农业水土工程

1961—2023年中国降雨侵蚀力变化特征及未来趋势预估

高 歌^{1,2},陈 涛³,徐沅鑫⁴

国家气候中心,北京100081;2.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京210044;
 西藏自治区气候中心,拉萨850000;4.四川省气候中心,成都610072)

摘要:为水土流失预防和科学治理提供参考,基于1961—2023年中国均一化逐日降水资料对降雨侵蚀力进行估算, 并结合侵蚀性降雨特征开展降雨侵蚀力变化趋势和成因分析,并探讨降雨侵蚀力的极端变化,在此基础上,摸清中国及 十大流域降雨侵蚀力变化危险状况,并基于Hurst方法预估未来变化趋势。结果表明:1)1961—2023年,中国及东南 诸河、西北诸河流域年降雨侵蚀力呈现显著增加趋势,西南诸河流域则呈现显著减少趋势,其余大多数流域增加趋势不 明显;2)中国及十大流域大多年侵蚀性降雨量、雨日、平均降雨强度增加,其中平均降雨强度和/或降雨量的变化为大 多数流域年降雨侵蚀力变化的主要成因;3)中国大部地区年最大日降雨侵蚀力增加,10年一遇次降雨侵蚀力1961— 2023年相比1961—1990年呈增加的站点比例多达64.3%;4)近60年来,中国大部地区降雨侵蚀力变化具有危险性, 站点比例达80%,其中降雨侵蚀力总量及极端都呈增加变化的类型在各流域均最为突出、范围最大;5)除西南诸河流 域外,预估大多数流域年降雨侵蚀力未来变化趋势将均以持续增加为主。目前和未来气候条件对中国水土流失治理不容 乐观,需根据降雨侵蚀力变化特点,因地制宜制定长期规划和采取有效措施。

关键词: 降雨; 侵蚀; 变化; 极端; 趋势预估

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405121

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2025)-04-0050-09

高歌,陈涛,徐沅鑫.1961—2023年中国降雨侵蚀力变化特征及未来趋势预估[J].农业工程学报,2025,41(4):50-58. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.202405121 http://www.tcsae.org

GAO Ge, CHEN Tao, XU Yuanxin. Variation and trend of rainfall erosivity in China during 1961-2023 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(4): 50-58. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405121 http://www.tcsae.org

0 引 言

水土流失会导致土地退化,减少耕地资源,淤塞河 流、渠道、水库,影响水利工程发挥效益,还会造成水 质污染,甚至导致水旱、泥石流滑坡等灾害的发生,威 胁粮食安全、环境安全、交通安全和社会经济可持续发 展^[1-2]。中国是世界上水土流失最严重的国家之一,2023 年《中国水土保持公报》表明,中国共有水土流失面积 2.627 6×10⁶ km²,其中水力侵蚀面积 1.071 4×10⁶ km², 占水土流失总面积的 40.8%。在水力侵蚀的各种诱因中, 降雨通过移动和运输土壤颗粒发挥着显著重要作用^[3]。

气候变暖背景下,中国及其不同区域近几十年降水 特征在总量^[4-6]、降水日数及持续时间^[7-8]、强度^[9-10]以及 极端性^[11-13]等方面均有不同程度变化,降水这些特征的 变化会直接改变降雨侵蚀力,影响水力侵蚀。掌握降雨 侵蚀力的变化规律和趋势可为预防水土流失、制定水土 保持规划及优化水土保持措施、修复和生态治理、农业 管理决策等提供参考依据,尤其是水力侵蚀特别严重的 区域^[14]。针对中国^[15-16]及其不同区域^[17-18]、流域^[19-22]的 降雨侵蚀力的变化趋势研究较多,降雨侵蚀力估算除采 用地面观测资料外,卫星遥感、多源数据融合等降水网 格化资料的应用也不断增多^[23-25],网格化降水具有覆盖 范围较广,时空分辨率较高等优势,但高质量的地面观 测资料仍是评估、检验的主要参考^[24]。均一化地面降水 资料,为降雨侵蚀力的变化及趋势研究提供了可靠的基 础,目前仅个别流域采用了此类资料^[19],有待在全国范 围开展使用。

降雨侵蚀力变化成因对各地区水土保持措施和工程 实施具有实际的参考意义,分析因子从初步仅关注年降 雨量^[26],逐步考虑侵蚀性降雨的主要特征因子^[19-20]、极 端降雨变化及大气环流因子的影响^[27]。降雨总量、日数、 雨强特征变化为降雨侵蚀力变化最直接的影响因子,基 于这些指标高歌等^[19]、姬兴杰等^[20]分别采用偏相关、逐 步回归方法对长江流域、黄河流域开展降雨侵蚀力变化 主导因子分析,多因子综合分析对其他流域成因分析开 展是很好的借鉴,各流域可根据降雨侵蚀力变化成因主 导因子的变化进行针对性的规划和措施调整实施。

科学综合评判降雨侵蚀力变化危险性,摸清时空格 局以及未来变化趋势,可为不同区域提高水土保持和流 域科学综合治理、气候变化适应应对能力提供依据。但 以往研究多单独考虑年降雨侵蚀力总量变化可能对水土 流失的不利影响,涉及极端降雨侵蚀力的变化研究则较 少,还是多止步于极端降水的变化,如:吉戴婧琪等^[13]

收稿日期: 2024-05-07 修订日期: 2024-11-20

基金项目:中国气象局气候变化专题项目(QBZ202408);中国气象局创 新发展专项(CXFZ2024Q007)

作者简介: 高歌, 博士, 正研级高工, 研究方向为气象灾害风险评估及气 候影响评价。Email: gaoge@cma.gov.cn

51

研究分析表明近 60 年来中国极端降水强度指数呈现显著 增加趋势,极端降水量及日数指数呈现不显著增加趋势。 实际上,随着近些年来极端降水增多增强,极端降雨侵 蚀力对土壤侵蚀的影响更为严重^[27],是降雨侵蚀力变化 危险性必需考虑的重要方面。气候变化背景下,中国年 降雨侵蚀力变化的危险性以及空间格局分布如何,迫切 需要基于总量和极端两个方面进行综合判断和分析。

本文拟采用历史均一化日降水资料,提高中国及十 大流域年降雨侵蚀力时空变化趋势以及极端变化空间格 局的识别质量,探讨不同流域降雨侵蚀力变化趋势及主 要成因,并试图从降雨侵蚀力总体趋势和极端变化两方 面摸清中国及十大流域降雨侵蚀力变化危险状况,并采 用 Hurst 方法探讨未来趋势,以期为中国水土保护措施 和流域治理提供精细化有价值的参考。

1 数据与方法

1.1 数 据

本文采用中国气象局国家气象信息中心提供的中国 2 419 个气象观测站 1961—2023 年的逐日均一化降水资料开展 分析。该资料采用标准正态方法结合站点沿革信息对原 始站点降水观测资料进行均一性检测和订正,去除因站 点迁移、仪器换型、观测场周边环境变化等原因造成的 资料非均一化^[28],减少气候变化研究的不确定性。中国 气象观测站点分布及十大流域分区见图 1。



注: 1 松花江流域, 2 辽河流域, 3 海河流域, 4 黄河流域, 5 淮河流域, 6 长江流域, 7 东南诸河流域, 8 珠江流域, 9 西南诸河流域, 10 西北诸河流 域。审图号为 GS(2019)1786 号。港澳台数据暂缺。

Note: 1 Songhua River Basin, 2 Liaohe River Basin, 3 Haihe River Basin, 4 Yellow River Basin, 5 Huaihe River Basin, 6 Yangtze River Basin, 7 Southeast River Basin, 8 Pearl River Basin, 9 Southwest River Basin, 10 Northwest River Basin. This map is based on the standard map with the approval number GS (2019) 1786. Data on Hong Kong, Macau, and Taiwan is currently unavailable.

Fig.1 Distribution of meteorological observation stations and ten river basins in China

1.2 方 法

1.2.1 降雨侵蚀力及 10 年一遇次降雨侵蚀力估算

相对月、年尺度,日资料估算的降雨侵蚀力具有更高的精度^[29],本文采用 XIE 等^[30]方法计算日降雨侵蚀力

 $(R_d, \text{MJ·mm/(hm^2 \cdot h \cdot a))}$:

$$R_d = a P_d^{1.7265}$$
 (1)

式中 *P_a* 为不低于 10 mm 的日降雨量; α 取值暖季(5— 9月)为 0.3937, 冷季(10月一次年4月)为 0.3101。 区域平均值计算选择缺测率少于 10% 的站点进行统计, 采用站点占总站数的 90%(图 1)。

采用 10 年一遇日降雨侵蚀力乘以系数 1.17 估算 10 年一遇次降雨侵蚀力^[31]。重现期采用广义极值分布函数 (Generalized extreme value distribution)和 Kolmogorov-Smirnov 法进行统计拟合及优度检验,分布参数用极大 似然法估计,显著水平取 α= 0.05。文中要素值的空间分 布均采用反距离权重插值方法制作。

1.2.2 趋势分析及未来趋势预估

采用线性回归方法的斜率作为线性变化速率进行趋势分析,Mann-kendall方法用于趋势显著性检验,信度取 *a*=0.05。由于非参数 Mann-Kendall 方法对变化趋势的判别会受到序列的 1 阶自相关影响,先对序列与滞后 1 a 的自相关系数进行检验,如自相关显著,原始序列通过去掉自相关性进行修订,然后对修订后的序列进行变化趋势计算及显著性检验,详见文献 [32-33]。

采用重标极差 R/S 方法计算 Hurst 指数预估中国及 十大流域未来趋势。Hurst 指数(H)大小可反映将来对 现有状态的持续性,未来变化趋势是否与之前保持一致^[34]。 当 0.5<H<1时,表明时间序列具有长期相关的特征, 预估未来会持续过去的状态,且 H 值越接近 1 其持续性 越强;当 0<H<0.5 时,表明时间序列有长期相关性, 但将来的总体趋势和过去相反,H 值越接近 0 表明反持 续性越强;当 H=0.5 时,表明时间序列是随机的和不相 关的,未来不受现在的影响。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力及侵蚀性降雨气候特征

全国多年平均年降雨侵蚀力为3713.8 MJ·mm/(hm²·h·a), 空间分布差异大,总体呈现由东南向西北方向递减趋 势,长江流域东部、东南诸河、珠江流域、西南诸河东 南部等地的大部地区有 5000~8000 MJ·mm/(hm²·h·a), 珠江流域东南部及上述局地超过 8 000 MJ·mm/(hm²·h·a), 其中广西东兴最大,达 22 524.5 MJ·mm/(hm²·h·a);南 疆、内蒙古西部、甘肃西部、青海西北部等地不 足 100 MJ·mm/(hm²·h·a), 新疆托克逊最少, 仅为 2.1 MJ·mm/(hm²·h·a)(图 2a)。年侵蚀性降雨量、降雨 日数、平均降雨强度的空间分布与之大体一致(图 2b、 2c、2d),相关系数分别为0.97、0.88、0.78。其中年平 均侵蚀性降雨强度为一年中日降雨量≥10 mm 的降雨总 量/侵蚀性降雨总日数,其多年平均值在辽河流域南部、 海河流域东部、黄河流域下游、淮河流域、长江中下游 大部及四川盆地、东南诸河、珠江流域普遍超过 25 mm/d, 其中珠江流域沿海及长江、淮河流域的局部超 过 30 mm/d (图 2d)。

就流域而言, 年降雨侵蚀力南方流域总体大于北方

流域,其中珠江最大,其次为东南诸河,辽河为北方最 大,西北诸河流域最小。年侵蚀性降雨量和降雨日数空 间分布态势与降雨侵蚀力大体一致,东南诸河略大于珠 江流域,位居第一。就年平均侵蚀性降雨强度而言,珠 江流域最大,其次为淮河、东南诸河流域,海河流域超 过了其他南方流域,位居第四(表1)。



图 2 1961—2023 年中国年降雨侵蚀力与侵蚀性降雨特征指标多年平均值空间分布 Fig.2 Distribution of annual rainfall erosivity and characteristic indexes of erosive rainfall averaged from 1961 to 2023 in China

表 1 1961-2023 年中国十大流域年降雨侵蚀力与侵蚀性降雨 特征指标多年平均值

Table 1Annual rainfall erosivity and characteristic indexes oferosive rainfall averaged from 1961 to 2023 in ten river basins ofChina

流域	ARE/	AER/	AERD/	AERI/
River basins	$(MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1})$	mm	d	$(\mathbf{mm} \cdot \mathbf{d}^{-1})$
松花江	1 522.6	342.0	15.9	21.4
辽河	2 433.6	442.3	17.2	25.3
海河	2 368.1	407.7	15.2	26.6
黄河	1 437.6	317.3	14.6	21.2
淮河	3 952.8	648.3	22.6	28.6
长江	4 837.9	898.7	34.4	25.6
东南诸河	7 151.5	1 288.5	47.4	27.2
珠江	7 919.9	1 273.5	42.5	29.5
西南诸河	2 979.0	679.8	30.7	20.5
西北诸河	262.0	76.2	4.5	13.7
中国	3 713.8	673.4	25.6	24.4

2.2 降雨侵蚀力变化趋势及极端变化特征

1961-2023年中国年降雨侵蚀力大部地区增加,站

点比例为71.2%,松花江流域中部、淮河流域中部、长 江流域中下游大部及四川盆地东部、东南诸河、珠江流 域中部增加速率大,有 100~600 MJ·mm/(hm²·h·10a), 其中增加趋势显著的站点比例为8.3%,且分布较分散; 中国的东北至西南一带年降雨侵蚀力减小,辽河流域南 部、海河流域东部、黄河流域的甘肃东部、四川盆地西 部、西南诸河东部、珠江流域西部等地减小速率有 10~200 MJ·mm/(hm²·h·10a)(图 3a)。年侵蚀性降雨量、 降雨日数变化趋势空间分布与年降雨侵蚀力大体一致, 但增加的范围依次减小,站点比例分别为68.9%、59.4%, 增加趋势显著的站点比例有 7.7 %、6.8%; 减小的范围 依次增加(图 3b、图 3c)。年平均侵蚀性降雨强度呈现 大范围增加,站点比例为73.7%,增加趋势显著的站点 比例达 10.7% (图 3d), 仅辽河流域中部、海河流域大 部、西北诸河东部和西部局部、西南诸河的中部、珠江 流域东部等地减小,大部分地区减少趋势不明显。



注:图中黑点代表通过 a=0.05 水平的趋势显著性检验。下同。

Note: The dots mean that the changing rates of stations passed the trend significant test at α =0.05 level. Same below.



Fig.3 Changing rates of annual rainfall erosivity and characteristic indexes of erosive rainfall from 1961 to 2023 in China

2.2.2 中国和十大流域变化趋势及成因分析

1961—2023 年,中国年降雨侵蚀力呈现显著增加趋势,增加速率为 61.2 MJ·mm/(hm²·h·10a)。年侵蚀性降雨量和平均降雨强度增加,但后者增加趋势显著。就十大流域而言,大多数流域年降雨侵蚀力呈增加趋势,其中东南诸河、西北诸河流域增加趋势显著,仅海河、西南

诸河流域减少,其中后者减少趋势显著。年侵蚀性降雨 量和降雨日数变化趋势基本一致,除西南诸河显著减少 外,其他流域均为增加,其中西北诸河流域增加趋势显 著。年平均侵蚀性降雨强度,黄河、长江、东南诸河、 珠江、西北诸河等流域呈显著增加,其余流域趋势变化 不明显(表2)。

^{2.2.1} 变化趋势空间分布

表 2 1961—2023 年中国十大流域年降雨侵蚀力及侵蚀性降雨 特征指标变化速率

 Table 2
 Changing rates and significant of annual rainfall erosivity and characteristic indexes of erosive rainfall from 1961 to 2023 in

ten river basins of China				
流域	ARE/	AER/	AERD/	AERI/
River basins(N	$1 \text{J} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10a)$	$^{-1})(\text{mm} \cdot (10a)^{-1})$	$(d \cdot (10a)^{-1})($	$mm \cdot d^{-1} \cdot (10a)^{-1})$
松花江	60.5	10.3	0.3	0.1
辽河	25.1	3.6	0.1	0.1
海河	-13.0	0.7	0.1	-0.1
黄河	25.2	2.3	0.0	0.2*
淮河	90.5	7.0	0.1	0.3
长江	100.0	9.3	0.0	0.2*
东南诸河	230.9*	24.4	0.4	0.3*
珠江	131.6	12.2	0.0	0.2*
西南诸河	-86.7*	-21.7*	-1.0*	0.0
西北诸河	12.0*	3.6*	0.2*	0.3*
中国	61.2*	5.6	0.0	0.2*

注: *为通过 a= 0.05 水平的趋势显著性检验。

Note: * means the changing rates passed the trend significant test at α =0.05 level.

摸清各地降雨侵蚀力的变化成因有助于水土保持措施的选择和工程规划。参考文献 [19] 方法,先采用 Spearman 秩偏相关方法分析年降雨侵蚀力与侵蚀性降雨 的3个特征指标的偏相关系数及显著性,判定主要影响 因子(表3),然后分析三者与年降雨侵蚀力变化趋势 的一致性和趋势显著性,判定导致年降雨侵蚀力变化的 贡献因子及主导因子。

表 3 1961—2023 年中国十大流域年降雨侵蚀力与侵蚀性降雨 特征指标偏相关系数

Table 3Patial correlation coefficients and significant test betweenannual rainfall erosivity and characteric indexes of erosive rainfallfrom 1961 to 2023 in ten river basins of China

流域 River basins	ARE & AER	ARE & AERD	ARE & AERI
松花江	0.66*	-0.13	0.65*
辽河	0.67*	-0.31*	0.45*
海河	0.70*	-0.22	0.62*
黄河	0.83*	-0.58*	0.19
淮河	0.66*	-0.14	0.57*
长江	0.82*	-0.4*	0.51*
东南诸河	0.57*	-0.03	0.74*
珠江	0.59*	-0.19	0.55*
西南诸河	0.68*	-0.24	0.35*
西北诸河	0.95*	-0.84*	0.30*
中国	0.83*	-0.43*	0.47*

注: *表示偏相关关系显著(P<0.05)。

Note: * means that the partial correlation coefficient is significant (P < 0.05).

松花江、海河、淮河、东南诸河、珠江、西南诸河 年侵蚀性降雨量和平均降雨强度与年降雨侵蚀力偏相关 系数为正值且显著,而侵蚀性降雨日数则相反,表明前 两者为其主要影响因子,其中松花江、淮河、东南诸河、 珠江,年侵蚀性降雨量和平均降雨强度与年降雨侵蚀力 变化一致,增加速率均为正,均对年降雨侵蚀力变化有 贡献。东南诸河和珠江流域的平均侵蚀性降雨强度增加 趋势显著,为年降雨侵蚀力增加的主导因子。海河流域 年平均侵蚀性降雨强度与年降雨侵蚀力变化均减小,为 其变化主要成因。西南诸河年侵蚀性降雨量与年降雨侵 蚀力均呈显著减少趋势,为其变化主导因素。黄河流域 年侵蚀性降雨量和雨日与年降雨侵蚀力偏相关系数显著, 其中前者与年降雨侵蚀力均增加,为其变化主要成因。 辽河、西北诸河、长江及中国,年降雨侵蚀力与3个指 标的偏相关系数均显著,仅与年降雨日数偏相关系数为 负。辽河流域3个指标均呈现不明显的增加趋势,均对 年降雨侵蚀力增加有贡献。西北诸河流域3个指标均呈 显著增加趋势,在三者共同作用下,导致年降雨侵蚀力 也呈现显著增加趋势。长江流域和中国年侵蚀性降雨量 和平均降雨强度变化对年降雨侵蚀力变化均有贡献,三 者均增加,且平均降雨强度增加趋势显著,为主导因子。 2.2.3 年最大日降雨侵蚀力变化趋势

中国大部地区年最大日降雨侵蚀力增加,增加站点的比例达 65.9%,其中显著增加站点比例为 7%,淮河、长江、珠江、东南诸河等流域的部分地区增加幅度较大,有 50~200 MJ·mm/(hm²·h·10a)。对近 60 年最大日降雨侵蚀力极大值出现各年代的站数统计表明,出现极值的站数总体呈现增加趋势,其中 21 世纪 10 年代最多,站点比例为 23%,其次为 20 世纪 90 年代,站点比例接近 20%,20 世纪 70 年代最少,为 9.7%,进入 21 世纪 20 年代仅 3 a,极大值站点比例就已达 10%。年最大日降雨侵蚀力变化趋势空间格局由最大日降雨量的变化决定(图 4)。



- 图 4 1961—2023 年中国年最大日降雨侵蚀力和最大日降雨量 变化趋势
- Fig.4 Changing rates of annual maximum daily rainfall erosivity and daily rainfall from 1961 to 2023 in China

2.2.4 10年一遇次降雨侵蚀力及其变化

10年一遇次降雨侵蚀力可反映极端强降雨事件对土 壤流失的可能影响。其空间分布与年降雨侵蚀力类似, 由东南向西北递减,辽河流域南部、海河流域东部、淮 河流域、长江流域四川盆地及以东、东南诸河、珠江流 域等地有2000~5000 MJ·mm/(hm²·h·a),其中琼州半岛、 海南岛等地超过5000 MJ·mm/(hm²·h·a),广东阳江最大, 达12139.4 MJ·mm/(hm²·h·a);西北诸河、黄河和长江流 域的上游、西南诸河西部不足500 MJ·mm/(hm²·h·a),其 余地区有500~2000 MJ·mm/(hm²·h·a)(图5a)。

通过 1961—2023 年与 1961—1990 年两时段对比, 进一步探讨极端降雨侵蚀力的变化,可为水保工程建设 规划、防范措施制定提供参考。两时段服从 GEV 分布的 站点共有 2 183 个。1961—2023 年相比 1961—1990 年,中 国大部地区次降雨侵蚀力极端性呈增强态势,增强站点 比例达 64.3 %。增幅较大的区域主要分布珠江流域北部、 东南诸河、长江流域中游的南部及下游、淮河流域大部、 海河流域西南部等地普遍超过 200 MJ·mm/(hm²·h·a), 其中局部超过 600 MJ·mm/(hm²·h·a)(图 5b),上述地区 及松花江流域大部、辽河流域西部、黄河流域西部和中 部、西北诸河西部等地相对增幅有 10%~40%,西北诸 河局部超过 40%(图 5c);减幅较大的区域局地性分布强 (图 5b),相对减幅百分比普遍不足 10%,松花江流域 西部、海河流域东北部等地的局部有 10%~30%(图 5c)。



图 5 1961—2023 年中国 10 年一遇次降雨侵蚀力及其与 1961—1990 年时段的绝对差值、相对差值分布 Fig.5 Distributions of 10-year return period of event rainfall erosivity in the period of 1961-2023 and the absolutive/relative difference to the period of 1961-1990 in China

2.3 变化危险状况综合分析

降雨侵蚀力变化危险状况可从年降雨侵蚀力总体变 化趋势以及10年一遇次降雨侵蚀力两时段极端变化情况 综合考虑。通过两个指标增加、减少情况组合形成4种 降雨侵蚀力变化类型见表4。

表4 1	1961-2023年十大流域不同降雨侵蚀力变化危险状况
Table 4	Dangerous conditions of rainfall erosivity change in ten
	river beging of Ching from 1061 to 2022

liver basins of China from 1901 to 2025				
流域	站点百分比 Percentage of stations/%			
River basins	类型 1Type 1	类型 2Type 2	类型 3Type 3	类型 4Type 4
松花江	8.1	2.4	20.2	69.4
辽河	24.4	14.1	5.1	56.4
海河	37.6	9.3	14.4	38.7
黄河	24.1	10.8	15.9	49.1
淮河	16.1	9.4	13.5	60.9
长江	15.8	8.9	19.2	56.1
东南诸河	4.8	2.4	10.8	81.9
珠江	26.7	11.4	15.2	46.7
西南诸河	26.9	26.9	7.7	38.5
西北诸河	11.5	8.0	19.5	61.1

注:通过指标(年降雨侵蚀力、10年一遇次降雨侵蚀力)增加、减少情况组 合形成4种类型:两者均呈减少(类型1)、前增后减(类型2)、前减后增 (类型3)、两者均增加(类型4)。

Note: Type 1, 2, 3, 4 indicate the four types formed by the combination of indicators (annual rainfall erosivity, 10-year return period of event rainfall erosivity): Type 1, two indicators decrease; Type 2, The former increases and the latter decreases; Type 3, The former decreases and the latter increases; Type 4, two indicators increase.

两者均呈减少,危险性减小(类型1);前增后减 (类型2)和前减后增(类型3),表明变化单方面危险 性增加;两者均增加,表明变化两方面危险性增加(类 型4),情况最为严重。后3种情况下全国站点比例达 80.1%,各流域3种情况总计站点比例均超过60%,其 中东南诸河、松花江流域超过90%,长江、淮河、西北 诸河流域超过80%。各流域类型4情况站点比例均为最 大,其中有6个流域比例超过50%,东南诸河流域高达 81.9%。两者均呈减少情况的站点比例海河流域最大为 37.6%(表4)。

2.4 未来变化趋势预估

计算各站 Hurst 指数大小,结合图 3a 过去 60 多年 年降雨侵蚀力变化趋势分析,预估未来变化趋势有 4 种 情况:持续减小、持续增加、由减小变化为增加、由增 加变化减小,各种变化趋势站点所占比例见表 5。未来 中国总体以持续增加趋势为主,比例超过 50%,其中长 江流域涉及站点最多,分布广,珠江、淮河、黄河、松 花江、西北诸河等流域涉及站点也较多;持续减小以及 由增加变为减小趋势站点比例分别为 20.7%、17.4%,由 减小变为增加趋势的比例最少。就各流域而言,绝大多 数流域以持续增加比例为主,其中松花江比例为 83.8%, 其次为东南诸河有 72.0%;西南诸河以持续减小趋势为 主,比例为 40.7%,但持续增加的比例也较高,为 34.6%。

表 5 中国及十大流域年降雨侵蚀力未来变化趋势预估

able 5	i rend projections of annual rainfall erosivity in ten river
	basins and China in future

冻墙	站点百分比 Percentage of stations/%			
River	持续减小	持续增加	减小变增加	增加变减小
basins	Continuously	Continuously	Decrease→	Increase→
	decrease	increase	Increase	Decrease
松花江	7.4	83.8	2.2	6.6
辽河	27.9	43.0	10.5	18.6
海河	31.7	39.5	15.1	13.7
黄河	24.8	45.2	9.6	20.4
淮河	21.1	55.4	4.9	18.6
长江	18.4	55.9	6.1	19.5
东南诸河	2.8	72.0	3.7	21.5
珠江	24.3	46.6	13.8	15.4
西南诸河	40.7	34.6	12.3	12.3
西北诸河	13.5	63.7	4.7	18.1
中国	20.7	53.8	8.1	17.4

2.5 讨论

通过与已有中国及流域降雨侵蚀力变化趋势研究 相比,由于时段不同及采用的均一化资料、流域平均 站点、序列自相关影响修订处理等因素,各区域降雨 侵蚀力的变化趋势和速率大小均会有差异。如:WEI 等[21]研究表明, 1960-2018年淮河流域年降雨侵蚀力 总体呈略增加, 变化速率为 47.4 MJ·mm/(hm2 ·h·10a), 空间上呈现南增北减态势,减少的区域集中在沂沭泗 流域,而本文研究淮河流域降雨侵蚀力总体增加速率 为 90.5 MJ·mm/(hm2 ·h·10a), 空间上大部分地区呈现增 加, 仅局地有减小; LAI等^[22]的研究表明, 1960-2012年珠江流域降雨侵蚀力略有增加,变化速率为 49.6 MJ·mm/(hm2 ·h·10a), 而本文研究则约为其 2.6 倍, 变化的空间态势大体一致,西部减少且局部减少趋 势显著,中东部以增加为主。极端强降雨事件对年降 雨侵蚀力变化速率影响大,如:海河流域 1961-2018 年为-101.3 MJ·mm/(hm²·h·10a), 1961-2023 年变为 -13.0 MJ·mm/(hm²·h·10a), 主要是因为 2019 年以来极 端强降雨频发,整个流域有22%的站点出现日降雨侵 蚀力历史极大值,尤其 2021 年最多,其次为 2023 年, 2021 年流域平均值为 1961 年以来最大值,超过 1963 年, 2023年位居第四大。姬兴杰等^[20]研究发现 1961—2019 年黄河流域呈现不显著的减少趋势,而本文计算变化 速率为 25.2 MJ·mm/(hm²·h·10a),转为不明显的增加趋 势,这也与近几年极端降雨有关,如:2021年河南出 现特大暴雨,其中郑州最大小时降水量超过此前中国 大陆地区小时降水量气象观测记录,整个流域有16.8% 的站点日值出现历史极大值,该年流域平均值也达1961 年以来最大值。这些区域变化的新特点,在水土流失 治理中需要考虑适当调整方案, 尤其侧重增加针对极 端降水的水土保持应对措施,保护现有取得的成效。

从年降雨侵蚀力变化趋势成因分析来看,中国及各 流域主要贡献因子及主导因子不完全相同。西北诸河和 辽河侵蚀性雨量、平均降雨强度、雨日变化均有贡献, 但西北诸河流域三要素变化均发挥重要作用;长江、东 南诸河、珠江、松花江、淮河等流域及中国平均侵蚀性 降雨强度和雨量变化均有贡献,其中前3个流域和中国 平均降雨强度变化发挥主导作用。东南诸河、珠江等南 方沿海流域,侵蚀性降雨特征变化除受大气环流因素影 响外,还受到近些年来台风及其伴随的降水变化的影响, CAO 等^[35] 研究表明珠江流域台风通过增加降水量、降 雨持续时间以及降雨动能影响降雨侵蚀力变化。黄河流 域受降雨量增加主导,与姬兴杰等^[20]基于逐步回归分析 得出降雨量是黄河流域降雨侵蚀力变化的主导因素相一 致,由于该流域侵蚀性雨日数无变化,雨量增加主要也 是平均雨强增加造成的。上述大多数流域,就影响降雨 侵蚀力变化的成因而言, 平均降雨强度变化对年降雨侵 蚀力变化发挥重要作用。平均降雨强度增大,极端事件 多发,更易引发泥石流、滑坡等灾害,不仅导致土壤流 失,还对经济发展、交通运输、人们正常生活和生命安 全造成威胁。

1961—2023年,中国大部地区降雨侵蚀力变化危险 性增加。在3种危险性增加类型中,以降雨侵蚀力总量 及极端都呈增加的类型在各流域均最为突出、覆盖范围 大,对水土流失预防和治理十分不利,尤其是重点关注 和防治水土流失的区域,治理措施兼顾总量和极端的影 响。西北诸河流域水土流失严重,植被覆盖总体较差, 除受类型 4 影响外,类型 3 占比也较大,降雨侵蚀力极 端性增加造成山区山洪、泥石流等灾害加重,如:2022 年8月17日,青海西宁大通县瞬时强降雨,引发山洪、 泥石流灾害,人员伤亡严重,同时下垫面植被破坏严重。 松花江、长江、东南诸河流域降雨侵蚀力危险类型存在 类似情况。上述区域需要特别关注极端降水对已有水保 工程设施的破坏,加固提升预警防护防御能力,以及相 关工程建设标准也需要考虑极端降水的影响。辽河、海 河、黄河、淮河、珠江、西南诸河等流域除受类型4影 响外,类型1占比也较大,这些区域虽降雨侵蚀力危险 性减小,但因受降雨减少影响,一定程度地影响植被生 长,也会减小植被覆盖率,造成土质疏松,一旦有强降 水发生,实际水土流失也会十分严重,植被生态建设和 维护仍不能放松。

本文预估未来中国总体及绝大多数流域年降雨侵蚀 力变化趋势将以持续增加为主。根据中国水利部门水土 流失动态监测显示,近些年来中国水土流失状况连续实 现面积强度"双下降"、水蚀风蚀"双减少",水土保 持率稳步提升。但考虑到中国总体水土流失面积仍较大, 目前和未来气候条件对中国水土流失治理和稳固成果不 容乐观。建议各地根据未来降雨侵蚀力变化趋势以及各 自独特的侵蚀环境和特点,采用不同水土流失防治措施。 坡耕地是东北黑土区水土流失的主要策源地,考虑到目 前降雨侵蚀力危险性增加,建议合理增设防护林带,做 好坡耕地防护,有效防治沟道侵蚀,采取适当耕作措施 及植林种草、建坝蓄水等工程[36],加强工程洪水调控。 海河、淮河流域的土石山区,土层薄、水土流失危害大, 近十年来受雨带北抬北扩影响,部分地区降雨增多,极 端强降水多发,洪涝灾害加重,需继续加强坡耕地改造 和退耕还林(草),保持水土、涵养水源,优化土地利 用格局,减少人为水土流失的工程项目,形成"蓄、排、 拦、挡、封"综合的工程治理措施[37]。黄土高原区水土 流失治理工程保有量巨大,为应对极端降水、降雨侵蚀 力增加,建议在水土流失治理质量上巩固、提高和改善, 做好梯田淤地坝水土保持工程措施经营维护和功能提升, 增强抵御暴雨能力^[38],同时可充分利用降雨推进植被恢 复措施,减少极端降水下造成的水土流失。长江中下游、 珠江、东南诸河流域等地的南方红壤丘陵地区,降雨量 丰沛、雨日多、强度强,降雨侵蚀力的持续增加,迫切 需要加强坡耕地、荒坡以及崩岗治理,稳定基本农田, 有计划、有步骤地实施退耕还林、封山育林,进一步加 强小流域为单元的综合治理。西南诸河及长江上游流域, 泥石流、滑坡量大面广,降雨侵蚀力增加的区域,灾害 发生频率也将增加,泥石流和滑坡治理仍是重点,控制 沟谷蚀。西南石漠化地区, 1991-2020年, 干旱强度和 日数呈现增强、增多趋势^[39],不利植被生存,会进一步 加剧石漠化发展,未来降雨侵蚀力持续减少,迫切需要 加强关键时段降水预报预测,为库坝蓄水提供参考,合 理利用水源,提高植被覆盖率。西北诸河流域,未来降 雨侵蚀力将持续增加,建议在气候暖湿变化背景下,以 保护优先、自然恢复为主,加强植被恢复等生态环境建 设,同时做好山区山洪、泥石流滑坡灾害防治,提高农 田防洪水利设施的建设质量和标准^[40]。

3 结 论

1)本文采用均一化降水资料分析表明 1961-2023 年中国年降雨侵蚀力总体呈现显著增加趋势,十大流域 中除西南诸河流域显著减少、东南诸河和西北诸河流域 显著增加外,其余大多数流域变化趋势不明显。年降雨 侵蚀力与年侵蚀性降雨量、降雨日数变化趋势空间分布 大体一致,但增加的范围依次减小,而平均侵蚀性降雨 强度则大范围增加。造成各流域年降雨侵蚀力变化趋势 成因不完全相同。

2)年最大日降雨侵蚀力中国大部地区增加,其历史 极大值发生站数随年代变化总体呈现增加态势,21世纪 10年代最多,超过20世纪90年代。1961—2023年相 比1961—1990年,中国有64.3%的站点10年一遇次降 雨侵蚀力极端性呈增强态势。

3) 1961—2023 年,中国大部地区降雨侵蚀力变化 危险性增加,站点比例超过 80%,其中降雨侵蚀力总量 及极端都呈增加的类型在各流域均最为突出,对水土流 失防预和治理十分不利。中国及绝大多数流域年降雨侵 蚀力未来变化趋势预估表明将以持续增加为主。总体看 来,目前和未来气候条件对中国水土流失预防治理十分 不利,需根据降雨侵蚀力总量和极值变化特点和趋势, 因地制宜制定长期规划和采取有效措施。

[参考文献]

- DAI W, ZENG Y, JING T G, et al. Estimation of rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau: A new combination of the ERA5 dataset and machine learning[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129892.
- [2] CHEN Y L, WEI T, LI J D, et al. Future changes in global rainfall erosivity: Insights from the precipitation changes[J]. Journal of Hydorlogy, 2024, 638: 131435.
- [3] BARAKAT A, RAFAI M, MOSAID H, et al. Mapping of water induced soil erosion using machine learning models: a case study of Oum Er Rbia Basin (Morocco) [J]. Earth Systems and Environment, 2023, 7: 151–170
- [4] 徐东坡,李金明,周祖昊,等. 1956—2018 年中国降水特 征的时空分布规律研究[J]. 水利水电技术,2020,51(10): 20-27.
 XU Dongpo, LI Jinming, ZHOU Zuhao, et al. Study on the

x0 Dongpo, L1 Jinning, ZHOO Zunao, et al. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 20-27. (in Chinese with English abstract)

[5] 杜军凯, 仇亚琴, 李云玲, 等. 1956—2016 年中国年降水量及 其年内分配演变特征[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 182-196. DU Junkai, QIU Yaqin, LI Yunling, et al. Evolution charcteristics of the interannual and intra-annual precipitation in China from 1956-2016[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 182-196. (in Chinese with English abstract)

- [6] 战云健,任国玉,王朋岭.数据处理方法对中国区域平均 降水序列精度的影响[J]. 气候变化研究进展,2019,15(6): 584-595.
 ZHAN Yunjian, REN Guoyu, WANG Pengling. The influence of data processing on constructing regional average precipitation time series[J]. Climate Change Research, 2019, 15(6): 584-595. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周雨,张育嘉,苗昌盛,等.中国降水特征及拟合参数时 空分布研究[J].人民珠江,2024,45(3):48-58.
 ZHOU Yu, ZHANG Yujia, MIAO Changsheng, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation characteristics and fitting parameters in China[J]. Pearl River, 2024, 45(3):48-58. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王颖,施能,顾俊强,等.中国雨日的气候变化[J].大气科 学,2006,30(1): 162-170.
 WANG Ying, SHI Neng, GU Junqiang, et al. Climatic variation of wet days in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(1): 162-170. (in Chinese with English abstract)
- [9] 薛媛,杨庆,马柱国,等. 1961—2020年中国区域不同等级降水的变化趋势及其可能成因[J].大气科学,2024,48(2): 619-644.
 XUE Yuan, YANG Qing, MA Zhuguo, et al. Trends and possible causes of different levels of precipitation variations in China dring 1961-2020[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(2): 619-644. (in Chinese with English abstract)
- [10] 许肖璐,张方敏,邓汗青,等. 1961-2020年中国降水等级的变化特征[J].水土保持研究,2024,31(2):181-189.
 XU Xiaolu, ZHANG Fangmin, DENG Hanqing, et al. Changes in precipitation grades in China from 1961-2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2):181-189. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵煜飞,张强,鞠晓慧,等.中国近 30 年短时极端降水特 征分析[J]. 大气科学, 2024, 48(3): 1144-1156.
 ZHAO Yufei, ZHANG Qiang, JU Xiaohui, et al. Analysis of the characteristics of short-term extreme precipitation in China in the last 30 Years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(3): 1144-1156. (in Chinese with English abstract)
- [12] 江洁,周天军,张文霞.近60年来中国主要流域极端降水 演变特征[J].大气科学,2022,46(3):707-724. JIANG Jie, ZHOU Tianjun, ZHANG Wenxia. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3): 707-724. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吉戴婧琪,元媛,韩剑桥.中国极端降水事件的时空变化 及趋势预测[J].中国农村水利水电,2022(10):74-80.
 JI Daijingqi, YUAN Yuan, HAN jianqiao. Spatial-temporal changes and trend predictions of extreme precipitation events in China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10):74-80. (in Chinese with English abstract)
- [14] XU X J, YAN Y J, DAI Q H, et al. Spatial and temporal dynamics of rainfall erosivity in the karst region of southwest China: Interannual and seasonal changes[J]. Catena, 2023, 221: 10673.
- [15] 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[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256.
 LIU Bintao, TAO Heping, SONG Chunfeng, et al. Temporal

and spatial variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009[J]. Geographical Research , 2013., 32(2): 245-256.

- [16] 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(2): 33-40.
 ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyuan. Spatial distribution of rainfall erosivity in China[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(2): 33-40.
- [17] 郑明星,张富.西北地区降雨侵蚀力时空变化规律分析[J]. 甘肃农业大学学报,2022,57(1):154-160.
 ZHENG Mingxing, ZHANG Fu. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in northwest China[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(1): 154-160. (in Chinese with English abstract).
- [18] WANG W T, YING S Q, YU J, et al. Long-term trends of precipitation and erosivity over Northeast China during 1961-2020[J]. International Soil and Water Conservation Research. 2023, 11: 743-754.
- [19] 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).
- [20] 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.

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).

- [21] WEI C, DONG X H, YU D, et al. Spatio-temporal variations of rainfall erosivity, correlation of climatic indices and influence on human activities in the Huaihe River Basin, China[J], Catena, 2022, 217: 106486
- [22] LAI C G, CHEN X H, WANG Z L, et al. Spatio-temporal variation in rainfall erosivity during 1960-2012 in the pearl River Basin, China[J], Catena, 2016, 137: 382-391.
- [23] 江源天,王文婷,谢云,等.基于 IMERG 反演降水数据估 算广东省降雨侵蚀力[J].农业工程学报,2023,39(24): 153-164.

JIANG Yuantian, WANG Wenting, XIE Yun, et al. Estimating rainfall erosivity in Guangdong Province using IMERG remote sensing precipitation products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(24): 153-164. (in Chinese with English abstract)

[24] 邢贞相,段维义,刘明阳,等.四种网格化降水产品估算 中国大陆区域降雨侵蚀力比较[J].农业工程学报,2023, 39(5):100-109.

XING Zhenxiang, DUAN Weiyi, LIU Mingyang, et al. Comparison of the four gridded precipitation products for estimating regional rainfall erosivity in the Chinese mainland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(5): 100-109. (in Chinese with English abstract)

 [25] 梁宇靖, 沈润平, 师春香, 等. 基于 CLDAS 融合降水的中国 降雨侵蚀力研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1333-1346.
 LIANG Yujing, SHEN Runping, SHI Chunxiang, et al. Rainfall erosivity in China based on CLDAS fusion precipitation[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1333-1346. (in Chinese with English abstract)

 [26] 曾瑜, 厉莎, 胡煜彬. 1961—2014 年鄱阳湖流域降雨侵蚀 力时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1): 106-114.
 ZING Va. LI Sha, ULI Vakin, Spatial transmission of

ZENG Yu, LI Sha, HU Yubin. Spatial-temporal variation of distribution of rainfall erosivity in the Poyang Lake Basin during 1961-2014[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(1): 106-114. (in Chinese with English abstract)

- [27] ZHAO Y S, ZHU D Y, WU Z G, et al. Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectivs[J]. Science of the Total Environment, 2024, 917: 170425
- [28] 王秋香,李庆祥,周昊楠,等.中国降水序列均一性研究 及对比分析[J]. 气象, 2012, 38(11): 1390-1398.
 WANG Qiuxiang, LI Qingxiang, ZHOU Haonan, et al. Homogeneity study and comparison and analysis on precipitation series over China[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(11): 1390-1398. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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)
- [30] XIE Y, YIN S Q, LIU B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology. 2016, 535: 547-558.
- [31] 殷水清,薛筱禅,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)
- [32] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. Hydrological Processes, 2002, 16: 1807-1829.
- [33] CHU J T, XIA J, XU C Y, et al. Spatial and temporal variability of daily precipitation in Haihe River basin, 1958-2007[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2): 248-260.

[34] 王俊骄,张雅旎,孙晓艳. 综合 R/S 法和 Mann-Kendall 法 分析杭州市 60 年小雨降水日趋势变化[J]. 科技通报, 2019, 35(12): 41-45.
WANG Junjiao, ZHANG Yani, SUN Xiaoyan. Trends of light rain precipitation days of Hangzhou in recent 60 years[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(12): 41-45. (in

[35] CAO Z, ZHU D Y, LI R H, et al. Influence of typhoons on the spatiotemporal variation in rainfall erosivity in the Pearl river basin[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2024, 155: 1019-1034.

Chinese with English abstract)

[36] 王计磊,李子忠.东北黑土区水力侵蚀研究进展[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.
WANG Jilei, LI Zizhong. Research progress on water erosion in the black soil region of northeast China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(5): 389-397. (in Chinese with English abstract)

- [37] 孙天妙,曹建生,阳辉,等.北方土石山区水土流失治理现状与展望[J].防护林科技,2022,(9):56-61.
 SUN Tianmiao, CAO Jiansheng, YANG Hui, et al. The current situation and prospects of soil erosion control in the northern mountainous areas[J]. Protection Froest Science and Technology, 2022, (9): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [38] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报,2019,39(20):7398-7409.
 LI Zongshan, YANG Lei, WANG Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loss Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409. (in Chinese

with English abstract)

- [39] 高歌,李莹,陈逸骁,等. 30 年来中国干旱时空规律演变特征[J].中国防汛抗旱,2023,33(7):1-8.
 GAO Ge, LI Ying, CHEN Yixiao, et al. The evolution characteristics of drought spatio-temporal law in China in the recent 30 years [J]. China Flood & Drought Management. 2023, 33(7):1-8. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王澄海,张晟宁,张飞民,等.论全球变暖背景下中国西北 地区降水增加问题[J].地球科学进展,2021,36(9):980-989.
 WANG Chenghai, ZHANG Sengning, ZHANG Feimin, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9):980-989. (in Chinese with English abstract)

Variation and trend of rainfall erosivity in China during 1961-2023

GAO Ge^{1,2}, CHEN Tao³, XU Yuanxin⁴

(1. National Climate Center, Beijing 100081, China;

 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
 Tibet Autonomous Region Climate Centre, Lhasa 850000, China;
 Sichuan Climate Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: This study aims to estimate the variation characteristics of rainfall erosivity in 10 river basins in China. The daily precipitation data was then selected from 1961 to 2023. Three characteristic values of erosive rainfall were combined, such as the total erosive rainfall, erosive rainy days, and mean erosive rainfall intensity. The trend and cause of annual rainfall erosivity were analyzed by the linear regression and Spearman's rank partial correlation analysis. The extreme variations were obtained from the trend of annual maximum daily rainfall erosivity and difference of event rainfall erosivity under a 10-year return period during the two periods 1961-2023 and 1961-1990. The recurrence period was statistically fitted for the goodness of fit using the Generalized extreme value distribution (GEV) function and Kolmogorov-Smirnov method. Then, the dangerous situations of rainfall erosivity were comprehensively determined to consider the overall trends and extreme variations in China. At last, the annual rainfall erosivity was predicted using the Hurst index by rescaled range analysis P/S. Some recommendations were given on soil erosion prevention and control in different key erosion regions. The results show that: 1) The ever-increasing trend was found in the annual rainfall erosivity in the Southeast- and Northwest-river basin from 1961 to 2023. But the Southwest-river basin showed a significant decreasing trend. There was no outstanding increasing trend in most other river basins; 2) The positive rate of change was observed in the annual erosive rainfall, rainy days, and mean erosive rainfall intensity in most river basins. Particularly, the significantly increasing trend was found in the mean erosive rainfall intensity in the Yellow, Yangtze, southeast, Pearl, and northwest river basins. The different causes contributed to the trends of annual rainfall erosivity in the 10 river basins. The annual mean intensity of erosive rainfall and/or rainfall was dominated by the trend of annual rainfall erosivity in most river basins. 3) A positive rate of change was found in the maximum daily rainfall erosivity in most parts of China. The number of stations with the extreme maximum historical value was increasing over time, with the peak in the 2010s over that in the 1990s. The ratio of stations with the increasing event rainfall erosivity under a 10-year return period between the two periods 1961-2023 and 1961-1990 to the total was 64.3%; 4) Either the total amount or the extreme of rainfall erosivity was damaged to the soil and water conservation. The rainfall erosivity showed a proportion of more than 80% of total stations in most parts of the country over the past 60 years. Among them, both the total and extreme rainfall erosivity were the most prominent and widespread in all river basins; 5) The annual rainfall erosivity in most stations in most 10 river basins was predicted to continue the ever-increasing trends during 1961-2023, except for Southwest river basin with ever decreasing trend. The current and future climate conditions are not optimistic for soil erosion control in China. It is very necessary for long-term plans and effective measures, according to the total amount and extreme changes of rainfall erosivity in specific regions. The findings can also provide scientific references for the prevention and control of soil erosion. Keywords: rainfall; erosion; variation; extreme; trend projection