

引用格式: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 J F, He H X, Guo B. 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.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170411

1980-2015年黄河流域降雨侵蚀力时空变化分析

范俊甫^{1,2},何惠馨¹,郭兵¹

1. 山东理工大学建筑工程学院,淄博 255049;2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101

Temporal and Spatial Variations of Rainfall Erosivity in Yellow River from 1980 to 2015

FAN Junfu^{1,2*}, HE Huixin¹, GUO Bing¹

1. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Yellow River is the second longest river in China. The soil erosion and sandstorm harms are the severe problems for the management of Yellow River. Rainfall erosivity is a reflection of potential soil erosion caused by rainfall and an important factor of soil erosion models. The research about rainfall erosivity in Yellow River is critical for the preservation and management of Yellow River. This research used daily rainfall data from 166 meteorological stations in Yellow River from 1980 to 2015. The rainfall erosivity was calculated by the daily rainfall erosivity model. It is necessary to use area partition because differences of the climate factors, i.e. rainfall, are significant in a river basin. The annual variation of rainfall erosivity was discussed based on PCA, isodata cluster and maximum likelihood classification method which were used to area partition after the ordinary kriging method, and the gravity center model. The gravity center can be used to reveal migration direction of the rainfall erosivity. The results showed that rainfall erosivity was quite different in different zones of Yellow River. The minimal value of the erosivity was $200 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and the maximum value was $3000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The rainfall erosivity of Yellow River had an increase from the northwest to the southeast. The zones with large rainfall erosivity also had an intense variation. The gravity center of rainfall erosivity in some zones which included Xining and Huhehaote, had a migration towards the northeast. While some zones which included Taiyuan and Xi'an, had a migration toward the southwest. The migration area of gravity center in each zone dwindled from the northwest to the southeast in temporal and spatial variations. The variety of the same zone's rainfall distribution in different years had a decrease from the northwest to the southeast.

收稿日期 2017-09-04;修回日期:2017-11-27.

基金项目 :国家自然科学基金项目(41501425);国家重点研发计划项目(2017YFB0503500);山东省重点研发计划项目(2016GSF122006);山东省高等学校科技计划项目(J16LH03);山东理工大学青年教师发展支持计划项目(4072-115016);资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41501425; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503500; Key Research and Development Program of Shandong Province, No.2016GSF122006; Project of Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program, No.J16LH03; Young Teacher Development Support Program of Shandong University of Technology, No.4072-115016; State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System.]

作者简介 范俊甫(1985-),男,博士,讲师,研究方向为高性能地学计算与城市环境遥感。E-mail: fanjf@sdut.edu.cn

Key words: rainfall erosivity; Yellow River; gravity center model; annual variation

***Corresponding author:** FAN Junfu, E-mail: fanjf@sdut.edu.cn

摘要: 本文利用1980–2015年黄河流域及周边166个气象站点36 a的降雨资料,采用日降雨侵蚀力计算模型,对克里金插值后的栅格数据,通过利用主成分分析法、isodata 聚类和最大似然法实现区域划分,并在此基础上应用重心模型研究了黄河流域降雨侵蚀力的时空变化。研究表明:黄河流域内不同区域的年降雨侵蚀力差异较大,最小的区域在 $200 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右变化,最大的区域可达 $3000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,年降雨侵蚀力具有由西北向东南递增的趋势。年降雨侵蚀力大的区域其侵蚀力值在不同年份中波动范围也大。西宁、呼和浩特等所在的一区、二区和三区的年降雨侵蚀力的重心总体上呈现向东北方迁移趋势。太原、西安所在的四区、五区其重心总体上呈现向西南方迁移趋势,其年降雨侵蚀力重心迁移范围小,重心点分布更紧密。各区域年降雨侵蚀力重心的迁移范围在空间和时间尺度上总体呈现由西北向东南方向逐渐缩小趋势。

关键词: 降雨侵蚀力;黄河流域;重心模型;年际变化

1 引言

降雨是影响水土流失的主要动力因素之一,降雨侵蚀力作为反映降雨对土壤侵蚀影响的潜在能力,其时空分布的定量研究是进行土壤侵蚀评价的基础。正确评估降雨侵蚀力,对于土壤侵蚀预测、小流域综合治理、水土保持措施优化具有重要意义^[1]。由 Wischmeier 等^[2]提出的 EI_{30} 降雨侵蚀力指标已在世界范围得到广泛应用,但该指标依赖于历史降雨资料的统计分析,需至少有 20 a 以上的降雨资料才能保证其计算精度。中国降雨侵蚀力指标的研究从 20 世纪 80 年代开始,现已取得了很多有意义的研究成果^[3]。众多学者针对不同研究区的实际情况建立了相应的降雨侵蚀力的简易算法,如史志华^[4]等基于武汉市的降雨特点,建立了基于日降雨量的降雨侵蚀力模型;周伏建等^[5]建立了基于月雨量的降雨侵蚀力模型,为中国南方的降雨侵蚀力指标的研究提供了借鉴;章文波等^[6]提出了基于日降雨量的降雨侵蚀力模型,并给出了参数估算方法,计算精度较高。

黄河是中国的第二大河流,地处干旱、半干旱、半湿润区^[7],流域范围广、地貌差异大。流域内黄土高原地区水土流失严重,北部长城内外风沙区风蚀强烈,严重的水土流失和风沙危害,使该区域的生态环境持续恶化^[8]。现有的针对黄河流域降雨侵蚀力的研究主要集中在对黄河流域内水蚀区的研究,如蔺明华等^[9]基于陕西黄河流域水蚀区建立了相应的土壤侵蚀模型;李秀霞等^[10]应用信息熵原理,定量分析了黄河水蚀区四级流域尺度上土壤侵蚀过程的空间尺度效应。目前,针对黄河全流域的降雨侵蚀力的研究相对较少。本文利用基于日降雨量的侵蚀力模型结合重心模型,研究黄河流域降

雨侵蚀力的变化,对制定黄河流域防治土壤侵蚀对策具有积极作用,可为黄河流域制定土地利用合理规划和控制水土流失提供参考依据。

2 数据源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域位于北纬 $32^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 、东经 $96^{\circ} \sim 119^{\circ}$,西起巴彦喀拉山,东临渤海,南至秦岭,北抵阴山,流域面积 79.5 万 km^2 ^[11]。黄河流域幅员辽阔,属于大陆性季风气候区,受大气环流和季风环流影响,气候比较复杂,流域内不同地区降水差异较大^[12]。多年平均降水量为 460 mm ,受地形等因素的影响,降水分布由东南向西北递减^[13]。

2.2 数据源

本研究选取了1980–2015年黄河流域区内90个气象站以及其周边地区79个气象站的逐日降雨量数据(图1)。剔除2个部分长度不足36年和1个海拔

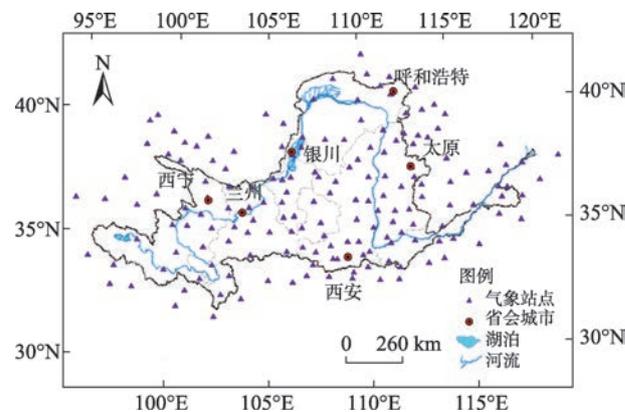


图1 黄河流域气象站点分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Yellow River

值异常的站台数据。数据由中国气象科学数据共享服务网平台提供(<http://data.cma.cn/>),其质量可靠。

2.3 研究方法

2.3.1 区域划分

黄河流域范围广阔,集水面积 752 443 km²,因流经不同的气候带和地貌单元,全流域自然条件变化很大^[8]。孔峰等^[14]研究表明,中国的总降雨雨量从东南沿海地区向西北内陆呈现“增-减-增”的变化趋势,总降雨雨日呈现“东南增加-西北减少”的空间分异格局。周祖昊等^[15]在研究黄河流域的日降雨时间上向下尺度化模型时,将黄河流域分成 5 个大强度降雨区。因此,在黄河流域降水分布不均、差异显著的前提下,若以全流域范围作为研究对象,难以细致的把握降雨侵蚀力在地理空间上的变化。本文通过对黄河流域 1980-2015 年共 36 年的逐日降雨数据进行计算得到降雨侵蚀力数据,采用克里金插值方法进行未知区域数值估计。克里金插值方法的空间分辨率为 1 km,投影为阿伯斯投影,选用 58 个站点数据对插值结果进行验证,相对误差统计如图 2 所示,总体插值精度基本满足要求,平均相对误差为 18.73%。借助主成分分析方法获取 isodata 聚类分析方法的分类数目,运用 isodata 聚类分析方法获取自然像元分组的特征,最后利用最大似然法将黄河流域划分为 5 个特征区域。本文的最大似然分类法是根据给定的属性值为每个类计算出像元属于该类的概率,将像元分配给概率最大的那个类。此概率和权重逻辑的基础是贝叶斯决策规则。各像元和类别的实际概率值是通过各类别的平均值和协方差矩阵确定的^[16]。

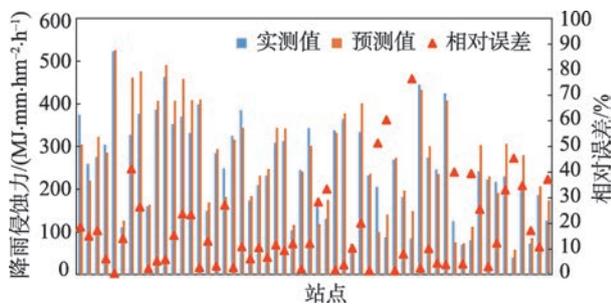


图 2 克里金插值结果验证

Fig. 2 The verification of Kriging interpolation

2.3.2 降雨侵蚀力计算

降雨侵蚀力是表征降雨-侵蚀背景的经典特征指标,传统可采用 EI₃₀公式计算次降雨侵蚀力。但

由于很难获取各气象站较长年份的次降雨过程,研究中选择采用气象站常规降雨观测数据建立的简易算法作为计算公式^[13]。已有的研究表明,日降雨量比月、年降雨量提供更多的降雨特征信息,利用日降雨资料计算的降雨侵蚀力结果精度较月、年尺度雨量资料要高^[17]。本文采用第一次全国水利普查水土保持专项普查使用的降雨侵蚀力估算方程^[18],此方程由章文波等^[19-20]提出的降雨侵蚀力模型改进而来,其公式如下:

$$\bar{R}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \left(\alpha \sum_{j=1}^M P_{d_{ij}}^\beta \right) \quad (1)$$

$$\alpha = 21.239\beta^{-7.3967} \quad (2)$$

$$\beta = 0.6243 + \frac{27.346}{\bar{P}_{d_0}} \quad (3)$$

$$\bar{P}_{d_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{24} \sum_{j=1}^M P_{d_{ij}} \quad (4)$$

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_k \quad (5)$$

式中: \bar{R}_k 为第 k 个半月的降雨侵蚀力/ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; N 为计算数据时间序列长度; M 为第 i 年第 k 个半月侵蚀性降雨的次数; $P_{d_{ij}}$ 为第 i 年第 k 个月第 j 次侵蚀性降雨量/ mm ,取日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 作为侵蚀性降雨; \bar{P}_{d_0} 为侵蚀性降雨的多年平均值/ mm ; \bar{R} 为多年平均降雨侵蚀力/ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3.3 重心模型

重心概念来源于牛顿力学,是指区域空间上存在某一点,在该点的前后左右各个方向的力量对比保持相对平衡^[21]。重心是在动态地权衡了各个地区作用力大小以后表现为向作用力大的方向移动,移动的方向即为变量格局变化的方向^[22]。决定重心主要因素有:各地的地理位置和属性变化^[23]。本文采用刘斌涛等^[24]研究西南山区降雨侵蚀力变化所使用的降雨侵蚀力重心模型,公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{X} &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \\ \bar{Y} &= \frac{\sum_{i=1}^n Y_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: \bar{X} 、 \bar{Y} 为重心坐标; X_i 、 Y_i 为第 i 个站台的经纬度坐标; R_i 为第 i 个站台月或年的降雨侵蚀力/ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3 结果与分析

3.1 降雨侵蚀力分区

通过使用ArcGIS 10.2中的普通克里金法对36 a的黄河流域及周边地区的降雨侵蚀力进行插值,运用主成分分析方法实现插值后栅格数据的降维,其各个主成分的特征值、贡献率及累计贡献率如表1所示。本文选取第一主成分量至第五主成分量,累计贡献率达98.30%作为isodata聚类分析方法中类数目划分的依据。通过最大似然法将降维后的栅格数据按照isodata聚类分析提供的特征值进行像元分类,最终实现黄河流域5个降雨侵蚀力区域的划分,如图3所示。这5个区域的划分与黄河流域气候特征、降雨、地势变化分布基本一致,总体呈现西北方地势高、干燥少雨蒸发量大,东南方地势低、温暖湿润降雨充沛。

表1 主成分分析中特征值、贡献率及累计贡献率

Tab. 1 Eigenvalue, percent contribution and accumulative eigenvalue in PCA

变量	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
第一主成分量	5 091 383.0644	93.5312	93.5312
第二主成分量	114 433.1599	2.1022	95.6334
第三主成分量	65 762.5568	1.2081	96.8415
第四主成分量	43 024.3090	0.7904	97.6319
第五主成分量	36 119.9579	0.6635	98.2955
第六主成分量	18 727.6496	0.3440	98.6395
...

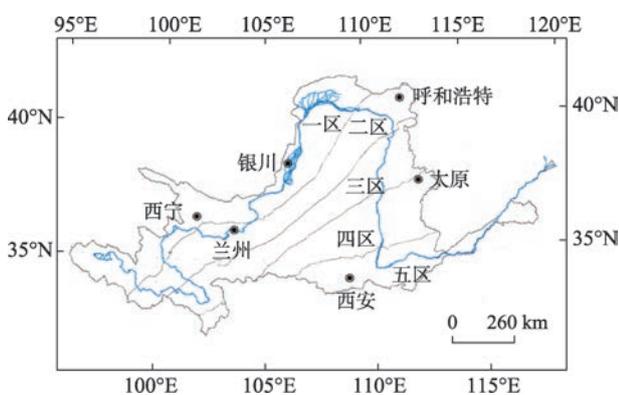


图3 黄河流域分区示意图

Fig. 3 Area partition in Yellow River

3.2 降雨侵蚀力年际变化特征

通过降雨侵蚀力计算公式获得黄河流域范围内90个气象站1980-2015年共36 a的年降雨侵蚀力值,利用克里金空间插值法获得上述36 a逐年份的黄河流域降雨侵蚀力空间分布图。由图4可知,在

空间上,降雨侵蚀力在黄河流域的分布呈现由西北向东南逐渐增大,这和黄河流域的降水分布相类似。由图5可知,1980-2015年一区的年降雨侵蚀力常年小于 $400 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,且年际间波动范围较小;二区的年降雨侵蚀力基本保持在 $400 \sim 800 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;三区的年降雨侵蚀力总体上处于 $800 \sim 1200 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,但自2000年有出现逐年递增的情况,在2013年逼近 $1600 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;而四区和五区的年降雨侵蚀力基本常年大于 $1000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,五区的降雨侵蚀力波动幅度最大,如年降雨侵蚀力最小的时候接近 $1000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,最大时候超过 $3000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。现将1980-2015年间各年份的年降雨侵蚀力重心点分布较为零散的区域定义为重心迁移活跃区,包括一区和二区,将重心点分布比较紧密的区域定义为重心迁移缓滞区,包括三区、四区和五区。

3.3 黄河流域及各分区降雨侵蚀力特征

利用ArcGIS 10.2中的最小边界几何工具,获得1980-2015年各时间段内各区年降雨侵蚀力重心的最小面积外接矩形作为重心的迁移范围,其面积统计如图6所示。1980-2015年,从一区至五区的年降雨侵蚀力重心的外接矩形面积处于先递减后增大的变化状态,一区的年降雨侵蚀力重心的活动范围最大为 8007.34 km^2 ,四区的年降雨侵蚀力重心的活动范围最小为 1698.67 km^2 。一区在1984-1994年和2008-2015年,这2个时间段内的重心迁移范围最小,可见该时期内其区域内的降雨分布相对于其他时间段而言差异最小;而二区只在1987-1994年出现了较小的重心迁移范围,仅有 981.08 km^2 ;三区、四区和五区从1980-2015年各个时间段的重心迁移范围一直都保持在 1000 km^2 左右,仅有四区在1994-2001年出现了较大的重心迁移范围,达 1601.46 km^2 。对比各个时间段可见,一区作为5个区域内年降雨侵蚀力最小的区域,其各时间段内的年降雨侵蚀力重心迁移范围的变化最为显著,其年降雨侵蚀力重心的外界矩形面积最大达 5422.17 km^2 ,最小仅有 1135.13 km^2 。而年降雨侵蚀力相对较大的区域,如三区、四区和五区,其各时间段内的年降雨侵蚀力重心迁移范围的变化则相对缓和。

3.3.1 重心迁移活跃区

由于重心点存在分布范围广,运动轨迹复杂多变等特点,为便于分析,按照年降雨侵蚀力重心分布的位置对每个区域再进行细分,在水平方向分成东区和西区,在垂直方向分成南区和北区(图7(a))。

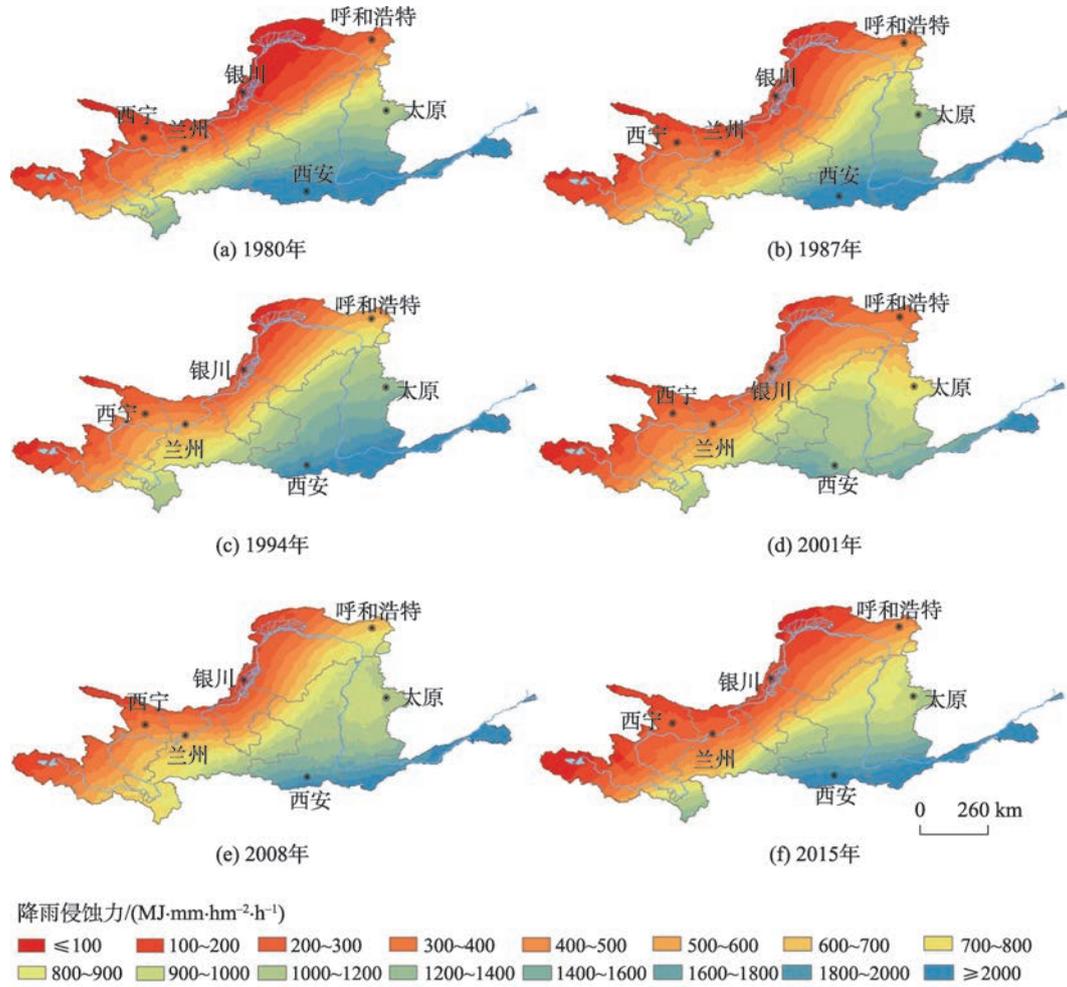


图4 1980-2015年黄河流域年降雨侵蚀力空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual rainfall erosivity from 1980 to 2015 in Yellow River

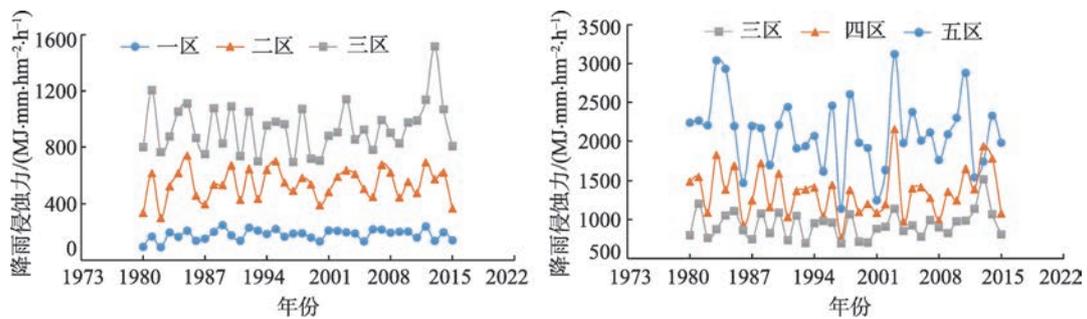


图5 1980-2015年各区年降雨侵蚀力均值

Fig. 5 Average annual rainfall erosivity from 1980 to 2015 in different zones

由图7(b)可知,1980-2015年一区的年降雨侵蚀力重心总体往东北方向迁移,重心的迁移距离最大达85.65 km,最小只有6.53 km;而1987-1994年的年降雨侵蚀力重心却出现往西南方迁移的现象。

由图8可知,1980-2015年西区的年降雨侵蚀力比重总体处于下降趋势,一区的年降雨侵蚀力重

心总体上处于往东移动的状态。由图9(a)、(b)可知,1980年北区年降雨侵蚀力的比重主要受重心点附近的门源地区的年降雨侵蚀力的影响,而1994年,北区银川以北区域的年降雨侵蚀力比重迅速增加,远高于其在1980年的比重,这极大地影响了1994年的年降雨侵蚀力重心点的空间位置,使之重

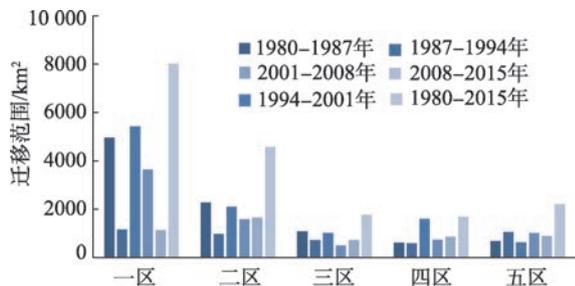


图6 1980-2015年各区年降雨侵蚀力重心的迁移范围
Fig. 6 The area of the gravity center migration of each zone from 1980 to 2015

心点比1980年更偏北。

对比一区,二区的降雨侵蚀力重心迁移趋势更为明显,总体上一直向东北方迁移,如图10所示。其中,1980-1987年迁移变化最大为106.37 km,2008-2015年迁移距离最小为12.42 km;1980-1987年其迁移运动范围也最大达2276.72 km²,1987-1994年的迁移范围最小为981.08 km²。可见,1980-1987年二区的降雨侵蚀力重心点分布最为松散,该时期内的降雨分布差异较大;而1987-1994年二区的重心点分布最为集中,可见该时期内降雨分布差异较小。

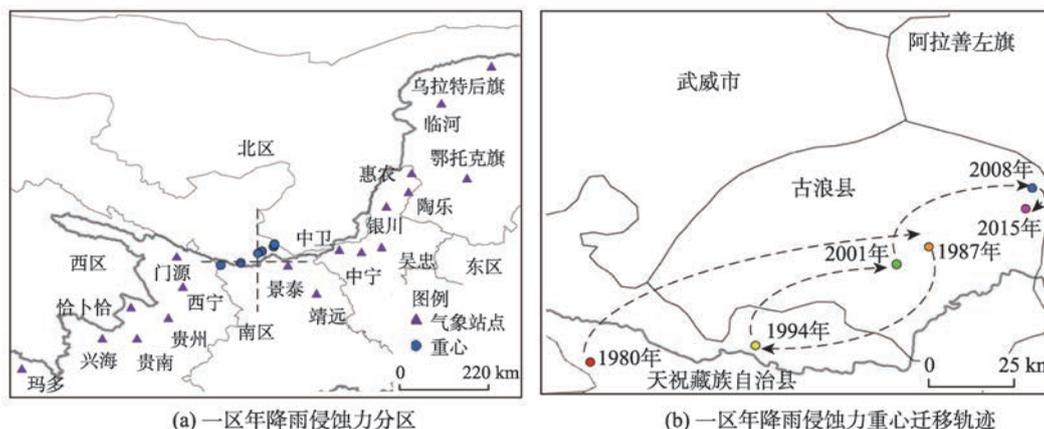


图7 一区年降雨侵蚀力分区及重心轨迹图

Fig. 7 Area partition and track of the gravity center of annual rainfall erosivity in Zone One



图8 一区年降雨侵蚀力比重分布
Fig. 8 Percentage of annual rainfall erosivity of different parts in Zone One

3.3.2 重心迁移缓滞区

作为紧邻重心迁移活跃区的中间地带,三区的重心迁移变化不如四区五区缓和,其在东西方向和南北方向的迁移变化相对更明显(图11)。1980-1987年,年降雨侵蚀力重心迁移距离最大,其迁移运动范围也最大,达1081.49 km²;1987-1994年其迁移距离最小,仅有7.51 km。由1980-2008年重心的迁移运动轨迹可见,三区各地的降雨比重在此期间

变化差异较大,这可能和季节反常、降水不平衡有密切关系。

由于四区、五区的降雨侵蚀力重心迁移变化主要集中在水平方向,所以主要进行东西方向的分析(图12)。如图13所示,四区作为全流域重心点分布最为集中的区域,1980-1994年其东区的降雨侵蚀力比重处于上升阶段,使降雨侵蚀力重心也一直处于往东偏移的状态。但2001年,西区所占的比重迅速下降至62.05%,低于1980年的比重,这使四区的降雨侵蚀力重心向西方向偏移,且位置要比1980年的重心点位置更偏西。这一点在重心迁移范围上也有显现,1994-2001年的重心迁移范围猛增至1601.46 km²,远远高于其他时期内的迁移范围值(表2)。可见,此期间内,四区的降雨分布出现了较为显著的变化。

五区的降雨分布差异一直都较小,1980-1987年五区的年降雨侵蚀力重心迁移距离为全流域最小只有4.25 km。1980-2015年五区的年降雨侵蚀力重心的迁移范围一直保持在600~1000 km²左右,虽存在增减趋势,但总体变化较为平稳。

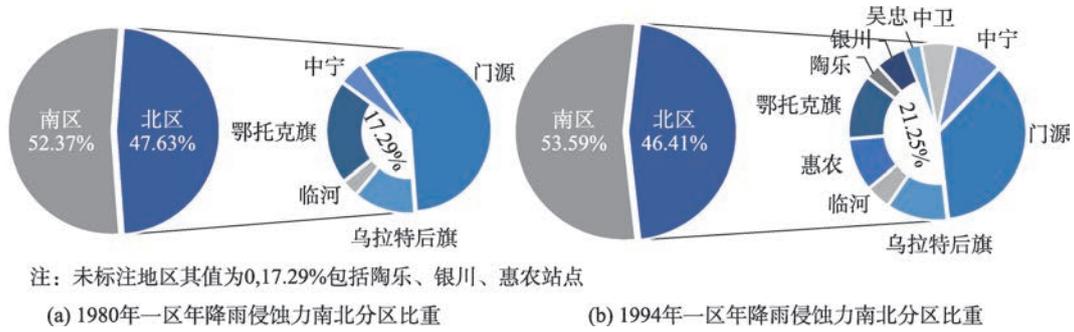


图9 一区各地降雨侵蚀力比重详图

Fig. 9 Percentage of annual rainfall erosivity of different cities in Zone One

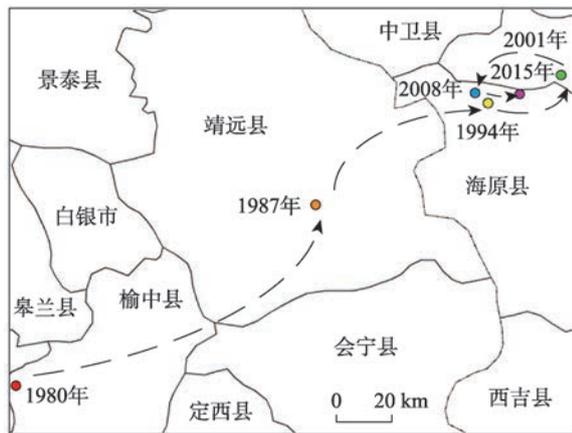


图10 二区年降雨侵蚀力重心轨迹图

Fig. 10 Track of the gravity center of annual rainfall erosivity in Zone Two

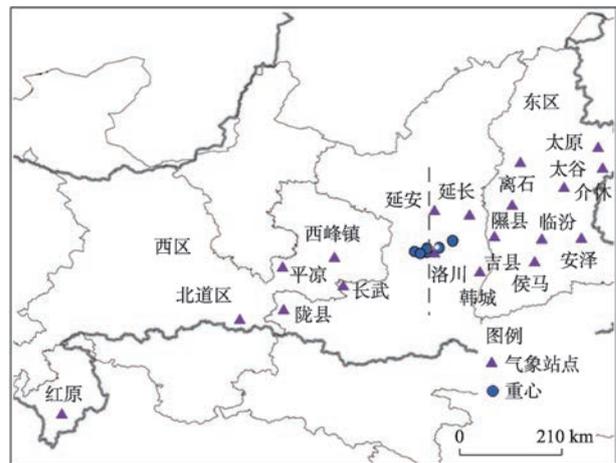


图12 四区年降雨侵蚀力分区

Fig. 12 Area partition of annual rainfall erosivity in Zone Four

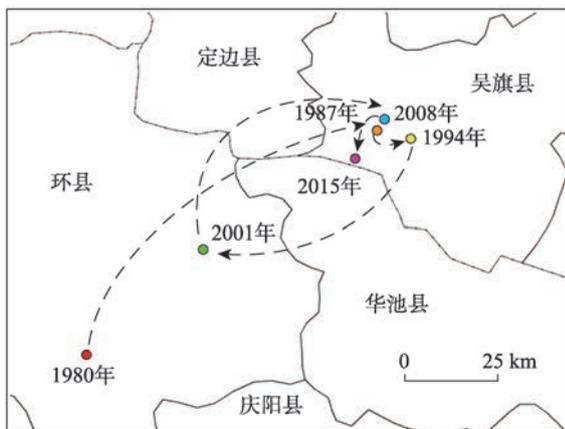


图11 三区年降雨侵蚀力重心轨迹图

Fig. 11 Track of the gravity center of annual rainfall erosivity in Zone Three

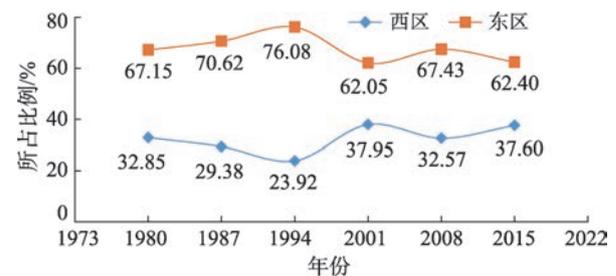


图13 四区年降雨侵蚀力比重分布

Fig. 13 Percentage of annual rainfall erosivity of different parts in Zone Four

4 结论

黄河流域内年降雨侵蚀力差异较大。黄河流域的年降雨侵蚀力呈现由西北向东南增加的趋势，

这和流域内降水分布情况相一致。西宁、银川所在的一区属于历年来降雨侵蚀力最弱的区域，其年降雨侵蚀力常年在 $200 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右波动，而西安所在五区属于降雨侵蚀力最强的区域，其年降雨侵蚀力常年大于 $1000 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随着黄河流域的年降雨侵蚀力的增大，其波动幅度相应增大。西安所在五区年际间波动尤其剧烈，而西宁、银川所在的一区历年降雨侵蚀力最小，其波动幅度也最小。

表2 四区、五区年降雨侵蚀力重心迁移轨迹

Tab. 2 Track changes of the gravity center migration of annual rainfall erosivity in Zone Four and Zone Five

区域	年份	经度	纬度	迁移方向	迁移距离/km	迁移范围/km ²
四区	1980	109°20'589"	35°49'13"			
	1987	109°34'59"	35°53'58"	北偏东 63.79°	22.56	626.61
	1994	109°50'09"	36°01'34"	北偏东 54.70°	26.65	588.60
	2001	109°7'34"	35°50'3"	南偏西 68.27°	66.48	1601.46
	2008	109°21'14"	35°53'10"	北偏东 70.60°	21.04	743.60
	2015	109°14'01"	35°47'54"	南偏西 44.56°	14.71	860.04
五区	1980	111°28'39"	34°53'40"			
	1987	111°26'04"	34°52'37"	南偏西 61.02°	4.25	686.86
	1994	111°36'18"	34°54'59"	北偏东 70.50°	15.59	1059.25
	2001	111°18'51"	34°51'15"	南偏西 70.32°	26.66	641.47
	2008	111°25'53"	34°53'33"	北偏东 62.01°	11.33	1018.82
	2015	111°09'45"	34°34'26"	南偏西 64.76°	25.59	905.96

黄河流域各区的重心运动轨迹各不相同。1980-2015年,黄河流域内西宁、呼和浩特等所在的一区、二区和三区其年降雨侵蚀力的重心总体上呈现向东北方迁移的趋势,而太原、西安所在的四区、五区其重心总体上呈现向西南方迁移的趋势,且其轨迹更加迂回。黄河流域内重心迁移的范围呈现出由西北向东南方逐渐减小的趋势。黄河流域内西宁所在的一区,不同年份间降雨分布的差异最为显著,致使其重心迁移范围最大,其不同时间段内的迁移范围差异也最大。太原、西安所在的四区、五区其年降雨侵蚀力重心迁移的范围小,重心点的分布更紧密,其不同年份间降雨分布的差异无论在空间尺度还是时间尺度上都更小。

参考文献 (References):

- [1] 任洪玉,刘惠英.三峡库区大宁河流域降雨侵蚀力的时空变化[J].水土保持通报,2016,36(3):1-7. [Ren H Y, Liu H Y. Temporal-spatial variations of rainfall erosivity in Daning River watershed of Three Gorges Reservoir Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(3):1-7.]
- [2] 刘惠英,王永文,张平仓.三峡库区龙河流域降雨侵蚀力的时空分布特征[J].长江科学院院报,2016,33(4):22-26. [Liu H Y, Wang Y W, Zhang P C. Temporal-spatial variations of rainfall erosivity of Longhe River watershed in Three Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016,33(4):22-26.]
- [3] 花利忠,贺秀斌,颜昌宙,等.三峡库区大宁河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2008,28(4):22-25. [Hua L Z, He X B, Yan C Z, et al. Temporal-spatial variations of rainfall erosivity in Daning River watershed of

Three Gorges Reservoir Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008,28(4):22-25.]

- [4] 史志华,郭国先,曾之俊,等.武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究[J].中国水土保持,2006(1):22-24. [Shi Z H, Guo G X, Zeng Z J, et al. Daily rainfall erosivity model and characteristics of rainfall erosivity in Wuhan[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(1):22-24.]
- [5] 周伏建,陈明华,林福兴,等.福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J].福建水土保持,1989(2):58-60. [Zhou F J, Chen M H, Lin F X, et al. A primary study of the index of rainfall erosivity in Fujian Province[J]. Fujian Soil and Water Conservation, 1989(2):58-60.]
- [6] 张玉娟,王延亮,刘丹丹.土壤侵蚀时空动态分析——以黑龙江省宾县为例[J].测绘通报,2014(7):102-104. [Zhang Y J, Wang Y L, Liu D D. Spatial-temporal dynamic analysis of soil erosion sensitivity: Taking Bin county, Heilongjiang Province as an example[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(7):102-104.]
- [7] 王雁,丁永建,叶柏生,等.黄河与长江流域水资源变化原因[J].中国科学:地球科学,2013,43(7):1207-1219. [Wang Y, Ding Y J, Ye B S, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008[J]. Science China: Earth Sciences, 2013,43(7):1207-1219.]
- [8] 张光辉.黄河流域降雨侵蚀力对全球变化的响应[J].山地学报,2005,23(4):4420-4424. [Zhang G H. Response of rainfall erosivity to climate change in Yellow River basin [J]. Journal of Mountain Science, 2005,23(4):4420-4424.]
- [9] 蔺明华,张金慧,党维勤.黄河流域陕西片土壤侵蚀预报模型研究[J].中国水土保持,2003(4):19-20. [Lin M H, Zhang J H, Dang W Q. Study on soil erosion forecasting

- model for Shaanxi region of the Yellow River basin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(4):19-20.]
- [10] 李秀霞,李天宏,倪晋仁.黄河流域水蚀区土壤侵蚀空间尺度效应分析[J].*地理科学进展*,2008,27(6):49-56. [Li X X, Li T H, Ni J R. Analysis on spatial scaling effects of water erosion in the Yellow River basin[J]. *Progress in Geography*, 2008,27(6):49-56.]
- [11] 张亚玲,苏惠敏,张小勇. 1998-2012年黄河流域植被覆盖变化时空分析[J].*中国沙漠*,2014,34(2):597-602. [Zhang Y L, Su H M, Zhang X Y. The spatial-temporal changes of vegetation restoration in the Yellow River basin from 1998 to 2012[J]. *Journal of Desert Research*, 2014,34(2): 597-602.]
- [12] 常军,王永光,赵宇,等.近50年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J].*高原气象*,2014,33(1):43-54. [Chang J, Wang Y G, Zhao Y, et al. Characteristics of climate change of precipitation and rainy days in the Yellow River basin during recent 50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2014,33(1):43-54.]
- [13] Liu L, Liu Z, Ren X, et al. Hydrological impacts of climate change in the Yellow River Basin for the 21st century using hydrological model and statistical downscaling model[J]. *Quaternary International*, 2011,244(2):211-220.]
- [14] 孔锋,方建,吕丽莉,等.1961-2015年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征[J].*热带地理*,2017,37(4):473-483. [Kong F, Fang J, Lv L L, et al. Tendency and fluctuation of different rainfall intensities in China during 1961-2015 [J]. *Tropical Geography*, 2017,37(4):473-483.]
- [15] 周祖昊,王浩,贾仰文,等.缺资料地区日降雨时间上向下尺度化方法探讨——以黄河流域为例[J].*资源科学*, 2005,27(1):92-96. [Zhou Z H, Wang H, Jia Y W, et al. Temporal downscaling of daily precipitation in lack-data watershed: A case study in Yellow River[J]. *Resources Science*, 2005,27(1):92-96.]
- [16] Esri Company. ArcGIS帮助(10.2、10.2.1和10.2.2) (2014/5/10)[http://resources.arcgis.com/zh-cn/help/main/10.2/index.html#na/009z000000q9000000/\[EB/OL\]](http://resources.arcgis.com/zh-cn/help/main/10.2/index.html#na/009z000000q9000000/[EB/OL]) [2017/11/7]
- [17] 张革,刘德富,宋林旭,等.香溪河流域降雨侵蚀力特征及简易算法初步研究[J].*水土保持研究*,2013,20(5):7-12. [Zhang G, Liu D F, Song L X, et al. Rainfall erosivity characteristics and simple estimation method in Xiangxi River watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013,20(5):7-12.]
- [18] 李智广,刘宪春,刘建祥,等.第一次全国水利普查水土保持普查方案[J].*水土保持通报*,2010,30(3):87-91. [Li Z G, Liu X C, Liu J X, et al. Plan of soil and water conservation survey in national census for water resources[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010,30(3):87-91.]
- [19] 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. [Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002,22 (6):705-711.]
- [20] 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 W B, Xie Y, Liu B Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003,21(1):33-40.]
- [21] 孙根年,杨忍,姚宏.基于重心模型的中国入境旅游地域结构演变研究[J].*干旱区资源与环境*,2008,22(7):150-157. [Sun G N, Yang R, Yao H. Study on the regional structure change of Chinese inbound tourism based on the gravity model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008,22(7):150-157.]
- [22] 郑昭彦.基于重心模型的浙江省入境旅游市场的地域结构变动分析[J].*浙江师范大学学报(自然科学版)*,2012, 35(1):115-120. [Zheng Z Y. Study on the regional structure change of inbound tourism in Zhejiang Province based on the gravity model[J]. *Journal of Zhejiang Normal University(Natural Sciences)*, 2012,35(1):115-120.]
- [23] 樊杰.中国农村工业化的经济分析及省际发展水平差异[J].*地理学报*,1996,51(5):398-407. [Fan J. An analysis of the economic features and regional difference of China's rural industrialization[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(5):398-407.]
- [24] 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[J].*农业工程学报*,2012,28(21):113-120. [Liu B T, Tao H P, Song C F, et al. Study on annual variation of rainfall erosivity in southwest China using gravity center model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(21):113-120.]