

# 太行山脉不同量级降雨侵蚀力时空变化特征

李维杰<sup>1</sup>, 王建力<sup>2</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 基于太行山脉及其周边地区 76 个气象监测站点 1954-2016 年逐日降雨数据, 建立了基于不同量级侵蚀性年降雨量模拟年降雨侵蚀力的简易模型, 并采用气候倾向率、小波周期分析、重心模型、Co-Kriging 插值、Mann-kendall 非参数趋势检验以及突变分析等方法, 分析了不同量级降雨侵蚀力时空变化特征及其影响因素。结果表明: (1) 太行山脉地区年降雨侵蚀力简易模型为  $y=0.182x_1^{1.095}+5.463x_2^{0.982}+9.401x_3^{1.017}+15.258x_4-26.753$ , 且多年降雨侵蚀力呈小幅上升趋势, 10 年间上升了  $2.4 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 同时存在约 20 年的主周期和 6 年的小周期变化, 并在 1996 年发生显著突变; 中雨和大雨侵蚀力 63 年间均呈上升趋势, 而暴雨和特大降雨侵蚀力呈下降趋势; 春秋两季主要受中雨和大雨侵蚀力的影响, 而夏季则主要受特大降雨侵蚀力的影响。(2) 太行山脉地区各量级降雨侵蚀力最大值主要分布于太行山脉东南部以及五台山地区, 最小值主要分布于地区的东北部; 运用重心模型发现各量级降雨侵蚀力重心在春夏季节整体向东部以及东北部地区进行迁移, 而秋冬季节则向南部以及西南地区迁移, 形成一个循环, 且与冬夏季风的控制时间相符。(3) 太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力与侵蚀性降雨量均呈显著正相关 ( $P<0.01$ ), 大雨和特大降雨侵蚀力分别与纬度、海拔呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 这主要与副热带高压移动、地形、海拔以及自然地理环境等因素有关。

**关键词:** 不同量级降雨侵蚀力; 重心模型; 时空变化; 太行山脉

目前, 土壤侵蚀已经成为人类目前所面临的最为严重的生态环境问题之一。引发土壤侵蚀的因素包括降雨、土壤、植被、地形、坡长以及坡度等, 其中降雨成为诱发土壤侵蚀的主要动力因素<sup>[1]</sup>。降雨对土壤侵蚀的主要表现形式为雨滴击溅和径流剥蚀, 其降雨的持续时间、强度、次数均会对土壤侵蚀面积产生重要影响<sup>[2]</sup>。

国内外学者对于土壤侵蚀的研究主要集中于土壤侵蚀预测模型上。1965 年, Whischmeier 等<sup>[3]</sup>首次提出通用水土流失方程 USLE (Universal Soil Losses Equation), 其中降雨侵蚀力 (Erosivity factor of Rainfall) 成为其 6 大主要影响因子之一<sup>[4]</sup>。降雨侵蚀力主要表征降雨引发土壤侵蚀的潜在能力, 已成为土壤侵蚀气候因子的定量评价指标<sup>[5]</sup>。降雨侵蚀力主要与地区降雨量、降雨日数、降雨强度等参数密切相关, 相关研究表明地区降雨侵蚀力与降雨量存在极显著相关性, 同时土壤侵蚀的产生往往与那些次数相对较少、降雨量和降雨强度相对较大的降雨相关<sup>[6]</sup>。目前, 降雨侵蚀力 R 因子的度量还没有统一的标准, 从模型结构上分为两大类: 一类是经典算法 (动能降雨强度结构模型), 主要涉及降雨动能与降雨强度, 时间尺度往往以小时为单位; 另一类是简易算法, 主要运用常规降

收稿日期: 2018-08-27; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 贵州省科技合作计划项目 (LH[2014]7498); 贵州省科技计划院士工作站项目 ([2016]5602)

作者简介: 李维杰 (1993-), 男, 山西晋城人, 硕士, 主要从事全球环境变化研究。E-mail: 2586746160@qq.com

通讯作者: 王建力 (1969-), 男, 山东威海人, 博士, 教授, 主要从事全球环境变化研究。

E-mail: wangjl@swu.edu.cn

雨资料,时间尺度包括日、月、年。经过相关学者多年的深入研究表明,经典算法其降雨数据获取相对困难且计算过程繁杂,不适合大范围的推广,而简易算法降雨数据获取相对容易且计算简便,精度也相对较高,因此目前国内外降雨侵蚀力 $R$ 因子的计算普遍采用简易算法。

目前,已有降雨侵蚀力的研究主要集中于年际、年内以及季节尺度上的时空变化,对于不同量级降雨侵蚀力特征的研究相对较少。赵平伟等<sup>[6]</sup>人利用多种统计学方法,深入研究了滇西北地区不同量级降雨侵蚀力时空变化以及突变特征;冯若昂等<sup>[7]</sup>人运用侵蚀理论与GIS技术相结合的方法分析了山东省不同量级降雨侵蚀力增长率空间差异的成因。不同量级降雨时空变化差异必然不同程度上影响不同时间和区域下的土壤水蚀特征,因此对于不同量级降雨侵蚀力的研究是极为必要的。前人对不同量级降雨侵蚀力的研究主要集中于时空变化特征上,对于不同量级降雨侵蚀力集中分布区域的动态变化情况研究相对较少<sup>[8]</sup>。本文将社会经济研究领域取得广泛应用的重心模型引入到水土保持学科中,以期更加深入的了解地区降雨侵蚀力的形成机制以及演化趋势,提高土壤侵蚀发生时期的预测精度<sup>[9]</sup>。

太行山脉地区属于中国国家级水土流失重点治理区。据《2016年中国水土保持公报》报道,太行山脉治理区监测面积为10423 km<sup>2</sup>,分别涉及山西省襄垣县、潞城市、五台县、昔阳县以及河北省平山县、涉县。区内地形主要以山地为主,植被以林地和草地居多,水土流失面积达4975.92 km<sup>2</sup>,占土地面积的47.74%,主要作用力为水力侵蚀。相比2013年,太行山脉地区水土流失面积缩减了63.53 km<sup>2</sup>,然而水土流失监测与防治依然严峻<sup>[10]</sup>。目前对太行山脉地区的研究主要集中于生态涵养以及保护方面,涉及降雨侵蚀力的研究鲜见报道。因此,本文基于太行山脉及其周边地区76个气象监测站点1954-2016年逐日降雨数据,采用多种统计学方法以及重心模型,分析其不同量级降雨侵蚀力时空分异特征,对于小流域以及典型土壤侵蚀区危险性监测、预警以及评价具有重要的意义,同时为水土流失重点治理区决策的制定以及相关配套防治措施的出台提供理论指导<sup>[11]</sup>。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

相关学者对于太行山脉的地理界限说法不一,本文参考李薇<sup>[12]</sup>的说法,将太行山脉地区作为一个独立的地理单元进行论述。太行山脉地区位于34°71'~40°34'N、110°60'~115°62'E,分别跨越北京、山西、河南、河北四省市,总面积约12.7万km<sup>2</sup>(图1)。太行山脉地区地形总体上西北高东南低,平均海拔为1500~2000 m,最高处位于山西省境内的五台山,高度约3091 m,号称“华北屋脊”;太行山脉是黄土

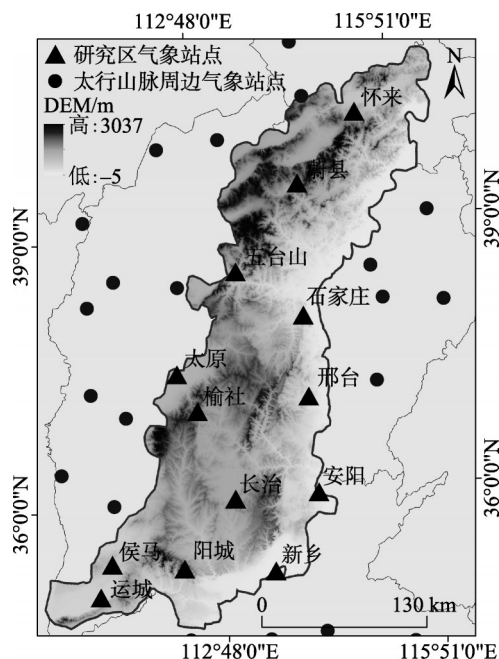


图1 太行山脉研究点位置及高程

Fig. 1 Location and elevation of research sites of Taihang Mountains Area

高原与华北平原的自然分界线，同时也是华北地区经济发展的生态堡垒与屏障。

太行山脉地区总体上为暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，年平均温度约 10 ℃，最高温度可达 38 ℃，年均降水量保持在 540 mm 左右，降水量在年内分布呈现出集中性，6-9 月降水总量占全年降水量的 70%，同时因自然地理以及气候条件的差异，降水量自东南向西北逐渐递减。地区植被随着海拔的升高表现出明显的垂直地带性，1000 m 以下多灌丛，1000~2000 m 之间为常绿阔叶林，2000~3000 m 之间多针阔混交林以及高亚草原，3000 m 以上高山草甸相对丰富，主要集中于五台山地区。太行山脉地区属于北方典型的土石山区，土壤水分含量以及持水能力相对较低，土层浅薄，降水的季节分配不均往往引发一系列的地质灾害以及生态环境问题<sup>[13]</sup>。《中国水土保持公报》连续 14 年一直将太行山脉地区作为中国水土流失重点治理区，如何有效准确地预测土壤侵蚀发生的时间与地区，对于水土流失治理以及相关政策的制定均起着至关重要的作用。

1.2 数据来源与分析方法

本文气象数据均来自于“中国气象数据网”(<http://data.cma.cn/site/index.html>)，包括了 1954-2016 年间太行山脉及其周边地区 76 个站点的逐日降雨量（24 小时降雨量）、经纬度以及海拔等数据。每个站点的起止时间存在较大差异，为满足研究需要，遵循欧洲气候评估数据集采用的标准<sup>[14]</sup>：（1）数据时长不得少于 40 年；（2）单个站点缺失数据不得超过 10%；（3）每一年的缺失数据不得超过 20%或连续 3 个月。基于此标准，共筛选出 60 个气象站点，其中研究区内共包含 13 个气象站点（表 1），分布相对均匀，降雨时间序列长度范围为 44~63 年，均符合研究标准。

表 1 太行山脉地区监测站点  
Table 1 Monitoring site of the Taihang Mountains Area

站点	地区	监测年限	纬度/°	经度/°	海拔/m
怀来	河北	1954-2016	40.24	115.30	536.80
蔚县	河北	1954-2016	39.50	114.34	909.50
太原	山西	1954-2016	37.47	112.33	778.30
榆社	山西	1957-2016	37.04	112.59	1041.40
运城	山西	1956-2016	35.03	111.03	365.00
侯马	山西	1957-2016	35.39	111.22	433.80
邢台	河北	1954-2016	37.11	114.22	183.00
阳城	山西	1957-2016	35.29	112.24	659.50
长治	山西	1973-2016	36.03	113.04	991.80
新乡	河南	1954-2016	35.19	113.53	73.20
安阳	河南	1954-2016	36.03	114.24	62.90
石家庄	河北	1955-2016	38.02	114.25	81.00
五台山	山西	1956-2016	38.57	113.31	2208.30

本文主要研究不同量级降雨所产生的降雨侵蚀力，因此对于不同雨量级的划分则尤为重要。参考中国第一次全国水利普查水土保持专项普查的标准<sup>[15]</sup>，将 12.0 mm 作为侵蚀性降雨量的标准，日降雨量 < 12.0 mm 不参与降雨侵蚀力的计算，日降雨量 ≥ 12 mm 则划分为不同雨量级；中雨日（12.0~24.9 mm）、大雨日（25.0~49.9 mm）、暴雨日（50.0~100 mm）、特大暴雨日（100~250 mm），由此算出各雨量级的降雨侵蚀力，并分别命名

为中雨侵蚀力、大雨侵蚀力、暴雨侵蚀力以及特大降雨侵蚀力。同时将12月至次年2月划分为冬季, 3-5月为春季, 6-8月为夏季, 9-11月为秋季。

### 1.3 研究方法

#### (1) 降雨侵蚀力的计算

目前全国主要采用第一次全国水利普查水土保持专项普查中使用的降雨侵蚀力方程进行计算, 该模型是由章文波等<sup>[16]</sup>人基于日降雨量数据所提出的降雨侵蚀力简易模型, 已广泛运用于中国大部分地区, 南方地区降雨侵蚀力估算精度相对较高, 而北方地区相对较差, 具体计算方法如下:

$$R_{\text{半月}} = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (1)$$

式中:  $R_{\text{半月}}$  表示第  $i$  个半月的降雨侵蚀力 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $P$  表示第  $i$  个半月内日降雨量  $\geq 12.0$  mm 的降水量 (mm);  $k$  表示第  $i$  个半月内日降雨量  $\geq 12.0$  mm 的降水日数 (天);  $\alpha$  与  $\beta$  表示模型计算参数, 具体计算方法如下:

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891}$$

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

式中:  $P_{d12}$  表示日降雨量  $\geq 12.0$  mm 的日平均雨量 (mm);  $P_{y12}$  表示日降雨量  $\geq 12.0$  mm 的年平均雨量 (mm); 不同区域的模型参数值  $\alpha$  与  $\beta$  存在较大差异, 经计算, 参数  $\alpha$  的取值范围为 0.01~0.08, 平均值为 0.04; 参数  $\beta$  的取值范围为 2.18~2.83, 平均值为 2.49。通过逐日降雨量数据计算每半月的降雨侵蚀力, 由此汇总得到月、季、年均降雨侵蚀力。

为了建立适合于太行山脉及其周边地区的年降雨侵蚀力简易模型, 结合前人的研究, 选取了太行山脉及其周边地区 60 个气象站点前 40 年 (1954-1993 年) 降雨量数据, 采用幂函数与二次函数模型建立不同量级降雨侵蚀力与降雨量之间的关系<sup>[17-18]</sup> (表 2)。根据表 2 分别建立基于不同量级侵蚀性年降雨量、侵蚀性年降雨量、年降雨量的年降雨侵蚀力算法, 具体如下:

表 2 降雨量与降雨侵蚀力函数模型回归结果

Table 2 Rainfall and rainfall erosion force function model regression results

$x$	$y$	回归方程	决定系数 $R^2$
年中雨量	年中雨侵蚀力	$y=0.182x_1^{1.095}$	0.81
年大雨量	年大雨侵蚀力	$y=5.463x_2^{0.982}$	0.95
年暴雨量	年暴雨侵蚀力	$y=0.941x_3^{1.017}$	0.91
年特大降雨量	年特大降雨侵蚀力	$y=15.258x-26.753$	0.98
年侵蚀性降雨量	年降雨侵蚀力	$y=0.014x^2-3.526x+1337.089$	0.72
年降雨量	年降雨侵蚀力	$y=0.009x^2-4.254x+1502.015$	0.79

$$R_1 = 0.182x_1^{1.095} + 5.463x_2^{0.982} + 9.401x_3^{1.017} + 15.258x_4 - 26.753 \quad (3)$$

$$R_2 = 0.014x^2 - 3.526x + 1337.89 \quad (4)$$

$$R_3 = 0.009x^2 - 4.254x + 1502.015 \quad (5)$$

式中:  $R_1$  表示不同量级侵蚀性年降雨量模拟年降雨侵蚀力 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $R_2$  表示侵蚀性年降雨量模拟年降雨侵蚀力 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $R_3$  表示年降雨量模拟年降雨侵蚀力 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $x_1$  表示年中雨量 (mm);  $x_2$  表示年大雨



量 (mm);  $x_3$  表示年暴雨量 (mm);  $x_4$  表示年特大降雨量 (mm)。

本文以章文波模型累积半月降雨侵蚀力所得的年降雨侵蚀力为精度值,运用式(3)~式(5)分别模拟60个气象站点1954-1993年降雨侵蚀力,采用线性回归方法对比分析各模拟值与精确值之间的差异。结果表明基于不同量级侵蚀性年降雨量简易算法模拟年降雨侵蚀力结果优于其他两种算法模拟结果,其相关性系数达0.98,并通过0.01显著性水平(图2)。

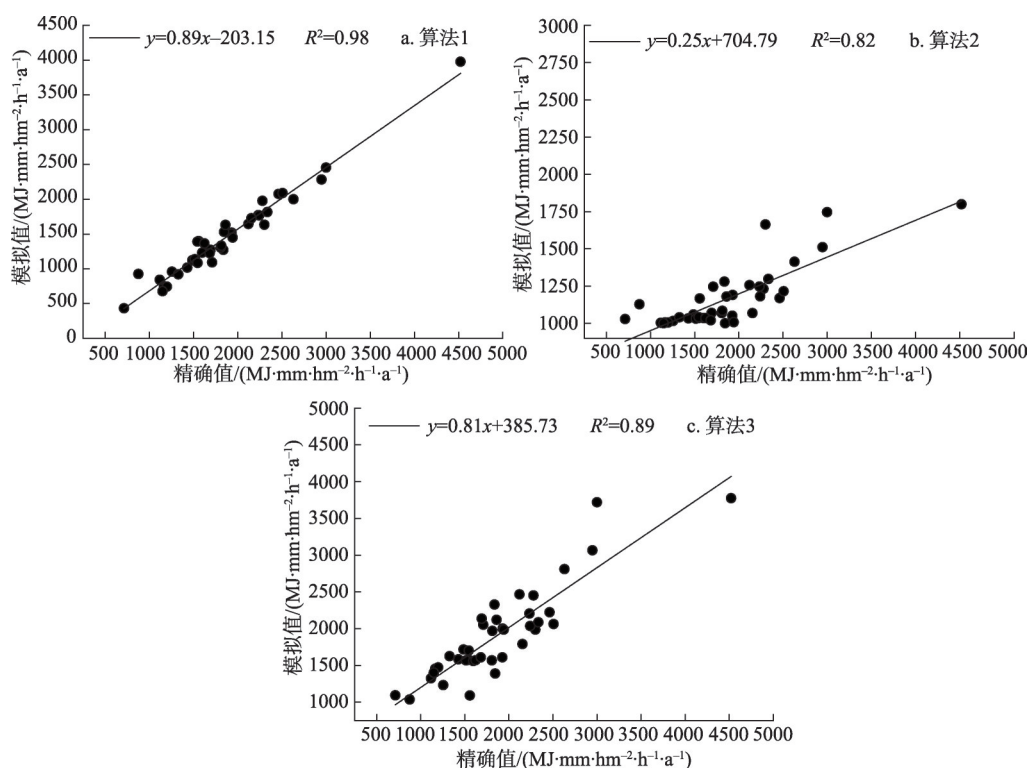


图2 各模拟年降雨侵蚀力值与精确值的散点图

Fig. 2 Scatter plot of erosive force values and exact values for each simulated rainfall

为了进一步验证不同量级侵蚀性年降雨量简易模型的可行性,将太行山脉及其周边地区60个气象站点后23年(1994-2016年)中雨量、大雨量、暴雨量以及特大降雨量输入算法1模拟后23年降雨侵蚀力(图3)。通过检验模拟值与精确值发现其存在极显著相关性( $P<0.01$ )。因此基于不同量级年降雨量计算年降雨侵蚀力的简易模型具有一定的精度,可用于估算太行山脉地区年降雨侵蚀力。

## (2) 时间特征分析方法

本文采用世界气象组织(WMO)推荐的Mann-kendall非参数趋势分析以及气候倾向率检验年降雨侵蚀力的变化趋势<sup>[19]</sup>。通过统计Z值,可以判断时间序列上的变化趋势,当 $Z>0$ 时表示处于上升趋势, $Z<0$ 时表示处于下降趋势,Z的绝对值越大,则变化趋势越显著,当绝对值大于1.96时,表明通过0.05显著性水平检验;运用变异系数( $C_v$ )分析<sup>[20]</sup>年降雨侵蚀力随时间变化而发生的变异或偏离程度,其中 $C_v\leq 0.1$ 时为低等变异, $0.1<C_v<1$ 为中等变异, $C_v\geq 1$ 则为高等变异;采用Mann-kendall突变分析以及累计距平法

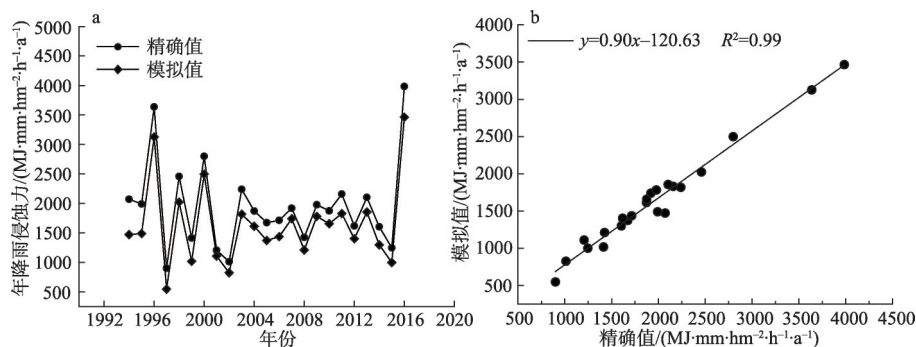


图3 1994-2016年降雨侵蚀力模拟值与精确值的比较及拟合

Fig. 3 Comparison and fitting of simulated and exact values of rainfall erosivity from 1994-2016

分析年降雨侵蚀力发生突变的时间节点与置信度<sup>[21]</sup>, Mann-kendall突变分析主要是对统计量序列的分析,  $UB$ 表示逆序列,  $UF$ 表示正序列, 并给予0.05显著性水平检验边界线。当 $UF_k > 0$ 时, 表明时间序列处于上升趋势, 当 $UF_k < 0$ 时, 则表明时间序列处于下降趋势, 若上升或下降的趋势超过边界线, 则表明存在显著的变化趋势。当 $UF$ 与 $UB$ 两条时间序列均处于显著性水平边界线内, 且存在交点, 则其交点所对应的时间节点则为统计序列发生突变的时间; 最后通过小波分析法 (Wavelet Analysis) 分析年降雨侵蚀力的周期性变化规律<sup>[22]</sup>。

### (3) 空间特征分析方法

本文鉴于太行山脉地区复杂的地形特征, 采用Arcgis中考虑高程因素的协同克里金方法 (Co-Kriging), 分析不同量级降雨侵蚀力在不同时间尺度上的空间分布, 同时采用降雨侵蚀力重心模型分析空间上降雨侵蚀力的变化趋势<sup>[23]</sup>。重心模型概念的提出基于牛顿力学, 其主要通过模型来动态的权衡各个地区作用力的大小, 指示变量变化的方向, 其公式如下:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (6)$$

式中:  $\bar{X}$ 与 $\bar{Y}$ 表示重心坐标;  $X_i$ 与 $Y_i$ 表示第 $i$ 个监测站点的经纬度坐标;  $R_i$ 表示 $i$ 监测站点的年或月降雨侵蚀力 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力时间变化特征

#### 2.1.1 太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力划分依据

通过比较太行山脉地区年降雨日数、年侵蚀性降雨量、年降雨量以及年降雨侵蚀力的极值比, 发现其之间存在一定差异性。整体表现为: 年降雨侵蚀力 > 年侵蚀性降雨量 > 年降雨量 > 年降雨日数, 表明地区年降雨侵蚀力的变化幅度相对较大, 而年降雨日数的变化幅度相对较小; 同时比较太行山脉地区年降雨日数、年侵蚀性降雨量、年降雨量以及年降雨侵蚀力最大值出现的区域 (表3), 可以发现年降雨日数、年降雨量以及年侵蚀性

表3 太行山脉地区多年降雨日数、降雨量、侵蚀性降雨量及降雨侵蚀力  
Table 3 Rainfall days, rainfall, erosive rainfall, and rainfall erosivity in the Taihang Mountains Area

站点	年降雨日数/天	年降雨量 /mm	年侵蚀性降雨量 /mm	年降雨侵蚀力 /(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	年侵蚀性降雨量 /mm
五台山	125.41	774.32	462.93	2116.20	0.60
太原	74.62	444.64	268.49	1356.93	0.60
榆社	86.47	544.90	346.54	1539.75	0.64
长治	87.75	559.87	354.21	1823.62	0.63
运城	78.16	529.23	350.84	1688.15	0.66
阳城	87.22	599.99	403.64	1984.75	0.67
安阳	75.29	579.20	418.73	2412.81	0.72
新乡	75.78	605.14	421.34	2502.56	0.70
蔚县	83.94	413.96	214.52	796.31	0.52
石家庄	73.27	555.51	373.63	2092.72	0.67
怀来	74.70	396.48	225.61	977.46	0.57
邢台	73.67	527.95	365.18	2021.85	0.69
侯马	81.62	512.31	324.70	1675.22	0.63

降雨量所出现的区域均为五台山，而年降雨侵蚀力最大值出现的区域为新乡，表明五台山地区降雨日数与降雨量虽较多，但多为非侵蚀性降雨或小量级侵蚀性降雨，而新乡地区降雨日数与降雨量虽较少，但大量级侵蚀性降雨占比相对较大，这与赵平伟等<sup>[6]</sup>人对于滇西北地区多年降雨侵蚀力的研究结果相一致。说明将太行山脉地区降雨侵蚀力细致划分至不同量级是有必要的。

通过对太行山脉地区不同量级年降雨日数、降雨量以及降雨侵蚀力的特征进行分析(图4)。发现太行山脉地区年降雨日数与降雨量随着降雨量级的增大而逐渐递减，年降雨侵蚀力则随着降雨量级的增大呈“抛物线”变化。年均中雨日、大雨日、暴雨日以及特大降雨日占总降雨日数的比例分别为64.52%、27.53%、6.99%、0.95%，年均中雨量、

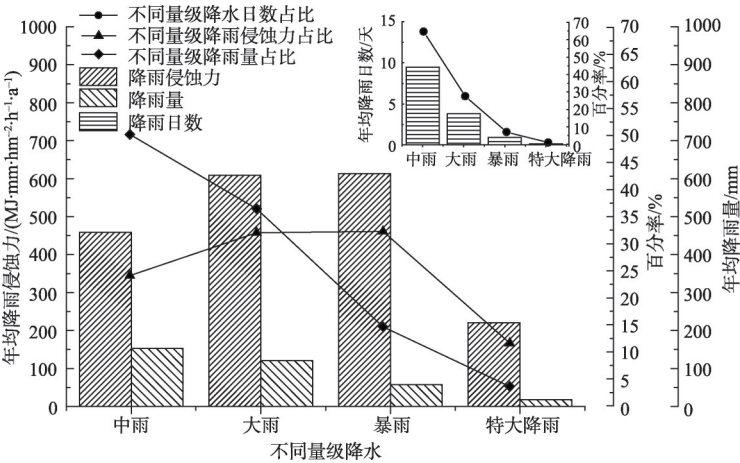


图4 太行山脉地区不同量级降雨日数、降雨量、降雨侵蚀力比列及其特征分析  
Fig. 4 Analysis of different magnitude rainfall days, rainfall, rainfall erosivity ratios and their characteristics in the Taihang Mountains Area

大雨量、暴雨量以及特大降雨量占总降雨量的比例分别为50.21%、36.45%、14.65%、3.59%，而年均中雨侵蚀力、大雨侵蚀力、暴雨侵蚀力以及特大降雨侵蚀力占年降雨侵蚀力的比例分别为24.10%、32.03%、32.26%、11.63%。表明暴雨以上量级降雨日数占总降雨日数的比例不到8.0%，其产生的降雨量占总降雨量比例为18.23%，然而其引起的降雨侵蚀力占总降雨侵蚀力比例却高达43.89%，因此太行山脉地区降雨侵蚀力的产生以及变化主要与降雨日数少，雨量级别较大的降雨事件有关。同时在地区植被、土壤、地形、坡度以及坡长不变的情况下，通过比较不同量级降雨侵蚀力占总降雨侵蚀力的比例，发现太行山脉地区土壤侵蚀的发生主要是由中雨和暴雨所致，二者降雨侵蚀力占总降雨侵蚀力的比例高达64.29%，对于土壤侵蚀重点治理地区应做好密切监测工作，预防滑坡、泥石流等地质灾害的发生。

### 2.1.2 不同量级降雨侵蚀力年际变化

太行山脉地区1954-2016年间年平均降雨量为528.76 mm，而年均降雨侵蚀力为1901.57 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>，通过线性趋势拟合发现年降雨侵蚀力呈上升趋势，上升幅度相对较小，10年间上升了2.4 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>，而年降雨量则呈下降趋势，10年间下降了4.9 mm，二者均未通过0.05显著性水平检验（图5）；同时年均降雨侵蚀力与年均降雨量的变异系数 $C_v$ 分别为0.37、0.19，均属于中等变异，表明年降雨侵蚀力相比年降雨量变化幅度较大。

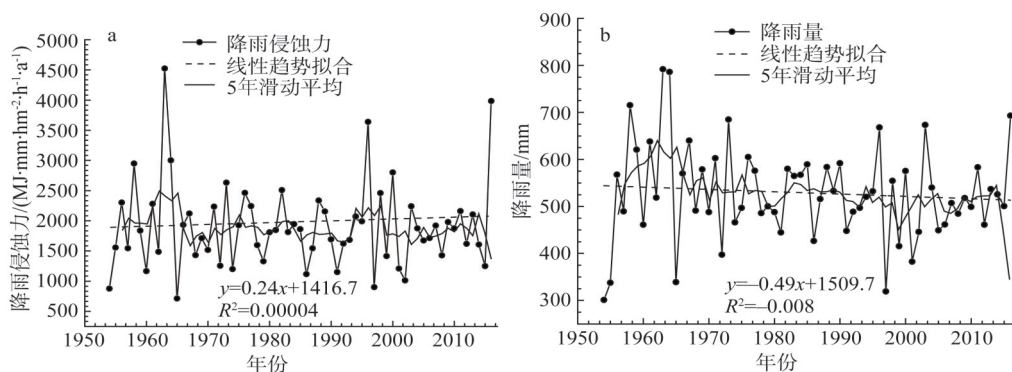


图5 太行山脉地区多年年降雨侵蚀力与年降雨量变化特征

Fig. 5 Characteristics of annual rainfall erosivity and annual rainfall in the Taihang Mountains Area

通过对太行山脉地区1954-2016年间年均降雨侵蚀力5年滑动平均发现其存在两个波峰期与两个波动期。总体上分为4个阶段：1954-1967年为第一阶段，年均降雨侵蚀力变化处于第一个波峰期，1963年达到最大值；1967-1991年为第二阶段，年均降雨侵蚀力呈波动变化趋势；1991-2002年为第三阶段，年均降雨侵蚀力处于第二个波峰期，最大值出现在1996年；2002-2016年为第四阶段，年均降雨侵蚀力呈波动变化趋势。表明太行山脉地区年均降雨侵蚀力存在一定的周期性变化，通过采用小波周期法对63年年时间变化序列进行分析（图6），发现年均降雨侵蚀力存在约20年的主周期和约6年的小周期变化。

通过对太行山脉地区年降雨侵蚀力趋势分析发现其存在三处剧烈变化阶段。第一阶段为1963-1965年期间，最大值与最小值相差6.35倍；第二阶段处于1996-1997年期间，最大值与最小值相差4.04倍；而第三阶段处于2015-2016年期间，最大值与最小值相差



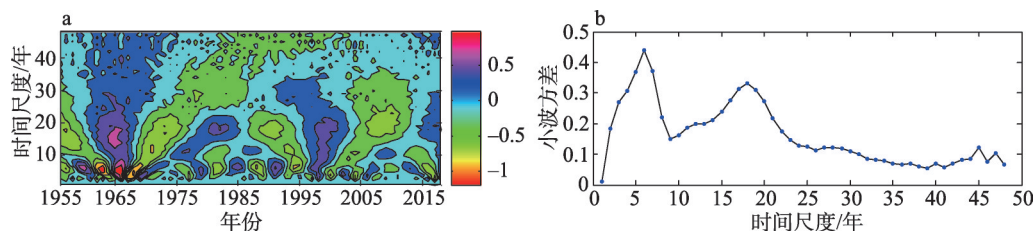


图6 年降雨侵蚀力小波分析动态变化

Fig. 6 Wavelet analysis of annual rainfall erosion forces

3.19倍,表明年降雨侵蚀力在这三处时间段处于突变期。通过累计距平法对63年降雨侵蚀力时间序列进行突变点检验,发现1963年、1996年、2015年为突变点(图7),而通过Mann-kendall非参数性突变检验法进行分析发现 $UF$ 与 $UB$ 正逆时间序列变化趋势均处于0.05置信区间内,同时存在多个交点,即突变点,进一步运用滑动 $T$ 检验法与Yamamoto法进行检验,结果表明63年间年均降雨侵蚀力仅在1996年发生突变,且通过0.01显著性水平。因此综合各种时间序列检验方法得知太行山脉地区63年间年均降雨侵蚀力发生突变的时间点为1996年。

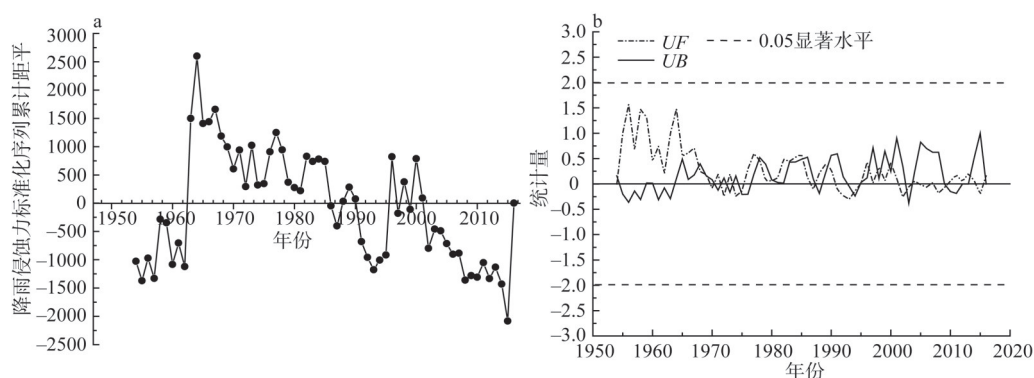


图7 基于累计距平法和Mann-kendall突变检验法的年降雨侵蚀力时间序列

Fig. 7 Time series of annual rainfall erosivity based on the cumulative anomaly and Mann-Kendall mutation test

太行山脉地区1954-2016年间不同量级降雨侵蚀力变化趋势存在一定差异。如图8所示,年均中雨与大雨侵蚀力63年间均呈上升趋势,中雨侵蚀力上升幅度相对较大,10年间二者降雨侵蚀力分别增加了 $12 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $4.3 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,变异系数分别为0.43、0.57;年均暴雨与特大降雨侵蚀力63年间均呈下降趋势,特大降雨侵蚀力下降幅度相对较大,10年间降雨侵蚀力分别减少了 $3.9 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $7.8 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,变异系数分别为1.33、4.23。表明太行山脉地区1954-2016年间降雨侵蚀力呈上升趋势主要是由中雨侵蚀力和大雨侵蚀力造成的,其中中雨侵蚀力占主导;同时通过变异系数比较,发现随着降雨量级以及雨强的增大,变异系数也逐渐增大,相关部门应加强对强降雨所引发的土壤侵蚀灾害监测力度。

### 2.1.3 不同量级降雨侵蚀力季节变化

太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力季节变化特征总体表现为:中雨侵蚀力在春夏秋冬季节均会出现,大雨和暴雨侵蚀力只在春夏秋季出现,而特大降雨侵蚀力仅出现在夏季。如

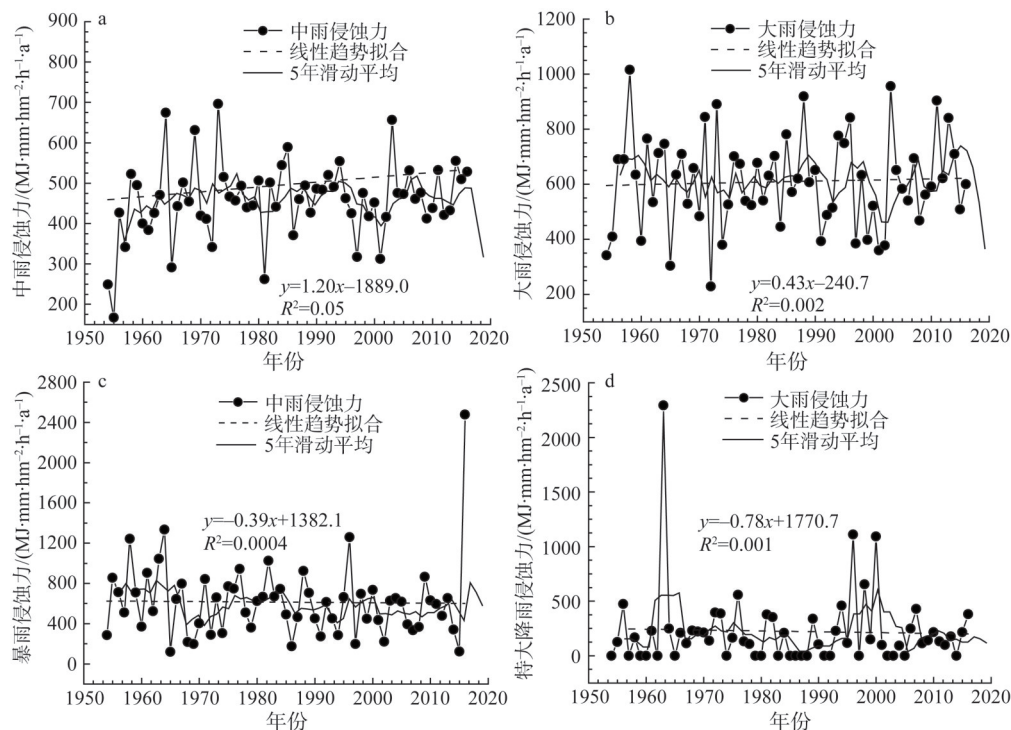


图8 太行山区不同量级降雨侵蚀力年际变化

Fig. 8 Interannual variation of rainfall erosivity for different magnitudes in the Taihang Mountains Area

图9所示,中雨侵蚀力在春、秋、冬季节呈上升趋势,上升幅度较大的季节为春季与秋季,10年间平均分别上升了 $2.4 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $2.9 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,均未通过显著性检验;而夏季呈下降趋势,10年间平均下降了 $1.2 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,未通过显著性检验,表明中雨侵蚀力在季节变化上总体呈上升趋势,春季与秋季土壤侵蚀风险相对较大,同时这一时期也是农作物播种和收割的季节,土地利用强度较大,应开展相关的预防工作。

太行山脉地区大雨与暴雨侵蚀力主要出现在春、夏、秋三季。如图10所示,大雨侵蚀力在春、秋两季呈上升趋势(图10a),秋季上升幅度较大,10年间平均上升了 $8.3 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,未通过显著性水平检验,夏季大雨侵蚀力呈下降趋势,10年间下降了 $13.2 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,表明大雨侵蚀力总体呈上升趋势,秋季土壤侵蚀风险相对较大;暴雨侵蚀力在夏、秋季节呈下降趋势(图10b),夏季下降幅度较大,10年间平均下降了 $33.7 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而春季暴雨侵蚀力呈上升趋势,10年间平均上升了 $1.4 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,表明暴雨侵蚀力总体呈下降趋势,土壤侵蚀有所缓解,但依然要密切监测春季暴雨侵蚀力的发生。

太行山脉地区特大降雨侵蚀力出现的季节主要是在夏季。如图11所示,特大降雨侵蚀力季节变化总体上呈上升趋势,10年间平均上升了 $9.3 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,未通过显著性水平检验。综上所述,太行山脉地区春、秋两季由中雨和大雨侵蚀力导致的土壤侵蚀风险相对较大,尤其是秋季;而夏季由中雨、大雨以及暴雨侵蚀力导致的土壤侵蚀风险相对较小,但要警惕特大降雨侵蚀力的发生;冬季发生土壤侵蚀的风险较小,此期间可以开展相关工程建设。

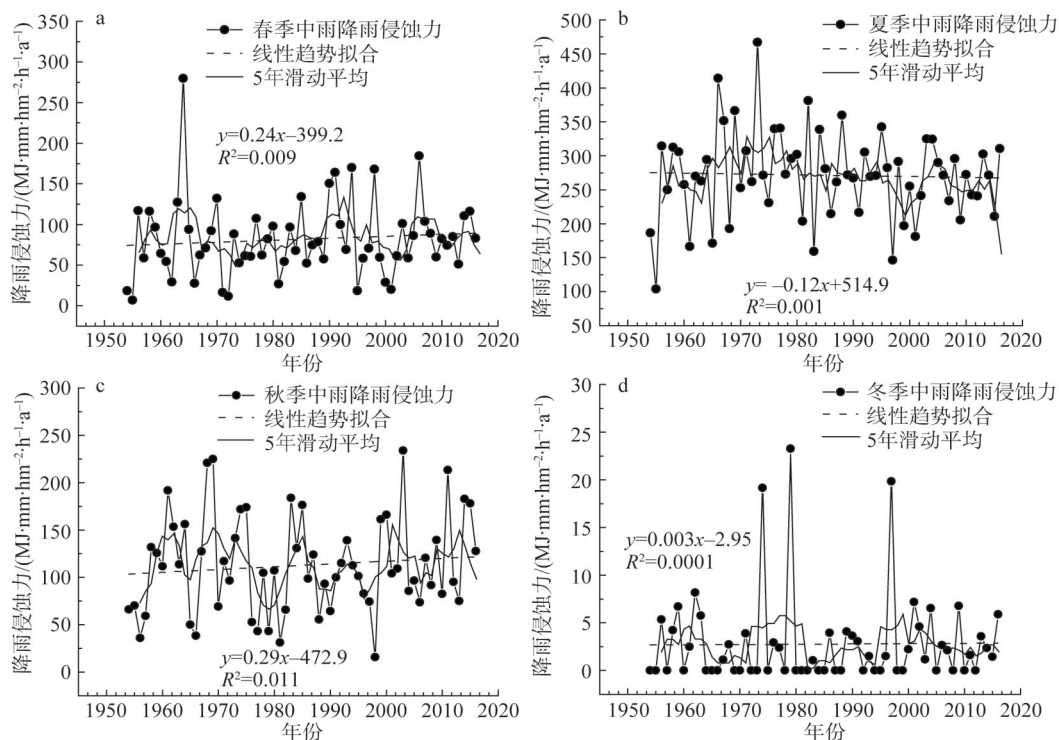


图9 中雨侵蚀力季节变化特征

Fig. 9 Seasonal variation of rain erosivity

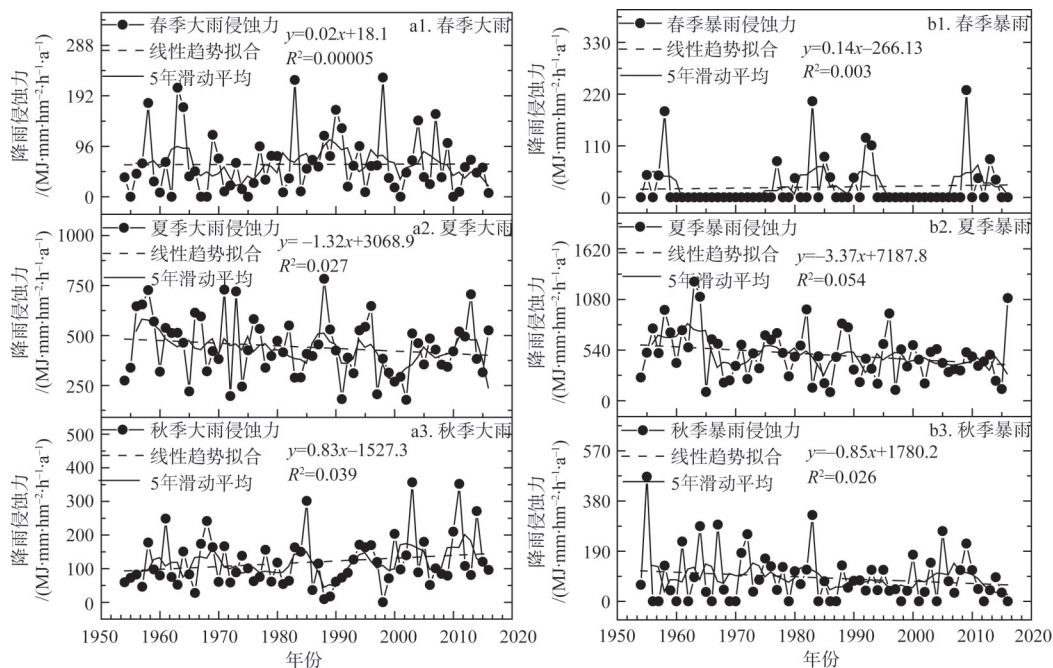


图10 大雨侵蚀力与暴雨侵蚀力季节变化特征

Fig. 10 Seasonal variations of erosive force and storm erosive force in heavy rain

2.2 不同量级降雨侵蚀力空间变化特征

2.2.1 不同量级降雨侵蚀力年际变化空间分布

太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力年际变化存在较为显著的差异性。如图 12 所示, 年均中雨侵蚀力主要分布于汾河谷地以及五台山地区, 最大值出现在五台山地区, 年均值可达  $690.91 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 最小值出现在蔚县地区, 年均值仅为  $364.26 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 最大值与最小值相差 1.89 倍, 这主要与地区所处的自然地理环境有关; 年均大雨侵蚀力主要分布于太行山脉西南麓以及五台山地区, 最大值出现在五台山地区, 年均值达  $799.13 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 而五台山以北的地区年均大雨侵蚀力依然较小, 最小值出现在蔚县地区, 年均值仅为  $390.13 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , 最大值与最小值相差 2.05 倍, 与年均中雨侵蚀力的分布范围相比, 大雨侵蚀力分布范围更为广阔, 这主要与

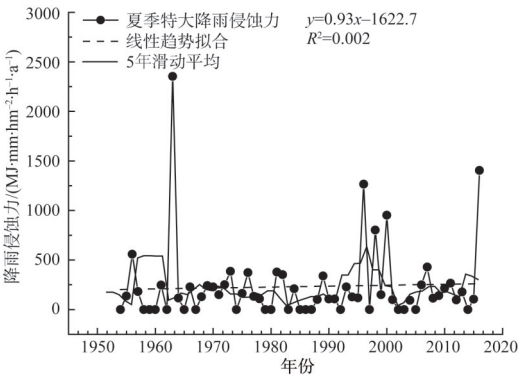


图 11 特大降雨侵蚀力季节变化特征  
Fig. 11 Seasonal variations of erosive force in extreme rainfall

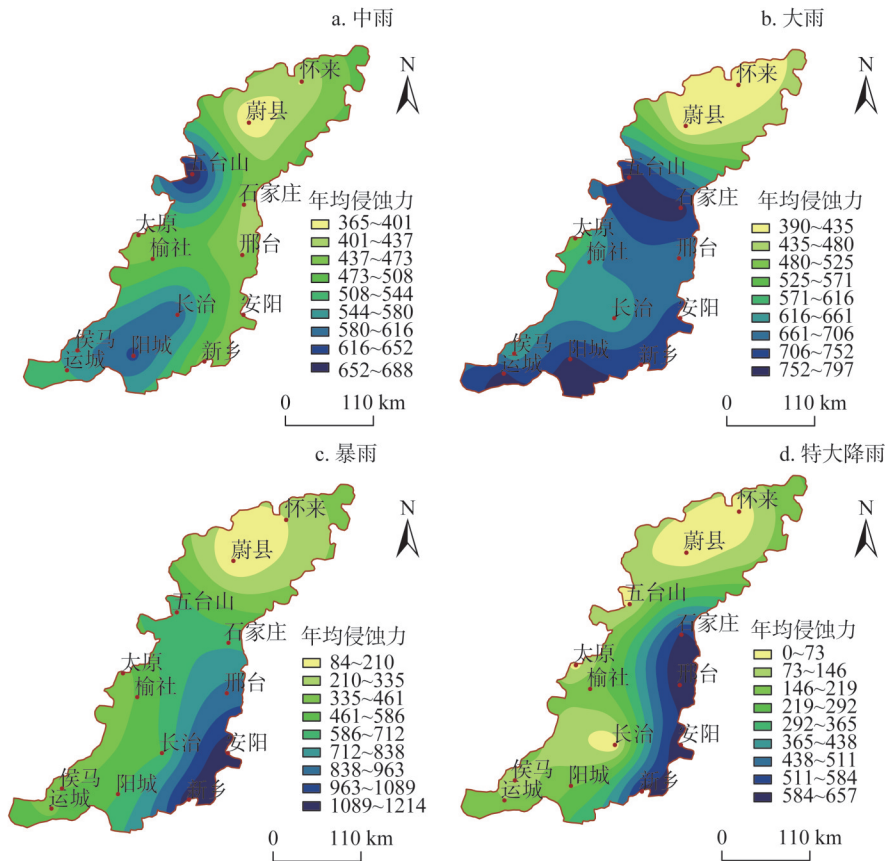


图 12 太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力年际变化空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of interannual variations of rainfall erosivity for different magnitudes in the Taihang Mountains Area



大雨出现的季节以及地形有关,大雨一般出现在6-9月,正好为中国北方降雨最为丰富的时期,同时因暖湿气流的抬升多形成侵蚀性降雨;年均暴雨侵蚀力主要分布于太行山脉的东南部,最大值出现在安阳地区,年均值可达 $1213.92 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而最小值出依然出现在蔚县地区,年均值仅为 $82.87 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,最大值与最小值相差14.65倍,这主要与暖湿气流受山脉的阻挡被迫抬升有关,容易形成侵蚀性降雨,雨量以及雨强均较大;年均特大降雨侵蚀力主要分布于太行山脉东南麓,最大值出现在安阳地区,年均值可达 $622.89 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而最小值依然出现在蔚县地区,其从未发生过特大降雨侵蚀力,其形成原因与暴雨侵蚀力基本一致。表明太行山脉地区各量级降雨侵蚀力总体上随着降雨量级的增大,地区差异性逐渐显著,同时各量级降雨侵蚀力最大值主要分布于太行山脉东南部以及五台山地区,最小值主要分布于地区的东北部。

### 2.2.2 不同量级降雨侵蚀力季节变化分布

太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力季节变化存在显著差异性。如图13所示,中雨侵蚀力季节变化幅度相对较小,春季主要集中于太行山脉西南部,随着夏季雨带的扩展,中雨侵蚀力重心整体向东北部地区进行迁移,春季—夏季以及夏季—秋季其迁移距离分别为32.88 km、58.51 km,而在冬季中雨侵蚀力重心逐渐向西南地区迁移,其迁移的距

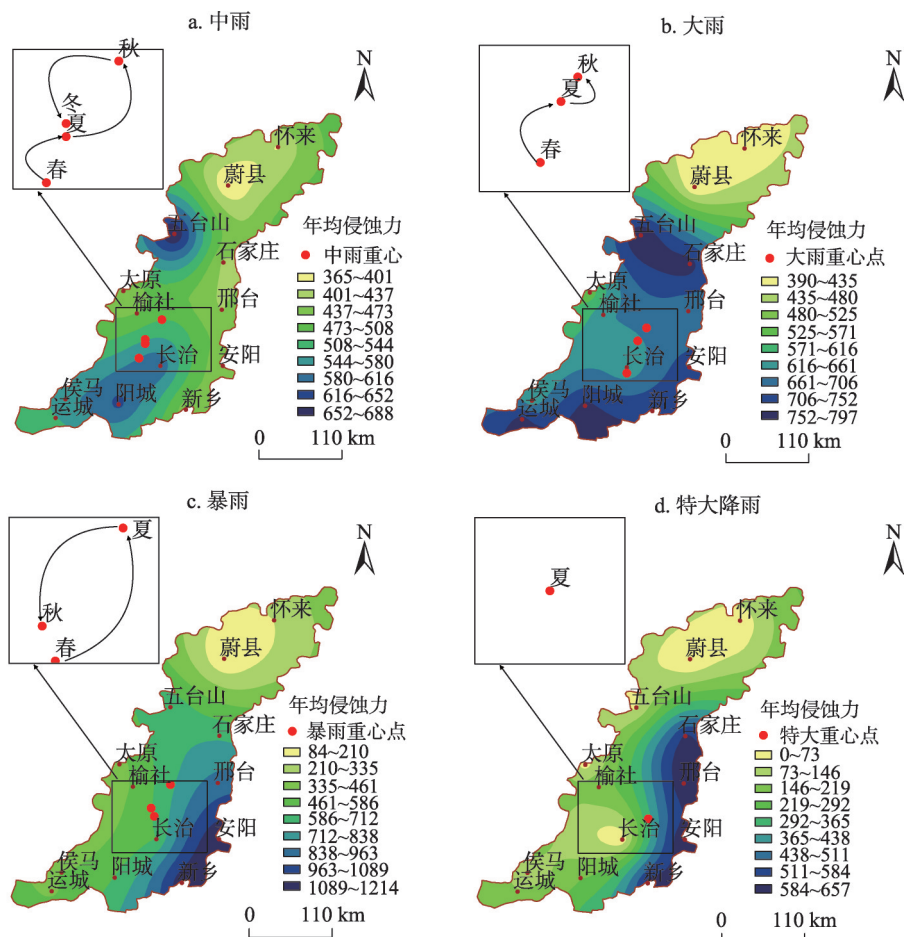


图13 不同量级降雨侵蚀力重心季节迁移轨迹

Fig. 13 Seasonal trajectory of the gravity center of gravity for different magnitudes of rainfall

离为 50.94 km；大雨侵蚀力季节变化幅度相对较大，春季主要集中于太行山脉南部边缘地区，夏季雨带逐渐向内陆以及北部扩展，大雨侵蚀力重心在季节变化上整体向东北部地区进行迁移，春季—夏季以及夏季—秋季其迁移的距离分别为 71.34 km、31.63 km；暴雨侵蚀力季节变化也相对较大，暴雨侵蚀力重心在季节变化上整体向东北部倾斜，春季—夏季以及夏季—秋季其迁移的距离分别为 73.13 km、59.85 km；特大降雨侵蚀力主要集中于夏季的新乡以及邢台地区，降雨侵蚀力的重心偏向于东南部地区。各量级降雨侵蚀力重心迁移距离一定程度上可以反应该时期降雨的分布状况，因此春季—夏季期间，大雨以及暴雨分布差异显著；夏季—秋季期间中雨和暴雨分布存在显著差异，秋季—冬季期间，中雨的空间变化分布存在较大差异。不同量级降雨侵蚀力重心季节性移动一定程度上受季风环流、经纬度、海拔以及地形等因素的影响，太行山脉地区冬春相对干旱，降水主要集中于河谷地带以及山地地区，小量级侵蚀性降雨或非侵蚀性降雨占比大，降雨侵蚀力重心偏南；夏秋季节降水偏多，主要受副热带高压、天气系统以及地形的影响，当副热带高压脊线向北推进至 30°N 时，地区大规模强降雨相继发生，大雨和暴雨侵蚀力逐渐占主导，同时因太行山和燕山山脉迎风面形成的弧形壁垒，副热带海洋气团向北延伸，地形起伏与坡面较陡地区多形成特大降雨，降雨侵蚀力的重心偏北，由此形成一个循环，这种重心迁移的变化特征与冬夏季风的控制时间相符<sup>[24]</sup>。

2.3 不同量级降雨侵蚀力与其他因素相关性分析

降雨侵蚀力一定程度与侵蚀性降雨量、降雨历时、降雨次数以及降雨强度有关。而为了进一步分析太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力的时空变化差异，分别统计了太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力与侵蚀性降雨量、经纬度以及海拔之间的相关性（表4）。太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力与侵蚀性降雨量均呈显著正相关（ $P<0.01$ ），同时大雨和特大降雨侵蚀力分别与纬度、海拔呈显著负相关（ $P<0.05$ ），其他均未通过显著性检验。大雨侵蚀力与纬度呈显著负相关主要与副热带高压脊线的移动有关，随着纬度的增加影响逐渐较小；而特大降雨侵蚀力与海拔呈显著负相关主要与地形以及地势起伏有关，特大降雨往往发生在迎风坡坡面较陡与地势起伏较大的区域，随着高程的增加而增大，当到达一定高度时，空气中的水汽含量逐渐减少，随着高程的增加而降低，雨量的增减与地形高低趋势基本一致<sup>[24]</sup>。

3 结论

（1）太行山脉地区多年来降雨侵蚀力呈现出小幅上升的趋势，在 10 年间上升了

表 4 不同量级降雨侵蚀力及其相关影响因素分析

Table 4 Analysis of rainfall erosivity and its related factors in different grades

不同类型降雨侵蚀力	降雨侵蚀力与其他不同因素的决定系数 $R^2$			
	侵蚀性降雨量	海拔	纬度	经度
太行山区	0.93**	0.29	-0.61*	0.08
中雨	0.89**	0.54	0.41	0.54
大雨	0.96**	0.11	-0.65*	0.40
暴雨	0.96**	0.49	0.51	0.14
特大降雨	0.64**	-0.69**	0.30	0.30

注：\*、\*\*分别表示通过 0.05、0.01 显著性检验。

2.4 MJ·mm·hm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>, 同时存在约20年的主周期和6年的小周期变化, 且在1996年发生显著突变; 中雨和大雨侵蚀力63年间均呈上升趋势, 而暴雨和特大降雨侵蚀力呈下降趋势; 春秋两季主要受中雨和大雨侵蚀力的影响, 而夏季则主要受特大降雨侵蚀力的影响。

(2) 太行山脉地区各量级降雨侵蚀力年际分布总体上随着降雨量级的增大, 地区差异性逐渐增强, 同时各量级降雨侵蚀力最大值主要分布于太行山脉地区东南部以及五台山地区, 最小值主要分布于地区的东北部; 运用重心模型发现各量级降雨侵蚀力重心在春夏季节整体向东部以及东北部地区进行迁移, 秋冬季节则向南部以及西南地区移动, 同时降雨量级越高, 其降雨侵蚀力的重心越靠近东南部地区。

(3) 太行山脉地区不同量级降雨侵蚀力与侵蚀性降雨量均呈显著正相关 ( $P<0.01$ ), 同时大雨和特大降雨侵蚀力分别与纬度、海拔呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 这主要与副热带高压移动、地形、海拔以及自然地理环境等因素有关。

### 参考文献(References):

- [1] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960-2009年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256. [LIU B T, TAO H P, SONG C F, et al. Temporal and spatial trends of rainfall erosivity in china from 1960 to 2009. Geographical Research, 2013, 32(2): 245-256.]
- [2] 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. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159-168. [LAI C G, CHEN X H, WANG Z L, et al. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Pearl River Basin from 1960 to 2012. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 159-168.]
- [3] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington: Agriculture Handbook, 1978.
- [4] BAGHERZADEH A. Estimation of soil losses by universal soil losses equation model using GIS at Mashhad Plain, Northeast of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 2012, 7(1): 211-220.
- [5] 史东, 梅江东, 卢喜平, 等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时空分布特征. 农业工程学报, 2008, 24(9): 16-22. [SHI D, MEI J D, LU X P, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity in Fuling district of Chongqing. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 16-22.]
- [6] 赵平伟, 郭萍. 1980-2013年滇西北地区降雨侵蚀力变化特征. 地理科学, 2015, 35(10): 1306-1312. [ZHAO P W, GUO P. Characteristics of rainfall erosivity in Northwest Yunnan from 1980 to 2013. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1306-1312.]
- [7] 冯若昂, 刘加珍, 陈永金, 等. 山东省多年降雨侵蚀力及其增长率变化分析. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 83-93. [FENG R A, LIU J Z, CHEN Y J, et al. Analysis of rainfall erosivity and its growth rate in Shandong province. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 83-93.]
- [8] YU B. Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36(1): 143-165.
- [9] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 基于重心模型的西南山区降雨侵蚀力年内变化分析. 农业工程学报, 2012, 28(21): 113-120. [LIU B T, TAO H P, SONG C F, et al. Analysis of annual variation of rainfall erosivity in southwest mountainous areas based on gravity center model. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 113-120.]
- [10] 刘春利, 杨勤科, 谢红霞. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征. 环境科学, 2010, 31(4): 850-858. [LIU C L, YANG Q K, XIE H X. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Yanhe River Basin. Environmental Science, 2010, 31(4): 850-858.]
- [11] 汪言在, 苟诗薇. 重庆市降雨侵蚀力空间格局及其变化. 地理科学, 2013, 33(1): 116-123. [WANG Y Z, GOU S W. Spatial pattern and its change of rainfall erosivity in Chongqing. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(1): 116-123.]
- [12] 李薇, 谈明洪. 太行山区不同坡度NDVI变化趋势差异分析. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 509-519. [LI W, TAN

- M H. Analysis of the variation trend of NDVI trends of different slopes in Taihang Mountain Area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4): 509-519.]
- [13] 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. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 278-291. [ZHONG K Y, ZHENG F L. Spatial and temporal changes of rainfall erosivity in the Songhua River Basin from 1960 to 2014. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 278-291.]
- [14] KLEIN TANK A M G, WIJINGAARD J B, VAN ENGELEN A. *Climate of Europe: Assessment of Observed Daily Temperature and Precipitation Extremes*. Knml, De Bilt, Netherlands, 2002.
- [15] 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. 2013-05. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. First national water conservancy survey on soil and water conservation. 2013-05.]
- [16] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日降雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711. [ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Study on the method of calculating rainfall erosivity using daily rainfall. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.]
- [17] 边柳, 高强, 张海军. 河南省降雨侵蚀力空间分布特征. *中国水土保持*, 2009, 1(3): 23-26. [BIAN L, GAO Q, ZHANG H J. Spatial distribution characteristics of rainfall erosivity in Henan province. *Soil and Water Conservation in China*, 2009, 1(3): 23-26.]
- [18] KEO SOKSAMNANG, 何洪鸣, 赵宏飞, 等. 黄土高原50年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 1-7. [KEO S, HE H M, ZHAO H F, et al. Changes of rainfall erosivity and its effects on soil erosion over the past 50 years on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 1-7.]
- [19] 马良, 姜广辉, 左长清, 等. 江西省50余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 61-68. [MA L, JIANG G H, ZUO C Q, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity changes in Jiangxi province for more than 50 years. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(21): 61-68.]
- [20] 史展, 陶和平, 刘斌涛, 等. 基于GIS的岷江流域降雨侵蚀力时空特征分析. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 97-102. [SHI Z, TAO H P, LIU B T, et al. Temporal and spatial characteristics of rainfall erosivity in Minjiang River Basin based on GIS. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2): 97-102.]
- [21] 陈世发. ENSO对韶关市1951-2013年降雨侵蚀力影响研究. *地理科学*, 2016, 36(10): 1573-1581. [CHEN S F. Study on the influence of ENSO on the rainfall erosivity of Shaoguan city from 1951 to 2013. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1573-1581.]
- [22] 宋小燕, 穆兴民, 高鹏, 等. 松花江哈尔滨站近100年来径流量变化趋势. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1803-1809. [SONG X Y, MU X M, GAO P, et al. Trends of runoff variation from 1990 to 2005 at Harbin station of Songhua River. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1803-1809.]
- [23] 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. *地球信息科学学报*, 2018, 20(2): 196-204. [FAN J F, HE H X, GUO B. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in the Yellow River Basin from 1980 to 2015. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(2): 196-204.]
- [24] 李素霞. 河北省太行山迎风区降雨径流特征. *水文*, 2009, 29(3): 93-95. [LI S X. Characteristics of rainfall and runoff in the windward area of Taihang Mountain, Hebei province. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(3): 93-95.]



## Spatial and temporal variations of rainfall erosivity at each level in Taihang Mountain

LI Wei-jie<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>2</sup>

(1. School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** This paper is mainly based on daily rainfall data from 76 meteorological monitoring stations in the Taihang Mountains and its surrounding areas from 1954 to 2016. A simple model is established to simulate the annual rainfall erosivity based on different magnitudes of aggressive annual rainfall. The climatic trend rate, wavelet period analysis, center of gravity model, Co- Kriging interpolation, Mann- Kendall non- parametric trend test and mutation analysis were used to analyze the spatial and temporal variations of rainfall erosivity and their influencing factors. The results show that: (1) The simple model of annual rainfall erosivity in the Taihang Mountains area is  $y=0.182x_1^{1.095}+5.463x_2^{0.982}+9.401x_3^{1.017}+15.258x_4-26.753$ , and the erosivity of rainfall over years showed a slight upward trend, and it increased by  $2.4 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  in 10 years. There is also a major cycle of about 20 a and a small cycle of 6 a, and significant mutations occurred in 1996. The eclipse of moderate rain and heavy rain showed an upward trend in 63 years, while the violent rain and extraordinary rainfall erosivity showed a downward trend. The spring and autumn seasons are mainly affected by moderate and heavy rain erosivity, while summer is mainly affected by excessive rainfall erosivity. (2) The maximum rainfall erosivity of all magnitudes is mainly distributed in the southeastern part of the Taihang Mountains and the Wutai Mountain areas. The minimum is mainly distributed in the northeastern part of the study area. Using the center of gravity model, we found that the gravity center of each magnitude of rainfall migrating migrates to the east and northeast in spring and summer, while that of the autumn and winter seasons migrates to the south and southwest, forming a cycle that is consistent with the control time of the winter and summer monsoons. (3) There was a significant positive correlation between rainfall erosivity and erosive rainfall in different magnitudes in the Taihang Mountains ( $P<0.01$ ). Heavy rain and extraordinarily heavy rainfall erosivity were significantly negatively correlated with latitude and altitude ( $P<0.05$ ). This is mainly related to factors such as subtropical high pressure movement, topography, elevation and natural geographical environment.

**Keywords:** rainfall erosivity at each level; center of gravity model; spatial and temporal variations; Taihang Mountains