

文章编号: 1008-2786-(2018)3-391-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000335

# 济南市 1970—2016 年降雨侵蚀力时空变化

徐 晶<sup>1</sup>, 徐征和<sup>2</sup>, 李 伟<sup>3</sup>, 王秀茹<sup>1\*</sup>, 王 希<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 济南大学 资源与环境学院, 济南 250022;

3. 济南市锦绣川水库管理处, 济南 250022)

**摘 要:** 降雨侵蚀力是反映降雨引起土壤侵蚀能力大小的关键指标, 对水土流失的监测、预报及治理具有重要的意义。本研究利用济南市 48 个雨量站 1970—2016 年日降雨数据, 采用 Mann-Kendall 非参数趋势检验和突变检验、小波周期分析(Wavelet Analysis)、泰森多边形及 ArcGIS 逆距离加权插值(IDW, Inverse Distance Weighted)等方法分析了济南市降雨侵蚀力的时空变化特征。结果表明: (1) 济南市多年平均降雨侵蚀力是  $3774.91 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 年际变化整体呈现不显著的增长趋势, 存在着 3~6 年、7~11 年和 19~25 年 3 类不同尺度的周期变化规律, 在 1980 年和 1990 年附近发生突变; (2) 降雨侵蚀力年内分布不均, 多集中在 6—9 月, 春季和夏季表现为微弱的上升趋势, 秋季和冬季表现为下降趋势; (3) 降雨侵蚀力与降雨量的空间分布规律相似, 中部和南部地区明显高于北部和西南地区, 东西部差异不明显, 且大部分区域的年降雨侵蚀力表现为不显著增长的趋势; (4) 各雨量站的变异系数( $C_v$ )范围是 0.28~0.49, 且多数雨量站 1990—2016 年平均降雨侵蚀力比 1970—1989 年增加 10% 以上; (5) 不同地形区的降雨侵蚀力与降雨量都存在较好的相关关系, 而与海拔的相关关系不显著。

**关键词:** 降雨侵蚀力; 时空分布特征; 降雨; 土壤侵蚀; 济南市

**中图分类号:** S157.1

**文献标志码:** A

土壤侵蚀问题已成为一个典型的全球性环境问题<sup>[1]</sup>。我国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一, 截止到 2014 年, 土壤侵蚀总面积达到了  $294.91 \text{ km}^2$ , 占国土总面积的 30.72%<sup>[2]</sup>。以“泉城”著称的济南市, 近年来受气候、自然及人类活动等因素的影响, 土壤侵蚀问题越来越突出, 因此研究济南市土壤侵蚀状况对保护生态环境、保泉护泉等工作均具有重要的现实意义。

影响土壤侵蚀的因素有很多, 如气候、地质地形、植被及人类活动等。降雨是影响土壤侵蚀最主要的因素之一, 其侵蚀能力的大小用降雨侵蚀力来表示<sup>[3-5]</sup>。计算降雨侵蚀力的方法有很多, 从最初

利用降雨动能、降雨量分别与降雨强度的乘积来计算降雨侵蚀力<sup>[6-7]</sup>, 到后来利用大尺度降雨数据估算降雨侵蚀力的简易模型, 其计算方法日趋完善<sup>[8-9]</sup>。相对于年或月降雨量构建的简易模型, 利用日降雨数据估算降雨侵蚀力的方法由于其精度更高, 数据较易获取等优势, 得到了国内外的广泛应用<sup>[10-11]</sup>。

降雨侵蚀力和降雨量一样, 均具有明显的时空变化特征, 但不同区域由于其气候、地理等因素的不同, 降雨侵蚀力的变化特征也不同, 因此需要充分结合当地的实际情况来分析降雨侵蚀力。有关我国水土流失最为严重的黄土高原及西南等地降雨侵蚀力

**收稿日期**(Received date): 2018-01-04; **改回日期**(Accepted date): 2018-05-14

**基金项目**(Foundation item): 水利部公益性行业科研专项(201401001); 济南市社会民生重大专项(SHMS2015-301); 济南大学科研基金(XKY1524)。[Ministry of Water Resources Public Welfare Industry Research Special Project(201401001); Major Livelihood Projects of Jinan(SHMS2015-301); Research Fund of University of Jinan(XKY1524)]

**作者简介**(Biography): 徐晶(1990-), 女, 山东烟台人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀和水资源配置。[XU Jing(1990-), female, born in Yantai, Shandong province, Ph.D. candidate, research on soil erosion and water resource allocation] E-mail: xj\_jndx@163.com

**\* 通讯作者**(Corresponding author): 王秀茹(1957-), 女, 河北保定人, 博士, 教授, 主要从事水土保持及农田水利研究。[WANG Xiuru(1957-), female, born in Baoding Hebei province, Ph.D., professor, research on water and soil conservation and irrigation and water conservancy] E-mail: wang-xr@163.com

变化特征的研究有很多<sup>[12-14]</sup>,但关于济南市降雨侵蚀力的研究则相对较少,仅有章文波等<sup>[9]</sup>在研究全国降雨侵蚀力空间变化特征时,以济南测站为例,分析了1970—1998年降雨侵蚀力的年际变化趋势。但该研究时间序列较短且数据较老,不能反映近年来济南市的土壤侵蚀状况,同时也没有考虑地形及空间位置对降雨侵蚀力的影响,仅用一个测站的降雨数据来计算整个区域的降雨侵蚀力,这在分析济南市降雨侵蚀力的时空变化特征及土壤侵蚀状况上是远远不够的。

因此,为了填补针对整个济南市降雨侵蚀力变化研究的空白,更加精确、全面地分析济南市降雨侵蚀力的时空变化特征,本文基于日雨量的降雨侵蚀力模型及济南市48个雨量站的日降雨资料,利用Mann-Kendal非参数趋势检验和突变检验、小波周期分析及ArcGIS空间分析等方法,分析了济南市1970—2016年间降雨侵蚀力的时间和空间变化,并对不同地形区(北部平原区和南部丘陵山地区)降雨量、降雨侵蚀力等的差异进行了研究,以期对济南市水土流失的防治、泉水及生态环境的保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

济南市(36°02′~37°33′N,116°13′~117°45′E)地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带,地势南高北低,气候类型属于典型的暖温带半湿润季风型气候,年平均气温为14℃,多年平均降雨量约为650~700mm。由于研究区内山地多,坡度大,降水季节分配不均匀,导致区内土壤侵蚀比较强烈,尤其是水力侵蚀问题更为突出。济南市总的土壤侵蚀面积达到1616.70 km<sup>2</sup>,占全市总面积的20.20%,中度及以上侵蚀面积占总侵蚀面积的59.90%。因此济南市面临着严峻的水土流失防治任务。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据获取

本文采用济南市48个雨量站(图1)1970—2016年的日降雨数据,数据均来自济南市水文局下辖的水文网站。由于每个雨量站开始记录降雨数据的时间不同,会有个别数据的缺失,但单个雨量站缺失的数据均未超过10%。对于某个站点缺失的数

据,则是利用周边2个及以上站点降雨量的平均值进行插补,从而获得较为完整的降雨序列数据<sup>[15]</sup>。

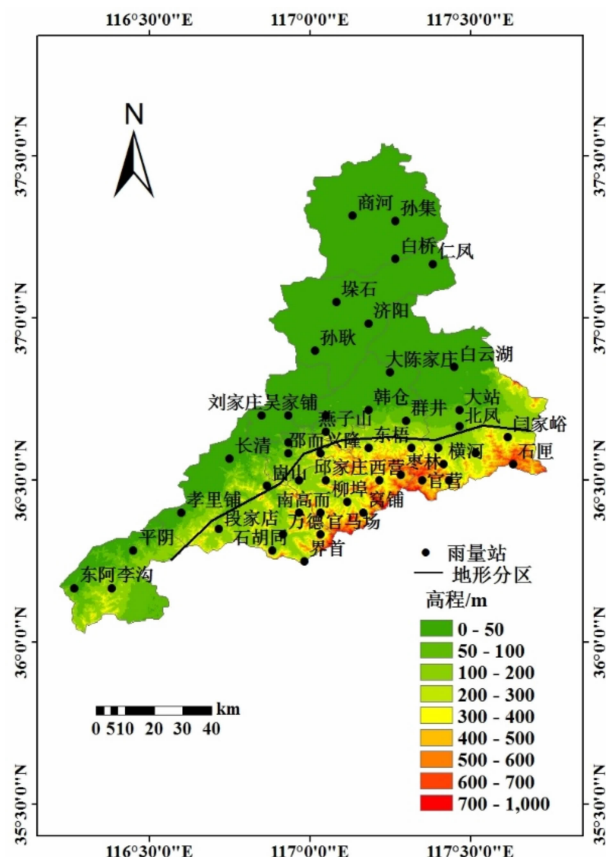


图1 济南市地形分区及雨量站分布图

Fig. 1 Topographic zoning and distribution of rainfall stations in Jinan City, China

### 2.2 研究方法

#### (1) 降雨侵蚀力的计算

本研究选用章文波等<sup>[9,16]</sup>提出的简易模型进行降雨侵蚀力的计算,该算法在国内已被广泛认可和使用<sup>[17-20]</sup>。具体计算公式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\gamma \quad (1)$$

$$\alpha = 21.586\gamma^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\gamma = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

式中: $R_i$ 为半月(第*i*个)降雨侵蚀力, MJ · mm · hm<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> · a<sup>-1</sup>;  $P_j$ 是半月内第*j*天的日降雨量(≥12 mm);  $k$ 为该半月内降雨的天数;  $P_{d12}$ 和  $P_{y12}$ 为日平均雨量和年均雨量(日降雨量≥12 mm),  $\alpha$ 和  $\gamma$ 是模型参数,反映区域降雨特征。

年降雨侵蚀力通过累加上式(1)~(3)计算的半月降雨侵蚀力而得。

## (2) 时间变化分析方法

本文采用 Mann-Kendall 法分析降雨侵蚀力时间序列的变化趋势。它是基于两个统计变量  $S$  和  $Z$ , 来确定一个序列  $(x_1, \dots, x_n)$  变化趋势是否显著。 $S$  的计算如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

其中, 当  $x_j - x_k > 0$  时,  $\text{sgn}(x_j - x_k) = 1$ ; 当  $x_j - x_k = 0$  时,  $\text{sgn}(x_j - x_k) = 0$ ; 当  $x_j - x_k < 0$  时,  $\text{sgn}(x_j - x_k) = -1$ 。

$S$  为正态分布, 其均值为 0, 方差  $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ , 当  $n > 10$  时,  $Z$  的计算如下: 当  $S > 0$  时,  $Z = (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}$ ;  $S = 0$  时,  $Z = 0$ ;  $S < 0$  时,  $Z = (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}$ 。

在双边检验中, 给定  $\alpha$  置信水平, 若  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ , 则原假设不可接受, 即在  $\alpha$  置信水平上, 序列存在明显变化趋势 (上升或下降), 本文选择  $\alpha$  置信水平为 0.05, 因此  $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。当  $Z$  为正值时, 是上升趋势;  $Z$  为负值时, 是下降趋势<sup>[21]</sup>。

Mann-Kendall 检验法同样可以用来检验序列的突变点, 当  $UF_k$  (正序列统计量) 和  $UB_k$  (逆序列统计量) 相交时, 且交点在临界线内, 那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。同时当  $UF_k > 0$  时, 序列为上升趋势; 当  $UF_k < 0$  时, 序列为下降趋势, 若  $UF_k$  超过临界值, 则说明变化趋势明显<sup>[22]</sup>。

采用小波分析方法<sup>[23]</sup> 分析降雨侵蚀力的周期性变化规律。

## (3) 空间变化分析方法

空间变化特征的分析方法则选用逆距离加权插值法和泰森多边形法<sup>[24]</sup>, 利用 ArcGIS 10.2 对济南市 48 个雨量站的多年平均降雨量和降雨侵蚀力进行空间内插, 得到济南市多年平均降雨量和降雨侵蚀力空间分布图, 并对降雨侵蚀力 Mann-Kendall 法的统计量  $Z$  值和变异系数进行空间插值, 分析其空间变化特征。

## (4) 季节和区域的划分

根据济南市气候及地理特点等因素, 将季节划分为: 春季 (3—5 月)、夏季 (6—8 月)、秋季 (9—11 月) 和冬季 (12—翌年 2 月)。由于济南市的地势南高北低, 南北差异较大, 因此本文将研究区划分为北部平原区和南部丘陵山地区 (图 1, 基本以 200 m 海拔为划分界线) 两个区域, 从而对不同地形区内的降雨量、降雨侵蚀力等的差异进行研究。

# 3 结果与分析

## 3.1 降雨侵蚀力时间变化分析

### 3.1.1 年际变化

济南市 1970—2016 年平均年降雨侵蚀力是  $3774.91 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 变异系数为 0.28, 属于轻度变异, 且最大值 ( $5686.56 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 是最小值 ( $1748.16 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 的 3.3 倍。由图 2b 降雨侵蚀力的年际变化图可知, 济南市 1970—2016 年的年降雨侵蚀力表现为波动变化趋势, 5a 滑动平均值呈现出微弱的上升趋势。济南市 47a 年降雨侵蚀力变化趋势总体表现为: 1990 年以前呈现出下降的趋势, 之后波动上升至 1998 年, 随后再次下降, 到 2003 年再次上升, 2009 年以后呈现波动下降的趋势。小波周期分析的结果如图 3 所示, 年降雨侵蚀力在变化过程中存在着 3~6 年、7~11 年和 19~25 年 3 类尺度的周期变化规律, 除了 3~6 年尺度上的周期变化在 1985 年以后表现得较为稳定, 其余两个尺度上的周期变化在 1970—2016 年均稳定分布, 有全域性。

济南市的年降雨侵蚀力与年降雨量的变化趋势基本相同, 如图 2 所示。在 1970—2016 年之间的 47 年间, 年降雨侵蚀力与年降雨量的最大值 ( $919.68 \text{ mm}$ )、最小值 ( $389.50 \text{ mm}$ ) 出现的年份一样, 均在 1990 年和 2002 年。年降雨侵蚀力的变异系数比年降雨量的变异系数大, 分别是 0.28 和 0.19, 说明相对于降雨量的变化, 降雨侵蚀力的年际变化更加剧烈。年降雨侵蚀力和年降雨量 Mann-Kendall 检验的  $Z$  值分别为 0.44 和 0.68, 小于 1.96, 均为不显著性增加。

济南市降雨侵蚀力的突变分析结果如图 4 所示, 1970—1982 年,  $UF$  基本大于 0, 1983—1995 年,  $UF$  小于 0, 之后  $UF$  基本处于大于 0 的状态, 因此, 降雨侵蚀力经历了增大—减小—增大的变化过程。 $UF$  和  $UB$  两条曲线在 1980 年和 1990 年相交, 且都在置信区间  $\pm 1.96$  ( $\alpha = 0.05$ ) 内, 因此突变点出现在 1980 年和 1990 年附近, 1980 年是降雨侵蚀力由偏多时期向偏少时期变化的年份, 1990 年则是由降雨侵蚀力偏少时期向偏多时期变化的年份。

### 3.1.2 年内及季节变化

#### (1) 年内分布特征

济南市降雨侵蚀力与降雨量的年内分布规律基本一致 (图 5), 多集中在 6—9 月份, 此阶段为济南

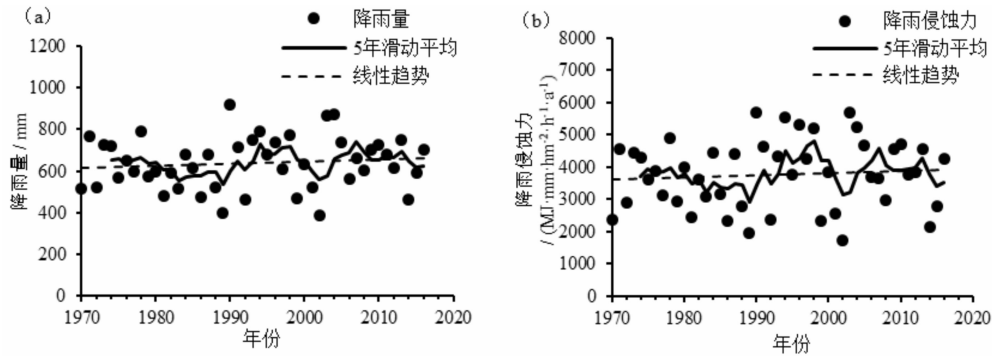


图2 济南市年降雨量和降雨侵蚀力的变化趋势图

Fig.2 Trend chart of annual rainfall and rainfall erosivity in Jinan City, China

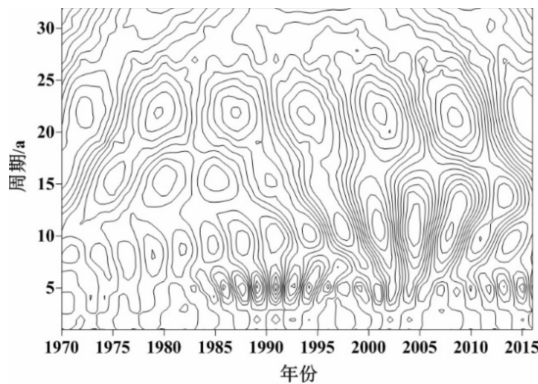


图3 基于小波分析的年降雨侵蚀力周期变化图

Fig.3 Interannual variability chart of annual rainfall erosivity based on Wavelet analysis

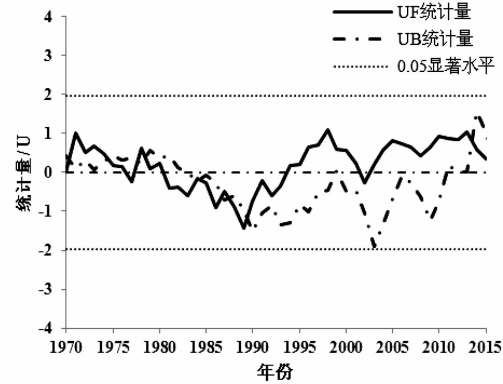


图4 年降雨侵蚀力 M-K 突变分析图

Fig.4 Abrupt changes chart of rainfall erosivity based on M-K

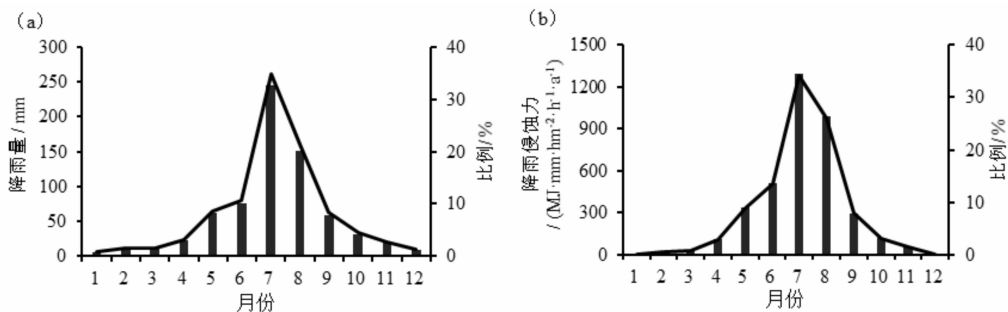


图5 济南市月降雨量和降雨侵蚀力分布图

Fig.5 Distribution of monthly rainfall and rainfall erosivity in Jinan City, China

市的汛期。汛期降雨侵蚀力和降雨量分别占全年降雨侵蚀力和降雨量的81.85%和75.46%，月降雨侵蚀力和降雨量的最大月份都是7月，分别是1291.78 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>和245.72 mm，占全年的34.25%和34.94%；但月降雨侵蚀力最小(2.82 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>)的月份是12月，月降雨量最小(6.34 mm)的月份是1月，占全年的0.12%和0.90%。

## (2) 季节变化特征

济南市降雨侵蚀力的季节变化特征如图6所

示。四个季节的降雨侵蚀力均表现为不显著的变化趋势，春季和夏季为增加趋势，秋季和冬季为降低趋势。春季降雨侵蚀力的变化趋势比较稳定，波动范围较小，平均降雨侵蚀力是484.14 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>，占全年降雨侵蚀力的12.83%；夏季平均降雨侵蚀力是2793.34 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>，占全年降雨侵蚀力的74.00%；秋季和春季的平均降雨侵蚀力大小基本一样，为476.54 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>；冬季降雨侵蚀力最小，仅占全年的0.64%，主要是因为冬季多以降雪为主，降雨量很

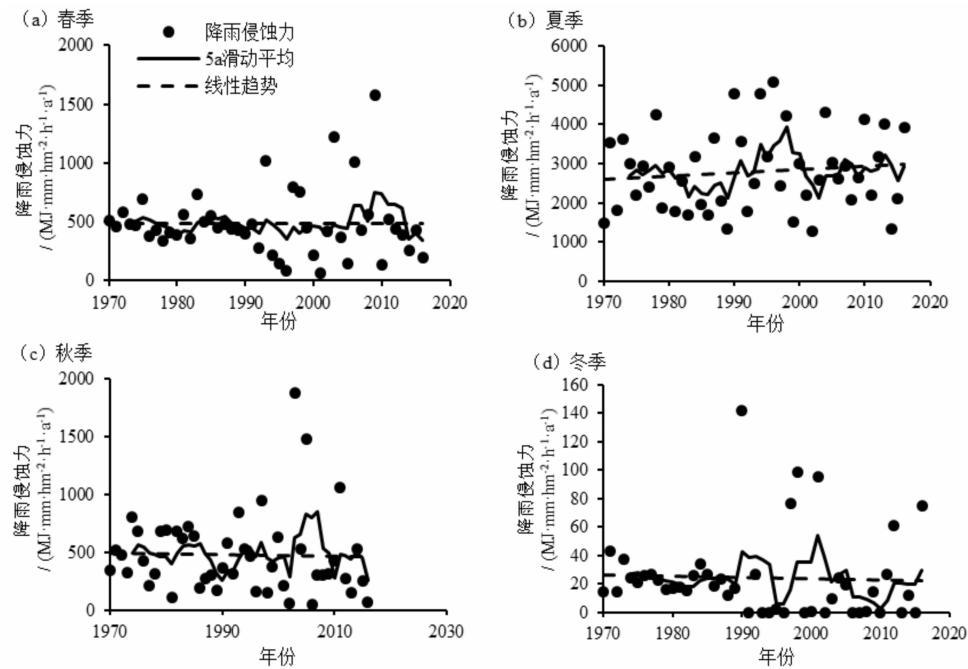


图 6 济南市四季降雨侵蚀力时间变化图

Fig. 6 Seasonal change of rainfall erosivity in Jinan City, China

小,因此能造成土壤侵蚀的降雨量就更小了。

### 3.2 降雨侵蚀力空间变化特征

#### 3.2.1 降雨量和降雨侵蚀力的空间特征分析

由于降雨侵蚀力与降雨量的关系密切,因此先对降雨量的空间分布特征进行了分析,如图 7a 所示。济南市的多年平均降雨量为 638.07 mm,南部

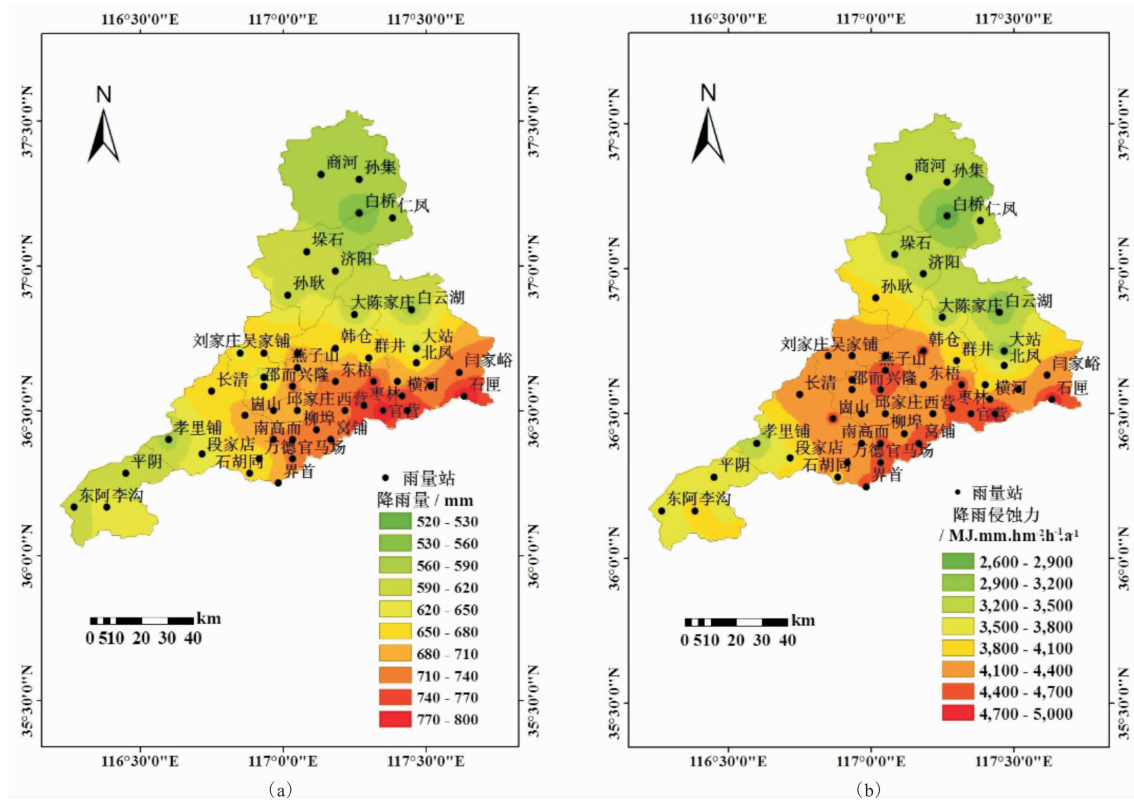


图 7 济南市降雨量 (a) 和降雨侵蚀力 (b) 空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of annual rainfall (a) and rainfall erosivity (b) in Jinan City, China



地区明显高于北部地区,中部地区高于西南和北部地区,东、西部差异不明显。年降雨侵蚀力的空间分布规律[图 7b]与年降雨量的分布规律相似,东南部地区的降雨侵蚀力基本在  $4000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  以上,而西北部地区则小于  $3000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于济南市的南部地区多为丘陵山区,加之降雨比较丰富,因此降雨侵蚀力明显比北部平原地区大,无论从降雨侵蚀力分布还是实际情况来看,南部山区的水土流失压力明显大于北部地区。

### 3.2.2 分时段降雨量和降雨侵蚀力空间变化分析

根据降雨量和降雨侵蚀力的年际变化情况,1970—1989 年呈现降低的趋势,且在 1989 年达到最低,随后基本保持着波动上升的趋势,整体上 1990—2016 年的降雨量和降雨侵蚀力比 1970—1989 年高,因此本文将研究时段分为 1970—1989 年及 1990—2016 年两个时段,分别对两个时段的降雨量和年降雨侵蚀力进行了分析比较,得出两个时间段的变化率,如图 8 所示。由结果可知,济南市 48 个雨量站,除东红庙雨量站外,其他雨量站 1990—2016 年的平均降雨量均比 1970—1989 年有所增加,增加幅度在 1%~27% 之间,增加幅度最大

的是柳埠雨量站。而降雨侵蚀力除白云湖、韩仓和阎家峪外,其他雨量站也同样是增加的,增加幅度在 2%~50% 之间,多数雨量站的增幅在 10% 以上,增加幅度最大的是刘家庄雨量站。个别雨量站的降雨量和降雨侵蚀力的变化趋势之所以不同,原因之一是雨量虽然增加,但能引起水土流失的降雨量并未增加,相反有所减少,因此降雨侵蚀力也减小了。

### 3.2.3 年降雨侵蚀力空间变化分析

济南市降雨侵蚀力变异系数  $C_v$  和 Mann-Kendall 统计量  $Z$  值的空间分布如图 9 所示,变异系数呈现出明显的地区差异,中部和南部丘陵山区的变异系数明显小于北部和西南部地区,主要是因为中部和南部地区的降雨量较大,且相对稳定,年际变化不大,因此变异系数较小,基本小于 0.40。降雨侵蚀力的统计量  $Z$  的空间分布规律不是很明显,除个别雨量站外,大部分地区的降雨侵蚀力呈现增长的趋势,但无论是增长还是降低的趋势,均未通过显著性检验,统计量  $|Z| < 1.96$ ,变化趋势不显著。

### 3.3 不同地形区降雨侵蚀力分析

根据济南市的地形特点,将济南市划分为北部平原区和南部丘陵山区(以 200 m 海拔为界线),从而研究不同地形区的降雨量、降雨侵蚀力,以及降

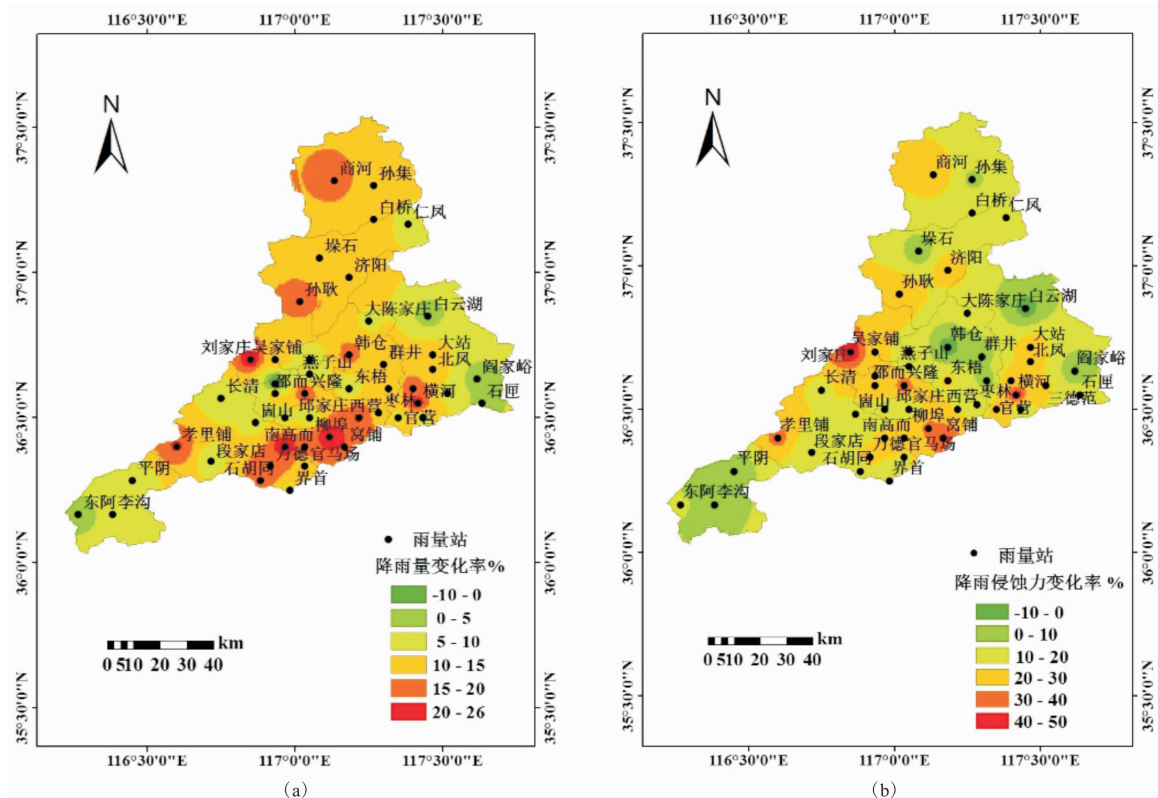


图 8 济南市两个时段降雨量(a)和降雨侵蚀力变化率(b)分布图

Fig. 8 Spatial distribution of change rates of annual rainfall (a) and rainfall erosivity (b) during the two periods in Jinan City, China

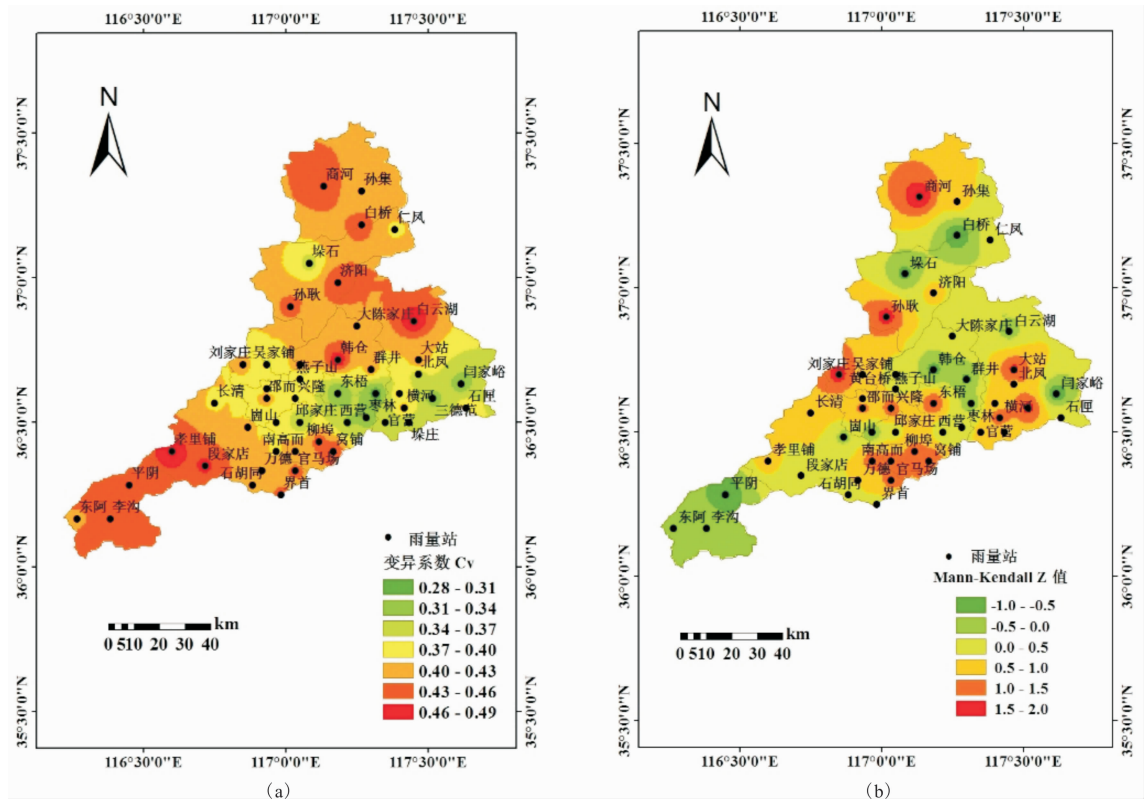


图 9 济南市降雨侵蚀力变异系数(a)和 Z 值(b)的空间分布图

Fig.9 Spatial distribution of variation coefficients of rainfall erosivity and (a) Mann-Kendall Z values (b) in Jinan City, China

表 1 济南市不同地形区降雨侵蚀力差异分析

Tab.1 Differences of rainfall erosivity under two terrain areas in Jinan City, China

地形区	年均 降雨量 /mm	年均降雨侵蚀力 /( MJ · mm · hm <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> )	年均降雨侵蚀力 Mann-Kendall Z 值	年均降雨侵蚀 力变异系数	年均降雨侵蚀力与不同因素的相关系数	
					降雨量	海拔
南部丘陵山地区	714.20	4 286.33	0.50	0.38	0.91	0.40
北部平原区	609.24	3 579.49	0.33	0.42	0.89	0.15
济南市	638.07	3 774.91	0.44	0.28	0.90	0.44

雨侵蚀力与不同影响因素的相关关系,结果如表 1 所示。

由结果可知,济南市南部丘陵山地区的年均降雨侵蚀力大于北部平原区,与年均降雨量的分布特征一致。南部丘陵山地区的年均降雨侵蚀力的增长趋势较北部平原区以及整个研究区明显, Mann-Kendall 趋势检验的 Z 值分别是 0.50、0.33 和 0.44。而变异系数则是北部平原区大于南部丘陵山地区,说明北部平原区各年降雨侵蚀力的离散程度及差异较大。降雨侵蚀力与降雨量是正相关关系,且相关系数均达到 0.89 以上,相关性很好;海拔与降雨侵蚀力的相关性不大,尤其在北部平原地区,相关系数很小。

济南市南部丘陵山地区降雨侵蚀力较大,且增长趋势较明显,因此水土流失防治压力也较大,这与南部山区土壤贫瘠,山坡陡峭,植被覆盖小,加之开发建设项目对土壤的破坏,使补给区面积不断缩小等因素也有一定的关系,这些自然和人为因素均使土壤侵蚀情况日趋严重。

4 结论

本文根据济南市 48 个雨量站 1970—2016 年逐日降雨资料,对济南市降雨侵蚀力的时空变化特征进行了分析,得出以下结论:

(1)济南市 1970—2016 年年均降雨侵蚀力为

3774.91 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>, 年际变化趋势与降雨量的变化趋势基本一致, 呈现不显著的增加趋势, 但降雨侵蚀力的年际变化比降雨量更加剧烈, 且存在着3~6年、7~11年和19~25年3类尺度的周期变化规律, 突变点出现在1980年和1990年附近。

(2) 月降雨侵蚀力和降雨量的年内分布多集中在汛期6—9月, 分别占全年降雨侵蚀力和降雨量的81.85%和75.46%。春季和夏季呈现不显著的增加趋势, 秋季和冬季呈降低趋势。

(3) 降雨侵蚀力的空间分布规律与降雨量的分布相似, 均是南部地区明显高于北部地区, 中部地区高于西南、北部地区, 东西部差异不明显; 大部分地区的降雨侵蚀力呈现增长的变化趋势; 除个别雨量站以外, 济南市1990—2016年的平均降雨量及降雨侵蚀力比1970—1989年均有所增加, 降雨量的增幅在1%~27%之间, 降雨侵蚀力增幅在2%~50%之间。

(4) 南部丘陵山地区的降雨侵蚀力增加趋势较北部平原区明显, 但北部平原区的各年降雨侵蚀力的离散程度及差异较大; 不同地形区的降雨侵蚀力与降雨量都具有较好的相关关系, 而与海拔的相关关系不显著。

## 5 讨论

本文利用日降雨资料对降雨侵蚀力进行估算, 虽然较年降雨及月降雨模型的精度高, 准确性好, 但相对于利用降雨强度及降雨动能计算降雨侵蚀力的模型还是存在一定的误差。由于10 min、30 min等雨强数据不易获取, 因此目前无法通过更精确的模型对济南市降雨侵蚀力进行研究, 日后将对这一问题进行深入探讨。

同时, 土壤侵蚀不仅与降雨侵蚀力有关系, 与植被、地形地貌及人类活动等也都相关, 因此, 在防治水土流失的过程中, 需要在参考降雨侵蚀力时空分布规律的基础上, 结合其他影响因素, 全面分析土壤侵蚀状况, 这样才能提出有针对性的水土保持措施, 这对于济南市的保泉供水、海绵城市的建设等同样具有重要的意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于RUSLE模型的南方丘陵区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297 [CHEN Dongmei, YANG Xiaohuan, XIAO Linlin, et al. Study of

soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model [J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1288-1297]

- [2] 中华人民共和国水利部. 水利部发布《第一次全国水利普查水土保持情况公报》[EB]. [http://www.mwr.gov.cn/slyw/201305/t20130517\\_435841.html](http://www.mwr.gov.cn/slyw/201305/t20130517_435841.html) [The Ministry of water Resources of the People's Republic of China. The bulletin of the first national soil and water conservation situation [EB]. [http://www.mwr.gov.cn/slyw/201305/t20130517\\_435841.html](http://www.mwr.gov.cn/slyw/201305/t20130517_435841.html)]
- [3] 史东梅, 江东, 卢喜平, 等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 16-21 [SHI Dongmei, JIANG Dong, LU Xiping, et al. Temporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Fuling District, Chongqing [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 16-21]
- [4] 许尔琪, 张红旗, 董光龙. 伊犁河谷土壤水力侵蚀的时空变化研究[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1203-1211 [XU Erqi, ZHANG Hongqi, DONG Guanglong. Temporal and spatial dynamics of soil water erosion in the Yili Valley [J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1203-1211]
- [5] 程琳琳, 赵文武, 张银辉, 等. 集水区尺度降雨侵蚀力空间分布对土壤流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 69-73 [CHENG Linlin, ZHAO Wenwu, ZHANG Yinhu, et al. Effect of spatial distribution of rainfall erosivity on soil loss at catchment scale [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 69-73]
- [6] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington D. C.: US Department of Agriculture, 1978: 537-540
- [7] FOSTER G R, LOMBARDI F, MOLDENHAUER W C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms [J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(1): 124-129
- [8] 刘秉正. 渭北地区R的估算及分布[J]. 西北林学院学报, 1993, 8(2): 21-29 [LIU Bingzheng. Estimation and distribution of Rainfall Erosive Power Index (R) in Weibei Region [J]. Journal of Northwest Forestry College, 1993, 8(2): 21-29]
- [9] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 33-40 [ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyun. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Mountain Research, 2003, 21(1): 33-40]
- [10] 付金霞, 张鹏, 郑粉莉, 等. 河龙区近55a降雨侵蚀力与河道输沙量的动态变化分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 185-192 [FU Jinxia, ZHANG Peng, ZHENG Fenli. Dynamic change analysis of rainfall erosivity and river sediment discharge of He-Long Reach of the Yellow River from 1957 to 2011 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 185-192]
- [11] BONILLA C A, VIDAL K L. Rainfall erosivity in Central Chile [J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(1-2): 126-133.
- [12] 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 [DAI Jinmei, ZHA Xuan, HUANG Shaoyan, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity on West Fujian during 1980 to 2013 [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15



- (4): 1–7]
- [13] 程金文, 岳大鹏, 达兴, 等. 陕南地区1960—2014年降雨侵蚀力变化研究[J]. 山地学报, 2017, **35** (1): 48–56 [CHENG Jinwen, YUE Dapeng, DA Xing, et al. Research on rainfall erosivity changes during 1960–2014 in the Southern Shaanxi [J]. Mountain Research, 2017, **35** (1): 48–56]
- [14] 范俊甫, 何惠馨, 郭兵. 1980—2015年黄河流域降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, **20** (2): 196–204 [FAN Junfu, HE Huixin, GUO Bin. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Yellow River from 1980 to 2015 [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, **20** (2): 196–204]
- [15] 钟科元, 郑粉莉. 1960—2014年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 自然资源学报, 2017, **32** (2): 278–291 [ZHONG Keyuan, ZHENG Fenli. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Songhua River Basin from 1960 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32** (2): 278–291]
- [16] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究, 2002, **3** (21): 384–390 [ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyun. Estimation of rainfall erosivity using rainfall amount and rainfall intensity [J]. Geographical Research, 2002, **3** (21): 384–390]
- [17] 李良冬, 高鹏, 穆兴民, 等. 辽河流域降雨侵蚀力的时空变化分析[J]. 中国水土保持科学, 2009, **7** (2): 69–73 [LI Liangdong, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Spatial-temporal varieties of rainfall erosivity in the Liaohe River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, **7** (2): 69–73].
- [18] 辜倩, 马旭林, 何宁, 等. 湖南1961—2010年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 科学技术与工程, 2018, **18** (6): 184–189 [GU Qian, MA Xulin, HE Ning, et al. Temporal and spatial variation characteristics of rainfall erosion force in Hunan Province from 1961 to 2010 [J]. Science Technology and Engineering, 2018, **18** (6): 184–189].
- [19] 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 [LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity on Pearl River basin during 1960–2012 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31** (8): 159–167].
- [20] 杨甲辰, 张荣华, 齐玉诚, 等. 日照市降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15** (5): 48–57 [YANG Jiachen, ZHANG Ronghua, QI Yucheng, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in Rizhao City [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, **15** (5): 48–57].
- [21] 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 Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng. 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]
- [22] 孙青雪. 基于Mann-Kendall检验的青山库区降水、径流变化趋势及突变分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2016, **28** (5): 29–33 [SUN Qingxue. Analysis of precipitation and runoff variation trend and mutation based on Mann-Kendall test in Qingshang Basin [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2016, **28** (5): 29–33]
- [23] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geo-physical time series [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, **11** (5/6): 561–566
- [24] YANG F B, LU C H. Spatiotemporal variation and trends in rainfall erosivity in China's dryland region during 1961–2012 [J]. Catena, 2015, **133** (133): 362–372

## Temporal and Spatial Changes of Rainfall Erosivity during 1970—2016 in Jinan City, China

XU Jing<sup>1</sup>, XU Zhenghe<sup>2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, WANG Xiuru<sup>1\*</sup>, WANG Xi<sup>2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China;

3. Administration Office of Jinxiuchuan Reservoir in Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** Soil erosion has been recognized as one of the most serious ecological environment issues, catching the growing concerns over years. Rainfall is naturally responsible for soil erosion. The rainfall erosivity is a sensitive reflection of potential soil erosion induced by precipitation. It is of great significance to the monitoring, forecasting and control of soil erosion. In this study it collected rainfall data from 48 rainfall stations in Jinan City from 1970 to 2016, and used the Mann-Kendall non-parametric trend test and mutation test, wavelet analysis, and ArcGIS inverse distance weighted (IDW) interpolation methods to investigate the temporal and spatial characteristics of

erosive erosivity in Jinan City. Results showed that: (1) The average annual rainfall erosivity for 1970 – 2016 in Jinan City was  $3774.91 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ . The interannual variation as a whole presented non-significant growth trend. In the 3 ~ 6 years, 7 ~ 11 years and 19 ~ 25 years, there were 3 types of periodic variation with different scales, and changes occurred abruptly around 1980 and 1990. (2) Rainfall erosivity was unevenly distributed through a year, mostly concentrated from June to September. The rainfall erosivity showed a slight upward trend in spring and summer, and declined in autumn and winter. (3) The spatial distribution of rainfall erosivity was consistent with the pattern of precipitation. In the central and southern regions they were significantly higher than those in the north and southwest regions, but there was no significant difference between the east and the west, and the annual rainfall erosivity in most regions showed no significant increase. (4) The variation coefficient of rainfall erosivity for all rainfall stations was between 0.28 to 0.49, and as comparing with the average annual rainfall erosivity during 1970 – 1989, it increased by more than 10% during 1990 – 2016 at most of the rainfall stations. (5) There was a good correlation between rainfall erosivity and precipitation in different terrain areas, but there was no significant correlation with elevation.

**Key words:** rainfall erosivity; spatio-temporal distribution characteristics; rainfall; soil erosion; Jinan City