡并用木槌夯实,夯实过程中应尽量减少对土壤的扰动影响试验结果;小区下设置集流装置,用于收集径流及泥沙样品。并于各径流小区监测场外安装美国HoBo U30便携式气象站及配套产品对降雨过程进行监测。每场降雨事件结束后分别对各类型样地的降雨量和径流土壤侵蚀量进行测算并详细记录。

2.3 数据分析与处理

土壤侵蚀量的计算公式为:

$$S_r = \frac{M_s}{S} \quad (1)$$

式中: S_r 为土壤侵蚀量(g/hm^2); M_s 为泥沙量(t); S 为面积(hm^2)。

降雨动能 E 的计算公式为:

$$E = \sum e_i p_i \quad (2)$$

$$e_i = \begin{cases} 0.119 + 0.087 \lg I_i & (I_i \leq 76 \text{ mm/h}) \\ 0.283 & (I_i > \frac{76 \text{ mm}}{\text{h}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: e_i 是各时段的单位降雨动能; p_i 是与 e_i 对应的降雨量; I_i 是各时段的降雨强度。

降雨侵蚀力指数 R 的计算公式为:

$$R = E \times I_{30} \quad (4)$$

式中: E 为单次降雨事件降雨总动能; I_{30} 为最大30 min雨强。

降雨径流模拟和降雨产沙模拟精度验证选用纳什系数 Nse 进行校准和不确定性评价, Nse 能够反映拟合的程度, Nse 高于0.60时则表示拟合结果可接受。 Nse 值越接近于1,则表示模拟效果越好。

$$Nse = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{oj} - Q_{sj})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{oj} - \bar{Q}_{oj})^2} \quad (5)$$

式中: Q_{oj} 单次指标实测值; Q_{sj} 单次指标模拟值; \bar{Q}_{oj} 实测值的总平均; \bar{Q}_{sj} 模拟值的总平均; n 事件发生总数。

使用Excel,Origin 2019,SPSS 22等软件对数据进行数据分析以及图表的制作。

3 结果与分析

3.1 降雨特征分析

本文监测到圪秋沟流域典型支流鲍家沟小流域2019年天然降雨15场,总降雨量为410.8 mm。由流域2019年次降雨特征可以看出(表2),研究区8月的降雨总量254.6 mm,约占6—9月降雨总量的62.10%;且降雨侵蚀力最高,达到817.44 [(MJ·mm)/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}$)],约占年降雨侵蚀力的63.55%。

目前已有学者^[2]根据多年裸露砒砂岩区的降雨特征对天然降雨的雨型进行了划分(表3),以该划分标准为依据,2019年研究区共发生了长历时暴雨1次,长历时中到大雨4次,短历时暴雨5次,短历时中到小雨5次。本文依据各次降雨的降雨量、降雨历时及 I_{30} 的数据(表2)选取了2019年的7月4日、8月5日、8月26日与9月5日4场不同的降雨类型的降雨事件,依据表3的划分标准分别代表第3类降雨、第2类降雨、第1类降雨及第4类降雨,对其累积雨量和瞬时雨量随的时间变化过程进行了分析。

图1表示圪秋沟流域各类型降雨的降雨过程。由图1可以看出,第1类雨型降雨的累积降雨量为98.2 mm,降雨累积历时长达1 167 min,降雨过程的瞬时雨量呈现为前主峰的双峰趋势,主降雨峰到达时间在降雨开始后的58 min左右,降雨峰值达7.2 mm,而后降雨强度逐渐较小,在累计时间500和800 min分别迎来两次峰值,降雨峰值达到1.8和2.6 mm,降雨强度为21.6和31.2 mm/h,整体来看

第 1 类降雨的累积降雨量伴随着雨峰的出现呈 3 阶梯式增长的趋势;第 2 类降雨的累积降雨量达到 33.4 mm,累积历时长达 845 min,降雨过程中在 360~564 min 处发生约 200 min 的降雨中止事件,降雨过程的瞬时雨量呈现后主峰的双峰趋势,在 735 min 时主峰出现,降雨峰值达 5.2 mm,降雨强度为 50.40 mm/h,累积降雨量呈双阶梯式增长的趋势;第 3 类降雨的累积降雨量为 36.6 mm,历时为 387 min,降

雨过程的瞬时雨量呈明显的单峰形态,降雨峰值出现在降雨开始的第 125 min,降雨量为 5.5 mm,降雨强度为 63.8 mm/h,在 250~340 min 内有 90 min 的降雨暂停事件发生,累积降雨量呈 S 形增长的趋势;第 4 类降雨累积降雨量达到 15.4 mm,历时 102 min,降雨过程瞬时雨量呈现单峰形态,降雨峰值出现在降雨开始的第 25 min,降雨量为 1.9 mm,降雨强度达 31.20 mm/h,累积降雨量呈线性增长的趋势。

表 2 圪秋沟流域 2019 年降雨特征

降雨编号	降雨量/ mm	历时/ min	平均雨强/ (mm·min ⁻¹)	次降雨功能 E / (MJ·hm ⁻²)	最大 30 min 雨强 I_{30} / (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力 R / (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)
20190605	16.6	425	2.01	2.29	14.2	32.44
20190611	15.4	785	0.84	1.39	4.8	6.61
20190618	13.4	160	6.5	3.37	17.2	57.53
6 月合计	45.4					96.58
20190704	36.6	387	3.6	3.28	8.6	28.1
20190711	18.2	1071	1.03	2.41	4.8	11.42
20190720	14.4	872	1.52	3.4	18.2	60.98
20190730	9.8	222	1.44	1.75	8.4	14.5
7 月合计	79					115
20190802	19.2	161	6.7	3.35	16.2	54.1
20190805	33.4	845	2.78	5.86	22	128.68
20190811	23.6	218	6.01	3.74	24.4	91.08
20190812	23.2	431	11.15	4.98	16.2	80.22
20190822	57	724	1.49	2.28	10.08	22.56
20190826	98.2	1 167.7	1.68	6.84	64.6	440.80
8 月合计	254.6					817.44
20190905	15.4	102	17.1	8.24	28.4	233.87
20190917	16.4	401	1.24	1.98	11.8	23.32
9 月合计	31.8					257.19
年总计	410.8					1 286.21

表 3 不同降雨类型统计参数数值范围

降雨类型	降雨量/mm	降雨历时/min	最大 30 min 雨强 I_{30} /(mm·h ⁻¹)
第 1 类(长历时暴雨)	96.20~98.60	1 140.00~1 165.00	40.00~78.40
第 2 类(长历时中到大雨)	13.35~34.93	715.94~1 295.24	2.52~19.54
第 3 类(短历时暴雨)	15.99~62.19	384.52~598.98	7.74~33.56
第 4 类(短历时中到小雨)	5.43~31.03	55.40~227.40	8.34~31.92

3.2 不同类型人工林地侵蚀特征对比分析

由于降雨而引发的水力侵蚀是裸露砢砂岩区最为主要的侵蚀形式。在对研究区的降雨类型进行划分和降雨特征进行分析后,为了进一步研究不同类型人工林的水沙调控能力,本文选取具有代表性的油松林、山杏林、沙棘林、柠条林 4 种纯林,选取草地和裸地作为对照。为了更为直观地比较不同植被对坡面

产流产沙特征的影响,按照侵蚀性降雨发生的顺序,选择 2019 年的 7 场具有强烈土壤侵蚀性的第 2 类降雨和第 3 类降雨进行分析。图 2 为不同人工林类型坡面降雨量与径流量和土壤侵蚀量的关系,不同形状节点分别表示第 2 类降雨和第 3 类降雨,代表了 7 场降雨中有 3 次属长历时的中到大雨(第 2 类降雨),有 4 次短历时的暴雨(第 3 类降雨)。降雨中以第 4 次

降雨产生的坡面径流量最高,该次降雨为雨量达 56.8 mm, I_{30} 达 11.2 mm/h, I_{10} 达 19.2 mm/h, 裸露坡面的产流量 8.78 L, 其余依次为:草地(5.65 L) > 沙棘林(5.54 L) > 柠条林(4.87 L) > 山杏林(3.95 L) > 油松林(3.72 L)。裸露坡面土壤侵蚀量最大,达到 10.8 t/hm², 其余依次为草地(2.84 t/hm²) > 柠条林(1.03 t/hm²) > 山杏林(0.57 t/hm²) > 油松林(0.51 t/hm²) > 沙棘林(0.48 t/hm²)。降雨中以第 3 次降雨造成的径流量和土壤侵蚀量最小,该次降雨量为

14.4 mm, I_{30} 为 18.2 mm/h, I_{10} 达 20.8 mm/h, 裸地产流量 0.59 L, 土壤侵蚀量为 2.05 t/hm²。整体来看,7 场降雨裸露基岩坡面的总产流量达 28.48 L, 总土壤侵蚀量达 31.85 t/hm², 有植被的坡面总产流量在 9.8~18.41 L 之间, 总土壤侵蚀量在 1.67~10.14 t/hm² 之间, 由此看出, 裸露基岩坡面的产流量是有植被坡面的 1.5 倍以上, 侵蚀量是有植被生长坡面的 3 倍以上。以上分析表明, 植被能有效减少坡面径流和土壤侵蚀量, 而人工林地的减流减沙能力明显优于草地和裸地。

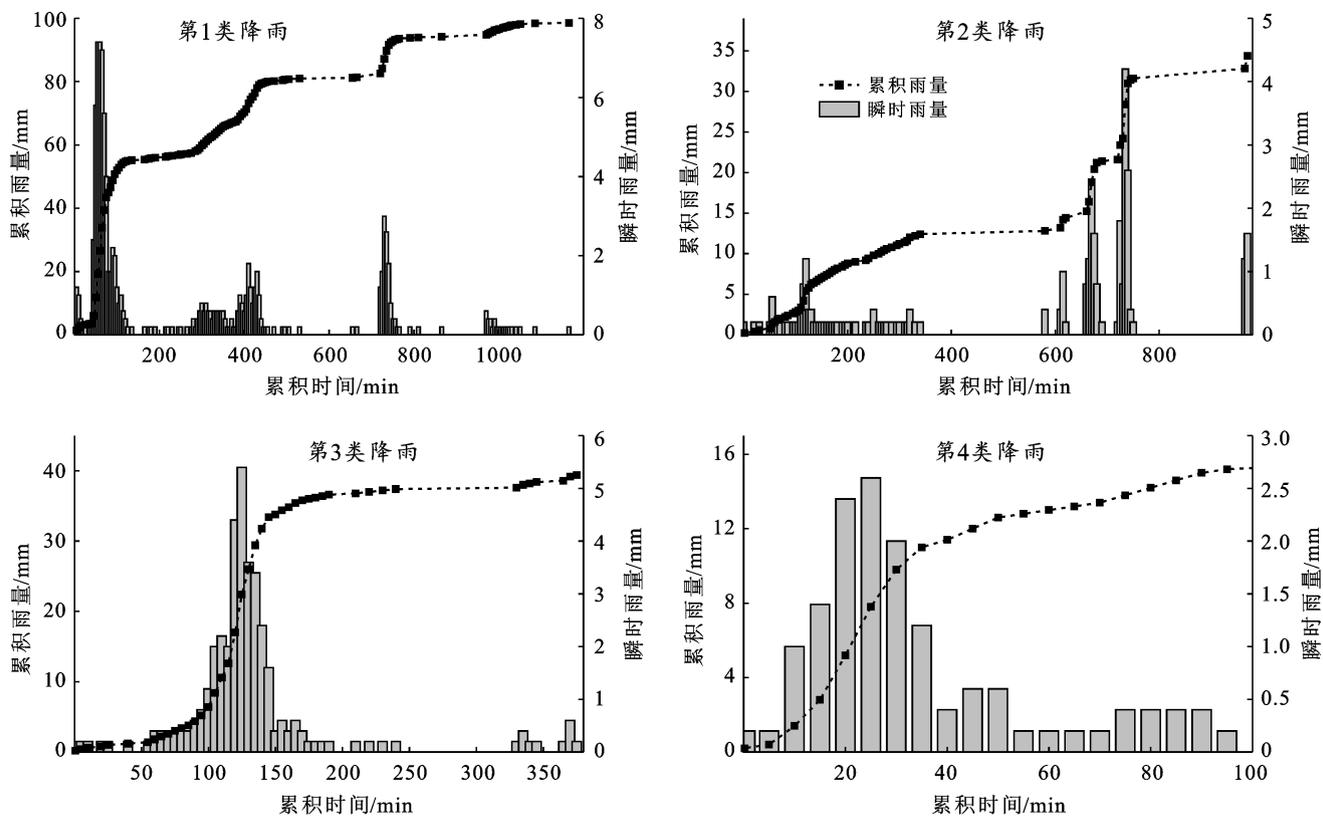


图 1 圪秋沟流域不同雨型的降雨过程

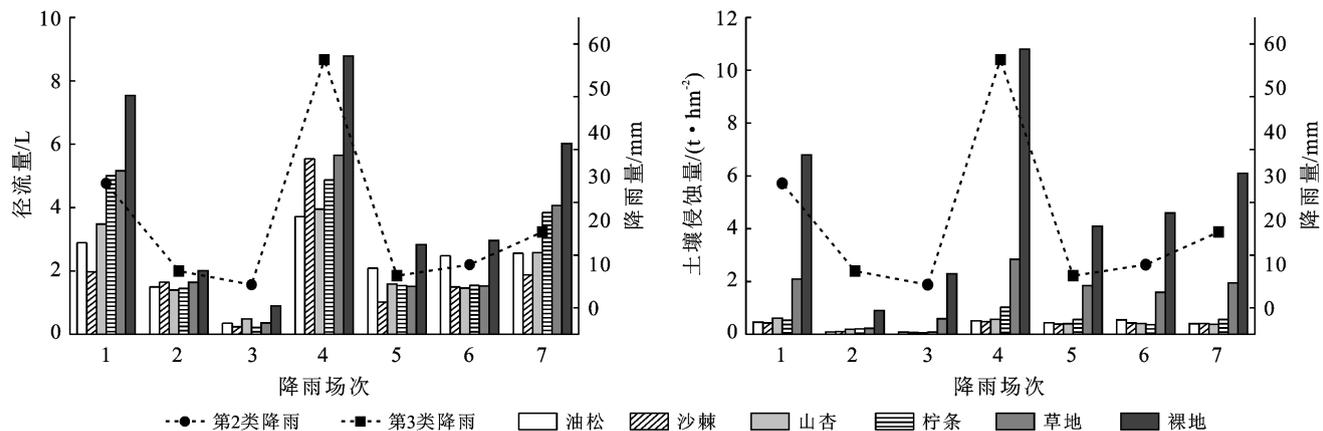


图 2 圪秋沟流域不同植被类型的径流量和土壤侵蚀量

图 3 为不同人工林地以裸地为基准计算的减流减沙率,同种人工林在不同降雨类型条件下表现出的减流能力不同,7 场降雨的平均减流率依次为 51.05%, 38.82%, 67.44%, 50.14%, 47.51%, 41.86%, 52.69%; 第 2 类降雨的平均减流率为 53.45%; 高于第 3 类降雨的平均减流率 47.29%; 表明植被对长历时的中到大雨的降雨减流作用最强,对短历时的暴雨的减流效果普遍较差。相同降雨条件下,各人工林地类型的减

流能力也有所区别,以第 4 次的短历时暴雨为例,各人工林地类型的减流率呈:沙棘林>油松林>山杏林>柠条林>草地;从人工林的减沙率角度来看,7 场降雨不同人工林地类型的平均减沙率均表现为:沙棘林>山杏林>油松林>柠条林>草地。第 2 类降雨的平均减沙率比第 3 类降雨的平均减沙率高 5.17%; 相同植被类型对不同降雨类型的减沙率的波动幅度相对较小,维持在 85.34%~92.51%。

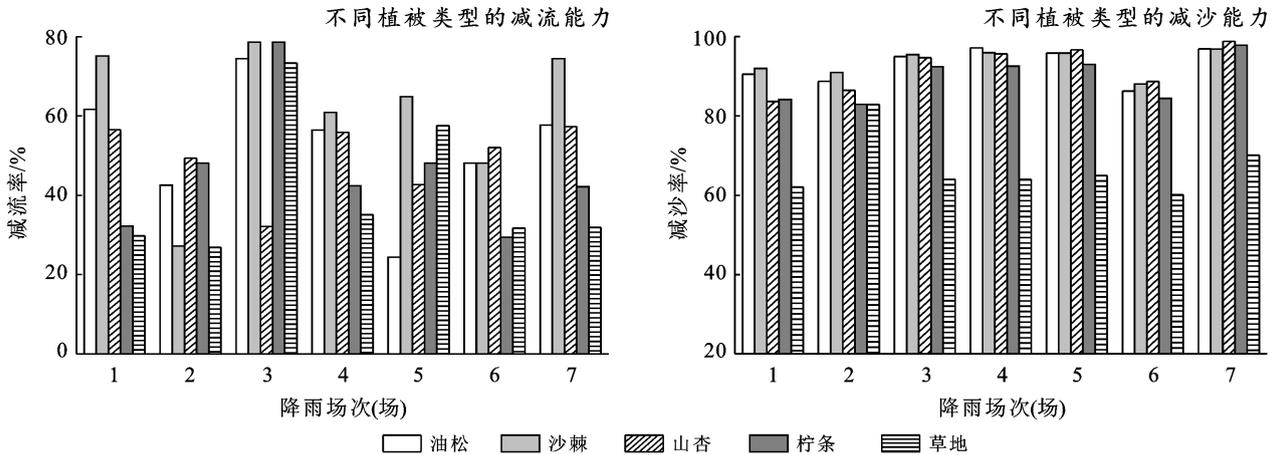


图 3 圪秋沟流域不同人工林地的减流减沙能力

3.3 不同类型人工林地降雨与侵蚀特征参数相关性分析

为了进一步分析降雨特征和不同类型人工林地侵蚀特征的关系,选取以上 7 场降雨的降雨特征参数与不同类型人工林地的产流量和土壤侵蚀量进行 Spearman 秩相关系数分析(表 4)。分析结果表明,平均雨强和 I_{30} 显著相关,和降雨侵蚀力 R 极显著相关,相关系数分别达到 0.786, 0.893; I_{30} 和降雨侵蚀力 R 呈极显著相关关系,相关系数为 0.964。此外,油松林和沙棘林地的产流量和土壤侵蚀量均呈极显著相关关系,相关系数分别 0.929, 0.893; 其他样地的产流量和土壤侵蚀量均呈显著相关关系,相关系数高于 0.739; 各类型样地的平均雨强和 I_{30} 均与土壤侵蚀量呈显著相关关系,相关系数高于 0.595。沙棘林、柠条林及裸地的降雨量和土壤侵蚀量均呈显著相关关系,相关系数高于 0.778。沙棘林地的减流率与减沙率呈显著相关关系,相关系数为 0.855。草地的 I_{30} 与减流率呈显著相关关系,相关系数为 0.775。通过分析结果来看,降雨量、平均雨强和 I_{30} 会对产流量及土壤侵蚀量产生影响。故而需进一步对降雨量和降雨强度与侵蚀特征参数的关系进行拟合分析。

3.4 不同类型人工林地产流产沙模拟及验证

本文选取 2019 年的降雨量(P)、最大 30 min

雨强(I_{30})和最大 10 min 雨强(I_{10})3 个指标对各类型人工林地的径流量和土壤侵蚀量的关系进行拟合,拟合的结果符合形如: $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$ 的多元线性方程(表 5),得到的各类型人工林地、草地以及裸地的降雨产流模型和降雨产沙模型拟合程度较好。

为了验证表 5 中得出的不同类型人工林地的产流产沙多元线性模型是否适用,基于 2020 年降雨监测数据,选取该年降雨中具有代表性的 3 场侵蚀性降雨的降雨量(P)、最大 30 min 雨强(I_{30})和最大 10 min 雨强(I_{10})数据(图 4)以及径流量和土壤侵蚀量数据进行验证(表 6)。选用纳什系数 Nse 进行校准和不确定性评价, Nse 值能够反映拟合的程度, Nse 高于 0.60 时则表示拟合结果可接受。 Nse 值越接近于 1,则表示模拟效果越好^[11-12]。结果表明,各类型人工林地以及草地降雨产流模型的 Nse 值均高于 0.62,模拟精度较高。其中油松林地 Nse 最高,为 0.92。而山杏林地的降雨产流模型 Nse 值为 0.62,模拟的精度较低;柠条林地的降雨产沙模型 Nse 值较低为 0.50,可能是因为柠条发达的根系分布以及在砒砂岩区的根系生长方式影响了产沙能力。其他类型人工林地以及草地和裸地的降雨产沙模型的 Nse 值均高于 0.61,模拟精度相对较高。

表 4 圪秋沟流域降雨特征参数与侵蚀特征参数 Speraman 秩相关系数矩阵

样地	指标	降雨量	降雨历时	平均雨强	E	I_{30}	R	产流量	土壤侵蚀量	减流率	减沙率
油 松 林	降雨量	1.000	0.107	0.250	0.214	-0.107	0.036	0.179	0.393	-0.536	-0.559
	降雨历时		1.000	-0.214	0.500	0.110	-0.107	-0.464	-0.500	0.022	-0.306
	平均雨强			1.000	0.679	0.786*	0.893**	0.393	0.643*	0.071	0.252
	E				1.000	0.714	0.750	0.179	0.286	0.021	0.108
	I_{30}					1.000	0.964**	0.321	0.729*	0.500	0.667
	R						1.000	0.429	0.571	0.286	0.577
	产流量							1.000	0.929**	0.071	0.108
	土壤侵蚀量								1.000	0.011	0.054
	减流率									1.000	0.523
	减沙率										1.000
沙 棘 林	降雨量	1.000	0.107	0.250	0.214	-0.107	0.036	0.143	0.886*	-0.750	-0.691
	降雨历时		1.000	-0.214	0.500	0.110	-0.107	-0.321	-0.571	-0.393	-0.400
	平均雨强			1.000	0.679	0.786*	0.893**	0.179	0.764*	0.321	0.164
	E				1.000	0.714	0.750	0.107	0.107	-0.036	-0.073
	I_{30}					1.000	0.964**	0.179	0.657*	0.536	0.582
	R						1.000	0.250	0.464	0.429	0.455
	产流量							1.000	0.893**	-0.107	0.091
	土壤侵蚀量								1.000	0.036	0.200
	减流率									1.000	0.855*
	减沙率										1.000
山 杏 林	降雨量	1.000	0.107	0.250	0.214	-0.107	0.036	-0.036	0.286	0.054	-0.414
	降雨历时		1.000	-0.214	0.500	0.110	-0.107	-0.393	-0.607	-0.667	-0.054
	平均雨强			1.000	0.679	0.786*	0.893**	0.429	0.607*	-0.126	0.054
	E				1.000	0.714	0.750	0.286	0.143	-0.505	0.054
	I_{30}					1.000	0.964**	0.464	0.821*	-0.162	0.378
	R						1.000	0.536	0.464	-0.126	0.306
	产流量							1.000	0.821*	0.631	-0.288
	土壤侵蚀量								1.000	0.667	-0.487
	减流率									1.000	-0.436
	减沙率										1.000
柠 条 林	降雨量	1.000	0.107	0.250	0.214	-0.107	0.036	0.071	0.778*	-0.571	-0.595
	降雨历时		1.000	-0.214	0.500	0.110	-0.107	-0.571	-0.541	0.357	-0.252
	平均雨强			1.000	0.679	0.786*	0.893**	0.357	0.723*	0.071	0.306
	E				1.000	0.714	0.750	0.036	0.234	0.429	0.162
	I_{30}					1.000	0.964**	0.214	0.796*	0.286	0.685
	R						1.000	0.321	0.559	0.250	0.595
	产流量							1.000	0.739*	-0.429	-0.072
	土壤侵蚀量								1.000	-0.288	0.155
	减流率									1.000	0.523
	减沙率										1.000
草 地	降雨量	1.000	0.107	0.250	0.214	-0.107	0.036	0.143	0.072	-0.126	-0.321
	降雨历时		1.000	-0.214	0.500	0.110	-0.107	-0.321	-0.577	0.054	0.750
	平均雨强			1.000	0.679	0.786*	0.893**	0.179	0.595*	0.595	-0.143
	E				1.000	0.714	0.750	0.107	0.198	0.523	0.571
	I_{30}					1.000	0.964**	0.179	0.613*	0.775*	0.179
	R						1.000	0.250	0.667	0.739	0.107
	产流量							1.000	0.775*	-0.414	-0.071
	土壤侵蚀量								1.000	0.136	-0.342
	减流率									1.000	0.144
	减沙率										1.000
裸 地	降雨量	1.000	0.107	0.250	0.214	-0.107	0.036	0.179	0.835*	—	—
	降雨历时		1.000	-0.214	0.500	0.110	-0.107	-0.464	-0.536	—	—
	平均雨强			1.000	0.679	0.786*	0.893**	0.393	0.607*	—	—
	E				1.000	0.714	0.750	0.179	0.250	—	—
	I_{30}					1.000	0.964**	0.321	0.679*	—	—
	R						1.000	0.429	0.714	—	—
	产流量							1.000	0.857*	—	—
土壤侵蚀量								1.000	—	—	

注: * 表示 $p < 0.05$ 显著相关; ** 表示 $p < 0.01$ 极显著相关。

表 5 裸露砒砂岩区人工林降雨产流产沙模型

植被类型	降雨产流(Q)模型	R ²
油松林	$Q=0.066P+0.03I_{30}+0.013I_{10}-0.438$	0.771
沙棘林	$Q=0.065P+0.011I_{30}-0.008I_{10}-0.062$	0.896
山杏林	$Q=0.068P+0.044I_{30}+0.016I_{10}-0.741$	0.960
柠条林	$Q=0.094P+0.083I_{30}+0.033I_{10}-1.78$	0.973
草地	$Q=0.108P+0.116I_{30}+0.013I_{10}-1.901$	0.970
裸地	$Q=0.161P+0.141I_{30}+0.023I_{10}-2.96$	0.979
林地类型	降雨产沙(S _r)模型	R ²
油松林	$S_r=0.007P+0.03I_{30}+0.009I_{10}-0.069$	0.918
沙棘林	$S_r=0.006P+0.004I_{30}-0.003I_{10}-0.058$	0.953
山杏林	$S_r=0.014P+0.003I_{30}+0.015I_{10}-0.239$	0.934
柠条林	$S_r=0.018P-0.01I_{30}+0.006I_{10}-0.127$	0.943
草地	$S_r=0.05P+0.031I_{30}+0.009I_{10}-0.462$	0.913
裸地	$S_r=0.18P+0.087I_{30}+0.015I_{10}-1.26$	0.832

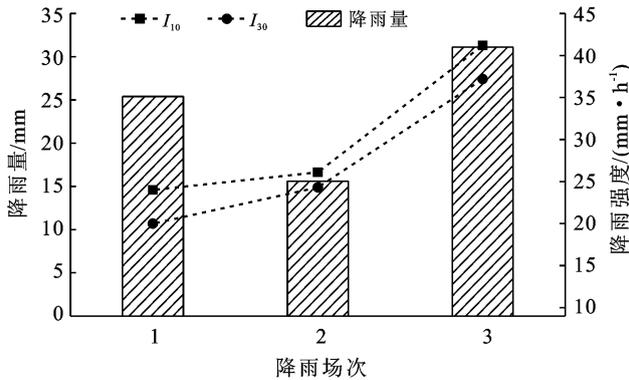


图 4 圪秋沟流域 2020 年侵蚀性降雨特征参数

表 6 裸露砒砂岩区人工林降雨产流产沙模型精度验证

植被类型	径流量/L			土壤流失量/(t·hm ⁻²)		
	实测值	模拟值	Nse 值	实测值	模拟值	Nse 值
油松林	1.68	1.72		0.47	0.55	
	1.10	1.07	0.92	1.01	1.04	0.61
	2.15	2.36		0.83	1.07	
沙棘林	1.51	1.63		0.09	0.11	
	0.85	1.04	0.89	0.11	0.07	0.92
	2.70	2.32		0.15	0.19	
山杏林	1.19	1.66		0.36	0.31	
	1.53	1.86	0.62	0.45	0.42	0.72
	2.66	3.01		0.57	0.62	
柠条林	1.88	1.90		0.11	0.28	
	1.83	2.65	0.72	0.10	0.04	0.50
	3.88	4.15		0.30	0.39	
草地	1.40	2.30		1.09	1.26	
	3.15	3.13	0.79	1.42	1.35	0.95
	4.47	4.91		2.19	2.21	
裸地	1.77	2.98		3.93	4.46	
	3.01	3.79	0.82	3.85	4.18	0.89
	6.39	6.51		6.90	7.43	

4 讨论与结论

4.1 讨论

降雨与土壤侵蚀间存在着密切的因果关系,这种因果关系会随着坡面状况的不同,使得土壤侵蚀状况发生改变^[13]。有研究^[14-16]表明降雨与坡面土壤侵蚀程度的关系紧密,产流量和土壤流失量会随降雨的增多而增大。但也有研究^[17-18]表明,从统计学的角度分析,土壤流失量与降雨量的正相关关系并不显著。正如本文分析发现降雨量与土壤侵蚀量呈一定的相关关系,但相关性并不强。张喜旺^[10]针对这种情况研究发现虽然降雨量与侵蚀量呈正相关关系,但并非年降雨量越大,土壤侵蚀量就越大,同等强度的降雨量,由于降雨与植被的分布模式不同,也会导致侵蚀产沙量出现巨大差异。

本文在相同类型降雨条件下,发现各类型人工林的产流量和减流能力未见统一规律。分析其原因可能是由于人工林植被状况包括冠层截留能力的不同以及林下草地土壤物理性质等综合作用导致的。侯喜禄^[19]认为沙棘和柠条林地土壤侵蚀量越小,暴雨对林地的径流量的影响最大。王志杰等^[20]研究发现自然植被的抗侵蚀能力要优于人工植被,人工植被中灌木林地以柠条和沙棘人工林地的抗侵蚀能力较强。余雕^[21]在筛选黄土高原水土保持型灌木林地时发现沙棘的侵蚀产沙能力要明显低于柠条林地。但是影响人工林地产流产沙的因素有很多,降雨仅仅是人工林水文过程的一个重要环节^[22]。在降雨条件下,人工林的枝叶和树干对降雨产生的明显截留作用。雨滴产生的动能被植被枝叶所消耗,同时大雨点会分裂成若干小粒径的雨滴,从而降低降雨侵蚀性^[23]。由于裸露砒砂岩区地表土层较薄,影响了人工林植被的生长状况,导致各类型人工林地的林冠层截留能力发生较大差异^[24-25];同时,由于裸露砒砂岩土壤的入渗性能和土壤结构与黄土丘陵地区的差异,造成裸露砒砂岩区降雨产流能力的不同,有学者认为沙棘人工林地会改善该区的植被状况以及土壤入渗性能^[26],入渗性能的增加会使得降雨产生的径流量发生改变。因此不同类型人工林降雨截留能力以及林下土壤的入渗能力的差异使得不同类型降雨在到达地表后产生的径流量无统一规律。未来应对裸露砒砂岩区不同类型人工林的降雨—入渗—产流过程进行深入研究。

立地条件的不同也会影响人工林地的减流减沙能力。杨春霞等^[27]研究了不同立地条件下的坡面土壤侵蚀差异性,发现草地的减流减沙作用优于裸地和刚栽植的灌木林地。冯志倩与郭军权等^[28-29]研究发

现坡度的增加会使得径流量和产沙率增加至少 0.96 倍。于国强等^[30]认为有植被覆盖的坡面侵蚀严重的区域位于下坡中下部以及中部。刘冉等^[31]研究发现无论是裸坡还是有植被的坡面,侵蚀强度均随着坡长的变化存在增长型、增长递减型以及波动型 3 种状态,因此坡长也会影响人工林侵蚀产沙的能力。此外,在对各类降雨类型的降雨过程的分析中得出的单峰以及双峰分布的规律仅仅能代表某一阶段的降雨过程特征,在得到的降雨与产沙模型和降雨与产流模型中, $R^2 > 0.771$ 。本文仅仅使用一个年度的降雨以及产流产沙观测数据进行了拟合,但结合以往该领域的研究成果来看^[2,6,16],往往数据量越少,具有统计意义的 R^2 的要求越大。因此在未来的研究中应对该研究区域的降雨进行多年连续监测,在不断增加观测时间尺度的基础上调整模型参数,使得模型精确性更高,更能代表研究区降雨与产流量及产沙量的关系。

4.2 结论

(1) 裸露砒砂岩区 2019 年年内长历时暴雨和中到大雨的瞬时雨量均呈现为双峰趋势,累积降雨量均呈梯式增长的趋势;短历时的暴雨和中到小雨降雨过程的瞬时雨量呈明显的单峰形态,累积降雨量分别呈 S 形和线性增长的趋势。

(2) 裸露基岩坡面的总产流量达 28.48 L,总土壤侵蚀量达 31.85 t/hm²,有植被的坡面总产流量在 9.8~18.41 L 之间,总土壤侵蚀量在 1.67~10.14 t/hm² 之间。土壤侵蚀量符合:裸地>草地>柠条林>山杏林>油松林>沙棘林的规律。裸露基岩坡面的产流量是有植被坡面的 1.5 倍以上,侵蚀量是有植被生长坡面的 3 倍以上。油松林和沙棘林地的产流量和土壤侵蚀量均呈极显著相关关系,相关系数分别 0.929, 0.893;各类型样地的平均雨强和 I30 均与土壤侵蚀量呈显著相关关系,相关系数高于 0.595。

(3) 人工林对长历时的中到大雨的降雨减流减沙作用最强,对短历时的暴雨的减流减沙效果较差。各类型人工林地降雨与产流量及土壤侵蚀量的拟合模型符合形如: $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$ 的多元线性方程,拟合程度较好。各类型人工林地以及草地降雨产流模型的 Nse 值均高于 0.62, R^2 均高于 0.70;降雨产沙模型的除柠条林外,其他类型人工林地 Nse 值均高于 0.57, R^2 均高于 0.60,精度相对较高。

【参 考 文 献】

[1] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等.内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J].地球学报,2004,25(6):659-664.
[2] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律[J].水土保持学报,2021,35(3):111-118.

[3] 胡剑汝,饶良懿,申震洲.基于 WEPP 的砒砂岩坡面复合侵蚀治理生态水文效应评价[J].水土保持学报,2020,34(2):123-129,238.
[4] 秦富仓,杨振奇,李龙.砒砂岩区土壤侵蚀机理与生态修复技术研究进展[J].北京林业大学学报,2020,42(12):142-150.
[5] 张军红,徐义萍.不同植被恢复模式对矿区土壤性质的影响[J].南方农业,2019,13(7):22-25.
[6] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.天然降雨条件下裸露砒砂岩区人工植被的减流减沙效应[J].水土保持研究,2022,29(1):100-104,112.
[7] 陈鹏,张铁钢,董智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):116-121.
[8] 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.
[9] 王伦江,张兴昌.苜蓿影响砒砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究[J].土壤学报,2020,57(2):284-295.
[10] 张喜旺,秦奋.砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J].地理研究,2016,35(3):513-524.
[11] 张高峰,喻丽莉,李妍,等.新安江模型在径流预报中的一致性分析[J].人民长江,2019,50(S1):75-78.
[12] 夏静芳.沙棘人工林水土保持功能与植被配置模式研究[D].北京:北京林业大学,2012.
[13] 王玲莉,张富,胡彦婷,等.侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响[J].人民黄河,2021,43(10):5.
[14] 史东梅,卢喜平,蒋光毅.紫色丘陵区降雨侵蚀力简易算法的模拟[J].农业工程学报,2010,26(2):116-122.
[15] 何杨洋,王晓燕,段淑怀.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):134-141.
[16] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2):118-122.
[17] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
[18] 刘刚才,朱波,代华龙,等.四川低山丘陵区紫色土不同土地利用类型的水蚀特征[J].水土保持学报,2001(6):96-99.
[19] 侯喜禄,梁一民,曹清玉.黄土丘陵沟壑区主要水保林类型及草地水保效益的研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(森林水文生态与水土保持林效益研究专集),1991(2):96-103.
[20] 王志杰.延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
[21] 余雕.黄土高原水土保持型灌木林地土壤质量特征及评价[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
[22] 周志宇.侵蚀性降雨及不同植被类型对小流域产流产沙的影响分析[J].水土保持应用技术,2022(1):8-11.

- 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. 砒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. 砒砂岩区 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.