

# 大汶河上游小流域降雨类型及其对产流产沙的影响

王如岩<sup>1</sup>, 赵龙<sup>2</sup>, 宋庆健<sup>1</sup>, 赵辰瑞<sup>2</sup>, 赵井辉<sup>3</sup>, 郑志国<sup>1</sup>, 张荣<sup>1</sup>

(1.泰安市水文中心, 山东 泰安 271018; 2.山东农业大学

水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 3.聊城市水利工程有限公司, 山东 聊城 252000)

**摘要:** [目的] 研究大汶河上游小流域降雨类型及其对产流产沙的影响, 为鲁中南山地丘陵区防洪减灾与水土流失的预测预警提供理论依据。[方法] 以大汶河上游徂徕山小流域为研究区, 基于2021—2023年小流域降雨数据及产流产沙数据, 采用K均值聚类、线性回归分析等统计分析方法, 研究了流域降雨类型及其对产流产沙的影响。[结果] 流域降雨可分为4种类型: I类为小雨量小雨强降雨; II类为中雨量中雨强降雨; III类为大雨量大雨强降雨; IV类为超大雨量中雨强降雨。III类降雨与IV类降雨为该流域产流产沙的主要来源。[结论] 徂徕山流域以小雨量小雨强降雨为主, 但暴雨频次仍然较高。受山区地形影响, IV类降雨是区域洪灾和泥石流的重要来源; 降雨量是该流域产流产沙的主要影响因素。

**关键词:** 大汶河上游流域; 统计分析法; 降雨类型; 产流产沙量

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)06-0194-06

**中图分类号:** S157, TV121+.7

**文献参数:** 王如岩, 赵龙, 宋庆健, 等. 大汶河上游小流域降雨类型及其对产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 194-199. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.021; Wang Ruyan, Zhao Long, Song Qingjian, et al. Rainfall regimes and their influence on runoff and sediment yield at small watershed in upper reaches of Dawen River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 194-199.

## Rainfall Regimes and Their Influence on Runoff and Sediment Yield at Small Watershed in Upper Reaches of Dawen River

Wang Ruyan<sup>1</sup>, Zhao Long<sup>2</sup>, Song Qingjian<sup>1</sup>,

Zhao Chenrui<sup>2</sup>, Zhao Jinghui<sup>3</sup>, Zheng Zhiguo<sup>1</sup>, Zhang Rong<sup>1</sup>

(1. Hydrological Center of Taian City, Taian, Shandong 271018, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian,

Shandong 271018, China; 3. Liaocheng Water Conservancy Engineering Corporation, Liaocheng, Shandong 252000, China)

**Abstract:** [Objective] The rainfall regimes and their effects on runoff and sediment yield in the small watershed of the upper reaches of Dawen River were studied, in order to provided a theoretical basis for the predicting and early warning of flood control and soil erosion in the mountainous and hilly areas of Central and Southern Shandong Province. [Methods] The Culai Mountain watershed in the upper reaches of the Dawen River was selected as the study area. K-means clustering and multiple linear regression analysis were employed to examine different types of rainfall and their impacts on sediment yield using rainfall, runoff, and sediment yield data from 2021 to 2023. [Results] The rainfall in this basin can be divided into four types, categorized as follows: type I features small amounts of precipitation with low intensity, type II features medium amounts of precipitation with moderate intensity, type III features heavy amounts of precipitation with high intensity, and type IV features extra heavy amounts of precipitation with moderate intensity.

收稿日期: 2024-06-22

修回日期: 2024-09-29

资助项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究资助项目“北方丘陵山区下小流域土壤氮磷流失规律及模型模拟研究”(IWHR-SKL-202219); 教育部产学研合作协同育人项目(201902211016; 202101284013); 水利部专项支撑计划水资源费项目“重要饮用水水源地综合监管方案”(WE0149B052020)

第一作者: 王如岩(1985—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源, 水土保持监测方面的研究工作。Email: wry04040124@163.com.

通信作者: 郑志国(1977—), 男(汉族), 山东省泰安市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面的研究工作。Email: sdta\_gsy@163.com.

Rainfall in types III and IV was the main source of runoff and sediment yield in this basin. [Conclusion] The Culai Mountain watershed mainly experiences light rainfall with low intensity, yet the frequency of rainstorms remains relatively high. Affected by the mountainous terrain, the IV type rainfall was significant sources of regional floods and debris flows. Rainfall Precipitation amount is the primary influencing factor for runoff and sediment production in this basin.

**Keywords:** upper reaches of Dawen River basin; statistical analysis; rainfall types; runoff and sediment yield

中国水土流失现象严重,具有范围广、面积大等特点。2023年,全国水土流失总面积 $2.63 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其中水力侵蚀面积 $1.07 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占水土流失总面积的40.77%<sup>[1]</sup>。降雨是流域产流产沙和水力侵蚀的主要动力来源<sup>[2]</sup>。降雨变化会对流域的水文过程和泥沙输移过程产生重要影响<sup>[3-4]</sup>。这些影响主要通过降雨各特征指标体现,常用的降雨特征指标主要包括降雨量( $P$ ),降雨历时( $D$ ),降雨强度( $I$ ),最大30 min雨强( $I_{30}$ )等<sup>[5]</sup>。基于降雨特征指标聚类得到的降雨类型能更好地代表流域的降雨特征,具有简化数据分析过程,易于与其他地区比较等优势。降雨类型研究对区域水土流失治理具有重要科学意义。

目前针对于流域雨型的研究在地区上多集中于黄土高原区、南方红壤区、北方土石山区等典型区域。在黄土高原区,短历时强降雨对产流产沙影响较大<sup>[6-8]</sup>,降雨强度对流域降雨产流产沙影响最大<sup>[9-11]</sup>。在降雨量较大的南方红壤区,相比于长历时大雨量降雨,短历时大雨强降雨是坡面产流的主要雨型,与黄土高原区研究结果相近<sup>[12-14]</sup>。在北方土石山区,有学者发现,特征为中频率、长历时、大雨量、中雨强特征的降雨为引起流域产流产沙的主要降雨类型<sup>[15]</sup>。由于气候及下垫面条件的差异,不同地区间降雨类型及其对产流产沙的影响存在差异。徂徕山小流域是典型的北方丘陵山区水土流失区,目前针对于该流域的

相关研究较少。因此,针对大汶河上游徂徕山小流域,开展降雨类型及其对产流产沙的影响研究,对阐明流域的水文过程和泥沙演变过程具有重要意义,可为制定更加科学的水资源管理和防洪治沙策略提供理论依据。

本研究以大汶河上游徂徕山小流域为研究对象,基于2021—2023年小流域降雨数据及产流产沙等数据,采用 $K$ 均值聚类法、线性回归分析法等统计分析方法,研究该小流域的降雨雨型及其对产流产沙的影响。以期为提高流域水资源管理、洪涝灾害防御能力和为鲁中南山地丘陵区水土流失的预测提供理论依据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

徂徕山小流域位于山东省徂徕山国家森林公园试验区内,流域面积约为 $0.92 \text{ km}^2$ ,地理坐标: $117^\circ 13' 27''$ — $117^\circ 14' 9'' \text{ E}$ , $36^\circ 3' 46''$ — $36^\circ 4' 32'' \text{ N}$ ,平均海拔高度为310 m,隶属于黄河下游大汶河流域,是国家级典型的水土流失重点治理区,水力侵蚀是该流域的主要土壤侵蚀类型(图1)。研究区属暖温带大陆性季风型气候区,年平均气温 $12.90 \text{ }^\circ \text{C}$ ,多年平均降雨量 $690.60 \text{ mm}$ 。气候特点是春旱、夏涝、晚秋又旱,降雨集中于6—9月,期间平均降雨量 $528.60 \text{ mm}$ ,占年降雨量的76.54%。



图1 大汶河流域水系分布及徂徕山小流域地形示意图

Fig.1 Water system distribution of Dawen River basin and topographic diagram of Culai Mountain watershed

## 1.2 数据来源与处理

研究中采用的 2021—2023 年流域降雨,径流和输沙数据来源于泰安市徂徕山水土保持综合观测站。降雨数据通过观测站内翻斗式自记雨量计(间隔时间为 5 min)采集。流域出口处设有一控制站,安装 HCJ1 自记水位计和小流域径流泥沙自动监测装置,可实现径流和输沙数据的自动化采集。设备采集的数据通过接口复制,数据间隔为 5 min,包括瞬时流量和瞬时干泥沙流失量。径流量( $R$ ,  $\text{m}^3$ ),输沙量( $S$ , t)计算公式为:

$$R = \sum_{n=1}^d \frac{r_{n-1} + r_n}{2} \times t_n \quad (1)$$

式中: $R$  为径流量( $\text{m}^3$ );  $r_{n-1}$  为时段开始时设备记录的流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $r_n$  为时间段结束时设备记录的流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $d$  为时段数;  $t_n$  为时段时长(s)。

$$S = \sum_{n=12}^d \frac{S_{n-1} + S_n}{2 \times 1000} \times t_n \quad (2)$$

式中: $S$  为输沙量(t);  $S_{n-1}$  为时段开始时河道干泥沙流失量( $\text{kg}/\text{s}$ );  $S_n$  为时间段结束时河道干泥沙流失量( $\text{kg}/\text{s}$ )。

文中采用的数据为实测数据,数据采集设备为国际先进设备。在获取到实测数据后,进行了数据的勘验,校核以及三性分析,分析了数据的可靠性,一致性和代表性。

## 2 研究方法

### 2.1 K-均值聚类

K-均值聚类法因其应用难度相对较低,是研究中最常使用的聚类方法之一<sup>[16-18]</sup>。其基本原理是将数据集中的  $n$  个对象划分为  $k$  个聚类,使得每个对象到其所属聚类的中心(或称为均值点、质心)的距离之和最小,距离一般为欧式距离或其他类型的度量距离。方法步骤如下<sup>[19]</sup>。

- (1) 从样本集中随机选择  $k$  个初始聚类中心点。
- (2) 逐个计算每个数据对象到各聚类中心点的距离,然后分配给距离最短的集合。
- (3) 重新计算每个集合的中心点坐标并更新产生新的集合。
- (4) 判断是否满足中止条件,若满足,则输出聚类结果,否则,重新转至第 2 步。

### 2.2 多元线性回归分析

多元线性回归分析(multiple linear regression)算法数学模型为:

设流域径流量( $Y_1$ ),输沙量( $Y_2$ )与降雨量( $X_1$ ),

降雨历时( $X_2$ ),降雨强度( $X_3$ ),最大 30 min 雨强( $X_4$ )间有线性关系

$$Y_1 = \beta_1 + \beta_3 X_1 + \dots + \beta_6 X_4 + \epsilon_1 \quad (3)$$

$$Y_2 = \beta_2 + \beta_7 X_1 + \dots + \beta_{10} X_4 + \epsilon_2 \quad (4)$$

式中: $\beta_1, \beta_2$  为回归常数;  $\beta_3, \beta_4 \dots \beta_{10}$  为回归系数;  $X_1, X_2 \dots X_4$  为自变量;  $Y$  为因变量;  $\epsilon$  是随机误差; 当自变量个数  $\geq 2$  时,称上式为多元回归模型。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域降雨类型划分

2021—2023 年,小流域共发生 79 场降雨。选取降雨量( $P$ ),最大 30 min 雨强( $I_{30}$ )为分类变量,采用 K 均值聚类法将降雨分为了 4 种类型,结果见表 1。I 类为小雨量小雨强降雨,发生次数为 49 场,占总降雨场次的 62.03%; II 类为中雨量中雨强降雨,发生次数为 22 场,占总降雨场次的 27.85%; III 类为大雨量大雨强降雨,发生次数为 6 场,占总降雨场次的 7.59%; IV 类为超大雨量中雨强降雨,发生次数为 2 场,占总降雨场次的 2.53%。

表 1 徂徕山小流域降雨聚类结果(最终聚类中心)  
Table 1 Cluster results of rainfall at Culai Mountain small watershed (final cluster center)

降雨类型	雨量( $P$ )/mm	雨强( $I_{30}$ )/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	频次
I	8.51	8.82	49
II	35.23	33.61	22
III	95.88	42.30	6
IV	151.25	33.85	2

### 3.2 流域不同降雨类型的产流产沙特征

通过分析流域产流产沙与降雨的关系,确定流域侵蚀性降雨的阈值为  $p = 17.5 \text{ mm}$ ,  $I_{30} = 11 \text{ mm/h}$ , 共有 29 场降雨满足侵蚀性降雨标准,其中 18 场降雨引发了流域产流产沙。结合雨型划分结果,得到不同降雨类型产流产沙特征(表 2)。4 种降雨类型的产流产沙能力大小顺序为:  $\text{IV} > \text{III} > \text{II} > \text{I}$ , I 类降雨的产流产沙能力最弱,平均径流量  $25\ 587.95 \text{ m}^3$ , 平均输沙量为  $9.64 \text{ t}$ ; II 类降雨平均径流量  $26\ 543.12 \text{ m}^3$ , 平均输沙量为  $11.36 \text{ t}$ ; III 类降雨平均径流量  $41\ 943.87 \text{ m}^3$ , 平均输沙量为  $18.44 \text{ t}$ ; IV 类降雨平均径流量  $79\ 707.95 \text{ m}^3$ , 平均输沙量为  $39.27 \text{ t}$ 。

I 类降雨难以引起流域的产流产沙。49 场 I 类降雨中,只有两场降雨引发了流域的产流产沙,且两场降雨均出现于夏季,此时流域降雨较多,土壤含水量较大,产流难度较小。II 类降雨中,侵蚀性降雨事

件超过Ⅱ类降雨总事件的三分之一。Ⅱ类侵蚀性降雨平均径流量与Ⅰ类降雨差异较小,但其平均输沙量与Ⅰ类降雨平均输沙量相差较大。Ⅰ类降雨为小雨量小雨强降雨,Ⅱ类降雨为中雨量中雨强降雨。由此可见,雨量及雨强的增大使得该类降雨的产流产沙能力增大,且其对输沙量的增大效果相较径流量更加明显。Ⅲ类和Ⅳ类的所有降雨事件都是侵蚀性降雨。Ⅳ类降雨的平均径流量和输沙量约为Ⅲ类降雨的2倍。Ⅳ类降雨的雨强比Ⅲ类降雨的雨强更大,但其雨强较小。这表明该流域平均径流量与平均输沙量受降雨量的影响更大。在总量上看,Ⅲ类降雨的总径流量与总输沙量最大,其次为Ⅳ类降雨,Ⅱ类降雨位居第三位,Ⅰ类降雨最小。因此,该流域产流产沙的主要来源为Ⅲ类降雨与Ⅳ类降雨,产流产沙能力最强的为Ⅳ类降雨。

表 2 徂徕山小流域不同雨型的径流量( $R$ )、输沙量( $S$ )特征  
Table 2 Characteristics of runoff ( $R$ ) and sediment yield ( $S$ ) of Culaí Mountain watershed under different rainfall regimes

降雨类型	平均径流量 ( $\bar{R}$ )/ $m^3$	总径流量 ( $\sum R$ )/ $m^3$	平均输沙量 ( $\bar{S}$ )/t	总输沙量 ( $\sum S$ )/t
I	$2.53 \times 10^4$	$5.12 \times 10^4$	9.64	19.27
II	$2.65 \times 10^4$	$1.06 \times 10^5$	11.36	45.45
III	$4.19 \times 10^4$	$2.52 \times 10^5$	18.44	110.65
IV	$7.97 \times 10^4$	$1.59 \times 10^5$	39.27	78.55

## 4 讨论

### 4.1 流域降雨类型研究

根据流域降雨类型的相关研究<sup>[9,20]</sup>,文中选取降雨量( $P$ ),最大30 min雨强( $I_{30}$ )作为分类变量,对流域2021—2023年降雨事件进行聚类,得到该流域的降雨类型。降雨类型分别是Ⅰ类(小雨量小雨强降雨集合),Ⅱ类(中雨量中雨强降雨集合),Ⅲ类(大雨量大雨强降雨集合),Ⅳ类(超大雨量中雨强降雨集合),发生频率由Ⅰ类到Ⅳ类递减。

泰安市降雨特征为降雨量较大且集中在夏季,降雨受山区地形的影响较大。研究表明,泰安市年均暴雨次数达到4.82次,相较于其他低海拔区域多出2.34次,这是由于泰山山脉的迎风坡对偏南暖湿气流起到阻挡和抬升作用,容易引发暴雨<sup>[21]</sup>。因此,该地区Ⅲ类降雨和Ⅳ类降雨的发生频次较大,水土流失较为严重。降雨类型对流域水文过程有较大影响<sup>[22]</sup>,本研究中,发现Ⅰ类降雨的降雨量和降雨强度较小,但频率极高,该类降雨事件对流域水文过程的影响相对较小,但仍然可能引发较小洪涝灾害<sup>[3]</sup>。Ⅲ类和Ⅳ

类降雨事件的降雨量和降雨强度较大,对流域水文过程的影响极大,能够引发大洪涝灾害。在其他流域中也发现了类似现象,例如在密云水库上游流域,与小雨量小雨强降雨事件相比,中雨量高雨强降雨和高雨量中雨强降雨对流域水文过程的影响非常大<sup>[23]</sup>。在黄土区桥子东沟流域的研究中,发现大雨量大雨强降雨相比其他雨型引发的径流量和输沙量最多<sup>[9]</sup>。

综上所述,本研究通过降雨量和最大30 min雨强对流域2021—2023年降雨事件进行聚类,将降雨类型分为了4类。徂徕山小流域降雨类型的研究有助于预测鲁中南地区的降雨的特征,为该地区防洪减灾提供支撑。

### 4.2 流域降雨特征对产流产沙的影响

根据流域不同雨型的径流量、输沙量分析,单位雨量下的产流产沙能力排序为:Ⅳ类>Ⅲ类>Ⅱ类>Ⅰ类,Ⅲ类降雨与Ⅳ类降雨为该流域产流产沙的主要动力来源,Ⅲ类降雨的特征为大雨量大雨强降雨,Ⅳ类降雨为超大雨量中雨强降雨,Ⅳ类降雨的平均径流量和平均输沙量是Ⅲ类降雨的2倍,而两种雨型差异主要是降雨量的差异。

由于Ⅰ类降雨和Ⅳ类降雨均仅有两场引起了流域产流产沙,不宜分降雨类型进行讨论,因此选取所有产流产沙降雨事件的降雨量,降雨历时,降雨强度,最大30 min雨强与流域径流量,输沙量进行多元线性回归分析(见表3)。4个降雨特征指标中仅降雨量与因变量(径流量、输沙量)的关系显著( $p < 0.05$ ),其余3个指标(降雨历时、降雨强度、最大30 min雨强)与因变量的关系不显著( $p > 0.05$ )。这表明径流量、输沙量变化受到降雨量变化影响较大,受其他指标影响不显著,且径流量、输沙量与降雨量满足线性关系。

采用逐步回归法建立了径流量及输沙量与降雨量线性回归关系(图2),其关联方程决定系数分别为0.76,0.77。回归系数为正值,表明流域径流量、输沙量随降雨量的增大而增大,降雨量每增加1 mm,径流量平均增加460.29  $m^3$ ,输沙量平均增加0.24 t。根据IPCC AR6,21世纪全球陆地年平均降水将增加<sup>[24]</sup>。在气候变化背景下,假设该流域出现降雨历时大于24 h,降雨量为200 mm的特大暴雨。根据关联方程计算,该场降雨将引发约92 833.17  $m^3$ 径流及45.47 t输沙。

因此,降雨量是该流域产流、产沙的主要影响因素。前期已开展了关于鲁中南山地丘陵区泰安市东周小流域的水土流失的研究,结果表明,降雨量是该地区产流产沙的主要影响因素<sup>[25]</sup>。



表 3 徂徕山小流域径流量及输沙量与降雨特征指标多元线性回归结果

Table 3 Multi-linear regression of runoff, sediment transport and rainfall characteristics at Culai Mountain watershed

降雨特征指标	径流量(R)				输沙量(S)			
	回归系数	t	P	R <sup>2</sup>	回归系数	t	P	R <sup>2</sup>
降雨量(X <sub>1</sub> )	390.61	2.51	0.03		0.19	2.49	0.03	
降雨历时(X <sub>2</sub> )	159.60	0.35	0.73		0.10	0.45	0.66	
降雨强度(X <sub>3</sub> )	-358.97	-0.67	0.51	0.62	-0.19	-0.72	0.49	0.64
最大 30 min 雨强(X <sub>4</sub> )	54.75	0.18	0.86		0.07	0.44	0.67	
常量	2 688.03	0.24	0.81		-1.88	-0.35	0.74	

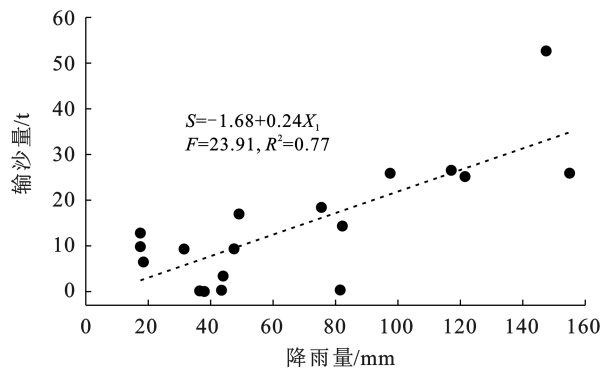
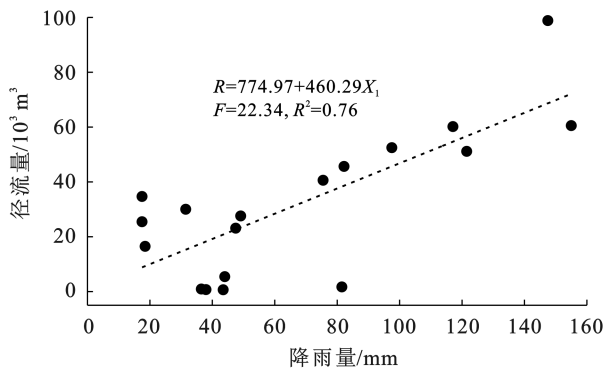


图 2 徂徕山小流域径流量、输沙量与降雨量线性回归关系(逐步回归法)

Fig.2 Linear regression relationship of runoff, sediment discharge with rainfall characteristics (stepwise regression)

## 5 结论

(1) 流域降雨可分为 4 种类型。Ⅰ类为小雨量小雨强降雨,占总降雨场次的 62.03%;Ⅱ类为中雨量中雨强降雨,占总降雨场次的 27.85%;Ⅲ类为大雨量大雨强降雨,占总降雨场次的 7.59%;Ⅳ类为超大雨量中雨强降雨,占总降雨场次的 2.53%。该流域以小雨量小雨强降雨为主,但受到山区地形影响,暴雨频次仍然较高。

(2) Ⅲ类降雨与Ⅳ类降雨是该流域产流产沙的主要来源,Ⅳ类降雨的产流产沙能力最强,是该流域洪灾和泥石流事件的主要雨型;降雨量是该流域产流产沙的主要影响因素。该研究结果可为鲁中南山地丘陵区水土流失的预测提供理论依据。

## 参考文献(References)

- [1] 《中国水土保持》编辑部.《中国水土保持公报(2023 年)》综述[J].中国水土保持,2024(7):41.  
Editorial department of 'Soil and Water Conservation in China'. Summary of China soil and water conservation bulletin (2023) [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(7):41.
- [2] 李子君,刘家圆,王海军.北方土石山区坡面水土流失特征研究[J].水土保持研究,2024,31(1):1-9.  
Li Zijun, Liu Jiayuan, Wang Haijun. Study on the charac-

teristics of soil and water loss on the slopes in northern rocky mountain area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):1-9.

- [3] 张嘉懿,汪军红,程先富,等.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[J].水土保持学报,2021,35(2):8-14.  
Zhang Jiayi, Wang Junhong, Cheng Xianfu, et al. Effects of rainfall on slope runoff and sediment yield under different crop measures in the Jiangzi River minor watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):8-14.
- [4] 朱方方,秦建淼,朱美菲,等.模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2023,37(3):10-18.  
Zhu Fangfang, Qin Jianmiao, Zhu Meifei, et al. Effect of mulch structure on runoff and sediment yield under simulation rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):10-18.
- [5] 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):109-113.  
Wang Lingli, Zhang Fu, Hu Yanting, et al. Effects of erosive rainfall classification and vegetation types on runoff and sediment load generation [J]. Yellow River, 2021,43(10):109-113.
- [6] 张志旭,宋孝玉,李蓝君,等.黄土高原沟壑区典型草地小流域水沙特征对不同雨型的响应[J].干旱区资源与环

- 境,2020,34(9):108-115.
- Zhang Zhixu, Song Xiaoyu, Li Lanjun, et al. Response of water and sediment characteristics to different rainfall regime in a typical grassland watershed in the gully region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020,34(9):108-115.
- [7] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007,335(3/4):247-258.
- [8] 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.
- Yang Yunbin, Zhang Jianjun, Li Liang, et al. Effects of rainfall process on runoff in small watersheds in the Loess Plateau of Western Shanxi Province, Northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(3):105-114.
- [9] 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.
- Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(2):169-175.
- [10] 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.
- Zhu Yanqin, Zhao Zhibin, Qi Guangping. Effects of vegetation types and rainfall regimes on slope erosion and sediment yield in loess hilly and gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(2):9-16.
- [11] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the Loess Plateau in China [J]. *Environmental Management*, 2008,42(3):402-411.
- [12] 王赫,杨舜成,岳晓峰,等.红壤区裸露坡地不同类型次降雨的产流产沙规律[J].水土保持学报,2023,37(4):61-68.
- Wang He, Yang Shuncheng, Yue Xiaofeng, et al. Runoff and sediment of different rainfall types on bare slope in the red soil region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(4):61-68.
- [13] 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.
- Kou Xinyue, Huang Jun, Jiang Xuebing, et al. Effects of rainfall on runoff and sediment under different underlying surfaces of runoff plots [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017,37(2):27-31.
- [14] 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.
- Qin Wei, Zuo Changqing, Yan Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(2):124-132.
- [15] 邬铃莉,王云琦,王晨洋,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):157-164.
- Wu Lingli, Wang Yunqi, Wang Chenfeng, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(24):157-164.
- [16] Macqueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations [J]. *Proc Symp Math Statist and Probability*, 5 th, 1967,1:281-297.
- [17] Kaufman L, Rousseeuw P J. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis* [M]. New Jersey, American: Wiley, 1990.
- [18] Vaishnave M P, Devi K S, Srinivasan P, et al. Detection and classification of groundnut leaf diseases using KNN classifier [C]// 2019 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). IEEE, Pondicherry, India, 2019.
- [19] Maulik U, Bandyopadhyay S. Genetic algorithm-based clustering technique [J]. *Pattern Recognition*, 2000,33(9):1455-1465.
- [20] 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.
- Chang Songguo, Hu Xueqin, Shi Dongmei, et al. Characteristics of runoff and sediment, nitrogen and phosphorus losses under soil management measures in sloping farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(5):34-40.
- [21] 梁家谈,谈心,梁国坚.泰安市近50 a暴雨时空变化特征研究[J].山东气象,2016,36(2):31-36.
- Liang Jiatan, Tan Xin, Liang Guojian. Temporal and spatial variation characteristics of rainstorm in Tai'an City in recent 50 years [J]. *Journal of Shandong Meteorology*, 2016,36(2):31-36.
- [22] Wu Yiping, Yin Xiaowei, Zhou Guoyi, et al. Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin [J]. *Nature Communications*, 2024,15(1):823.

- [17] 耿晓丽,张建军,魏聪礼,等.基于多层次判定的矿业城市武安土地利用强度变化研究[J].中国矿业,2018,27(5):106-112.  
Geng Xiaoli, Zhang Jianjun, Wei Congli, et al. Study on the change of land use intensity in mining cities based on multi level decision: Take Wuan City of Hebei Province as an example [J]. China Mining Magazine, 2018,27(5):106-112.
- [18] 杨建新,龚健,高静,等.国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征:以武汉市为例[J].资源科学,2019,41(4):701-716.  
Yang Jianxin, Gong Jian, Gao Jing, et al. Stationary and systematic characteristics of land use and land cover change in the national central cities of China using intensity analysis: A case study of Wuhan City [J]. Resources Science, 2019,41(4):701-716.
- [19] 张敏,杨雅雅,胡卓玮,等.长江经济带城市扩张的时空分异特征及影响机制[J].地理学报,2024,79(2):439-461.  
Zhang Min, Yang Liya, Hu Zhuowei, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing mechanism of urban expansion in the Yangtze River economic belt, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2024,79(2):439-461.
- [20] 贾克敬,何鸿飞,张辉,等.基于“双评价”的国土空间格局优化[J].中国土地科学,2020,34(5):43-51.  
Jia Kejing, He Hongfei, Zhang Hui, et al. Optimization of territorial space pattern based on resources and environment carrying capacity and land suitability assessment [J]. China Land Science, 2020,34(5):43-51.
- [21] 谢臻,张茜茜,阿迪拉·艾尼瓦尔江,等.山区土地利用变化强度与稳定性诊断研究:以福建省德化县为例[J].中国农业大学学报,2024,29(1):186-198.  
Xie Zhen, Zhang Qianqian, Adila Ainiwaerjiang, et al. Diagnostic study on the intensity and stability of land use changes in mountainous area: Taking Dehua County of Fujian Province as an example [J]. Journal of China Agricultural University, 2024,29(1):186-198.
- [22] 鲍文楷,杨园园,邹利林.快速城镇化地区土地利用变化强度及驱动力新特征:以京津冀地区为例[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(10):124-134.  
Bao Wenkai, Yang Yuanyuan, Zou Lilin. Land use change in rapid urbanization area and its driving forces based on intensity analysis: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021,43(10):124-134.
- [23] 程江浩,毛斯楠,张燕杰.1980—2020年青藏高原土地利用变化强度及稳定性分析[J].高原科学研究,2023,7(1):47-57.  
Cheng Jianghao, Mao Sinan, Zhang Yanjie. Analysis on change in intensity of land use and stability on the Tibetan Plateau from year 1980 to 2020 [J]. Plateau Science Research, 2023,7(1):47-57.
- [24] 赵华甫,张凤荣.耕地保护方向待转:从单一功能到多功能的演变交替[J].中国土地,2010(10):19-20.  
Zhao Huaifu, Zhang Fengrong. The direction of cultivated land protection to be changed: From single function to multi-function [J]. China Land, 2010(10):19-20.
- [25] 胡飞,柯新利,柴明,等.权衡城市扩张与永久基本农田保护的城增长边界划定:以武汉市为例[J].地理与地理信息科学,2019,35(3):72-77.  
Hu Fei, Ke Xinli, Chai Ming, et al. Determining the urban growth boundary by balancing urban expansion and permanent basic farmland protection: A case study of Wuhan [J]. Geography and Geo-Information Science, 2019,35(3):72-77.

(上接第199页)

- [23] 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.  
He Yangyang, Wang Xiaoyan, Duan Shuhuai. Characteristics of runoff and sediment during individual rainfall in upper area of Miyun Reservoir [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(24):134-141.
- [24] 周天军,陈梓明,陈晓龙,等.IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候:基于情景的预估和近期信息[J].气候变化研究进展,2021,17(6):652-663.  
Zhou Tianjun, Chen Ziming, Chen Xiaolong, et al. Interpreting IPCC AR6: Future global climate based on projection under scenarios and on near-term information [J]. Climate Change Research, 2021,17(6):652-663.
- [25] 张哲,方政,董智,等.鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(1):69-76.  
Zhang Zhe, Fang Zheng, Dong Zhi, et al. Effects of erosive rainfall and typical crops on slope runoff and sediment yield in mountainous area of central-south of Shandong Province [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024,46(1):69-76.