

1961—2019年黄河流域降雨侵蚀力时空变化特征分析

姬兴杰^{1,2}, 刘美³, 吴稀稀⁴, 丁亚磊⁵, 朱业玉²

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2. 河南省气候中心, 郑州 450003; 3. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 4. 洛阳市气象局, 洛阳 471003; 5. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 请研究基于黄河流域317个气象站1961—2019年逐日降雨资料, 采用日降雨侵蚀力计算模型计算各站点降雨侵蚀力, 统计分析了流域降雨侵蚀力的时空分布特征及其与地理因子和气象因子的关系, 从总体趋势角度综合探讨导致土壤水蚀加剧的原因, 以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供技术支持。结果表明: 1) 黄河流域1961—2019年平均降雨侵蚀力为1 223.1 MJ·mm/(hm²·h·a), 整体呈不显著下降趋势, 下降速率为每10a下降6.71 MJ·mm/(hm²·h·a)。降雨侵蚀力夏高冬低, 夏季降雨侵蚀力占全年的61.3%, 冬季仅占0.3%。2) 黄河流域多年平均降雨侵蚀力值的分布范围为33.0~3 550.6 MJ·mm/(hm²·h·a), 空间分布呈从西北到东南递增的规律。3) 降雨侵蚀力与各地理因子均呈极显著相关关系, 其中与经度和坡度呈正相关, 相关系数分别为0.587和0.164 ($n=317, P<0.01$), 与纬度和海拔高度呈负相关, 相关系数分别为-0.498和-0.490 ($n=317, P<0.01$); 降雨侵蚀力与降雨量、降水日数、雨强和暴雨日数均呈极显著正相关关系, 相关系数分别为0.839、0.208、0.819和0.753 ($n=317, P<0.01$)。逐步回归分析显示, 降雨量对降雨侵蚀力的贡献率最大, 降雨量是导致降雨侵蚀力变化的最主要因素。

关键词: 侵蚀; 降雨侵蚀力; 时空变化; 地理因子; 黄河流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.14.016

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-14-0136-10

姬兴杰, 刘美, 吴稀稀, 等. 1961—2019年黄河流域降雨侵蚀力时空变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 136-145. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.14.016 http://www.tcsae.org

Ji Xingjie, Liu Mei, Wu Xixi, et al. Spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Yellow River Basin from 1961 to 2019[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(14): 136-145. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.14.016 http://www.tcsae.org

0 引言

降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力, 其主要动力因素为当地的降雨气象条件^[1-4]。中国从南到北, 共有珠江、长江、淮河、黄河、海河、辽河及松花江等七大江河流域, 其面积约占国土总面积和耕地面积的45%和80%, 承载的人口高达全国77%^[5]。流域区域集中了大量人口和耕地, 降雨时空分布差异较大, 充分认识和理解流域降雨侵蚀力的时空分布规律, 对以流域为单元的土壤侵蚀潜在危险判定与预测、水土保持措施优化、生态治理修复、农业管理等具有重要现实意义^[6-8]。

降雨侵蚀力一直是人们研究和关注的热点, 并提出了一些简易的降雨侵蚀力计算算法^[9-12], 其中, 章文波等^[12]基于日降雨量构建了计算精度较高的降雨侵蚀力模型, 并在流域尺度上的降雨侵蚀力评价中应用较为广泛^[13-18]。对中国淮河^[13]、长江^[2,14-15]、松辽^[16,19]、珠江^[17]和黄河^[18,20-21]等流域降雨侵蚀力的相关研究表明, 受降雨量、地形地貌等因素以及经纬度和海拔等地理因子的影响, 流域之

间降雨侵蚀力的时空分布特征不尽相同, 同一流域也存在明显差别。在年降雨侵蚀力的时间变化上, 淮河流域总体以减少为主, 仅在流域南部及西南部地区呈增加; 长江流域金沙江与鄱阳湖流域呈显著上升^[15]; 珠江流域大部地区呈上升趋势^[17]; 松花江流域西北区域呈增加, 而在中部平原区的东北部和西南部区域呈下降^[19]; 黄河流域年降雨侵蚀力总体呈现略减少态势, 未来大部分地区呈增加趋势且确定性大^[21]。在空间分布上, 流域内降雨侵蚀力的空间差异与降雨量的空间分布规律密切相关^[22-25]; 年降雨侵蚀力在松花江流域东部丘陵山地区与经度、纬度成显著负相关^[19]; 在珠江流域与经度呈正相关、与纬度成负相关^[17]; 范俊甫等^[20]还指出了黄河流域年降雨侵蚀力中心在空间上的迁移变化规律。

黄河流域幅员辽阔, 地形复杂, 流域面积79.5万km², 上中下游分别为42.8、34.4和2.3万km²。黄河流域属于大陆性季风气候区, 跨越3个气候带、8个气候区和15个气候副区, 受大气环流和季风环流影响, 流域内大部分地区年降水量在200~600 mm之间, 空间分布差异显著, 总体上呈现自西北向东南逐渐增加^[26-29]。黄河流域人口众多, 农耕历史悠久, 受降水、植被、土壤、地形地貌及人类活动的综合影响, 水土流失面积大, 是中国土壤侵蚀最严重的区域之一, 因水土流失导致的生态环境问题尤其突出, 尤其是位于其中游的黄土高原地区^[20-21,30]。目前, 针对黄河全流域降雨侵蚀力时空变化

收稿日期: 2021-09-23 修订日期: 2022-07-06

基金项目: 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金项目(KZ202005); 中国气象局气象软科学项目(重大)(2020ZDAXM02)

作者简介: 姬兴杰, 博士, 正高级工程师, 研究方向为气候变化应对及灾害风险管理。Email: jixingjie2004@aliyun.com

规律的研究已有不少^[18,20-21]，但深入分析经纬度、海拔等地理因子以及相关气象因子与降雨侵蚀力关系，进一步明确其主要影响因素的研究尚不多见。鉴于此，本研究以黄河流域 317 个气象站 1961—2019 年逐日降雨量为基础，基于日雨量降雨侵蚀力模型，采用统计分析方法，分析了黄河流域降雨侵蚀力变化的时空分布特征和演变规律，综合考虑其与降雨量、经纬度以及海拔等因子的相关关系，基于逐步回归分析探讨影响降雨侵蚀力的主要因素，以期为黄河流域水土保持、农业管理和生态保护提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

黄河是中国的第二大河，发源于青海高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地，流经 9 个省区，从山东注入渤海。干流全长 5 464 km，流域总面积 79.5 万 km²。黄河流域地势西高东低，高差悬殊，形成自西而东、由高及低三级阶梯。黄河流域地处中纬度地带，是中国重要的生态屏障和生态脆弱区。受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂，因而流域内不同地区气候的差异显著，具有光照充足、季节差别大、温差悬殊、降水时空分布不均、蒸发大等特点。

1.2 资料选取及研究方法

本研究采用 1961—2019 年黄河流域 317 个站点逐日降雨量数据，对黄河流域降雨侵蚀力进行研究，气象站点分布见图 1。降水日数（≥0.1 mm 降雨日数）、雨强（降水量和降水日数的比值）、暴雨日数（≥50 mm 降雨日数）等指标，通过逐日降雨量计算获得。数据来源于河南省气象局，资料序列完整，已对数据准确性进行质量控制，可信度较高。

采用线性回归法分析降雨量、地理位置及海拔等因子对降雨侵蚀力的影响；采用 SPSS(Statistical Product and Service Solutions) 统计分析软件对样本数据进行相关性分析，并建立逐步回归模型，分析降雨侵蚀力的主要影响因素；通过一元线性回归方程 $y=a+bt$ (t 为年份， b 为随时间的变化量) 求得各指标随时间的变化趋势， $b>0$ 和 $b<0$ 分别表示各指标随时间而增加和减少，将 $b \times 10$ 作为各指标的气候倾向率；显著性检验统一采用概率水平 $P<0.01$ 为极显著、 $0.01 \leq P<0.05$ 为显著、 $P \geq 0.05$ 为不显著^[31]。空间分布图采用 ArcGIS10.2 软件绘制。本研究将降雨侵蚀力各地理因子分为低中高 3 部分进行分析，分级信息详见表 1。

表 1 降雨侵蚀力各地理因子分级

Table 1 Classification of rainfall erosivity of geographical factors

地理因子 Geographical factors	低 Low	中 Middle	高 High
经度 Longitude/(°)	<105	105~110	>110
纬度 Latitude/(°)	<35	35~38	>38
海拔 Altitude/m	<500	500~1500	>1500
坡度 Slope/(°)	<1	1~3	>3

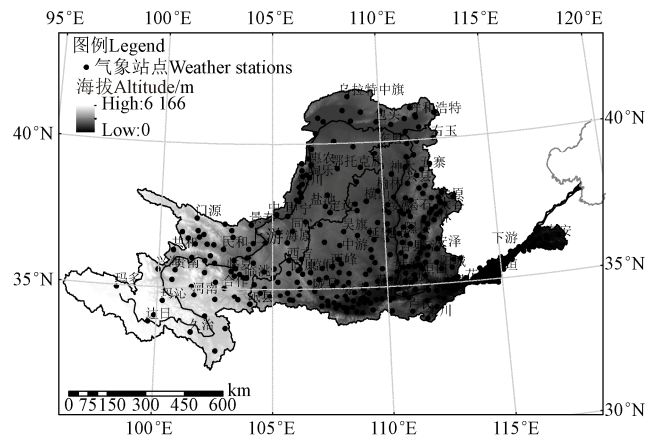


图 1 黄河流域位置及气象站点分布

Fig.1 Location of Yellow River Basin and meteorological stations

1.3 降雨侵蚀力计算方法

本研究采用章文波等^[12]修正的 Richardson 日降雨侵蚀力模型计算降雨侵蚀力：

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

式中 R_{sem} 为第 i 个半月时段的侵蚀力值 (MJ·mm/(hm²·h·a))； m 为该半月内侵蚀性降雨日数 (d)； P_k 为半月内第 k 天 ≥12 mm 的日雨量 (mm)； α 、 β 为模型参数。

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

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

式中 P_{d12} 为日雨量 ≥12 mm 的日平均雨量，mm； P_{y12} 为日雨量 ≥12 mm 的年平均雨量，mm。利用上述计算式计算逐年各半月的降雨侵蚀力，累计可得年降雨侵蚀力。

1.4 累积距平法

累积距平是一种较常用的判断变化趋势的方法，通过对累积距平曲线的观察，可以划分变化的阶段性。对于时间序列 x ，某一时刻的累积距平 S_t 表示为

$$S_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), \quad t=1, \dots, n \quad (4)$$

式中 $\bar{x} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t x_i$ 。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力时间变化特征

2.1.1 年际变化

黄河流域 1961—2019 年平均降雨侵蚀力为 1 223.1 MJ·mm/(hm²·h·a)，整体呈不显著下降趋势，下降速率为每 10 a 下降 6.71 MJ·mm/(hm²·h·a)。黄河流域年降雨侵蚀力变化趋势 (图 2a) 与年降雨量变化趋势 (图 2b) 基本一致。59 a 期间，年降雨侵蚀力的最大值与降雨量的最大值均出现在 1964 年，分别是 1 835.0 MJ·mm/(hm²·h·a) 和 706.9 mm；最小值均出现在 1997 年，分别是 795.8 MJ·mm/(hm²·h·a) 和 337.9 mm。

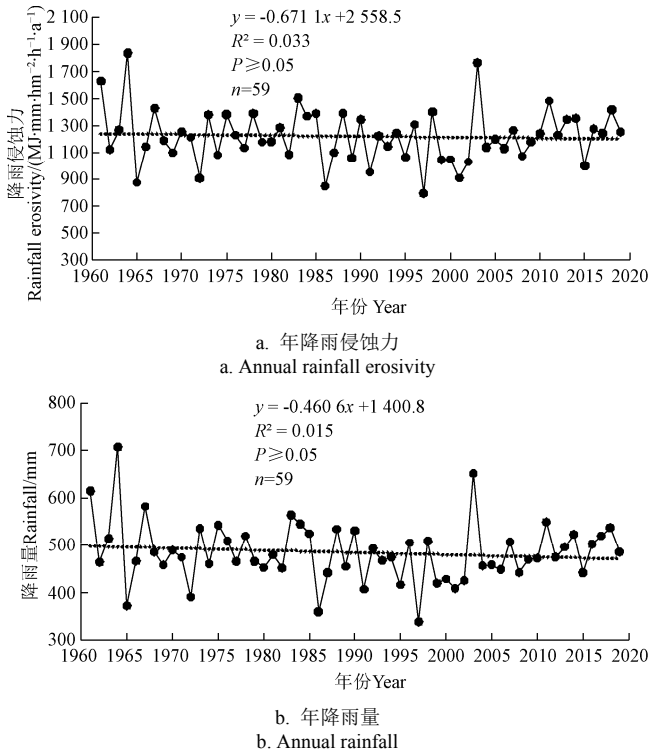


图 2 1961—2019 年黄河流域年降雨侵蚀力和年降雨量变化
Fig.2 Changes of annual rainfall erosivity and annual rainfall in the Yellow River Basin from 1961 to 2019

降雨侵蚀力累积距平分析表明 (图 3a), 降雨侵蚀力变化过程大体上可分为 3 个阶段: 1985 年之前为距平不断增加阶段; 而 1985—2002 年累积距平呈减少趋势; 2002 年以来降雨侵蚀力呈明显的增加趋势。降雨量与降雨侵蚀力累积距平变化趋势基本一致 (图 3)。

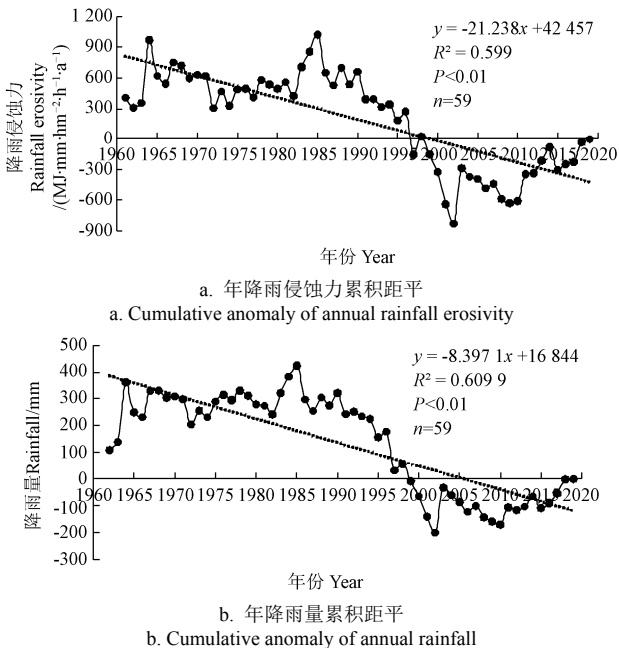


图 3 1961—2019 年黄河流域降雨侵蚀力和降雨量累积距平
Fig.3 Cumulative anomaly of rainfall erosivity and rainfall in the Yellow River Basin during 1961 to 2019

从逐年代变化来分析, 黄河流域降雨侵蚀力和降雨量均呈先下降再上升趋势, 其中 1980 s 较 1970 s 略高, 且均在 1990 s 达到历年代最低值, 距平百分率分别为

-8.1%和-8.0%; 而降雨侵蚀力与年降雨量在不同年代出现最高值出现, 降雨侵蚀力最高值出现在 2010 s, 距平百分率为 5.5%, 而降雨量出现在 1960 s, 距平百分率为 6.4%。

2.1.2 季节变化

从季节变化来看, 黄河流域降雨侵蚀力季节变化趋势与年际变化趋势略微不同, 其中春季、秋季和冬季呈不显著下降趋势, 平均每 10 a 分别降低 0.41、2.37 和 0.01 MJ·mm/(hm²·h·a); 夏季呈不显著增加趋势, 平均每 10 a 增加 1.33 MJ·mm/(hm²·h·a)。

从各季节逐年代变化角度分析, 春季降雨侵蚀力呈现先降低至 1970 s 后增加 1980 s 后转为持续减弱趋势直至 2000 s 再次转为增加趋势, 其中降雨侵蚀力在 1960 s 达到最高值为 68.6 MJ·mm/(hm²·h·a), 1970 s 达到最低值为 49.3 MJ·mm/(hm²·h·a); 夏季呈先持续增加至 1980 s 后降低, 1990 s 后再次呈持续增加趋势, 其中降雨侵蚀力在 2010 s 达到最高值为 258.1 MJ·mm/(hm²·h·a), 1960 s 达到最低值为 241.6 MJ·mm/(hm²·h·a); 秋季呈先降低再增加趋势, 1960 s 为最大值 118.0 MJ·mm/(hm²·h·a), 1990 s 为最小值 70.2 MJ·mm/(hm²·h·a); 冬季呈先增加后逐渐减弱趋势, 其中 1990 s 最低为 1.1 MJ·mm/(hm²·h·a), 1970 年最高为 2.4 MJ·mm/(hm²·h·a)。

2.1.3 年内变化

1961—2019 年黄河流域降雨侵蚀力多年平均月变化分析, 降雨侵蚀力呈先增加后降低的趋势, 降雨侵蚀力在 7 月达到最高值为 317.1 MJ·mm/(hm²·h·a), 最低值出现在 1 月为 0.8 MJ·mm/(hm²·h·a) (图 4)。降雨侵蚀力夏季最高, 冬季最低, 四季降雨侵蚀力分别为 59.4、250.2、97.1、1.5 MJ·mm/(hm²·h·a), 占全年降雨侵蚀力的 14.6%、61.3%、23.8%和 0.3%。冬季黄河流域温度较低, 主要以降雪形式为主, 降雨侵蚀力较低。

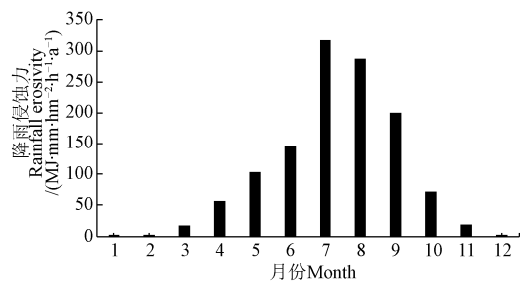


图 4 1961—2019 年降雨侵蚀力多年平均月变化
Fig 4 Monthly variation of rainfall erosivity from 1961 to 2019

2.2 降雨侵蚀力空间变化特征

2.2.1 年空间变化

利用 1961—2019 年黄河流域年平均降雨侵蚀力和降雨量数据进行插值得到流域的年降雨侵蚀力 (图 5a) 和年降雨量 (图 5b) 空间分布。年降雨侵蚀力分布范围为 33.0~3 550.6 MJ·mm/(hm²·h·a) 与年降雨量的空间分布规律基本一致, 空间分布特征表现为: 东南高西北低, 年降雨侵蚀力由从西北部的 400.0 MJ·mm/(hm²·h·a) 以下增加至东南部的 1 600.0 MJ·mm/(hm²·h·a) 以上。年降雨量

则从西北部的 300 mm 以下增加至东南部的 500 mm 以上。从分布中心看，年降雨侵蚀力与降雨量高值中心均位于流域东南部；降雨侵蚀力与降雨量的低值中心均位于流域的西北部。

为进一步分析流域降雨侵蚀力的变化趋势，本研究计算了各气象站的降雨侵蚀力 1961—2019 年的气候倾向率如图 5c。流域降雨侵蚀力气候倾向率呈现明显的地区

差异，在西北大部分区域降雨侵蚀力呈增加趋势，说明需要加强水土保持措施，防范水土流失加剧；东南部区域呈下降趋势。黄河流域 317 个气象站中有 156 个站年降雨降雨侵蚀力呈上升趋势，占全部气象站的 49.2%，其中陕西和山西中部、青海西南部以及甘肃少部分地区呈显著增加趋势；有 161 个站年降雨侵蚀力呈下降趋势，占 50.8%，其中甘肃、陕西、山东和山西少部分地区显著减少。

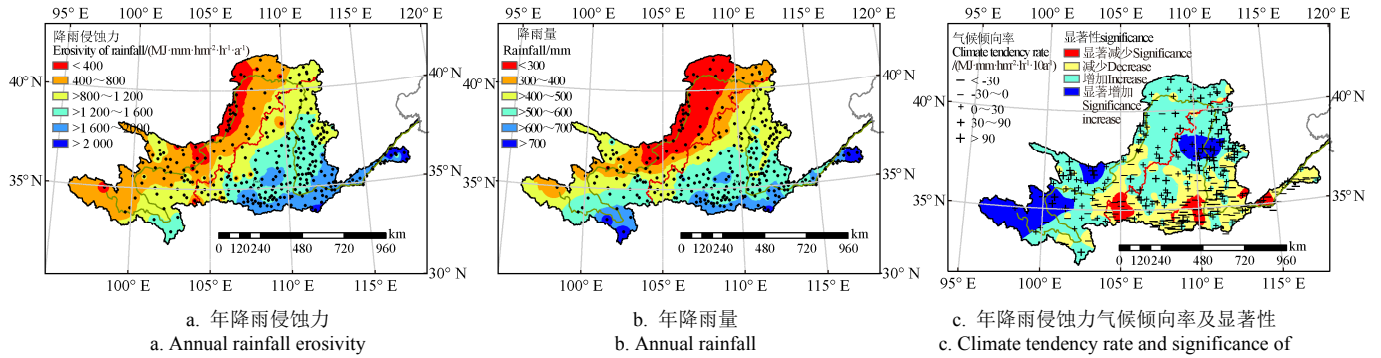


图 5 1961—2019 年黄河流域年均降雨侵蚀力、降雨量及降雨侵蚀力气候倾向率及显著性检验空间分布

Fig.5 Spatial distribution of annual rainfall erosivity, rainfall and climate tendency rate and significance test of rainfall erosivity in the Yellow River Basin from 1961 to 2019

2.2.2 季节空间变化

对不同季节的降雨侵蚀力的空间分布进行分析，四季降雨侵蚀力空间分布与年空间分布大致相同，整体呈东南高、西北低。四季降雨侵蚀力较高值区域主要出现在山东和河南地区，陕西和山西大部分地区以

及甘肃东南部地区，其中春季降雨侵蚀力高值中心出现在栾川，降雨侵蚀力为 169.6 MJ·mm/(hm²·h·a)；夏季和冬季高值中心均出现在泰山，降雨侵蚀力分别为 801.9 和 22.8 MJ·mm/(hm²·h·a)；秋季最高值出现在华山为 221.7 MJ·mm/(hm²·h·a)。

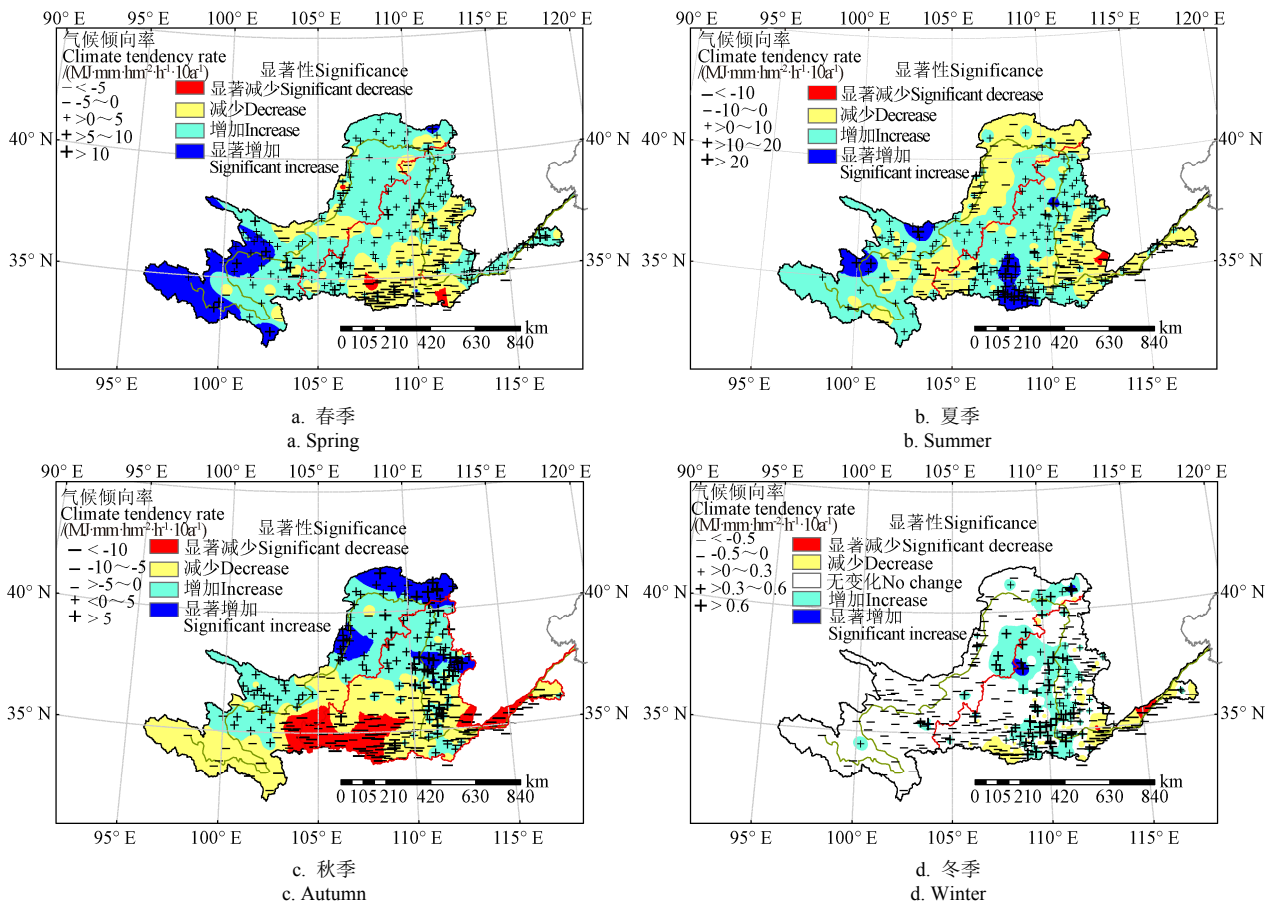


图 6 1961—2019 年黄河流域各季节降雨侵蚀力气候倾向率及显著性检验

Fig.6 Climate tendency and significance test of seasonal rainfall erosivity in the Yellow River Basin from 1961 to 2019

春季、夏季和秋季降雨侵蚀力较低值区与年空间分布基本一致，主要集中在内蒙古、宁夏和甘肃西北部，青海西部；冬季分布情况略微不同，主要集中在甘肃、青海和四川大部分地区，宁夏西北部和内蒙古部分地区。其中乌鞘岭春季降雨侵蚀力最低，为 0.8 MJ·mm/(hm²·h·a)；夏季和秋季降雨侵蚀力最低值均出现在靖远，分为 8.7 和 0.9 MJ·mm/(hm²·h·a)；冬季黄河流域上游大部分区域降雨侵蚀力均为 0。

从图 6 中可以看出，不同季节降雨侵蚀力变化趋势差异较明显。春季，全流域除山西和河南大部分区域以及陕西南部呈下降趋势外，其余大部分地区均呈上升趋势，其中以六盘山站上升幅度最大，气候倾向率为 10.3 MJ·mm/(hm²·h·10a)；华山站下降幅度最大，气候倾向率为-17.4 MJ·mm/(hm²·h·10a)。夏季降雨侵蚀力呈上升趋势的区域主要集中在山西北部 and 陕西大部分区域、青海和四川部分地区，下降区域主要集中在山西南部、河南和山东以及甘肃南部，其中长安站上升幅度最大，气候倾向率为 27.5 MJ·mm/(hm²·h·10a)；沁水站下降幅度最大，为-18.8 MJ·mm/(hm²·h·10a)。秋季降雨侵蚀力在山东、陕西和甘肃南部呈下降趋势，其余大部分地区降雨侵蚀力呈上升趋势，其中方山站的上升幅度最大，气候倾向率为 26.2 MJ·mm/(hm²·h·10a)；灵台站下降幅度最大，为-17.5 MJ·mm/(hm²·h·10a)。冬季 1961—2019 年黄河流域有 138 个站点降雨侵蚀力始终为 0，上升趋势主要集中在山西大部分地区、陕西和内蒙部分地区，下降趋势主要集中在河南和山东大部分区域，其中华山站的上升幅度最大，气候倾向率为 1.5 MJ·mm/(hm²·h·10a)；孟州站下降幅度最大，为-1.6 MJ·mm/(hm²·h·10a)。黄河流域四季降雨侵蚀力大部分站点均呈不显著上升和下降趋势，四季各有 10、11、16 和 4 个站点呈极显著和显著性变化趋势，分别占总站数的 3.2%、3.5%、5.0%和

1.3%。

2.3 年降雨侵蚀力与相关因子的相关分析

2.3.1 地理因子

图 7 采用线性回归法分析了地理因子对降雨侵蚀力的影响，结果表明降雨侵蚀力与经纬度、海拔及坡度均呈极显著相关关系，其中经度和地表坡度与其呈极显著正相关，相关系数分别为 0.587 和 0.164(n=317, P<0.01)；纬度和海拔均与其呈极显著负相关，相关系数分别为-0.498 和-0.490(n=317, P<0.01)。降雨侵蚀力随经度和坡度的增加而增加，随纬度和海拔的增加而减少。

将各地理因子与降雨侵蚀力相关关系进行自定义分级讨论，分级情况见表 1，结果表明纬度及海拔处于中值时相关性较好，相关系数分别-0.274(n=184, P<0.01)和-0.463(n=177, P<0.01)，高经度及高坡度与降雨侵蚀力的相关性较好，相关系数分别为 0.453(n=140, P<0.01)和 0.449(n=33, P<0.01)。

由于黄河流域不同区域降雨侵蚀力差异明显，故分区域对其进行进一步的研究。本研究采用线性回归分析的方法分别从上游、中游和下游对降雨侵蚀力与经纬度、海拔及坡度的相关关系进行了统计(表 2)。降雨侵蚀力从上游到下游呈逐渐增加趋势。上游地区降雨侵蚀力与经度和地表坡度关系不显著，与纬度和海拔分别呈极显著性负相关和正相关，相关系数分别为-0.224 和 0.338(n=104, P<0.01)；中游地区降雨侵蚀力与经度、纬度和海拔均呈极显著相关关系，相关系数分别为 0.207、-0.539 和-0.371(n=192, P<0.01)，与坡度关系不显著；下游地区降雨侵蚀力与经纬度关系不显著，与海拔和坡度均呈极显著正相关，相关系数分别为 0.712 和 0.736(n=21, P<0.01)。从全流域来看，降雨侵蚀力与经纬度和海拔均存在很好的相关性，均通过了 0.01 显著性检验。

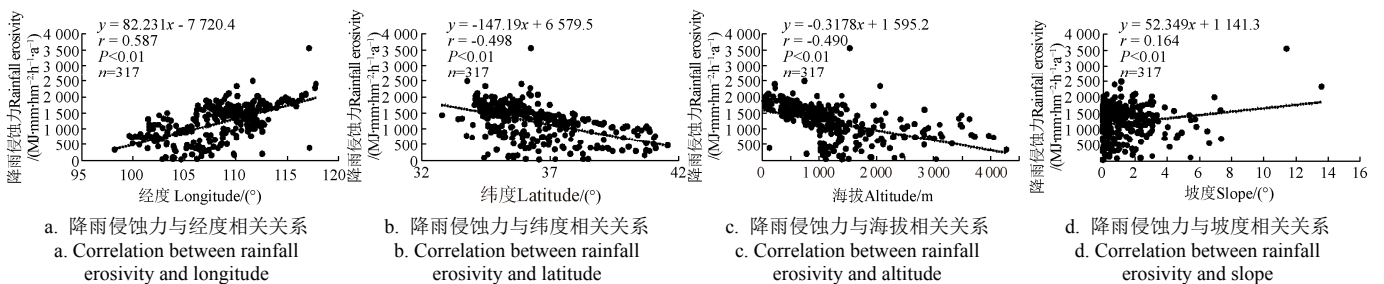


图 7 黄河流域多年平均降雨侵蚀力与各地理因子相关关系

Fig.7 Correlation between perennial mean rainfall erosivity and geographical factors in the Yellow River Basin

表 2 黄河流域上中下游降雨侵蚀力统计特征及其地理因子的相关关系

Table 2 Statistical characteristics of rainfall erosivity and its correlation with geographical factors in the Yellow River Basin

流域 Basin	降雨侵蚀力 Rainfall erosivity/(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	相关系数 Correlation coefficient <i>r</i>			
		经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	坡度 Slope
上游 Upstream	676.2	-0.005	-0.224*	0.338**	0.148
中游 Midstream	1 439.6	0.207**	-0.539**	-0.371**	0.134
下游 Downstream	1 941.8	0.245	0.183	0.712**	0.736**
全流域 Whole basin	1 222.4	0.587**	-0.498**	-0.490**	0.164**

注：*代表 0.05 显著性检验，**代表 0.01 显著性检验。

Note: * represents 0.05 significance test, ** represents 0.01 significance test.

2.3.2 气象因子

图 8 采用线性回归法分析了气象因子对降雨侵蚀力的影响，结果表明降雨侵蚀力与降雨量、降水日数、雨强及暴雨日数均呈极显著正相关，相关系数分别为 0.839、0.208、0.819 和 0.753($n=317, P<0.01$)。表 3 分区域对降雨侵蚀力与降雨量、降水日数、雨强及暴雨日数的相关关系进行了统计。上游地区降雨侵蚀力与各气象因子的相关系数分别为 0.695、0.524、0.442 和 0.291($n=104,$

$P<0.01$)；中游地区相关系数分别为 0.851、0.346、0.657 和 0.651($n=192, P<0.01$)；下游地区相关系数分别为 0.656、0.623、0.578 和 0.645($n=21, P<0.01$)。总体来看，全流域以及上中下游降雨侵蚀力与降雨量等相关气象因子的相关关系具有一致性，呈现出随降雨量、降水日数、雨强及暴雨日数的增加而增加，并且均表现出与降雨量相关性最好，排在降雨量之后的因子在上中下游具有差异，上游和下游为降水日数，中游为雨强。

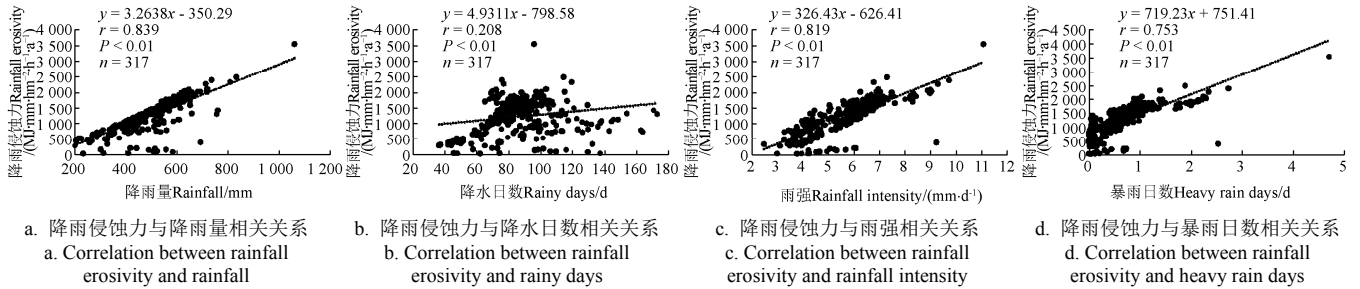


图 8 黄河流域多年平均降雨侵蚀力与各气象要素相关关系

Fig.8 Correlation between perennial mean rainfall erosivity and meteorological elements in the Yellow River Basin

表 3 黄河流域上中下游降雨侵蚀力与气象因素的相关关系

Table 3 Correlation between rainfall erosivity and other meteorological factors in the Yellow River Basin

流域 Basin	降雨量 Rainfall	降水日数 Rainy days	雨强 Rainfall intensity	暴雨日数 Heavy rain days
上游 Upstream	0.695**	0.524**	0.442**	0.291**
中游 Midstream	0.815**	0.346**	0.657**	0.651**
下游 Downstream	0.656**	0.623**	0.578**	0.645**
全流域 Whole basin	0.839**	0.208**	0.819**	0.753**

注：**代表 0.01 显著性检验。下同。
Note: ** represents 0.01 significance test. Same as below.

2.3.3 逐步回归分析

考虑到降雨量与降水日数、雨强和暴雨日数之间的相关性见表 4，故本研究选用与降雨侵蚀力相关性最好的降水量及各地理因子为自变量，降雨侵蚀力为因变量，采用多元逐步回归分析方法分析了降雨侵蚀力与各要素之间的关系，结果如表 5 所示，降雨侵蚀力主要受降雨量、海拔、经度和地表坡度的综合影响。各要素之间以降雨量对降雨侵蚀力的贡献率最大，是影响降雨侵蚀力的主导影响因素，对其呈正贡献。1961—2019 年降雨量的减少是导致降雨侵蚀力下降的主要原因。

表 4 黄河流域降雨量统计特征及其与其他气象因素的相关关系

Table 4 Statistical characteristics of rainfall and other meteorological factors in the Yellow River Basin

流域 Basin	降雨量 Rainfall/mm	降水日数 Rainy days	雨强 Rainfall intensity	暴雨日数 Heavy rain days
上游 Upstream	361.9	0.924**	0.187	-0.001
中游 Midstream	529.9	0.670**	0.527**	0.635**
下游 Downstream	636.7	0.936**	0.930**	0.985**
全流域 Whole basin	481.9	0.593**	0.681**	0.644**

2.3.4 气候倾向率与地理因子的关系分析

图 9 对黄河流域降雨侵蚀力趋势线斜率与经纬度、海拔

及地表坡度等地理因子进行相关关系分析，结果表明经度与降雨侵蚀力趋势线斜率呈极显著负相关，相关系数为 $-0.140(n=317, P<0.01)$ ；纬度与海拔均和降雨侵蚀力趋势线斜率呈极显著正相关，相关系数分别为 0.392 和 0.270($n=317, P<0.01$)；地表坡度相关性不显著。气候倾向率随降雨量和经度的增加而减少，随纬度及海拔的增加而增加。

表 5 黄河流域降雨侵蚀力逐步回归模型及显著性检验
Table 5 Stepwise regression model and significance test of rainfall erosivity in the Yellow River Basin

指标 Indicators	常数与影响因子 Constants and influence factors	回归系数 Regression coefficient	标准回归系数 Standard regression coefficient	P	显著性 Significant	R ²
	常数	-2 171.609±699.722	—	—		
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	降雨量	2.840±0.103	0.743	<0.01		0.825
	海拔	-0.157±0.028	-0.239	<0.01	P<0.01	
	经度	20.090±6.313	0.142	<0.01		
	坡度	19.248±8.233	0.060	<0.01		

将各地理因子与降雨侵蚀力气候倾向率相关关系进行自定义分级讨论，分级情况见表 1，结果表明纬度和海拔处于中值时与降雨侵蚀力气候倾向率的相关性较好，相关系数分别为 0.375($n=185, P<0.01$)和 0.298($n=178, P<0.01$)，低经度时相关性较好，相关系数为 $-0.401(n=55, P<0.01)$ ，地表坡度分级后与降雨侵蚀力气候倾向率几乎不相关。

表 6 分区域对降雨侵蚀力气候倾向率与各地理因子的相关关系进行了统计。降雨侵蚀力气候倾向率从上游到下游均逐渐减少趋势。全流域降雨侵蚀力气候倾向率为 4.11 MJ·mm/(hm²·h·10a)。上游和下游地区降雨侵蚀力气候倾向率与经纬度、海拔及坡度关系不显著；中游地区降雨侵蚀力气候倾向率与纬度及海拔均呈极显著相关关系，相关系数分别为 0.509 和 0.188 ($n=192, P<0.01$)，与经度和坡度关系不显著；全流域降雨侵蚀力气候倾向率与经纬度和海拔均呈显著相关关系。

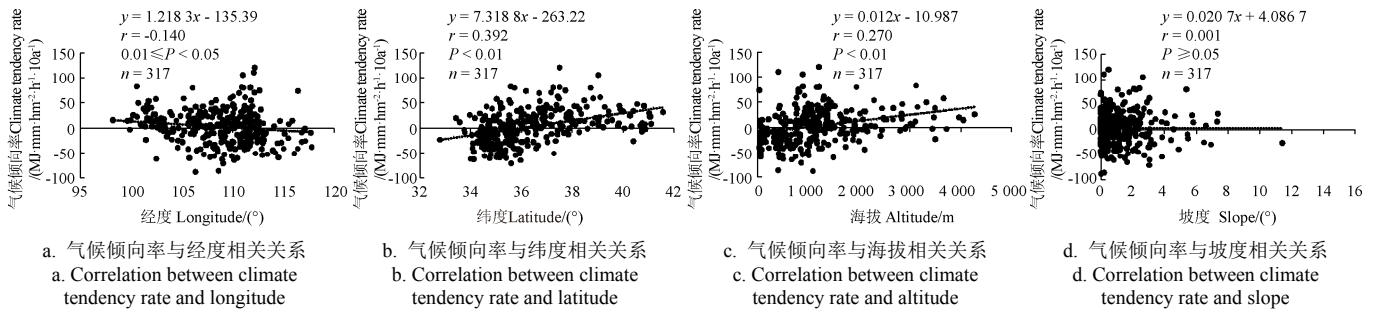


图9 黄河流域降雨侵蚀力气候倾向率与各地理因子相关关系

Fig.9 Correlation between climate tendency rate of rainfall erosivity and geographical factors in the Yellow River Basin

表6 黄河流域上中下游降雨侵蚀力气候倾向率统计特征及其与地理因子的相关关系

Table 6 Statistical characteristics of climate tendency of rainfall erosivity and its correlation with geographical factors in the Yellow River Basin River Basin

流域 Basin	气候倾向率 Climate tendency rate/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·10a ⁻¹)	相关系数 Correlation coefficient <i>r</i>			
		经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	坡度 Slope
上游 Upstream	18.44	-0.046	0.034	0.084	0.041
中游 Midstream	-1.29	0.099	0.509**	0.188**	-0.104
下游 Downstream	-17.42	0.257	0.380	-0.045	-0.134
全流域 Whole basin	4.11	-0.140*	0.392**	0.270**	0.001

注: **代表 0.01 显著性检验, *代表 0.05 显著性检验。

Note: ** represents the significance test of 0.01, * represents the significance test of 0.05.

以各地理因子为自变量, 降雨侵蚀力气候倾向率为因变量, 采用多元逐步回归分析方法分析了降雨侵蚀力气候倾向率与影响因子之间的关系, 结果如表 7 所示, 降雨侵蚀力气候倾向率主要受纬度和海拔的综合影响。各要素之间以纬度对降雨侵蚀力气候倾向率的贡献率最大, 是影响降雨侵蚀力气候倾向率的主导影响因素, 对其呈正贡献。

表7 黄河流域降雨侵蚀力气候倾向率逐步回归模型及显著性检验

Table 7 Stepwise regression model and significance test of climate tendency rate of rainfall erosivity in the Yellow River Basin

指标 Indicators	常数与影响因子 Constants and influence factors	回归系数 Regression coefficient	标准回归系数 Standard regression coefficient	<i>P</i>	显著性 Significant	<i>R</i> ²
气候倾向率 Climate tendency rate	常数	-261.041±34.084	—	—	—	—
	纬度	6.936±0.930	0.384	<0.01	<i>P</i> <0.01	0.205
	海拔	0.010±0.002	0.251	<0.01		

3 讨论

本研究与高歌等^[21]分别从不同角度对黄河流域降雨侵蚀力进行了分析, 对比分析结果得出, 黄河流域降雨侵蚀力空间分布均为从西北至东南逐渐增大。本研究黄河流域 1961—2019 年平均降雨侵蚀力及最大值和最小值分别为 1 223.1、1 835.0 和 795.8 MJ·mm/(hm²·h·a) 较高歌等^[21]1961—2017 年的结果 1 364.6、2 135.0 和 841.4 MJ·mm/(hm²·h·a) 普遍较小, 主要原因为分析数据不同, 本研究采用 317 个站点 1961—2019 年实际观测数据; 高歌等^[21]采用 311 个气象观测站 1961—2017 年的逐日均

一化资料进行分析, 此外计算方法的不同, 也给结果造成了一定的差异。为了进一步验证本研究结果真实性, 将本研究结果与同样采用实际观测值的范俊甫等^[20]进行对比, 本研究 1980—2015 年降雨侵蚀力空间分布与同期范俊甫等^[20]各分区降雨侵蚀力分布情况基本一致, 可见本研究结果在可靠范围内。

近些年来, 黄河流域水土保持力度不断加大, 水土流失强度明显降低, 入黄泥沙大幅减少, 综合防治取得了一定成效^[32], 但水蚀导致黄河流域水土流失问题依然存在。结合上述分析结果, 在对黄河流域降雨侵蚀水土治理过程中, 需要重点关注以下 3 个方面。1) 在空间上, 黄河流域上游各站点降雨侵蚀力以增加为主, 整个流域上游增加站点占上游总站点的 75.0%; 黄河流域中游降雨侵蚀力除与降雨量关系密切外, 还与雨强和暴雨日数具有较强的相关性, 降雨量增加、降水强度增强和暴雨日数增多将进一步提高降雨侵蚀力, 特别是在中游北部降雨侵蚀力多呈显著增加, 黄土高原中北部位于该区域^[33], 考虑到黄土本身结构松散等因素, 流域上游和中游北部水土流失将趋于严重; 中游南部与下游地区降雨侵蚀力呈多呈显著下降, 此变化态势对该区域水土保持较为有利。2) 在时间上, 降水量主要集中在夏季集中, 占全年总降雨量的 62.4%, 暴雨日数多, 是降雨侵蚀力最大的季节, 也是泥石流、滑坡等灾害高发时段; 纬度和海拔越高的地区, 降雨侵蚀力的气候倾向率愈大, 治理泥石流、滑坡等地质灾害的力度要较其他区域更大一些。3) 坡度与降雨侵蚀力呈显著正相关, 特别是在黄河下游地区, 相关系数达 0.736 (*P*<0.01), 该区域需要重视坡耕地治理, 进一步加大退耕还林还草等力度, 改善坡耕地覆盖状况, 提高土壤水土保持能力。

4 结 论

1) 1961—2019 年黄河流域年平均降雨侵蚀力为 1 223.1 MJ·mm/(hm²·h·a), 呈不显著下降趋势。降雨侵蚀力夏高冬低, 其中夏季降雨侵蚀力占全年的 61.3%, 冬季仅占全年的 0.3%。

2) 黄河流域年降雨侵蚀力表现为自东南向西北逐渐降低, 其高值中心及低值中心分别出现在流域的东南部和西北部。气候倾向率区域性差异显著, 降雨侵蚀力在上游和中游北部主要呈增加趋势; 下游和中游南部主要呈减弱趋势。

3) 降雨侵蚀力随经度和坡度的增加而增加, 随纬度和海拔高度的增加而减少; 降雨侵蚀力随降雨量、降水日数、雨强及暴雨日数的增加而增加, 且表现出与降雨量相关性最好。降雨侵蚀力主要受降雨量、海拔高度、经度和地表坡度的综合影响。其中以降雨量对降雨侵蚀力的贡献率最大且呈正贡献。纬度和海拔高度是降雨侵蚀力气候倾向率的主要影响因素, 且纬度对其贡献率最大, 为正贡献。

[参 考 文 献]

- [1] 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 Shuiqing, Xue Xiaochan, Yue Tianyu, et al. Spatiotemporal distribution and return period of rainfall erosivity in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 105-113. (in Chinese with English abstract)
- [2] 高歌, 殷水清, 陈涛, 等. 长江流域降雨侵蚀力时空变化及成因分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 84-92. Gao Ge, Yin Shuiqing, Chen Tao, et al. Spatiotemporal variation and cause analysis of rainfall erosivity in the Yangtze River Basin of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [3] Teng H F, Hu J, Zhou Y, et al. Modelling and mapping soil erosion potential in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(2): 251-264.
- [4] 吴洁玲, 查轩, 陈世发, 等. 1951-2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 21-26. Wu Jieling, Zha Xuan, Chen Shifa, et al. Variations of rainfall erosivity of different magnitudes in Shaoguan from 1951 to 2018[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [5] 肖潺, 叶殿秀, 陈昊明. 中国大陆雨涝时空特征[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 85-89. Xiao Chan, Ye Dianxiu, Chen Haoming. Temporal and spatial characteristics of waterlogging over mainland China[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 85-89. (in Chinese with English abstract)
- [6] 艾明乐, 赵强, 王奎峰, 等. 1957-2017 年泾河流域降雨量及降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 93-100. Ai Mingle, Zhao Qiang, Wang Kuifeng, et al. Spatio-temporal variations of rainfall and rainfall erosivity in Jinghe River Basin from 1957 to 2017[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(4): 93-100. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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. Zheng Zhe, Zou Jin, Pan Feng, et al. Spatio-temporal variation characteristics of rainfall erosivity during 1961-2010 in Nu river basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(5): 16-22. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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. Wen Tianfu, Zhang Fanping, Hu Jianmin, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity during the period 1958-2014 in Ganjiang river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 7-14. (in Chinese with English abstract)
- [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. Wang Wanzhong, Jiao Juying, He Xiaopin, et al. Distribution of rainfall erosivity R value in China[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 29-39. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 Zhihua, Guo Guoxian, Zeng Zhijun, et al. Daily rainfall erosivity model and characteristics of rainfall erosivity in Wuhan[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(1): 22-24. (in Chinese with English abstract)
- [11] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 45-51. Yin Shuiqing, Zhang Wenbo, Xie Yun, et al. Spatial distributions of rainfall erosivity in China based on high density stations data[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 45-51. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱宸, 赵雯, 叶正伟, 等. 1960—2014 年间淮河流域降雨侵蚀力的时空变化特征[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版), 2020, 19(3): 227-232. Zhu Chen, Zhao Wen, Ye Zhengwei, et al. Spatial and temporal variation of rainfall erosivity in Huaihe River basin from 1960 to 2014[J]. Journal of Huaiyin Teachers College (Natural Science Edition), 2020, 19(3): 227-232. (in Chinese with English abstract)
- [14] Huang J, Zhang J C, Zhang Z X, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960-2005 in the Yangtze River Basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2): 337-351.
- [15] 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 Bintao, Tao Heping, Song Chunfeng, 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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 113-120. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 159-167. (in Chinese with English abstract)
- [18] 夏正兵. 黄河流域极端气候下降雨侵蚀力时空特征研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 16-19.
- Xia Zhengbing. Study on temporal and spatial characteristics of rainfall erosion under extreme climate in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Power, 2021, 39(7): 16-19. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 Bing. 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. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高歌, 韩振宇, 殷水清, 等. 黄河流域 1961—2017 年降雨侵蚀力特征与未来变化预估[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 575-590.
- Gao Ge, Han Zhenyu, Yin Shuiqing, et al. Characteristics of rainfall erosivity during 1961-2017 and its change projections in future in the Yellow River Basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(3): 575-590. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭玉琴, 何太蓉, 钟博星. 乌江流域 1956—2014 年降雨特征及输沙效应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 1-7.
- Wu Yuqin, He Tairong, Zhong Boxing. Characteristics of precipitation and sediment effect in Wujiang River Basin during 1956-2014[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马岚, 黄生志, 黄强, 等. 渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 174-189.
- Ma Lan, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. Causes analyzing of the change of rainfall and rainfall erosivity in Weihe River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 174-189. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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.
- Peng Yuzhi, Fan Jianrong, Yu Jiang, et al. Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in Jinsha River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 Hongyu, Liu Huiying. 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. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 Jun, Wang Yongguang, Zhao Yu, et al. Characteristics of climate change of precipitation and rain days in the Yellow River Basin during recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(1): 43-54. (in Chinese with English abstract)
- [27] 赵慧霞, 卓莹莹, 刘厚凤. 1961-2019 年黄河流域降水量时空变化特征分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 26-31.
- Zhao Huixia, Zhuo Yingying, Liu Houfeng. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Yellow River Basin from 1961 to 2019[J]. Yellow River, 2022, 44(3): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [28] 周广胜, 周莉, 汲玉河, 等. 黄河水生生态承载力的流域整体性和时空连通性[J]. 科学通报, 2021, 66(22): 2785-2792.
- Zhou Guangsheng, Zhou Li, Ji Yuhe, et al. Basin integrity and temporal-spatial connectivity of the water ecological carrying capacity of the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(22): 2785-2792. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王有恒, 谭丹, 韩兰英, 等. 黄河流域气候变化研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 235-246.
- Wang Youheng, Tan Dan, Han Lanying, et al. Review of climate change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 235-246. (in Chinese with English abstract)
- [30] Keo Soksamnang, 何洪鸣, 赵宏飞, 等. 黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 1-7.
- Keo Soksamnang, He Hongming, Zhao Hongfei, et al. Analysis of rainfall erosivity change and its impacts on soil erosion on the Loess Plateau over more than 50 year[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [31] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [32] 张宝. 新时期黄河流域水土流失防治对策[J]. 中国水土保持, 2021(7): 14-16.
- Zhang Bao. Countermeasures of soil erosion control in the Yellow River Basin in the new period[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(7): 14-16. (in Chinese with English abstract)

[33] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 等. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 119-125.
Pei Tingting, Li Xiaoyan, Wu Huawu, et al. Sensitivity of

vegetation water use efficiency to climate and vegetation index in Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 119-125. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Yellow River Basin from 1961 to 2019

Ji Xingjie^{1,2}, Liu Mei³, Wu Xixi⁴, Ding Yalei⁵, Zhu Yeyu²

(1. Key Laboratory of Agro-meteorological Safeguard and Applied Technique in Henan Province, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Climate Center, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Luoyang Meteorological Bureau, Luoyang 471003, China; 5. College of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Yellow River Basin has been one of the most serious areas of soil erosion in China in recent years. A large area of soil erosion is distributed in the middle reaches of Loess Plateau areas. The comprehensive influence of precipitation, vegetation, soil, topography, and human activities has posed a great threat to the ecological and environmental landscapes, due mainly to a large population, and a long history of farming. Much effort has been made on the temporal and spatial variation of rainfall erosion in the whole Basin of the Yellow River. But, it is still lacking in the relationship between the rainfall erosion force and geographical factors, such as latitude, longitude, and altitude. In this study, the daily rain erosion force model was established to calculate the rainfall erosion force for each station using the daily rainfall data of 317 weather stations in the Yellow River Basin from 1961 to 2019. A systematic analysis was made to investigate the spatiotemporal distribution characteristics of rainfall erosion force in the basin. A correlation analysis was also used to determine the geographical factors, such as rainfall, longitude, latitude, and altitude. The results showed that the average rainfall erosivity was 1 223.1 MJ·mm/(hm²·h·a) in the Yellow River Basin from 1961 to 2019. The decline rate was 6.71 MJ·mm/(hm²·h·a) per 10 years. The erosion of rainfall in all four seasons showed no significant change trend, of which the erosion force of summer rainfall showed an upward trend, and the rest showed a downward trend. In terms of intra-year changes, the erosion force of rainfall reached the maximum of 317.1.4 MJ·mm/(hm²·h·a) in July, and the minimum of 0.8 MJ·mm/(hm²·h·a) in January. The rainfall erosion was high in summer and low in winter, with the summer rainfall erosion accounting for 61.3% of the year and only 0.3% in winter. The distribution range of multi-year average rainfall erosivity was 33.0-3 550.6 MJ·mm/(hm²·h·a). The spatial distribution was basically consistent with the annual average rainfall, indicating the increasing trend from the northwest to the southeast. There was an upward trend in the annual rainfall erosion force in the upper reaches of the Yellow River Basin. The middle and lower reaches showed a downward trend. Among them, a significant increase was found at the Fangshan, Tianzhu, Guinan, and Zeku stations, as well as Jia County. The rainfall erosivity was positively correlated with the rainfall, longitude, and slope, with correlation coefficients of 0.839, 0.587, and 0.164 ($P < 0.01$), respectively. By contrast, there was a negative correlation between latitude and altitude, with the correlation coefficients of -0.498, and -0.490 ($P < 0.01$), respectively. Stepwise regression showed that rainfall erosion was mainly affected by the combination of rainfall, altitude, longitude, and surface slope. Among them, the contribution rate of rainfall to erosion was the largest and most positive. Latitude and altitude were the main influencing factors of the climate propensity during rainfall erosion, where the latitude also presented the largest contribution rate and a positive contribution. Consequently, a better understanding was gained of the temporal and spatial patterns of rainfall erosivity in the Yellow River Basin and the various influencing factors. The finding can provide strong support to the development of the Yellow River Basin.

Keywords: erosion; rainfall erosivity; spatiotemporal variation; Yellow River Basin