

## 基于不同重现期暴雨的延河流域降雨侵蚀力时空格局

高晓玉<sup>1</sup>, 郑粉莉<sup>1</sup>, 潘勋诚<sup>1</sup>, 胡文韬<sup>1</sup>, 付金霞<sup>2</sup>, 张加琼<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 研究不同重现期暴雨的降雨侵蚀力精确估算及其时空格局,对极端降雨频发背景下流域土壤侵蚀防治和暴雨洪涝灾害防控具有重要意义。[方法] 基于延河流域39个雨量站1965—1990年、2006—2020年次降雨和输沙数据,使用广义极值分布(GEV)模型拟合延河流域次降雨重现期的分布和统计不同重现期暴雨的峰值降雨特征,提出一种新的基于不同重现期暴雨峰值降雨强度 $I_{\text{peak}}$ 乘以场次降雨量 $P$ 的降雨侵蚀力计算方法,并对延河流域不同重现期暴雨及降雨侵蚀力进行时空分析。[结果] 1)剖析1965—1990年、2006—2020年延河流域不同重现期暴雨的峰值特征及时空格局发现,延河流域不同重现期次暴雨量平均值为122.3~216.2 mm,且各重现期峰值降雨历时占次降雨历时的百分比 $T_{\text{peak}}/T$ 在不同重现期均维持在5%。1965—1990年,各重现期年暴雨量呈现先增加后减少的趋势,2006—2020年呈更加剧烈的波动变化趋势。2)提出基于不同重现期暴雨峰值降雨强度( $I_{\text{peak}}$ )乘以场次降雨量( $P$ )的降雨侵蚀力计算方法( $PI_{\text{peak}}$ )。与已有的多个降雨侵蚀力算法相比,延河流域5个站点河流输沙量与不同重现期次暴雨的降雨侵蚀力 $PI_{\text{peak}}$ 的相关性最好( $R^2=0.58$ )。3)基于 $PI_{\text{peak}}$ 估算的延河流域1965—1990年、2006—2020年五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇平均次暴雨侵蚀力分别为3 570.6、4 460.6、5 405.9、7 657.6、9 409.4 mm<sup>2</sup>/h。不同重现期暴雨的降雨侵蚀力与暴雨空间上均呈自东南向西北递减的趋势,存在2个相似的高值中心,且高值中心不随重现期增加而移动。[结论]  $I_{\text{peak}}$ 较 $I_{30}$ 或 $I_{60}$ 更能真实反映不同重现期的次暴雨峰值特征,且 $PI_{\text{peak}}$ 能够精准估算不同重现期次暴雨的降雨侵蚀力。研究成果可为极端暴雨驱动下的流域水土流失及洪涝灾害风险防治提供科学依据。

**关键词:** 延河流域; 暴雨; 重现期; 降雨侵蚀力; 时空格局

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0194-11

## Spatiotemporal Patterns of Rainfall Erosivity in Yanhe River Basin Based on Rainstorm Events with Different Return Periods

GAO Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHENG Fenli<sup>1</sup>, PAN Xuncheng<sup>1</sup>, HU Wentao<sup>1</sup>, FU Jinxia<sup>2</sup>, ZHANG Jiaqiong<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Investigating the accurate estimation of the rainfall erosivity of rainstorms with different return periods and their spatiotemporal patterns is essential for preventing soil erosion and mitigating flood disasters under frequent occurrences of extreme rainfall events. [Methods] Based on individual rainfall events and sediment load data from 39 rainfall stations in the Yanhe River basin during 1965—1990 and 2006—2020, the generalized extreme value (GEV) distribution model was applied to fit the distribution of rainfall return periods of individual rainfall events in the Yanhe River basin and analyze their peak rainfall characteristics with different return periods. A new method for calculating rainfall erosivity of rainstorm events with different return periods was

收稿日期: 2025-05-18

修回日期: 2025-06-21

录用日期: 2025-07-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243210)

第一作者: 高晓玉(1999—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: Gaoxy@nwafu.edu.cn

通信作者: 郑粉莉(1960—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

proposed, which multiplied the peak rainfall intensity ( $I_{\text{peak}}$ ) by the total rainfall ( $P$ ). The spatiotemporal patterns of rainstorm events and rainfall erosivity with different return periods in the Yanhe River basin were then analyzed. [Results] 1) The peak characteristics and spatiotemporal patterns of rainstorms with different return periods in the Yanhe River basin during 1965—1990 and 2006—2020 were analyzed. It was found that the average rainfall amount of individual rainstorm events with different return periods in the Yanhe River basin ranged from 122.3 to 216.2 mm. In addition, the ratio of peak rainfall duration ( $T_{\text{peak}}$ ) to total rainstorm duration ( $T$ ) remained around 5% across different return periods. From 1965 to 1990, the annual rainstorm amount with different return periods showed an initial increase followed by a decrease, while fluctuations were more pronounced during 2006—2020. 2) A rainfall erosivity calculation method ( $PI_{\text{peak}}$ ) was proposed, multiplying peak rainfall intensity ( $I_{\text{peak}}$ ) by total rainfall ( $P$ ) of rainstorms with different return periods. Compared with existing rainfall erosivity algorithms, the rainfall erosivity ( $PI_{\text{peak}}$ ) of rainstorms with different return periods showed the best correlation ( $R^2=0.58$ ) with river sediment load at five stations in the Yanhe River basin. 3) Based on  $PI_{\text{peak}}$  formula, the average rainfall erosivity of rainstorms with 5 years, 10 years, 20 years, 50 years, and 100 years return periods in the Yanhe River basin during 1965—1990 and 2006—2020 was estimated at 3 570.6, 4 460.6, 5 405.9, 7 657.6, and 9 409.4 mm<sup>2</sup>/h, respectively. Spatially, the rainfall erosivity of rainstorms with different return periods showed a decreasing trend from the southeast to the northwest, with two similar high-value centers, and these high-value centers did not shift with increasing return periods. [Conclusion]  $I_{\text{peak}}$  more accurately reflects the peak rainfall characteristics of individual rainstorm events across different return periods compared to  $I_{30}$  or  $I_{60}$ . Furthermore,  $PI_{\text{peak}}$  can precisely estimate the rainfall erosivity of individual rainstorm events with different return periods. These findings provide a scientific basis for preventing and controlling soil erosion and flood disaster risks in river basins driven by extreme rainstorms.

**Keywords:** Yanhe River basin; rainstorm; return period; rainfall erosivity; spatiotemporal patterns

**Received:** 2025-05-18

**Revised:** 2025-06-21

**Accepted:** 2025-07-02

**Online**(www.cnki.net): 2025-09-25

据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次报告<sup>[1]</sup>显示,近10多年来全球极端降水发生的频率和强度均呈显著增加的态势,导致水土流失和洪涝灾害频发,严重威胁人民的财产安全和区域经济社会的可持续发展。如2013年7月延安发生超过百年一遇标准的强降雨,500余座淤地坝损毁,累计经济损失超百亿元<sup>[2]</sup>;2024年7月,汉中、商洛、榆林等地发生持续性暴雨,造成多条道路中断、农田淹没,16.92万人受灾,直接经济损失10.21亿元<sup>[3]</sup>。因此,在当前气候变化背景下,查明不同重现期暴雨的潜在侵蚀能力可为应对极端暴雨带来的不利影响提供重要的科学指导。

黄土高原地区河流的泥沙与汛期短历时高强度暴雨事件存在显著关联<sup>[4]</sup>。大暴雨诱发的高含沙水流加剧河床冲淤变化,严重威胁河道行洪安全。在当前极端降水事件频发的背景下,现有降雨侵蚀力评估方法在描述不同重现期暴雨的侵蚀潜能方面较为薄弱,因此,科学估算不同重现期暴雨的降雨侵蚀力对区域水土流失灾害防治和河流安全运行管理有重要意义。降雨侵蚀力估算方法研究已取得显著进

展,在经典算法(降雨动能 $E$ 与某一时段最大雨强 $I_t$ 的乘积)的基础上,学者们进一步发展了基于场次<sup>[5]</sup>、日<sup>[6]</sup>、月降雨量( $P$ )的简易估算模型<sup>[7-9]</sup>等多种方法。如USLE基于WISHMEIER<sup>[10]</sup>提出的降雨动能( $E$ )和最大30 min雨强( $I_{30}$ )的乘积( $EI_{30}$ )估算降雨侵蚀力;修正通用土壤流失方程(RUSLE<sup>[11]</sup>、RUSLE2<sup>[12]</sup>)使用与USLE同样的指标进行计算,对降雨动能( $E$ )的算法进行改进;中国土壤流失方程(CSLE)使用日雨量( $P$ )并结合12 mm的侵蚀性降雨标准对半月降雨侵蚀力进行估算<sup>[13]</sup>。然而,当前降雨侵蚀力的估算对不同重现期的暴雨特征考虑较少,如不同重现期的暴雨极值、次暴雨的峰值降雨量及其持续时间等,且这些暴雨特征是流域和区域尺度水土流失与洪涝灾害的关键驱动力。现有计算降雨侵蚀力算法普遍采用的时段最大降雨强度( $I_{30}$ 、 $I_{60}$ 、 $I_{10}$ 等),对于不同类型暴雨<sup>[14-15]</sup>(如短历时对流暴雨与长历时锋面暴雨)的峰值降雨特征的描述较为薄弱,一定程度上可能低估极端暴雨的降雨侵蚀动力<sup>[16-17]</sup>,进而难以充分支撑极端降雨条件下水土流失精准防治。据此,本研究基于延河流域39个雨量

站场次降雨数据,提出不同重现期次暴雨的降雨侵蚀力计算方法,分析延河流域 1965—1990 年和 2006—2020 年不同重现期暴雨的降雨侵蚀力时空格局,以期为极端降雨频发背景下流域土壤流失量的精准估算提供技术支持,也为流域土壤侵蚀防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

延河是黄河的一级支流流域,位于陕北黄土高原中部(36°20'39"~37°19'18"N, 108°39'30"~110°28'46"E),流域面积 7 687 km<sup>2</sup>,全长 284.3 km,是黄河下游泥沙的主要来源区(图 1)。该流域的气候类型属于大陆性季风气候,夏季多雨,冬季少雨,年平均气温为 8.8~10.2℃,年平均降水量 520 mm。流域地势西北高东南低,主要的黄土地貌类型有黄土丘陵沟壑、黄土台地、黄土覆盖的古河谷及黄土覆盖的山地,其中黄土丘陵沟壑区比例约占全流域面积 90% 以上<sup>[18]</sup>,土壤类型主要为黄绵土<sup>[19]</sup>。流域内的主要支流有杏子河、平桥川河、西川河、南川河、蟠龙川河等。流域内土壤侵蚀严重,平均输沙模数达 1.14×10<sup>4</sup> t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[20]</sup>。

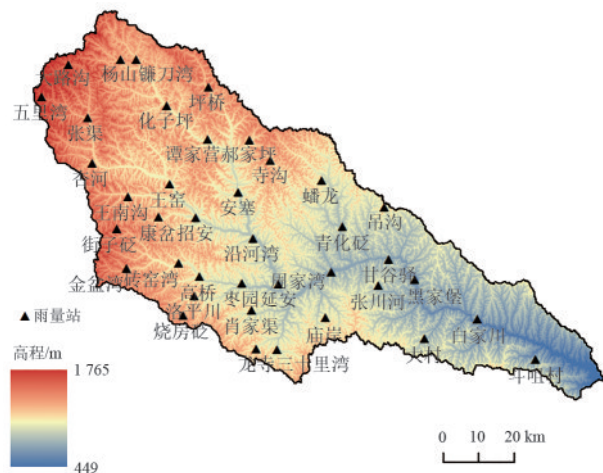


图 1 延河流域地理位置与雨量站点分布

Fig. 1 Geographic location of Yanhe River Basin and distribution of rainfall stations

### 1.2 数据来源

本研究的数据来源于黄河水利委员会,包含延河流域 39 个雨量站的次降雨和输沙数据(图 1),其中,次降雨数据的时间范围为 1965—1990 年、2006—2020 年和 1991—2005 年数据缺失。据此,本研究依据延河流域 39 个雨量站 1965—1990 年和 2006—2020 年次降雨数据分析流域不同重现期暴雨特征,阐明不同重现期暴雨的降雨侵蚀力时空格局特征。

### 1.3 研究方法

1.3.1 次降雨事件重现期的确定 本研究选用广义极值分布(GEV)这一国内外广泛用于极端降水的统计分布模型<sup>[21]</sup>,拟合延河流域次降雨重现期的分布特征,分别得到五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇重现期次暴雨分布。GEV 的分布函数为:

$$f(x; \mu, \sigma, k) = \frac{1}{\sigma} \left[ 1 - k \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{k} - 1} e^{-\left[ 1 - k \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{k}}} \quad (1)$$

$$F(x; \mu, \sigma, k) = e^{-\left[ 1 - k \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{k}}} \quad (2)$$

式中: $k$ 为形状参数; $\sigma$ 为尺度参数( $\sigma > 0$ ); $\mu$ 为位置参数。在实际计算中, $k$ 的取值决定极值分布的类型:当 $k < 0$ 时,为极值 II 型分布;当 $k > 0$ 时,为极值 III 型分布;当 $k = 0$ 时,为极值 I 型分布。

本文基于 Python 3.7 软件中 SciPy 库的 genextreme 函数确定广义极值分布函数中 $k$ 、 $\sigma$ 和 $\mu$ 的参数,并以此拟合次降雨的重现期特征。

1.3.2 次降雨事件的划分 本研究的次降雨事件的划分是基于通用土壤流失方程(USLE)和修正通用土壤流失方程(RUSLE)的标准进行划分,即将降雨间隔时间在 6 h 以上或连续 6 h 降雨量不足 1.2 mm 的看作 2 次降雨事件,否则看作 1 次降雨事件<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 延河流域不同重现期暴雨特征分析

2.1.1 不同重现期暴雨量特征分析 基于 GEV 分布函数,计算得到延河流域 39 个雨量站五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇次暴雨发生的极小值平均值分别为 94.0、112.9、132.0、158.7、180.5 mm,以此为整个流域各重现期暴雨发生的判别标准,分析不同重现期次暴雨特征。由表 1 可知,1965—1990 年、2006—2020 年 2 个时段,五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇次暴雨的平均值分别为 122.3、140.2、155.8、191.4、216.2 mm,对应的暴雨场次分别为 258、139、74、20、9 mm。

延河流域不同重现期多年平均暴雨量年内变化表明(图 2),五年一遇次暴雨发生在 5—10 月,十年一遇、二十年一遇次暴雨发生在 5 月和 7—9 月,五十年一遇、百年一遇次暴雨发生在 7—9 月。五年一遇多年平均暴雨量的最大值为 1 152.7 mm,出现在 7 月;十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇多年平均暴雨量的最大值分别为 1 136.4、1 484.7、991.1、1 137.8 mm,均出现在 8 月。五年一遇多年平均暴雨量的最小值为 101.3 mm,出现在 6 月;十年一遇、二十年一遇多年平均暴雨量的最小值分别为 133.4、146.4 mm,均出现在 5 月;五十年一遇、百年一遇多年

平均暴雨量的最小值均为 197.4 mm,均出现在 9 月。上述结果表明,7 月和 8 月是延河流域不同重现期暴雨发生的主要月份。

表 1 延河流域不同重现期次暴雨雨量标准及次暴雨统计特征

Table 1 Rainfall standards and statistical characteristics of individual rainstorm events with different return periods in Yanhe River basin

暴雨重现期/a	不同重现期次暴雨雨量标准/mm	1965—1990年、2006—2020年不同重现期次暴雨量平均值/mm	1965—1990年、2006—2020年不同重现期暴雨场次/场
5	94.0	122.3	258
10	112.9	140.2	139
20	132.0	155.8	74
50	158.7	191.4	20
100	180.5	216.2	9

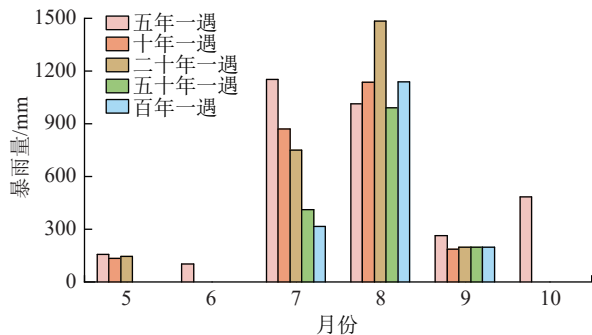


图 2 延河流域不同重现期多年平均暴雨量年内变化

Fig. 2 Intra-annual variations in multi-year average rainstorm amount of events with different return periods in Yanhe River basin

延河流域不同重现期暴雨量的年际变化(图 3)表明,五年一遇年暴雨量为 96.0~6 583.3 mm,其平均值为 1 213.2 mm;十年一遇年暴雨量为 116.0~4 431.9 mm,其平均值为 1 025.3 mm;二十年一遇年暴雨量为 132.4~3 694.7 mm,其平均值为 960.5 mm;五十年一遇年暴雨量为 166.6~1 815.6 mm,其平均值为 546.5 mm;百年一遇年暴雨量为 193.6~1 137.8 mm,其平均值为 492.0 mm。整体上,1965—

表 2 延河流域不同重现期次暴雨峰值参数的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of peak parameters of individual rainstorm events with different return periods in Yanhe River basin

暴雨重现期/a	平均次降雨历时( $T$ )/h	平均峰值降雨历时( $T_{peak}$ )/h	峰值降雨历时占次降雨历时的百分比( $T_{peak}/T$ )/%	峰值降雨强度( $I_{peak}$ )/(mm·h <sup>-1</sup> )
5	38.86	2.26	5.8	16.0
10	38.45	2.31	6.0	17.3
20	40.47	2.24	5.5	19.2
50	47.36	2.07	4.4	24.0
100	54.32	2.26	4.2	24.4

2.1.3 不同重现期暴雨的空间分布 延河流域五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇多年平均

1990 年,五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇年暴雨量呈先增加后减少趋势,2006—2020 年,五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇年暴雨量呈现波动变化趋势。百年一遇年暴雨量仅在 1977 年、1985 年、1987 年、2020 年 4 个年份出现。在观测期间,与 1965—1990 年相比,2006—2020 年的不同重现期的年暴雨量波动明显。

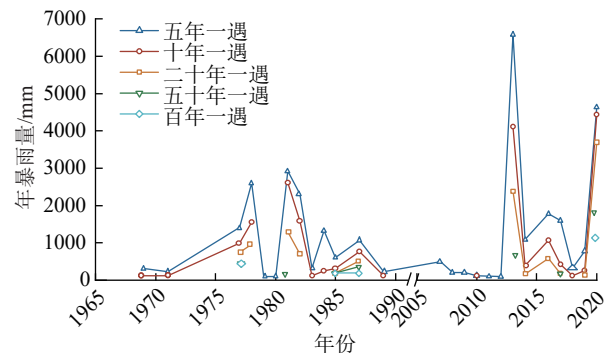


图 3 延河流域不同重现期暴雨量年际变化

Fig. 3 Inter-annual variations in rainstorm amount of events with different return periods in Yanhe River basin

2.1.2 不同重现期暴雨峰值特征分析 依据延河流域 1965—1990 年、2006—2020 年 2 个时段不同重现期次暴雨降雨特征,计算不同重现期暴雨峰值降雨持续时间( $T_{peak}$ )及峰值降雨强度( $I_{peak}$ )(表 2)。结果表明,不同重现期暴雨的平均次降雨历时  $T$  从五年一遇 38.86 h 增加至百年一遇 54.32 h,峰值降雨强度  $I_{peak}$  从五年一遇 16.0 mm/h 增加至百年一遇 24.4 mm/h。

表 2 还表明,峰值降雨历时占次降雨历时的百分比  $T_{peak}/T$  随重现期的增加而变化,为 4.2%~6.0%,其变化幅度较小,且基本上维持在 5%,不同重现期平均峰值降雨历时  $T_{peak}$  为 2.07~2.31 h。上述结果表明,随暴雨重现期从五年一遇增大至百年一遇, $T_{peak}$ 、 $T_{peak}/T$  几乎不随暴雨重现期的增大而变化,表明暴雨峰值降雨特征参数  $T_{peak}$  及  $T_{peak}/T$  在不同重现期间呈现稳定的特征。

暴雨空间分布具有相似的变化规律(图 4)。整体上,不同重现期的暴雨存在 2 个高值中心,分布于流域中

游的康岔至街子砭区域及中游的甘谷驿至下游的斗咀村区域。其中,五年一遇暴雨为 102.0~184.1 mm,十年一遇暴雨为 117.4~201.8 mm,二十年一遇暴雨为 132.1~202.2 mm,五十年一遇暴雨为 159.0~330.9 mm。流域内五年一遇暴雨最大值均出现在流域下游的大村站,十年一遇暴雨最大值出现在流域中游的蟠龙站,二十年一遇、五十年一遇暴雨最

大值均出现在流域中游的甘谷驿站。五年一遇、十年一遇暴雨最小值分别出现在流域上游的张渠站和 大路沟站,二十年一遇、五十年一遇暴雨最小值出现在流域中下游的肖家渠站和黑家堡站。因百年一遇暴雨在研究时段仅发生 9 场次,其数据量不足以分析其空间分布,故不对百年一遇暴雨进行空间分析。

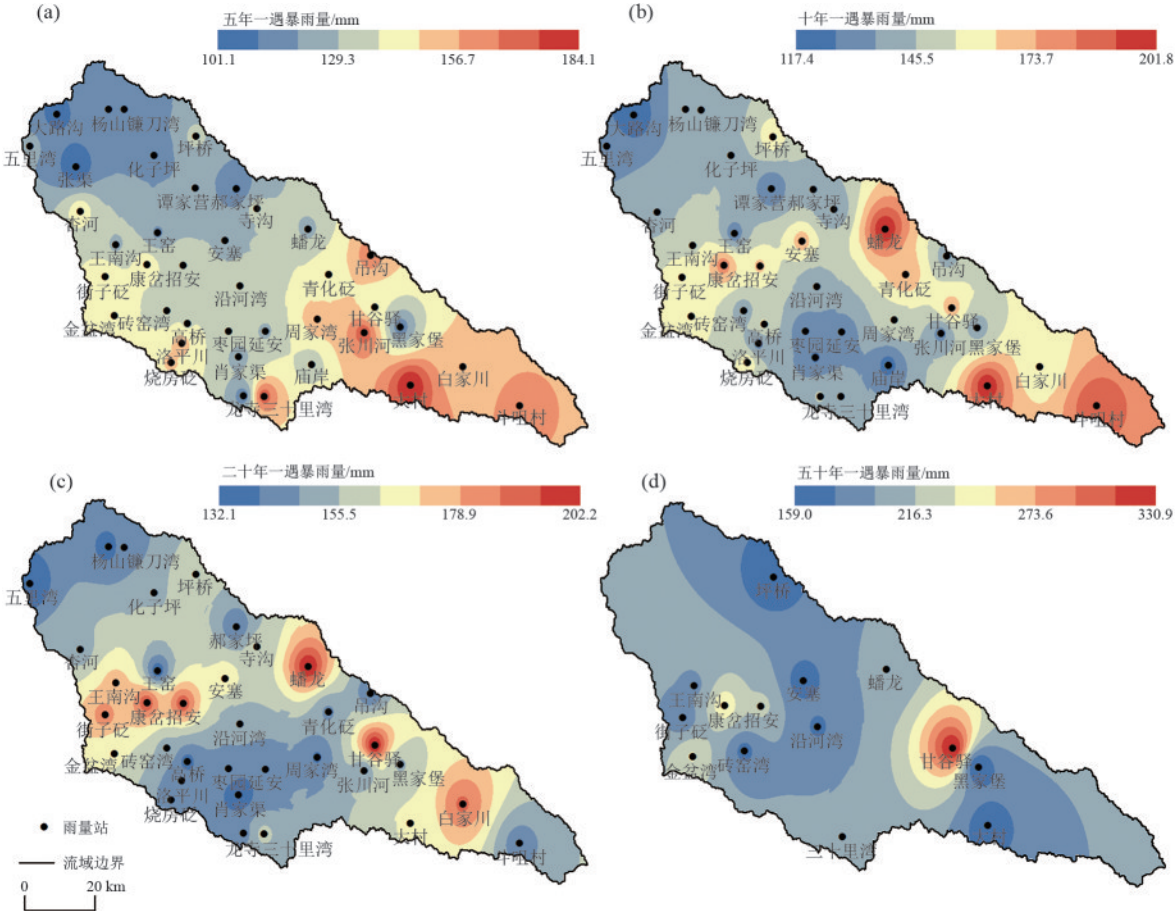


图 4 延河流域不同重现期暴雨的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of rainstorm events with different return periods in Yanhe River basin

2.2 不同重现期暴雨的降雨侵蚀力估算

2.2.1 不同重现期暴雨的降雨侵蚀力计算方法 基于贾志伟等<sup>[22]</sup>、江忠善等<sup>[23]</sup>和王万忠等<sup>[24]</sup>的研究结果,提出一种基于不同重现期暴雨峰值降雨强度乘以次降雨量的降雨侵蚀力计算方法。计算方法为:

$$R_{次} = P I_{peak} \tag{3}$$

式中: $R_{次}$ 为不同重现期次暴雨的降雨侵蚀力,  $mm^2/h$ ;  $P$ 为次降雨的总降雨量,  $mm$ ;  $I_{peak}$ 为次暴雨的峰值降雨强度,  $mm/h$ 。计算公式为:

$$I_{peak} = \frac{P_{peak}}{T_{peak}} \tag{4}$$

式中: $P_{peak}$ 为 1 场次暴雨的峰值降雨量,  $mm$ ;  $T_{peak}$ 为峰值降雨持续时间,  $h$ 。由表 2 可知,暴雨的峰值降雨特征参数在不同重现期间呈现稳定的特征,且峰值降雨历时  $T_{peak}$  变化为 2.07~2.31 h。由于在计算  $I_{peak}$  时

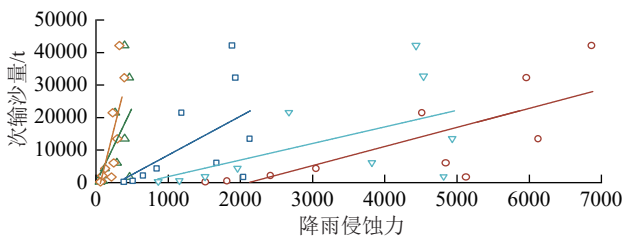
考虑到  $T_{peak}$  需囊括不同重现期暴雨的完整峰值降雨区间,故这里统一对不同重现期暴雨的  $T_{peak}$  采用最大值 2.3 h 进行计算。

2.2.2 基于不同算法的降雨侵蚀力对河流输沙的影响分析 已有研究<sup>[25-26]</sup>表明,1959—1969 年黄土丘陵沟壑区的河流泥沙输移比为 0.8~1.0,而 1970 年后由于淤地坝、退耕还林等工程的实施,多年平均泥沙输移比呈现整体显著下降的趋势<sup>[27]</sup>。但有研究<sup>[28]</sup>指出,次暴雨事件尺度下水保措施受暴雨洪水影响可能未完全发挥蓄水拦沙效益,泥沙输移比变化趋势不稳定,可能高于治理后的多年平均值。据此,考虑到 1 次暴雨条件下与多年平均的泥沙输移比差异,参考陈浩<sup>[29]</sup>、曹文洪等<sup>[30]</sup>研究成果可知,本研究时段内次暴雨条件下延河流域泥沙输移比接近 1.0,即暴雨条件下的次输沙量能基本上反映土壤流失量。据

此,基于收集到的安塞、甘谷驿、延安、枣园、杏河 5 个站点的次降雨与输沙数据,对比分析基于不同算法估算的降雨侵蚀力对流域输沙量的影响。

由图 5 可知,对于 5 种不同算法的降雨侵蚀力,本文提出的基于  $PI_{peak}$  估算的降雨侵蚀力与输沙量的相关性最好( $R^2=0.58$ ),其次为章文波等<sup>[31]</sup>提出的基于日降雨量和降雨强度( $P_d I_d$ )估算的降雨侵蚀力及江忠善等提出基于  $PI_{30}$  估算的降雨侵蚀力( $R^2=0.42$ ,  $R^2=0.31$ ),而使用 RUSLE 手册推荐的  $EI_{30}$  公式及王万忠等<sup>[23]</sup>的经验公式估算的降雨侵蚀力与输沙量相关性较弱( $R^2=0.28$ ,  $R^2=0.22$ )。此结果说明对于不同重现期暴雨,最大 30 min 雨强( $I_{30}$ )相比于峰值降雨强度( $I_{peak}$ )在量化暴雨与产沙关系时,存在对土壤侵蚀的低估现象。可能是由于  $I_{30}$  仅考虑 30 min 降雨特征,并不能完整地刻画不同重现期的次暴雨特征,尤其是其对峰值雨强及其历时缺乏考虑,且 30 min 仅是不同重现期暴雨过程峰值历时(2.3 h)的 1/5,因而低估流域土壤流失量。

- 本文提出的公式:  $R=PI_{peak}$       趋势线 $y=5.88x-12466.18$   $R^2=0.58$
- △ RUSLE:  $R=EI_{30}$                 趋势线 $y=46.22x-144.37$   $R^2=0.28$
- 姜忠善经验公式:  $R=PI_{30}$         趋势线 $y=11.97x-3505.71$   $R^2=0.31$
- ◇ 章文波经验公式:  $R=0.184\Sigma(P_d I_{td})$     趋势线 $y=92.29x-6956.07$   $R^2=0.42$
- ▽ 王万忠经验公式:  $R=235(PI_{30}/100)-52.3$     趋势线 $y=5.09x-3236.33$   $R^2=0.22$



注:5种算法的降雨侵蚀力单位不统一,具体单位详见各计算方法。

图 5 延河流域输沙量与 5 种算法估算的降雨侵蚀力的关系  
Fig.5 Relationship between sediment load and rainfall erosivity estimated by five algorithms in Yanhe River basin

### 2.3 延河流域不同重现期暴雨的降雨侵蚀力时空格局

2.3.1 不同重现期暴雨的降雨侵蚀力时间变化 延河流域 1965—1990 年和 2006—2020 年,五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇次暴雨降雨侵蚀力( $PI_{peak}$ )的平均值分别为 3 570.6、4 460.6、5 405.9、7 657.6、9 409.4  $mm^2/h$ 。流域不同重现期多年平均暴雨降雨侵蚀力的年内变化(图 6)表明,五年一遇多年平均暴雨降雨侵蚀力的最大值为 36 628.6  $mm^2/h$ ,出现在 7 月;十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇多年平均暴雨降雨侵蚀力的最大值分别为 34 796.7、48 754.5、42 089.8、55 353.0  $mm^2/h$ ,均出现在 8 月。五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇多年平均暴

雨降雨侵蚀力的最小值分别为 2 731.5、1 988.6、1 376.9、1 376.9、1 381.8  $mm^2/h$ ,均出现在 9 月。

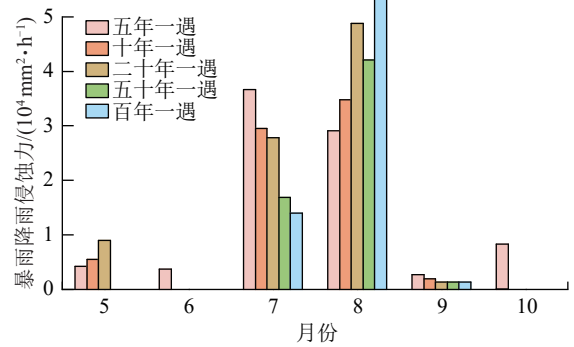


图 6 延河流域不同重现期多年平均暴雨降雨侵蚀力的年内变化  
Fig.6 Intra-annual variations in multi-year average rainfall erosivity of rainstorm events with different return periods in Yanhe River basin

延河流域不同重现期暴雨的降雨侵蚀力年际变化(图 7)表明,五年一遇年暴雨降雨侵蚀力为 960.7~182 478.2  $mm^2/h$ ,其平均值为 35 430.8  $mm^2/h$ ,最高值发生在 2013 年,最低值发生在 2011 年;十年一遇年暴雨降雨侵蚀力为 844.6~167 886.3  $mm^2/h$ ,其平均值为 32 632.5  $mm^2/h$ ,最高值发生在 2020 年,最低值发生在 1969 年;二十年一遇年暴雨降雨侵蚀力为 1 376.9~139 154.9  $mm^2/h$ ,其平均值为 33 336.4  $mm^2/h$ ,最高值发生在 2020 年,最低值发生在 1985 年;五十年一遇年暴雨降雨侵蚀力为 1 376.9~79 375.2  $mm^2/h$ ,其平均值为 21 878.8  $mm^2/h$ ,最高值发生在 2020 年,最低值发生在 1985 年;百年一遇年暴雨降雨侵蚀力为 1 376.9~55 353.0  $mm^2/h$ ,其平均值为 21 170.0  $mm^2/h$ ,最高值发生在 2020 年,最低值发生在 1985 年。整体上,1965—1990 年和 2006—2020 年,五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇年暴雨降雨侵蚀力均呈现波动变化趋势。百年一遇年暴雨降雨侵蚀力仅在 1977 年、1985 年、1987 年、2020 年 4 个年份发生,故而不进行统计分析。另外,与 1965—1990 年相比,2006—2020 年的不同重现期暴雨的降雨侵蚀力的波动振幅明显增加。

2.3.2 不同重现期暴雨的降雨侵蚀力空间分布 由图 8 可知,延河流域五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇多年平均暴雨降雨侵蚀力具有相似的空间分布规律。整体上,存在 2 个高值中心,分布于流域中游康岔至街子砭区域和中游的甘谷驿至下游的斗咀村区域,与对应的暴雨空间分布规律一致。其中,五年一遇暴雨降雨侵蚀力大致为 1 921.1~7 014.5  $mm^2/h$ ,十年一遇暴雨降雨侵蚀力大致为 2 519.5~10 004.2  $mm^2/h$ ,二十年一遇暴雨降雨侵蚀力大致为 1 540.7~10 566.7  $mm^2/h$ ,五十年一遇暴雨降

雨侵蚀力大致为  $1\ 377.6\sim 16\ 230.2\ \text{mm}^2/\text{h}$ 。五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇多年平均暴雨侵蚀力分别为  $3\ 930.8$ 、 $4\ 862.0$ 、 $5\ 284.8$ 、 $8\ 136.0\ \text{mm}^2/\text{h}$ 。流域内五年一遇、十年一遇、二十年一遇暴雨降雨侵蚀力最大值均出现在流域下游的斗咀村站,五十年一遇暴雨降雨侵蚀力最大值出现在流域中游的甘谷驿站,五年一遇暴雨降雨侵蚀力最小值出现在上游的郝家坪站,二十年一遇暴雨降雨侵蚀力最小值出现在中游的肖家渠站,十年一遇、五十年一遇暴雨降雨侵蚀力最小值均出现在中游的三十里湾站,因百年一遇暴雨降雨侵蚀力在研究时段仅出现9场次,其数据量不足以分析其空间分布,故不对百年一遇暴雨降雨侵蚀力进行空间分析。

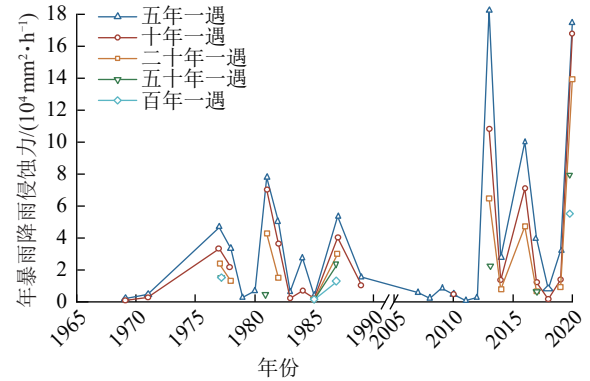


图7 延河流域不同重现期暴雨的降雨侵蚀力年际变化  
Fig.7 Inter-annual variations in rainfall erosivity of rainstorm events with different return periods in Yanhe River basin

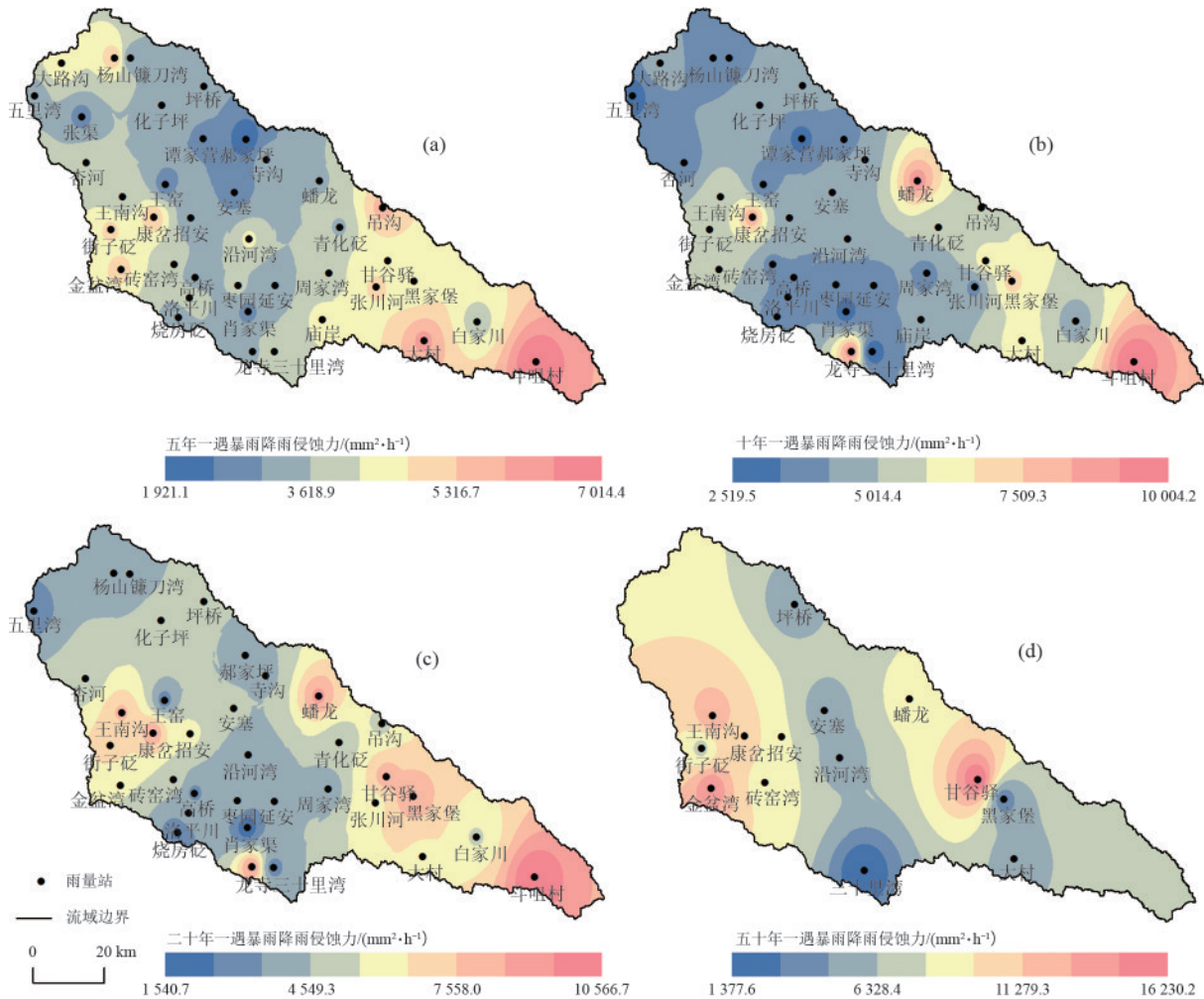


图8 延河流域不同重现期多年平均暴雨降雨侵蚀力空间分布

Fig.8 Spatial distribution of multi-year average rainfall erosivity of rainstorm events with different return periods in Yanhe River basin

### 3 讨论

#### 3.1 不同重现期暴雨动态变化及峰值特征分析

延河流域五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇暴雨均出现于5—10月,从多年平均月暴雨量来看,7、8月是延河流域发生大暴雨的

主要月份,体现黄土高原暴雨汛期集中分布的特性。8月的十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇多年平均月暴雨量均高于7月。从流域大气环流背景来看,可能是由于7月中旬以后副热带高压加强西伸北抬影响陕北,在与西风带的低压天气系统共同

作用导致的<sup>[32]</sup>。

年际变化上,延河流域1965—1990年和2006—2020年暴雨呈现明显的差异特征,尤其是2010年后,各重现期暴雨量呈更加剧烈的波动变化趋势,可能与近10a来黄土高原降水变率增大,极端降水频率和强度增加相关。空间格局上,延河流域不同重现期暴雨的空间格局呈自东南向西北递减趋势。整体上,不同重现期暴雨存在2个高值中心,分布于流域中游的康岔至街子砭区域及中游的甘谷驿至下游的斗咀村区域。气候和地形可能是导致暴雨呈现2个中心集中分布的原因。

已有研究<sup>[33]</sup>证明,峰值降雨强度是降雨模拟的重要参数,峰值持续时间和峰值降雨强度也是CLIGEN(Climat Generator)所使用的2个相关的降雨参数。从暴雨的峰值特征来看,随暴雨重现期的增加,峰值降雨历时占次降雨历时的百分比 $T_{peak}/T$ 基本维持5%的比例,说明延河流域极端暴雨的峰值特征差异主要体现在峰值降雨强度 $I_{peak}$ ,峰值降雨历时 $T_{peak}$ 不随重现期的变化而明显增加,与已有研究<sup>[34]</sup>结论一致。不同重现期峰值降雨强度 $I_{peak}$ 为16.0~24.4 mm/h,与张岩等<sup>[35]</sup>研究结果相近。

### 3.2 不同重现期暴雨的降雨侵蚀力算法对比分析

已有研究<sup>[36-38]</sup>表明,降雨量、降雨强度及降雨历时等降雨特征对径流输沙有重要影响,而暴雨的峰值雨强和峰值降雨持续时间决定洪峰的出现时间及洪峰流量的大小,精确描述暴雨的峰值特征对于计算不同重现期暴雨的降雨侵蚀力至关重要。

本研究提出的基于不同重现期暴雨峰值降雨强度乘以场次降雨量的降雨侵蚀力( $PI_{peak}$ )算法,计算1965—1990年、2006—2020年延河流域次暴雨降雨侵蚀力发现,随着暴雨重现期从5a增加至100a时,次暴雨的降雨侵蚀力呈指数增加的变化趋势。与5a暴雨重现期相比,100a暴雨重现期的降雨侵蚀力增加163.5%,对应的次暴雨量 $P$ 增加76.8%和峰值降雨强度 $I_{peak}$ 增加52.5%。表明在气候变化背景下,极端降雨量及其峰值降雨强度的增加是诱发土壤侵蚀风险增加的关键因子,因此,未来需高度警惕短历时暴雨事件诱发的水土流失灾害。

与已有研究<sup>[39]</sup>相比,本研究提出的不同重现期暴雨的降雨侵蚀力算法与流域次输沙量的相关性最好,可能主要是由于目前计算降雨侵蚀力使用的30 min或60 min最大雨强计算区间没有完全涵盖暴雨峰值的持续时间(2.3 h),如焦菊英等<sup>[39]</sup>针对极强烈侵蚀典型暴雨特征的研究中,B型暴雨(峰面性降雨夹有雷暴性质的暴雨)统计得到的最大30 min降

雨量为15~30 mm,占次降雨量的30%~45%。对于B型暴雨而言,使用传统的30 min区间可能低估其峰值特征,从而导致B型暴雨的降雨侵蚀力计算偏低。可能是由于 $I_{30}$ 计算的是30 min降雨区间的雨强均值,而使用 $I_{peak}$ 指标统计的是完整峰值降雨区间的雨强特征,对于暴雨峰值雨强计算可能更加准确。

由于不同重现期暴雨的降雨过程对流域产流产沙过程的影响也存在明显差异,流域洪峰出现时间及洪峰流量大小与峰值降雨强度 $I_{peak}$ 显著相关<sup>[40-41]</sup>,而目前使用的 $I_{30}$ 或 $I_{60}$ 降雨强度指标在刻画不同重现期暴雨对坡面产流产沙影响方面不能全面反映暴雨峰值持续时间及峰值降雨强度对流域产流产沙过程的影响,这也是本文提出的降雨侵蚀力算法与流域输沙量关系优于其余算法的原因。

### 3.3 不同重现期暴雨的降雨侵蚀力时空分析

基于 $PI_{peak}$ 估算的不同重现期暴雨的降雨侵蚀力表明,与不同重现期的暴雨量相比,延河流域不同重现期暴雨的降雨侵蚀力在年内呈现更加集中的变化趋势,主要体现在7、8月的五年一遇暴雨降雨侵蚀力占5—10月降雨侵蚀力的77%,超过十年一遇暴雨降雨侵蚀力占比更达到5—10月暴雨降雨侵蚀力的90%以上,而对应的7、8月五年一遇暴雨量占比仅为68%,可能是由于受副热带高压影响7月下旬至8月易发生短历时高强度暴雨,此时段降雨量和降雨强度为一年内的峰值,故此时段降雨侵蚀力占比较大。

从年际变化来看,已有研究<sup>[42-43]</sup>指出上世纪60年代至2010年延河流域暴雨量及暴雨强度整体呈现不显著的下降趋势,但近10a延河流域不同重现期暴雨的降雨侵蚀力相比于1965—1990年呈现明显增加趋势(图7),可能是由于近10a延河流域极端降雨频次及强度的增加。以数据较完整的五年一遇暴雨重现期趋势为例,2006—2020年五年一遇暴雨降雨侵蚀力波动振幅明显高于1965—1990年,尤其是2013年、2016年、2020年3场次特大暴雨典型年份的年降雨侵蚀力为1977年的4.0、2.2、3.8倍,表明近10a延河流域降雨侵蚀力也呈现极端化的特征。空间格局上,不同重现期暴雨的降雨侵蚀力与对应的暴雨空间分布规律一致,呈现流域内2个高值中心集中分布的特征。不同重现期暴雨的降雨侵蚀力相比暴雨量的空间变异更大,可能是由于地形导致的。

### 3.4 本研究的启示意义

本研究结果表明,1965—1990年和2006—2020年延河流域极端降雨事件呈显著加剧趋势,特别是2010年后不同重现期暴雨量及降雨侵蚀力的波动振幅较1965—1990年明显增大,反映出近10a流域极

端降雨事件频发且强度增强的显著特征。随着气候变暖和降水极端化趋势加剧,大暴雨事件诱发的高含沙水流可能引起河床冲淤动态改变,不仅导致水土流失风险陡增,更严重威胁河道行洪安全,导致连锁性灾害效应。因此,今后应重点关注极端降雨侵蚀风险的精准评估,完善水土流失与洪涝灾害的预警体系,切实做好极端暴雨驱动下的流域灾害风险评估和防治。

## 4 结论

1) 剖析 1965—1990 年、2006—2020 年延河流域不同重现期暴雨的峰值特征及时空格局发现,延河流域不同重现期次暴雨量的平均值为 122.3~216.2 mm,且各重现期峰值降雨历时占次降雨历时的百分比  $T_{\text{peak}}/T$  在不同重现期均维持在 5%。1965—1990 年,各重现期年暴雨量呈现先增加后减少的趋势,2006—2020 年呈更加剧烈的波动变化趋势。

2) 提出基于不同重现期暴雨峰值降雨强度  $I_{\text{peak}}$  乘以场次降雨量  $P$  的降雨侵蚀力计算方法 ( $PI_{\text{peak}}$ ),与已有的多个降雨侵蚀力算法相比,本研究提出的不同重现期暴雨的次降雨侵蚀力算法与流域次输沙量的相关性最好。已有研究使用的最大 30 min 降雨强度 ( $I_{30}$ ) 或最大 60 min 降雨强度 ( $I_{60}$ ) 指标可能低估峰面性降雨夹有雷暴性质的暴雨的峰值特征,从而导致对次暴雨的降雨侵蚀力的计算存在低估现象。

3) 估算不同重现期暴雨的降雨侵蚀力 ( $PI_{\text{peak}}$ ) 发现,延河流域 1965—1990 年和 2006—2020 年五年一遇、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇、百年一遇平均次暴雨侵蚀力分别为 3 570.6、4 460.6、5 405.9、7 657.6、9 409.4 mm<sup>2</sup>/h。不同重现期暴雨的降雨侵蚀力与暴雨空间格局相似,均呈现自东南向西北递减的趋势,且高值中心不随重现期增加而移动。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [2] 黄玉华,冯卫,李政国. 陕北延安地区 2013 年“7.3”暴雨特征及地质灾害成灾模式浅析[J]. 灾害学, 2014, 29(2):54-59.  
HUANG Y H, FENG W, LI Z G. Characteristics and geological disaster mode of the rainstorm happened on July 3.2013 in Yanan area of Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 54-59.
- [3] 人民网. 陕西本轮强降雨造成 16.92 万人受灾 直接经济损失 10.21 亿元[EB/OL]. (2024-07-19)[2025-06-21].  
<http://sn.people.com.cn/n2/2024/0719/c226647-40917581.html>.
- [4] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1982, 2(3):40-44.  
ZHU X M. Main types of water erosion in Loess Plateau and its related factors[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1982, 2(3):40-44.
- [5] 黎四龙,蔡强国,吴淑安. 次降雨侵蚀量的计算[J]. 泥沙研究, 1999, 24(1):49-55.  
LI S L, CAI Q G, WU S A. Calculation of erosion amount of secondary rainfall [J]. Journal of Sediment Research, 1999, 24(1):49-55.
- [6] XIE Y, YIN S Q, LIU B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535:547-558.
- [7] 高歌,陈涛,徐沅鑫. 1961—2023 年中国降雨侵蚀力变化特征及未来趋势预估[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 50-58.  
GAO G, CHEN T, XU Y X. Variation and trend of rainfall erosivity in China during 1961—2023[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4):50-58.
- [8] 翁薛柔,叶琰,叶勇,等. 基于多种算法的小安溪流域降雨侵蚀力时空演变特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4):143-150.  
WENG X R, YE Y, YE Y, et al. Spatiotemporal characteristics of rainfall erosivity in Xiaoxian basin using multiple algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(4):143-150.
- [9] 殷水清,薛筱婵,岳天雨,等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 105-113.  
YIN S Q, XUE X C, YUE T Y, et al. Spatiotemporal distribution and return period of rainfall erosivity in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9):105-113.
- [10] WISCHMEIER W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(3):246-249.
- [11] 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 and Water Conservation, 1981, 36(6):355-359.
- [12] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [13] 祝赢,章文波,刘素红,等. 第一次全国水利普查侵蚀模数的批量计算方法:基于 CSLE 和 GIS 的土壤水蚀模数计算器设计与应用[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5):

- 291-295.
- ZHU Y, ZHANG W B, LIU S H, et al. A batch computation method of soil erosion modulus in the first national water conservancy survey: Design and application of water erosion modulus calculator based on CSLE and GIS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5):291-295.
- [14] 孔锋,方建,吕丽莉,等.中国短历时和长历时暴雨对总暴雨贡献的空间差异性研究(1961—2015)[J].干旱区地理,2017,40(2):293-303.
- KONG F, FANG J, LU L L, et al. Spatial pattern difference between contribution of short and long duration heavy rainfall to total heavy rainfall in China from 1961 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2):293-303.
- [15] 王万忠,焦菊英,郝小品.黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系[J].水科学进展,1999,10(2):165-169.
- WANG W Z, JIAO J Y, HAO X P. Nonuniformity of spatial distribution of rainfall and relationship between point rainfall and areal rainfall of different patterns of rainstorm on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 1999, 10(2):165-169.
- [16] 王建勋,郑粉莉,江忠善,等.WEPP模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价:以坡度因子为例[J].泥沙研究,2008,33(6):52-60.
- WANG J X, ZHENG F L, JIANG Z S, et al. Assessment on WEPP model applicability (Hillslope version) to hill-gully region of the Loess Plateau: A case study in slope gradient factor [J]. Journal of Sediment Research, 2008, 33(6):52-60.
- [17] 王建勋,郑粉莉,江忠善,等.WEPP模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价:以坡长因子为例[J].水土保持通报,2007,27(2):50-55.
- WANG J X, ZHENG F L, JIANG Z S, et al. Assessment of WEPP model applicability (hillslope version) on hill-gully region of the Loess Plateau: A case study in slope length factor [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2):50-55.
- [18] 李佳恒.基于SWAT模型的延河流域水沙调控模拟与效益评估[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
- LI J H. Simulation and benefit evaluation of water and sediment regulation in Yanhe River basin based on SWAT model [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [19] 李天宏,郑丽娜.基于RUSLE模型的延河流域2001—2010年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- LI T H, ZHENG L N. Soil erosion changes in the Yanhe watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7):1164-1175.
- [20] 邱临静,郑粉莉,尹润生.1952—2008年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J].水土保持学报,2011,25(3):49-53.
- QIU L J, ZHENG F L, YIN R S. Trend analysis of precipitation and streamflow during 1952—2008 in Yanhe River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3):49-53.
- [21] 庄园煌,陈宏,孙密娜,等.气候变化背景下海河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J].大气科学学报,2025,48(2):278-288.
- ZHUANG Y H, CHEN H, SUN M, et al. Extreme precipitation characteristics and return period estimation in the Haihe River basin under climate change [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2025, 48(2):278-288.
- [22] 贾志伟,江忠善,刘志.降雨特征与水土流失关系的研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(黄土高原试验区土壤侵蚀和综合治理减沙效益研究专集),1990(2):9-15.
- JIA Z W, JIANG Z S, LIU Z. Study on relationship between rainfall characteristics and the loss of soil and water [J]. Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1990(2):9-15.
- [23] 江忠善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):40-45.
- JIANG Z S, LI X Y. Study on the rainfall erosivity and the topographic factor of predicting soil loss equation in the Loess Plateau [J]. Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1988(1):40-45.
- [24] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(I)[J].水土保持学报,1995,9(4):7-18.
- WANG W Z, JIAO J Y, HAO X P, et al. Study on rainfall erosivity in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(4):7-18.
- [25] 龚时旸,熊贵枢.黄河泥沙来源和地区分布[J].人民黄河,1979,1(1):7-18.
- GONG S Y, XIONG G S. Sediment source and regional distribution of the Yellow River [J]. Yellow River, 1979, 1(1):7-18.
- [26] 牟金泽,孟庆枚.论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J].泥沙研究,1982,(2):60-65.
- MOU J Z, MENG Q M. Research on sediment delivery ratio in watershed sediment yield calculation [J]. Journal of Sediment Research, 1982,(2):60-65.
- [27] 许炯心,孙季.水土保持措施对流域泥沙输移比的影响[J].水科学进展,2004,15(1):29-34.
- XU J X, SUN J. Effect of erosion control measures on sediment delivery ratio [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1):29-34.
- [28] 王志杰,马丽梅,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同空间尺度

- 流域泥沙输移比研究[J].水土保持通报,2013,33(6):1-8.  
WANG Z J, MA L M, JIAO J Y. Sediment delivery ratio in different spatial scale watershed in loess hill-gully region[J].Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6):1-8.
- [29] 陈浩.黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J].地理学报,2000,55(3):354-363.  
CHEN H. Relationship between erosion and sediment yield in drainage basins of loess gully hilly areas[J].Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3):354-363.
- [30] 曹文洪,张启舜,姜乃森.黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究[J].泥沙研究,1993(1):1-13.  
CAO W H, ZHANG Q S, JIANG N S. The study on mathematical model for sediment yields caused by one storm in loess zone [J]. Journal of Sediment Research, 1993(1):1-13.
- [31] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002(6):705-711.  
ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002(6):705-711.
- [32] 翟佑安.中国气象灾害大典.陕西卷[M].北京:气象出版社,2005.
- [33] YU B F. Adjustment of CLIGEN parameters to generate precipitation change scenarios in southeastern Australia [J].Catena, 2005, 61(2/3):196-209.
- [34] 戴有学,王振华,戴临栋,等.芝加哥雨型法在短历时暴雨雨型设计中的应用[J].干旱气象,2017,35(6):1061-1069.  
DAI Y X, WANG Z H, DAI L D, et al. Application of Chicago hyetograph method in design of short duration rainstorm pattern[J].Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6):1061-1069.
- [35] 张岩,朱清科.黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(6):99-103.  
ZHANG Y, ZHU Q K. Statistic analysis of erosive rainfall on the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6):99-103.
- [36] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.  
ZHANG H R, ZHENG F L. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3):40-43.
- [37] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010,35(6):48-53.  
GENG X D, ZHENG F L, LIU L. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hill slopes [J]. Journal of Sediment Research, 2010, 35(6):48-53.
- [38] 姚文艺,肖培青,申震洲,等.坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J].水利学报,2011,42(12):1438-1444.  
YAO W Y, XIAO P Q, SHEN Z Z, et al. Responses of runoff process and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12):1438-1444.
- [39] 焦菊英,王万忠,郝小品.黄土高原极强烈侵蚀(灾害性)的降雨产流产沙特征[J].自然灾害学报,1998(1):80-84.  
JIAO J Y, WANG W Z, HAO X P. Rainfall, runoff-generating and sediment-generating features of extreme intense erosion in the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Disasters, 1998(1):80-84.
- [40] WEI Z L, SUN H Y, XU H D, et al. The effects of rainfall regimes and rainfall characteristics on peak discharge in a small debris flow-prone catchment [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(7):1646-1660.
- [41] RAN Q H, SU D Y, LI P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424:99-111.
- [42] 任国玉,任玉玉,战云健,等.中国大陆降水时空变异规律: II. 现代变化趋势 [J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 451-465.  
REN G Y, REN Y Y, ZHAN Y J, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over China's mainland: II Recent trends [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4):451-465.
- [43] 李志,郑粉莉,刘文兆.1961—2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J].自然资源学报,2010,25(2):291-299.  
LI Z, ZHENG F L, LIU W Z. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007 [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2):291-299.