

1957 - 2017 年泾河流域降雨量及降雨 侵蚀力时空变化分析

艾明乐¹, 赵强¹, 王奎峰², 张太平², 李新颖¹

(1. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022; 2. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013)

摘要: 泾河流域受土壤侵蚀的影响, 水土流失较为严重, 为对流域水土流失风险评估和防治等提供参考依据, 根据 1957 - 2017 年泾河流域 5 个气象站点的日降水资料, 运用 ArcGIS 空间插值、小波分析、R/S 分析等方法, 分析了该时段降雨量及降雨侵蚀力时空变化规律。结果表明: 泾河流域及各气象站点的降雨量与降雨侵蚀力均呈显著正相关关系; 泾河流域降雨量与降雨侵蚀力年内分布不均, 主要集中在夏季, 分别占全年的 67.80% 和 52.86%; 泾河流域年均降雨量和降雨侵蚀力分别为 496.83 mm 和 1 481.24 (MJ · mm)/(hm² · h), 年际总体呈波动上升趋势且未来降雨侵蚀力将延续增加趋势, 两者均在 1996 和 2009 年出现突变点且第一主周期分别为 27 和 17 a; 泾河流域降雨量和降雨侵蚀力在空间上均呈从西北到东南递增的趋势。

关键词: 降雨侵蚀力; 降雨量; 小波分析; R/S 分析; 时空变化; 泾河流域

中图分类号: TV211.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0093-08

Spatio-temporal variations of rainfall and rainfall erosivity in Jinghe River Basin from 1957 to 2017

AI Mingle¹, ZHAO Qiang¹, WANG Kuifeng², ZHANG Taiping², LI Xinying¹

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China)

Abstract: The Jinghe River Basin is seriously affected by soil erosion, resulting in severe water and soil loss in the area. In order to provide a reference for risk assessment and prevention of soil erosion, we analyzed the spatio-temporal variations of rainfall and rainfall erosivity in Jinghe River Basin from 1957 to 2017 using ArcGIS spatial interpolation, wavelet analysis and R/S analysis, based on the daily precipitation data of five stations in the basin. The results showed that there was a significant positive correlation between the rainfall and rainfall erosivity in each of the five stations in Jinghe River Basin. The annual distribution of rainfall and rainfall erosivity in the basin was uneven, mainly in summer, accounting for 67.80% and 52.86% of the whole year respectively; The average annual rainfall and rainfall erosivity of Jinghe River Basin were 496.83 mm and 1 481.24 (MJ · mm) / (hm² · h) respectively, both of which showed a fluctuated upward trend, with the prospect of continuous increase of the rainfall erosivity in the future. Both of the rainfall and rainfall erosivity experienced abrupt changes in 1996 and 2009, and their first main cycle was 27 a and 17 a respectively. Spatially, the rainfall and rainfall erosivity of the basin increased from northwest to southeast.

Key words: rainfall erosivity; rainfall; wavelet analysis; R/S analysis; spatio-temporal variation; Jinghe River Basin

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471160)

作者简介: 艾明乐(1998-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 赵强(1977-), 男, 山东泰安人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水文及水资源。

1 研究背景

降雨引发土壤侵蚀的潜力称为降雨侵蚀力,这是水土流失的原因之一^[1]。降雨侵蚀力作为通用土壤流失方程中的重要因子,能反映降雨特性对土壤侵蚀的影响,是土壤侵蚀规律分析和预测的基础^[2]。降雨侵蚀力大小取决于降雨特征,精确评测和计算降雨侵蚀力(R)值可以预示土壤流失状况,为水土流失的治理提供理论依据^[3]。

当前,国内外对降雨侵蚀力的研究已经取得了丰富的成果,基于次降水动能和强度的经典算法(EnI_{30})和基于常规气象观测调查数据的简单算法^[4]为降雨侵蚀力的主要计算方法,其中经典算法由 Wischmeier 等^[5]于 1978 年提出,对 R 进行了初步量化。但由于该种算法数据获取难度较大^[6]、计算方法复杂且耗时^[7-8],在实际应用时受到一定限制。王万忠等^[9]最先将经典算法引入国内并研究了适合中国的降雨侵蚀力计算方法。在经典算法的基础上,章文波等^[10]利用日雨量数据进行了计算,其修订的日雨量侵蚀力模型因数据获取容易且计算精度高,得到了广泛的应用^[10-12]。

泾河流域植被覆盖率低,河段比降大,由于降雨侵蚀力导致的水土流失问题严重,流域生态环境十分脆弱^[13-14]。本文根据国内外研究现状,结合泾河流域自然条件,基于文献^[10]的模型,运用小波分析、ArcGIS 空间插值等方法研究泾河流域降雨量和降雨侵蚀力的时空变化规律并分析其主要影响因素,以期更好地掌握降雨侵蚀变化规律,为水土流失防治和农业开发提供参考^[6,15]。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

泾河流域位于 $106^{\circ}14'E \sim 108^{\circ}42'E, 34^{\circ}46'N \sim 37^{\circ}19'N$,流经宁夏、甘肃和陕西省部分地区,河流全长 455 km,多年平均径流量为 $21.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,流域面积约为 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。黄土丘陵及高原沟壑区是泾河流域主要的土壤侵蚀类型,该流域属大陆季风性气候,位于半湿润半干旱地区,流域多年平均气温为 8°C ,年降雨量在 350 ~ 600 mm 之间,降雨集中在 6-8 月份,年际变化差异显著^[16]。泾河流域概况及气象、水文站点分布见图 1。

2.2 数据来源

1957-2017 年泾河流域 5 个气象站点(图 1)日降水量数据来自国家气象局数据中心^[17]([http://](http://data.cam.cn)

data.cam.cn)。由于不同站点观测数据的起始时间不同,站点迁移及其他一些原因会导致局部数据出现缺测,因此,在数据使用前对其进行质量控制:对于部分单日降雨数据的缺失,采用临近两个或两个以上的降雨数据取平均值进行补充,并剔除了超过 5% 降水数据缺失或连续超过 3 个月数据缺失的站点数据^[18],最终整理得到完整的降雨数据。为对整个流域进行分析,对最终选取的 5 个站点的数据运用泰森多边形计算各站点所占权重^[19]。

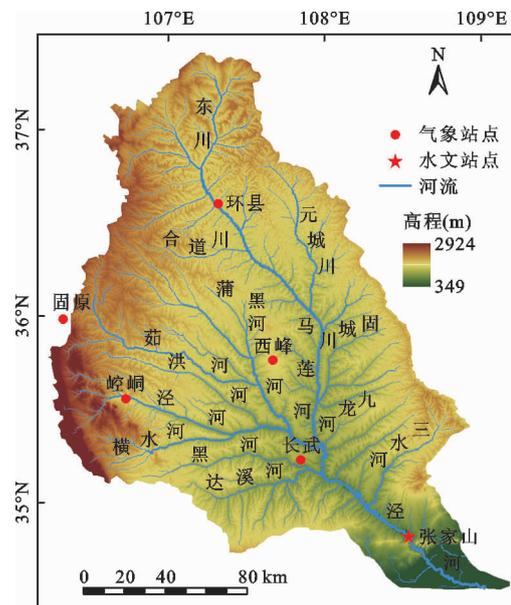


图 1 泾河流域概况及气象、水文站点分布

2.3 研究方法

2.3.1 降雨侵蚀力 文献^[10]模型运用于降雨充沛的区域时,其误差很小,因而更为实用^[10,20],而运用于降雨量少的区域时,模型误差较大^[1]。其具体计算公式如下:

$$R_j = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (1)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

式中: R_j 为半月降雨侵蚀力, $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; P_j 为日雨量,mm, ($P_0 \geq 12 \text{ mm}$); P_{d12} 为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日均雨量,mm; P_{y12} 为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年均雨量,mm; k 为半月时段内的天数,d; α 和 β 为模型参数。

参照中国第一次全国水利普查中的水土保持专项调查数据,将 1957-2017 年泾河流域的侵蚀性降雨量标准设定为 12.0 mm ^[1,21]。

2.3.2 小波分析法 小波分析可以通过缩放和平移实现时间和频域的局部变化,实现时间序列周期性变化的多尺度详细分析^[15,22],因此常用于水文气象序列的时频分析。交叉小波变化和小波相干谱可以用来研究两个时间序列多时间尺度的相关关系,但交叉小波存在一定的缺点,即仅能分析两个时间序列共同的高能量区,无法对低能量区进行分析,而相干小波能解决这一问题。

本文运用 Morlet 小波、交叉小波及相干小波分析了泾河流域不同时间尺度降雨量与降雨侵蚀力的周期性变化,具体方法和过程在文献[23 - 25]中有详细介绍。

2.3.3 R/S 分析法 R/S 分析法(rescaled range analysis)能够区分出一段序列是否为随机序列,可以预测该序列的未来变化趋势。其方法是算出一个序列的 Hurst 值,如果 Hurst 值 > 0.5,则具有与上一个阶段相同的趋势;如果 Hurst 值在 0 ~ 0.5 之间,则具有逆持续性,即与上一阶段的变化趋势相反。具体方法过程详见文献[26 - 27]。

3 结果与分析

3.1 流域降雨侵蚀力分析

根据 1957 - 2017 年泾河流域 5 个气象站点的逐日降雨量数据,采用泰森多边形法确定流域降雨量,运用文献[10]模型计算降雨侵蚀力。泾河全流域及 5 个气象站点的降雨侵蚀力与降雨量的关系如图 2 所示。图 2(a) 显示,在泾河全流域的降雨侵蚀力与降雨量呈显著正相关性 ($P < 0.01$),决定系数 $R^2 = 0.8102$ 。各气象站点两者的相关性与全流域一致,决定系数最大的为环县, $R^2 = 0.7913$ (图 2(c));最小的为崆峒, $R^2 = 0.6504$ (图 2(d))。由此可见,降雨量与降雨侵蚀力的变化基本一致,但并不完全相同,原因可能在于研究时仅考虑了侵蚀性降雨,在降雨量大的年份,若侵蚀性降雨少,则降雨侵蚀力也小^[28]。

3.2 流域降雨侵蚀力时间变化

3.2.1 年内变化 1957 - 2017 年泾河全流域及 5 个气象站点的月均降雨量和降雨侵蚀力如图 3 所示。

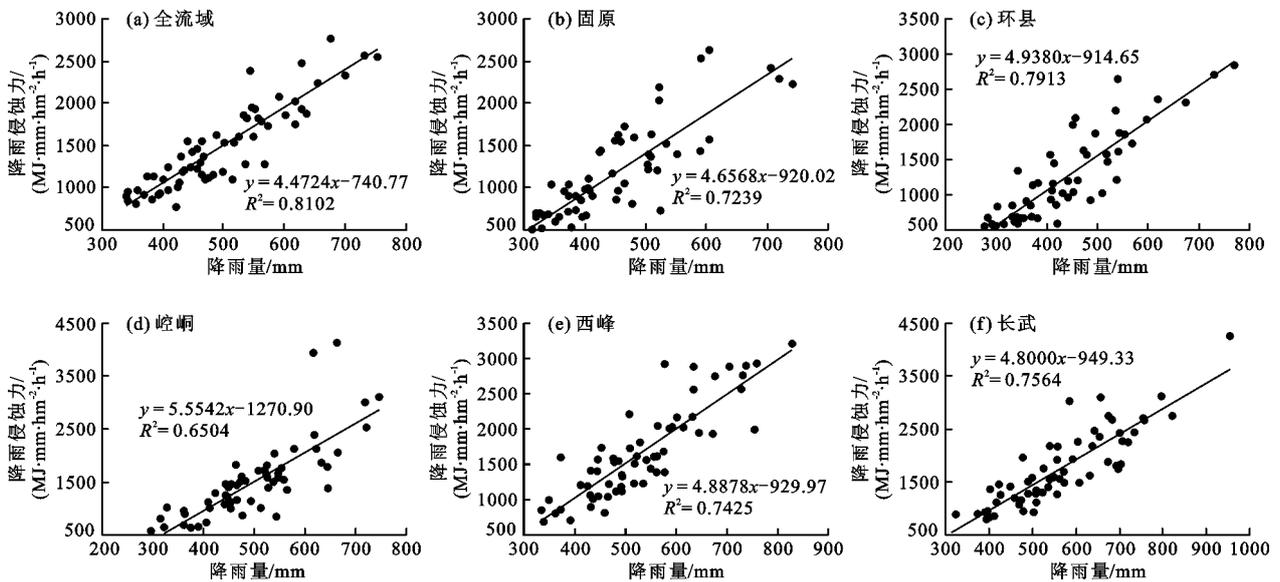


图 2 泾河全流域及 5 个气象站点的降雨侵蚀力与降雨量的关系

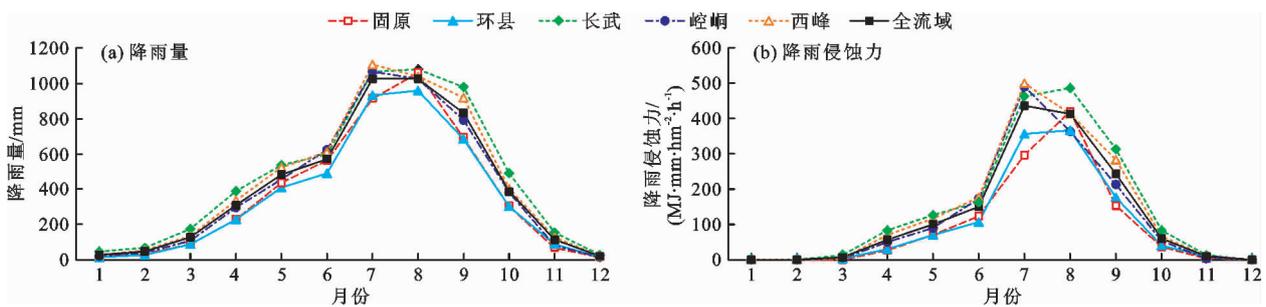


图 3 1957 - 2017 年泾河全流域及 5 个气象站点的月均降雨量和降雨侵蚀力

由图3(a)可知,泾河流域降雨量主要集中在夏季,7、8月出现两个峰值,分别为1 026.90和1 027.21 mm,分别占全年的20.67%和20.68%;由图3(b)可知,降雨侵蚀力也主要在夏季7、8月份出现峰值,分别为435.43和413.54 (MJ·mm)/(hm²·h),占全年的29.58%和28.09%。5个站点的年内降雨量与降雨侵蚀力的变化特征与全流域基本一致,固原和环县总体低于流域平均水平,而长武和西峰总体高于流域平均水平。

由图3可看出,1957-2017年泾河流域月均降雨量和降雨侵蚀力变化趋势基本一致。各站点中,环县和固原位于地势较高的西北地区,而西峰和长武位于地势较低的东南地区,说明两者的变化受到地形的影响,地势低的地区降雨量及相应的降雨侵蚀力较大。

3.2.2 年际变化 以1957-2017年泾河流域年降雨量和年降雨侵蚀力数据为基础,计算其算数平均

值,并对该数据进行5 a滑动平均处理,计算结果如图4所示。

由图4可看出,研究时段内泾河流域降雨量及降雨侵蚀力年际均呈波动上升趋势。降雨量趋势率为0.6725 mm/a,年降雨量集中在300~700 mm,均值为496.83 mm。最大值出现在1964年,为753.38 mm,最小值出现在1960年,为340.65 mm,平均振幅为206.37 mm(图4(a))。降雨侵蚀力趋势率为3.7992 (MJ·mm)/(hm²·h·a),年降雨侵蚀力集中在800~2 500 (MJ·mm)/(hm²·h),均值为1 481.24 (MJ·mm)/(hm²·h),最大值出现在2013年,为2 767.99 (MJ·mm)/(hm²·h),最小值出现在2009年,为769.73 (MJ·mm)/(hm²·h),平均振幅为999.13 (MJ·mm)/(hm²·h)(图4(b))。

通过对1957-2017年泾河流域各站点降雨量和降雨侵蚀力数据进行线性分析,得出各站点年际变化倾向率,如图5所示。

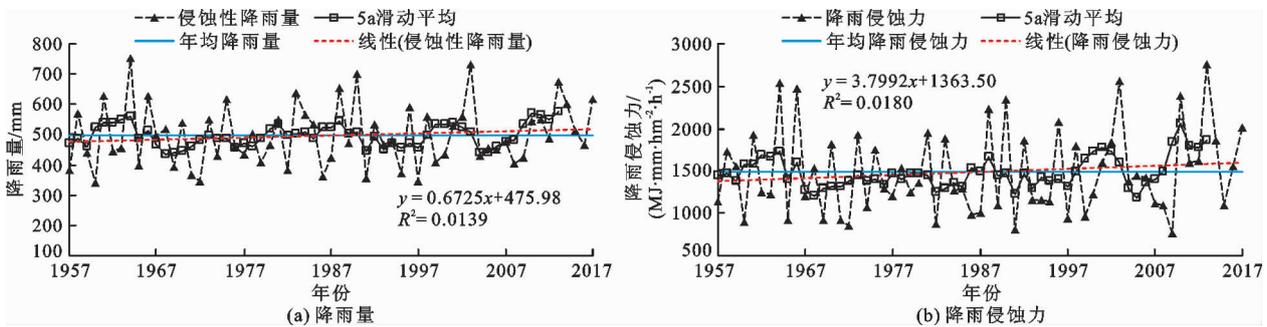


图4 1957-2017年泾河流域年降雨量和年降雨侵蚀力变化趋势

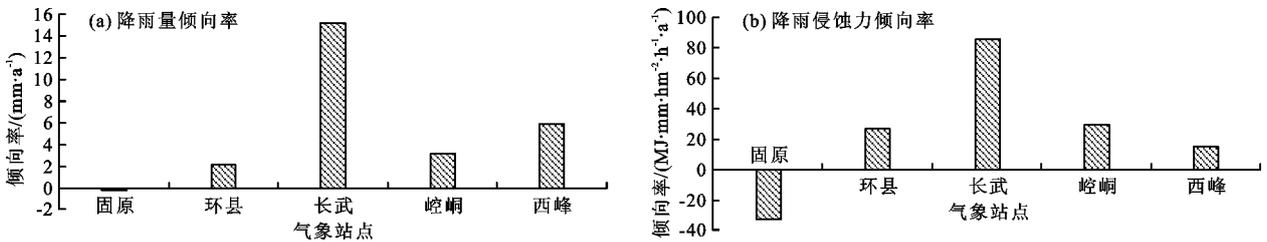


图5 1957-2017年泾河流域5个气象站点降雨量及降雨侵蚀力年际变化倾向率

由图5可知,除固原站外,其余4个气象站点的降雨量和降雨侵蚀力年际变化倾向率均为正值,其中长武站的增长率最大,其降雨量倾向率为15.18 mm/a(图5(a)),降雨侵蚀力倾向率为85.54 (MJ·mm)/(hm²·h·a)(图5(b))。

泾河流域5个站点中,降雨量和降雨侵蚀力增长率较大的长武站位于地势较低的东南地区,需加强监测;虽然固原站的降雨量和降雨侵蚀力增长率均呈减小趋势,但由于该地区长期以来受土壤侵蚀的影响,其多年平均降雨侵蚀力仍较大,达1 130.67

(MJ·mm)/(hm²·h)。

根据1957-2017年泾河流域降雨量和降雨侵蚀力数据计算出两者的年平均值,然后求出两者每年数据与其平均值的差值,并进行累加,分别得到两者的累积距平值,如图6所示。

由图6可知,研究时段内泾河流域年均降雨量和年均降雨侵蚀力累积距平变化趋势基本相同,均在1966和2009年出现突变。1957-1966年年均降雨量与年均降雨侵蚀力呈增大趋势,说明在此期间两者强度偏大;1968-2009年两者均呈波动减小趋

势,说明在此期间强度偏小;2009 - 2017 年两者再次增大,说明在此期间强度也偏大。

3.2.3 降雨侵蚀力周期分析 通过 Morlet 小波对 1957 - 2017 年泾河流域年降雨量及降雨侵蚀力进行小波分析,运用 MATLAB 软件对数据进行处理,采用 Surfer 进行小波图绘制,结果见图 7。

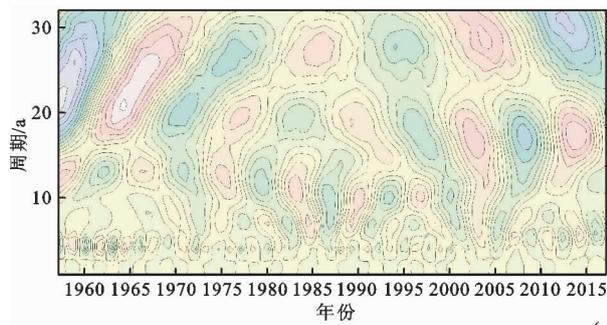
分析图 7 可知,泾河流域降雨量周期有两个峰值尺度,分别为 27、19 a,其中,27 a 为第一主周期(图 7(a));泾河流域降雨侵蚀力变化也有两个峰值尺度,分别为 3、17 a,其中 17 a 的周期峰值最大,为第一主周期,3 a 次之。

基于 1957 - 2017 年泾河流域年降雨量和降雨

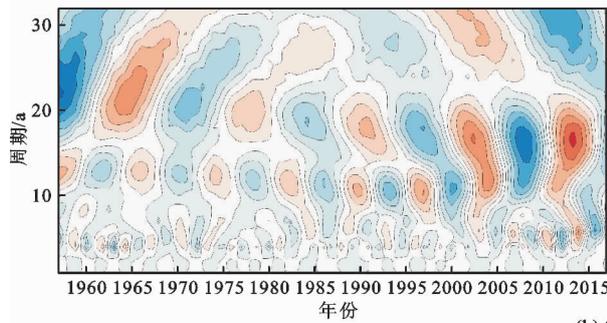
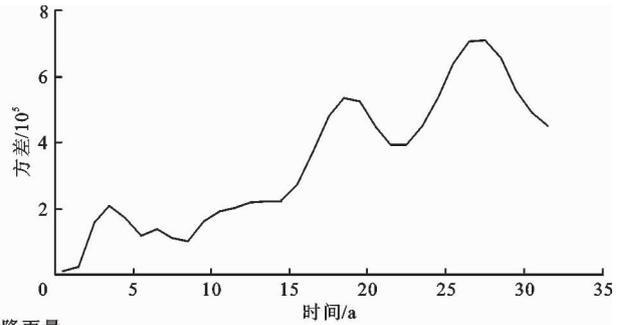
侵蚀力的数据,运用 MATLAB 软件绘制降雨侵蚀力与降雨量的交叉小波与相干小波图,如图 8 所示。



图 6 1957 - 2017 年泾河流域年均降雨量和年均降雨侵蚀力累积距平曲线



(a) 年降雨量



(b) 年降雨侵蚀力

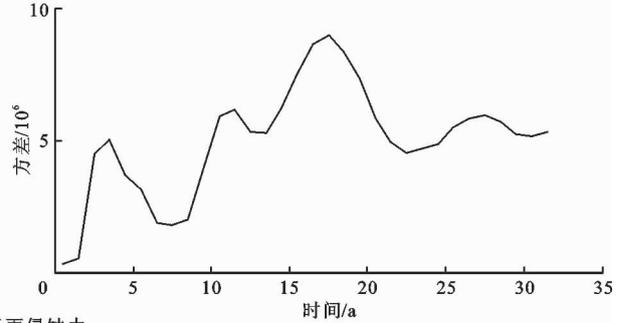
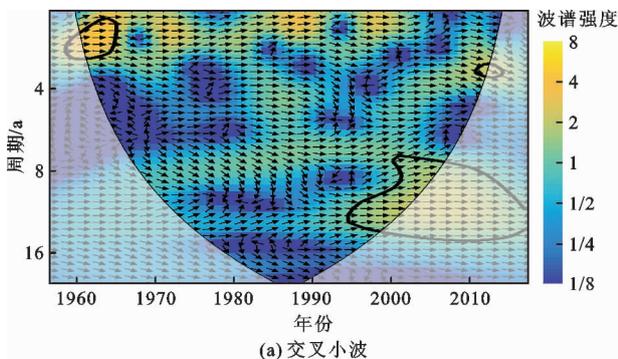
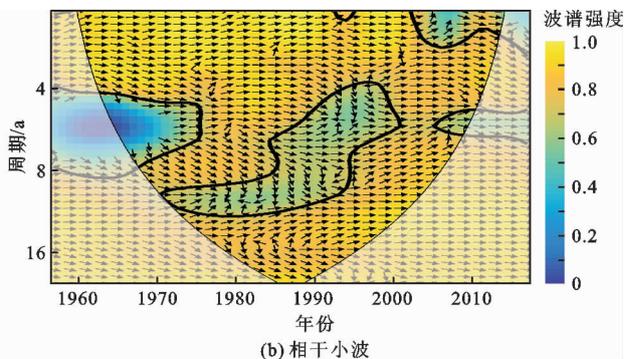


图 7 1957 - 2017 年泾河流域年降雨量及降雨侵蚀力小波分析等值线和方差图



(a) 交叉小波



(b) 相干小波

图 8 1957 - 2017 年泾河流域降雨侵蚀力与降雨量的交叉小波和相干小波

对泾河流域交叉小波(图 8(a))进行分析: 1961 - 1970 年有 1 ~ 2 a 的共振周期,由相位角可知,降雨量和降雨侵蚀力此时呈现显著正相关; 1992 - 2017 年有 1 个 8 ~ 12 a 的共振周期,由相位

角可知,两者在此时呈现显著正相关,且均通过了置信度为 95% 的检验。对泾河流域相干小波(图 8(b))进行分析:降雨量与降雨侵蚀力在相干小波低能量区 1965 - 1975 年和 1970 - 1998 年分别存在

4~7 a 和 4~10 a 的共振周期,由相位角可知,降雨量和降雨侵蚀力在该周期呈现显著正相关关系,且均通过了置信度为 95% 的检验。

3.2.4 降雨侵蚀力未来趋势分析 对 1957-2017 年泾河流域及各站点降雨侵蚀力及降雨量数据分别进行 R/S 分析,得到其 Hurst 指数(H),见表 1。

表 1 泾河流域及各气象站点降雨侵蚀力及降雨量 Hurst 指数

站点	降雨侵蚀力 H	降雨量 H
固原	0.635	0.572
环县	0.707	0.576
崆峒	0.550	0.496
西峰	0.480	0.429
长武	0.530	0.480
全流域	0.524	0.416

由表 1 可知,泾河流域未来年降雨侵蚀力的 Hurst 指数 H 值为 0.524($H > 0.5$);泾河流域未来降雨量的 Hurst 指数 H 值为 0.416($0 \leq H < 0.5$)。该结果说明泾河流域降雨侵蚀力未来将延续过去的变化趋势,而降雨量未来变化趋势与过去相反。从各站点来看,两者在固原和环县站均将延续过去变化趋势,而在西峰站的未来变化趋势均与过去相反;崆峒和长武站的降雨侵蚀力未来变化趋势与过去相同,而降雨量未来变化趋势与过去相反。

3.3 降雨量及降雨侵蚀力空间变化

基于 1957-2017 年泾河流域 5 个气象站的降

雨量及降雨侵蚀力数据,运用 ArcGIS 软件对其进行空间插值,如图 9 所示。

由图 9(a)可知,泾河流域北部环县区域年均降雨量整体偏小,南部长武区域整体偏大;西部固原、崆峒区域偏小,东部西峰区域偏大。南部地区年均降雨量范围为 531.8~581.4 mm,北部地区为 432.7~482.2 mm,西部地区为 449.2~498.8 mm,东部地区为 498.8~548.3 mm。该流域中长武的年均降雨量最大,最大值为 581.4 mm;环县的年均降雨量最小,最小值为 432.7 mm。

由图 9(b)可看出,泾河流域年均降雨侵蚀力空间分布特征与降雨量基本一致。流域南部地区的降雨侵蚀力为 1541~1745 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,北部地区的降雨侵蚀力范围为 1133~1337 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,西部地区的降雨侵蚀力范围为 1133~1473 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,东部地区的降雨侵蚀力范围为 1405~1609 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。降雨侵蚀力最大值在长武,为 1745 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,最小值出现在固原,为 1133 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。通过对降雨侵蚀力统计值 Z 进行反距离权重插值,得到流域的 Z 值空间变化趋势(图 9(c)),图 9(c)表明, Z 值的空间变化趋势差异较大,其中东南部分区域的变化趋向极为明显。

将 1957-2017 年泾河流域各站点日降雨量及降雨侵蚀力数据累加可得两者的多年平均值,如图 10 所示。

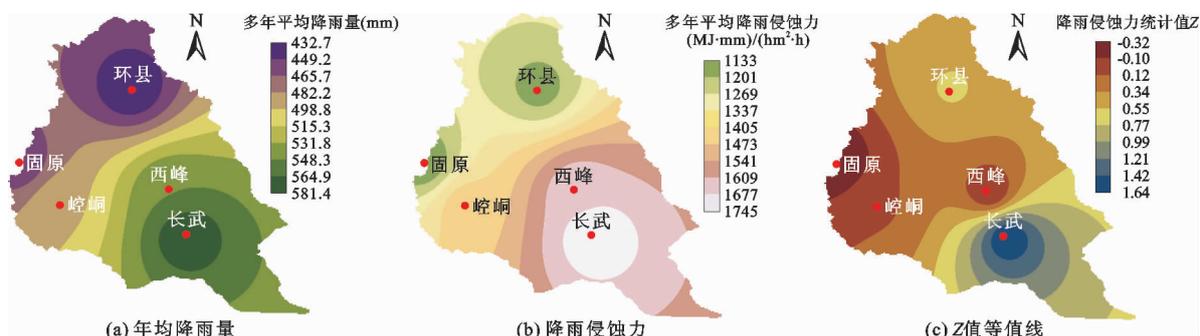


图 9 1957-2017 年泾河流域年均降雨量和年均降雨侵蚀力及其统计值 Z 空间分布

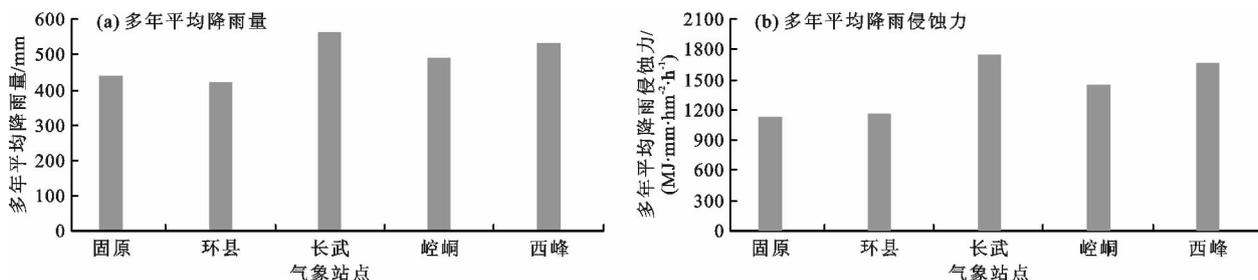


图 10 1957-2017 年泾河流域各气象站点多年平均降雨量及多年平均降雨侵蚀力

由图10可知,在研究时段内各站点多年平均降雨量及降雨侵蚀力的差异均较大。长武站多年平均降雨量最大,为561.50 mm,环县站最小,为421.99 mm,最大值为最小值的1.33倍(图10(a));长武站多年平均降雨侵蚀力也最大,为1745.88 (MJ·mm)/(hm²·h),最小值在固原站,为1130.67 (MJ·mm)/(hm²·h),最大值为最小值的1.54倍(图10(b))。

4 讨论

降雨是影响降雨侵蚀力的主要因素,泾河流域降雨量与降雨侵蚀力呈显著正相关,与孙从建等^[18]对黄土高原塬面保护区、臧珊珊等^[29]对哈尔滨市阿城区及伊力哈木·伊马木^[30]对新疆维吾尔自治区的降雨侵蚀力的相关研究结论一致。两者的对应关系表明,降雨侵蚀力的时空变化在一定程度上取决于降雨量,其分布也可根据降雨量来粗略分析,并定性地计算降雨侵蚀力,这为评价降雨侵蚀力提供了一种简便的方法。

泾河流域年均降雨侵蚀力为1481.24 (MJ·mm)/(hm²·h),低于赣江流域^[15],高于金沙江流域^[31],接近渭河流域^[32],主要原因在于各流域所处地理位置不同且位于不同季风带。泾河流域年内降雨量与降雨侵蚀力在7、8月份出现峰值,原因在于流域地处北温带,受大陆季风气候的影响,夏季侵蚀性降雨增多^[20]。泾河流域降雨量与降雨侵蚀力年际变化呈不明显的波动上升趋势,该研究结果与珠江流域^[33]、长江流域^[34]等相关研究结果一致。此外,降雨侵蚀力的增加速率大于降雨量,因为并非所有的降雨事件都具有侵蚀性^[10],侵蚀性降雨通常由强风暴所导致,尤其是在受气候影响显著的地区。

由于地势差异,降雨量受海拔影响而不同,全球气候变暖导致东亚季风北移也使空间分布出现差异^[35]。流域降雨量与降雨侵蚀力空间分布大体一致,与殷水清等^[36]的研究结果一致,进一步验证了降雨是影响降雨侵蚀力的主导因素^[9]。

5 结论

泾河流域的降雨量和降雨侵蚀力时空变化主要受季节及地理位置的影响,在时间和空间上呈现出不同的变化趋势,对其进行分析可得如下结论:

(1) 泾河流域及各站点降雨量与降雨侵蚀力均呈显著的正相关关系,相关性最高的为环县站($R^2 = 0.7913$),最小为崆峒站($R^2 = 0.6504$)。

(2) 泾河流域及各站点降雨量和降雨侵蚀力年

内分布不均,两者均集中在夏季。固原站和环县站总体高于流域平均水平,而西峰站和长武站总体低于流域平均水平。

(3) 1957-2017年泾河流域年均降雨量为496.83 mm,年均降雨侵蚀力为1481.24 (MJ·mm)/(hm²·h),两者在年际均呈增大趋势且降雨侵蚀力未来将延续以往的增大趋势,趋势率分别为0.6725 mm/a和3.7992 (MJ·mm)/(hm²·h·a);除固原外,各站点变化倾向率均呈现增大趋势,且两者分别以27和17a为第一主周期。

(4) 泾河流域多年平均降雨量与多年平均降雨侵蚀力空间分布规律大体一致,总体从西北到东南呈递增趋势。两者的最大值均在长武站,最小值分别在环县站和固原站。

参考文献:

- [1] 李维杰. 太行山脉不同量级降雨侵蚀力时空变化特征[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [2] 颜世敏, 马阔. 土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 江西农业, 2019(6): 67.
- [3] 杨轩. 降雨侵蚀力计算方法研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(16): 5-8.
- [4] 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.
- [5] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses—Guide to conservation planning[J]. Agriculture Handbook, 1978, 537: 285-291.
- [6] 何绍浪, 李凤英, 何小武. 水蚀预报中降雨侵蚀力研究进展[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 262-270.
- [7] ANGULO - MARTINEZ M, BEGUERIA SBEGUERIA S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain)[J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(1-2): 111-121.
- [8] 张真真, 单延功, 郭红丽, 等. 降雨特征对低山丘陵区典型小流域水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 32-38.
- [9] 王万忠, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(II)[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 29-39.
- [10] 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, 22(6): 705-711.
- [11] RICHARDSON C W, FOSTER G R, WRIGHT D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 0153-0156.
- [12] 何绍浪, 何小武, 李凤英, 等. 近60年来江西省各等级侵蚀性降雨与降雨侵蚀力的关系[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 8-14.

- [13] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近 50 年泾河流域降雨 - 径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165 - 171.
- [14] 吴小宏, 刘招, 李强, 等. 泾河长系列水沙变化规律与归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 144 - 149.
- [15] 温天福, 张范平, 胡建民, 等. 1958 - 2014 年赣江流域降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 7 - 14 + 20.
- [16] 马川惠, 黄强, 郭爱军. 泾河流域水沙联合分布特征分析及其不确定性评估[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 273 - 282.
- [17] 何奇芳, 曾小凡, 赵娜, 等. ERA - interim 再分析数据集在长江上游的适用性[J]. 人民长江, 2018, 49(12): 30 - 33.
- [18] 孙从建, 王佳瑞, 郑振婧, 等. 黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 568 - 576.
- [19] 颜旭. 成都地区地表径流及降水量估算[D]. 成都: 四川师范大学, 2015.
- [20] 郑哲, 邹进, 潘锋, 等. 1961 - 2010 年怒江流域降雨侵蚀力的时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 16 - 22.
- [21] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2 - 3 + 11.
- [22] 周嘉琦, 陈世发. 1951 - 2018 年华南前汛期暴雨特征分析——以韶关市为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 163 - 169 + 176.
- [23] YAO Tian, ZHAO Qiang, LI Xinying, et al. Spatiotemporal variations of multi-scale drought in Shandong Province from 1961 to 2017[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2020, 21(24): 332.
- [24] 徐泽华, 韩美, 路广, 等. 山东省降雨侵蚀力与气候指数关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 880 - 889.
- [25] 洪梅, 刘科峰, 张栋, 等. 基于交叉小波分析方法的西太平洋副热带高压年际变率与热带海温及大气环流异常的相关性研究[J]. 热带气象学报, 2020, 36(2): 166 - 179.
- [26] 覃珊, 岳春芳, 何兵, 等. 金沟河流域水文气象要素关系变异诊断[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 50 - 56.
- [27] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 811 - 820.
- [28] 戴金梅, 查轩, 黄少燕, 等. 1980 - 2013 年闽西地区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 1 - 7.
- [29] 臧珊珊, 李治军, 姜安宇. 哈尔滨市阿城区 1953 - 2018 年汛期降雨量及降雨侵蚀力变化分析[J]. 中国水土保持, 2020(8): 40 - 41.
- [30] 伊力哈木·伊马木. 新疆维吾尔自治区 1981 - 2018 年降雨侵蚀力的空间变化特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 1 - 9.
- [31] 彭玉芝, 范建容, 于江, 等. 金沙江流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 8 - 13.
- [32] 刘宇林, 赵广举, 穆兴民, 等. 近 55 年渭河流域降雨侵蚀力变化及对输沙量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 15 - 22.
- [33] 赖成光, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 珠江流域 1960 - 2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159 - 167.
- [34] 范建容, 严冬, 郭祥. GIS 支持下的长江上游降雨侵蚀力时空分布特征分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 92 - 96.
- [35] 陈操操, 谢高地, 甄霖. 泾河流域降雨量变化特征分析[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 172 - 177.
- [36] 殷水清, 谢云. 黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 29 - 33.