

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.024

河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析

付金霞¹ 张 鹏¹ 郑粉莉^{1,2} 关颖慧¹ 高 燕¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与干旱农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于河龙区间 12 个雨量站点 1957—2011 年降雨日数据及输沙量年数据,采用滑动平均、线性倾向估计、Mann-Kendall 非参数检验、累计距平、双累积曲线等方法,分析了河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力和输沙量的动态变化过程以及二者之间的相关关系,定量评估了降雨侵蚀力变化和人类活动对河龙区间输沙量变化的影响及贡献率。结果表明,河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力在 378.1 ~ 2 324.6 MJ·mm/(hm²·h·a) 之间变化,其平均值为 1 319.7 MJ·mm/(hm²·h·a);整个研究期内降雨侵蚀力呈不显著减小趋势,年均减小量为 9.7 MJ·mm/(hm²·h·a)。近 55 a 降雨侵蚀力变化过程可划分为 3 个阶段:1957—1974 年为快速下降阶段,其下降率为 83.7%;1975—1999 年为缓慢下降阶段,其下降率为 66.6%;2000—2011 年为缓慢回升阶段,其上升率为 42.7%。以 1957—1969 年降雨侵蚀力为基准,20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世纪前 12 a 降雨侵蚀力分别减小了 15.9%、19.5%、27.5% 和 22.7%。河龙区间近 55 a 输沙量变化介于 (0.09 ~ 21.37) 亿 t 之间,其平均值为 5.6 亿 t。整个研究期内输沙量呈极显著的下降趋势,其下降速率为 0.19 亿 t/a。以 1957—1969 年输沙量为基准,20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世纪前 12 a 输沙量分别减少了 27.3%、64.1%、54.8% 和 88.7%。经 Mann-Kendall 非参数检验法和累计曲线法综合判定,1979 年为河龙区间输沙量突变年份。输沙量与降雨侵蚀力具有极好的线性相关性。通过建立二者双累积曲线方程,计算得出 20 世纪 80、90 年代和 21 世纪前 12 a 降雨侵蚀力变化对输沙量变化的贡献率分别为 22.6%、44.3% 和 19.0%,而人类活动对输沙量变化的贡献率分别为 77.4%、55.7% 和 81.0%,人类活动对输沙量变化的影响程度较大。1980—1989 年和 2000—2011 年具有基本相同的降雨侵蚀力条件,但后者的输沙量却比前者减少 67.6%,表明 2000—2011 年河流输沙量的变化主要由人类活动引起,人类活动每年减少输沙量 2.5 亿 t。

关键词: 河龙区间; 输沙量; 降雨侵蚀力; 人类活动; 贡献

中图分类号: P9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0185-08

Dynamic Change Analysis of Rainfall Erosivity and River Sediment Discharge of He - Long Reach of the Yellow River from 1957 to 2011

Fu Jinxia¹ Zhang Peng¹ Zheng Fenli^{1,2} Guan Yinghui¹ Gao Yan¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The dynamic change of rainfall erosivity and river sediment discharge as well as the correlation between river sediment discharge and rainfall erosivity were analyzed based on daily rainfall data and yearly sediment discharge of 12 rainfall stations located in He - Long reach of the Yellow River from 1957 to 2011. Meanwhile, the impact and contribution of rainfall erosivity changes and human activities on the river sediment discharge changes were quantitatively evaluated. The main methods used were the moving average, linear trend estimation, Mann-Kendall nonparametric test, cumulative departure curve and double mass curve. The results showed that rainfall erosivity in He - Long reach from 1957 to 2011

收稿日期: 2015-03-29 修回日期: 2015-09-10
基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201201083)
作者简介: 付金霞(1978—),女,讲师,博士生,主要从事土地利用变化、气候变化与土壤侵蚀研究,E-mail: fujinxia405@nwsuaf.edu.cn
通信作者: 郑粉莉(1960—),女,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

shifted from $378.1 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ to $2\,324.6 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ with a mean of $1\,319.7 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, and rainfall erosivity did not exhibit significant downtrend. The decrement of rainfall erosivity per year in 1957—2011 was $9.7 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$. The changing trend of rainfall erosivity was divided into three stages during past 55 years in He—Long reach, which consisted of a rapid declining trend from 1957 to 1974, a slow decreasing trend from 1975 to 1999, and a slow increasing trend from 2000 to 2011. The declining rates of the first and second stages were 83.7% and 66.6%, respectively, and the increasing rate of the third stage was 42.7%. With rainfall erosivity in 1957—1969 as a reference, rainfall erosivities in the 1970s, 1980s, 1990s and the first 12 years of the 21st century were decreased by 15.9%, 19.5%, 27.5% and 22.7%, respectively. The river sediment discharge in He—Long reach from 1957 to 2011 shifted from $9 \times 10^6 \text{ t}$ to $2.14 \times 10^9 \text{ t}$ with a mean of $5.60 \times 10^8 \text{ t}$, and river sediment discharge showed highly significant downtrend. The decrement of river sediment discharge in 1957—2011 was $1.9 \times 10^7 \text{ t/a}$. With river sediment discharge in 1957—1969 as a reference, river sediment discharges in the 1970s, 1980s, 1990s and the first 12 years of the 21st century were decreased by 27.3%, 64.1%, 54.8% and 88.7%, respectively. The Mann—Kendall nonparametric test and the cumulative departure curve showed that the abrupt change of river sediment discharge appeared in 1979. There was a better linear correlation between river sediment discharge and rainfall erosivity. According to the double mass curve equation, the contributions of rainfall erosivity to the river sediment discharge changes in the 1980s, 1990s and the first 12 years of the 21st century were 22.6%, 44.3% and 19.0%, respectively; while the contributions of human activities to the river sediment discharge changes were 77.4%, 55.7% and 81.0%, respectively. Therefore, the impact of human activities on the river sediment discharge changes was dominated. Although rainfall erosivity in two periods of 1980—1989 and 2000—2011 was similar, river sediment discharge in 2000—2011 was decreased by 67.6%, compared with that in 1980—1989. Thus, the river sediment discharge changes were mainly caused by human activities and the decrement of river sediment discharge per year caused by human activities was $2.5 \times 10^8 \text{ t}$ in 2000—2011.

Key words: He—Long reach; sediment discharge; rainfall erosivity; human activity; contribution

引言

降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,它是通用土壤流失方程^[1] (Universal soil loss equation, USLE) 及改进的通用土壤流失方程^[2] (Revised universal soil loss equation, RUSLE) 的基本构成因子。美国农业部颁发的 USLE 或 RUSLE 各期农业手册都编绘了降雨侵蚀力等值线图,并以图表形式给出各地理气候区的降雨侵蚀力年内分布特征,用于指导农业生产实践^[3]。

黄河中游河龙区间是黄河流域水土流失最严重的地区,其不仅是黄河流域泥沙主要来源区,也是粗泥沙的主要来源区,一直以来是黄河流域水土保持生态建设重点区域。河龙区间泥沙来量自 20 世纪 70 年代开始减少,80、90 年代持续大幅度减少,进入 21 世纪以来减少更为明显。现有研究主要从降雨变化和人类活动影响两方面对河龙区间泥沙减少原因进行分析^[4-7],很少涉及引起水蚀的关键降雨指标因子——降雨侵蚀力的研究。在河龙区间,水蚀

面积占区间总面积的 80.40%^[8],水蚀是其主要的土壤侵蚀方式,而降雨是引起水蚀的主要动力^[9]。众所周知,降雨侵蚀力反映了降雨潜在的侵蚀能力,能够全面表征降雨量、降雨强度、降雨历时和降雨动能等对土壤侵蚀的综合影响^[3,10-11]。降雨侵蚀力已被国内外许多土壤侵蚀模型所采用并成为其预报模型中用以表征降雨的因子,除美国的 USLE 和 RUSLE 外,国内比较典型的模型有 Liu 等^[12] 的中国土壤流失预报方程 (China soil loss equation, CSLE)、江忠善等^[13] 的坡面土壤侵蚀预报模型、范瑞瑜^[14] 的小流域年产沙模型等。地表的侵蚀产沙变化必然引起河流输沙量的变化。郑粉莉等^[15] 对坡面尺度上土壤侵蚀过程的研究结果表明,黄土坡面上部片蚀+细沟侵蚀带的来水来沙使浅沟侵蚀带的侵蚀产沙量增加 16.7%~80.6%;浅沟微地形陡坡地的侵蚀状态以侵蚀-搬运过程居主导地位,上方来沙量全部被径流搬运而不在浅沟侵蚀带发生沉积。流域尺度泥沙输移特征的已有研究结果表明,在黄河中游高含沙水流普遍存在^[16],由于高含沙水流具有极强

的输沙能力,加之中游支流的泥沙来源于粒径较细的黄土,因此绝大部分泥沙以冲泻质(大于 95%)形式为水流搬运,很难发生沉积^[17-18,23]。这一机制使得黄河中游多年平均泥沙输移比接近 1^[17-24],即输沙量与侵蚀量基本相等。龚时旻等^[17]对河龙区间的沙量平衡计算表明,河龙区间平均每年沉积的泥沙量(0.8 亿 t)仅占河龙区间总产沙量的 8%,这 8%也可能是计算或测量误差,因此整个河龙区间多年情况下泥沙输移比也为 1。许炯心等^[25]对河龙区间无定河流域河道泥沙冲淤量的计算结果表明,1956—1989 年无定河流域河道淤积量(100.7 万 t)只相当于输沙量(1.39 亿 t)的 0.73%,因此认为进入无定河河道的泥沙可以全部下泄而不发生淤积,流域泥沙输移比为 1。郑明国等^[26]对无定河流域不同空间尺度泥沙输移比的研究结果也表明,不同尺度流域(流域面积 0.18~935 5 km²)的多年泥沙输移比在 1.05~1.12 之间变化,非常接近 1。

因此,作为代表降雨引起土壤侵蚀潜在能力的指标——降雨侵蚀力与河流输沙量的关系亟待研究。李林育等^[27]以单位降雨侵蚀力的输沙量(即输沙量负荷)为指标,分析松花江流域人类活动对河流泥沙的影响;张世杰等^[28]以年输沙量与年降雨侵蚀力的比值为指标,研究与相关重大事件和政策有关的人类活动对河龙区间河流泥沙的影响;秦伟等^[29]的研究结果表明,累积降雨侵蚀力与累积输沙量之间存在极高的相关性,并利用双累积曲线法和径流输沙系数还原法,计算了北洛河上游生态建设的减沙效应。现有研究中,同时分析河龙区间降雨侵蚀力和输沙量的动态变化过程以及两者之间关系的研究较为缺乏。鉴于此,本文基于河龙区间 12 个雨量站点 1957—2011 年降雨日数据及输沙量年数据,采用滑动平均、线性倾向估计、Mann-Kendall 非参数检验、累计距平、双累积曲线等方法,分析了河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力和输沙量的动态变化过程以及两者之间的相关关系,在此基础上定量评估降雨侵蚀力变化和人类活动对河龙区间输沙量变化的影响及贡献率,以期为黄土高原水土流失防治提供科学依据,为河龙区间生态建设提供决策支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

河龙区间是黄河中游河口镇至龙门之间的区段,位于 35°40′~40°34′N、108°02′~112°44′E 之间,面积 11.29 万 km²。河龙区间黄河干流长 725 km,河道比降 1%;支流水系发育,其中流域面积在

1 000 km²以上的较大支流达到 21 条,主要包括皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河、佳芦河、无定河、三川河和延河等流域。河龙区间属温带大陆性季风气候,年均气温 7℃,年降水量 453 mm。降水量由东南向西北递减,东南部湿润地区多年平均降水量可达 590 mm,而西北部地区降水量仅为 300 mm 左右,且年内降水集中于 5—9 月份。水蚀是其主要的土壤侵蚀方式,水蚀面积占区间总面积的 80.40%^[8]。区间多年输沙量均值为 6.3 亿 t^[6],1967 年输沙量大于 21 亿 t,2011 年则不到 0.1 亿 t。

1.2 数据来源

河龙区间气象数据来源于中国气象局网站,由于各项数据起始时间和数据缺失情况不同,本文遵循欧洲气候评估数据集采用的标准^[30]:①数据不得少于 40 年。②总体缺失数据不得超过 10%。③每年缺失数据不得超过 20%或连续超过 3 个月。最终选取东胜、河曲、横山、清水河、离石、绥德、五寨、隰县、兴县、延安、右玉、榆林等 12 个气象站 1957—2011 年日降水数据。

河龙区间泥沙数据来源于《中国河流泥沙公报》、《黄河水资源公报》以及《黄河泥沙公报》。同样遵循以上原则,最终选取头道拐和龙门站 1957—2011 年泥沙数据。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算

Wischmeier 等于 1958 年提出以降雨动能和最大 30 min 降雨强度的乘积作为降雨侵蚀力指标^[31]。该指标能较全面地表征降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨动能等各项降雨侵蚀特征,因此得到广泛认同。然而,其计算公式中要求的详细次降雨资料不易获得,对此,国内外学者提出了降雨侵蚀力的各种简易算法^[32-35]。这些简易算法主要是基于日降雨、月降雨和年降雨 3 类资料建立的。3 类算法中以基于日降雨资料的简易算法精度最高,众多基于日降雨的侵蚀力模型中又以章文波等修正的 Richardson 日降雨侵蚀力估算模型使用最为普遍。其模型为

$$R=\alpha \sum_{k=1}^m P_k^{\beta} \tag{1}$$

其中

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{2}$$

$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{3}$$

式中 k ——半月内侵蚀性降雨天数
 P_k ——半月内第 k 天大于等于 12 mm 的日降雨量,mm
 R ——半月内降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h·a)

p_{d12} ——日降雨量大于等于 12 mm 的日平均降雨量,mm

p_{y12} ——日降雨量大于等于 12 mm 的年平均降雨量,mm

利用式(1)~(3)计算逐年各半月的降雨侵蚀力,经汇总可得到月降雨侵蚀力、年降雨侵蚀力和多年平均降雨侵蚀力。

1.3.2 Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 检验方法(M-K 检验法)^[36-37]已被广泛应用于气象时间序列的趋势变化分析和气候水文序列突变检验。本文基于 Matlab 平台,利用 Mann-Kendall 检验方法对降雨侵蚀力及河流泥沙长期变化趋势及河龙区间输沙量突变发生年份进行检验。

2 结果与讨论

2.1 河龙区间降雨侵蚀力动态变化

2.1.1 降雨侵蚀力年际变化

河龙区间 1957—2011 年降雨侵蚀力均值为 1 319.7 MJ·mm/(hm²·h·a)。近 55 a 间降雨侵蚀力年际变化波动剧烈,其变化过程大体可归为 3 个阶段(图 1):① 1957—1974 年为快速下降阶段,降雨侵蚀力从 1961 年的 2 324.6 MJ·mm/(hm²·h·a)下降至 1974 年的 848.6 MJ·mm/(hm²·h·a),18 a 间下降幅度达 1 476 MJ·mm/(hm²·h·a),下降率为 83.7%,但降雨侵蚀力均值高出近 55 a 降雨侵蚀力均值 9.6%。② 1975—1999 年为缓慢下降阶段,降雨侵蚀力从 1978 年的 1 984.3 MJ·mm/(hm²·h·a)下降至 1999 年的 679.9 MJ·mm/(hm²·h·a),26 a 间

下降幅度为 1 304.4 MJ·mm/(hm²·h·a),下降率为 66.6%,降雨侵蚀力均值低于近 55 a 均值 3.3%。③ 2000—2011 年为缓慢回升阶段,2009 年降雨侵蚀力上升至 1 557.2 MJ·mm/(hm²·h·a),上升率为 42.7%,但降雨侵蚀力均值仍低于近 55 a 均值 7.5%。以 1957—1974 年降雨侵蚀力为基准,1975—1999 年、2000—2011 年降雨侵蚀力分别下降了 11.8% 和 15.6%。

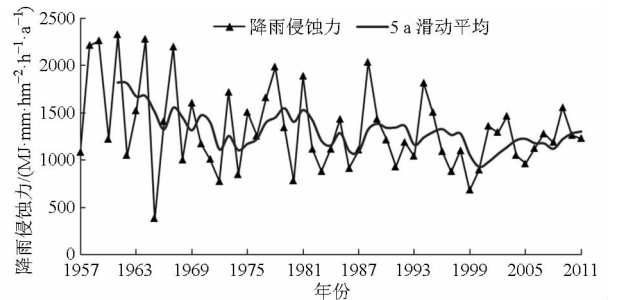


图 1 河龙区间降雨侵蚀力年际变化

Fig.1 Interannual change of rainfall erosivity in He-Long reach from 1957 to 2011

河龙区间 1957—2011 年降雨侵蚀力最大值为 2 324.6 MJ·mm/(hm²·h·a),出现在 1961 年;最小值仅为 378.1 MJ·mm/(hm²·h·a),出现在 1965 年。最大值与最小值的比值为 6.1,变异系数为 0.3(表 1),呈中等程度变异。近 55 a 降雨侵蚀力 M-K 检验系数 Z_{MK} 值为负,呈减小趋势,但未通过 95% 置信度检验,其减小趋势不明显,每年减小量仅为 9.7 MJ·mm/(hm²·h·a)。刘建祥等^[10]研究同样得出,1981—2010 年 30 a 来,河龙区间总体降雨侵蚀力呈不显著的减小趋势。

表 1 河龙区间降雨侵蚀力统计值

Tab.1 Statistical values of rainfall erosivity in He-Long reach from 1957 to 2011							
参数	均值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	最大值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	最小值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	极值比	变异 系数 C_v	M-K 趋势系数 Z_{MK}	年变化量/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)
数值	1 319.7	2 324.6	378.1	6.1	0.3	-1.1	-9.7

2.1.2 降雨侵蚀力年代变化

将 1957—2011 年近 55 a 划分为 1957—1969 年、1970—1979 年、1980—1989 年、1990—1999 年及 2000—2011 年 5 个时间段,分别对河龙区间降雨侵蚀力年代变化进行分析。图 2 表明,1957—1969 年降雨侵蚀力均值最大,达 1 578.5 MJ·mm/(hm²·h·a),高出近 55 a 均值 19.6%;20 世纪 70 年代降雨侵蚀力略高于近 55 a 均值;其余 3 个时段降雨侵蚀力均低于近 55 a 均值,但 21 世纪的前 12 a 降雨侵蚀力与 20 世纪 80 年代降雨侵蚀力数值近乎相等。

1957—1969 年、20 世纪 70、80、90 年代降雨侵蚀力依次减小,21 世纪的前 12 a 降雨侵蚀力有所回升,但仍低于近 55 a 均值。以 1957—1969 年降雨侵蚀力为基准,20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世纪的前 12 a 降雨侵蚀力分别减小了 15.9%、19.5%、27.5% 和 22.7%。

2.2 输沙量变化分析

2.2.1 输沙量年际变化

1957—2011 年河龙区间平均输沙量为 5.60 亿 t。输沙量最大值出现在 1967 年,达到 21.37 亿 t;最小

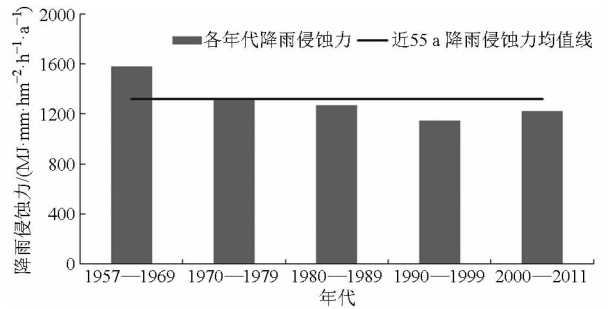


图2 河龙区间降雨侵蚀力年代变化

Fig.2 Decade change of rainfall erosivity in He - Long reach from 1957 to 2011

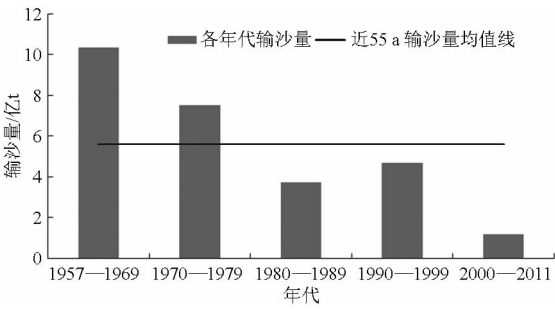


图4 河龙区间输沙量年代变化

Fig.4 Decade change of sediment discharge in He - Long reach from 1957 to 2011

值出现在2011年,仅为0.09亿t。近55 a间输沙量的极值比达到89.04,变异系数0.87,年际波动非常剧烈(图3)。各年输沙量在波动中不断下降,从1959年的18.75亿t下降到2011年的0.09亿t,近55 a间下降量达18.66亿t,为近55 a输沙量均值的3.3倍。近55 a输沙量M-K检验系数达-5.95,通过了99%显著性检验,说明输沙量下降趋势极为显著,下降速率为0.19亿t/a。

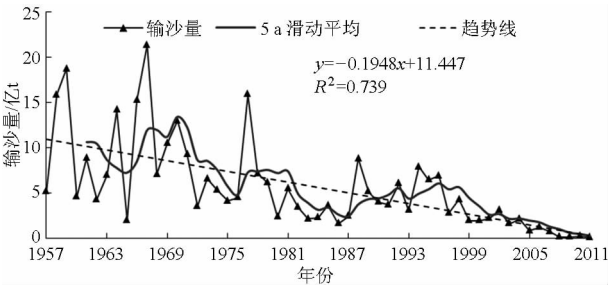


图3 河龙区间输沙量年际变化

Fig.3 Interannual change of sediment discharge in He - Long reach from 1957 to 2011

2.2.2 输沙量年代变化

同样将1957—2011年近55 a划分为1957—1969年、1970—1979年、1980—1989年、1990—1999年及2000—2011年5个时间段,分别对河龙区间输沙量年代变化进行了分析。图4表明,河龙区间1957—1969年输沙量均值最大,达到10.36亿t,高出近55 a输沙量均值85.0%;20世纪70年代输沙量为7.53亿t,高出近55 a输沙量均值34.4%;其余3个时段输沙量都低于近55 a输沙量均值,20世纪80、90年代以及21世纪的前12 a输沙量分别低于近55 a输沙量均值33.57%、16.43%和79.11%。除20世纪90年代异常外,各年代输沙量依次减小,20世纪90年代输沙量高于20世纪80年代和21世纪的前12 a输沙量。以1957—1969年输沙量为基准,20世纪70、80、90年代以及21世纪的前12 a输沙量分别减少了27.3%、64.1%、54.8%和88.7%。

2.2.3 输沙量突变检验

为了确定输沙量发生突变的年份,绘制了河龙

区间输沙量累计距平曲线(图5)。曲线在1979年和1996年均出现了较明显的拐点,1979年是累计曲线由增大趋势向减少趋势转折的重要点,1996年是累计曲线减少速率转化的一个拐点。经调查发现,1979年以后,国家在黄土高原实施大规模水土流失综合治理措施,如黄土高原四大片(皇甫川、无定河、三川河、定西县)的综合治理、小流域综合治理和修建坝库工程等。人类活动的干预改变了区域下垫面条件,减少了流域的土壤侵蚀和入河泥沙,使得河龙区间的输沙量显著减少。因此,本文确定1979年为河龙区间输沙量发生突变的时间点。

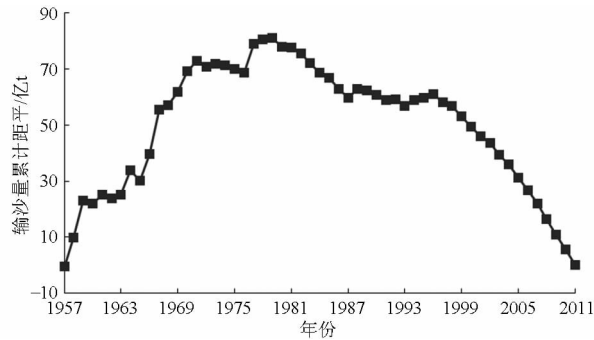


图5 河龙区间输沙量累计距平曲线

Fig.5 Cumulative departure curve of annual sediment discharge in He - Long reach

2.3 输沙量与降雨侵蚀力关系研究

2.3.1 输沙量与降雨侵蚀力相关性分析

以河龙区间输沙量突变年份1979年为界,将整个研究期划分为基准期(1957—1979年)和检验期(1980—2011年),分别建立基准期、检验期及整个研究期输沙量与降雨侵蚀力的线性方程(表2)。从表2可以看出,3个时段内区间输沙量与降雨侵蚀力相关系数均通过 $p < 0.01$ 显著性检验,二者具有极好的线性正相关关系。

2.3.2 降雨侵蚀力变化和人类活动对输沙量变化的影响评估

气候变化和地表下垫面变化的共同作用引起河龙区间输沙量变化。降水因子是气候因素中影响河

表 2 河龙区间输沙量与降雨侵蚀力关系

Tab.2 Correlation between sediment discharge and rainfall erosivity in He - Long reach

年份	线性方程	相关系数
1957—1979 年	$Y = 0.006x - 0.893$	0.684 **
1980—2011 年	$Y = 0.003x - 1.434$	0.506 **
1957—2011 年	$Y = 0.007x - 4.080$	0.650 **

注:Y 为年输沙量,亿 t;x 为年降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h·a);
**表示通过 $p < 0.01$ 显著性检验。

龙区间土壤侵蚀的关键驱动因子,而降雨侵蚀力又是公认的表征降雨潜在侵蚀能力的重要指标。下垫面因素主要包括:地形、土壤、土地利用、植被覆被、水利工程及其他人类活动。由于短时间内地形和土壤不会发生根本性的变化,因此下垫面变化主要由各种人类活动作用引起。由此本文研究降雨侵蚀力和人类活动对河龙区间输沙量变化的影响。在研究期内,作为代表降雨引起土壤侵蚀潜在能力的指标——降雨侵蚀力未发生明显变化,而河龙区间输沙量却显著减小,这必定是受到人类活动的影响。综合以上分析,可认为 1957—1979 年间河龙区间输沙量的变化主要由降雨侵蚀力的变化引起,受人类活动影响较少;1979—2011 年间,随着人类活动干预强度的增加,输沙量的变化由人类活动和降雨侵蚀力变化的共同作用引起。本文通过绘制输沙量-降雨侵蚀力双累积曲线并建立回归方程,分别评估降雨侵蚀力变化和人类活动对河龙区间输沙量变化的影响。

河龙区间输沙量-降雨侵蚀力双累积曲线如图 6

表 3 各年代降雨侵蚀力变化与人类活动对河龙区间输沙量变化的影响								
Tab.3 Quantification of impact of rainfall erosivity change and human activities on sediment discharge								
年份	实测输沙量/	计算输沙量/	实测减沙量/	实测减沙率/	降雨侵蚀力影响		人类活动影响	
	亿 t	亿 t	亿 t	%	减沙量/亿 t	贡献率/%	减沙量/亿 t	贡献率/%
1957—1979 年	9.13	9.11						
1980—1989 年	3.72	7.91	5.41	59.3	1.22	22.6	4.19	77.4
1990—1999 年	4.68	7.16	4.45	48.7	1.97	44.3	2.48	55.7
2000—2011 年	1.17	7.62	7.96	87.2	1.51	19.0	6.45	81.0

2.4 2000—2011 年人类活动对河龙区间输沙量的影响分析

通过上述降雨侵蚀力和输沙量年代变化的分析可知:河龙区间 1980—1989 年降雨侵蚀力均值为 1 270.1 MJ·mm/(hm²·h·a),2000—2011 年降雨侵蚀力均值为 1 220.8 MJ·mm/(hm²·h·a),二者比值为 1.04。以 1980—1989 年降雨侵蚀力为基准,2000—2011 年河龙区间降雨侵蚀力几乎未发生变化。在相同的降雨侵蚀力条件下,与 1980—1989 年的输沙量相比,2000—2011 年的输沙量发生了巨大

所示。可以看出,双累积曲线出现拐点,经判断拐点出现年份正是 1979 年;突变年份前后双累积曲线方程的决定系数均在 0.95 以上,通过了相关性检验。利用突变年份前的输沙量-降雨侵蚀力双累积曲线方程,可以求得突变年份后的累积输沙量,并以此为基础估算突变年份后的输沙减少量。

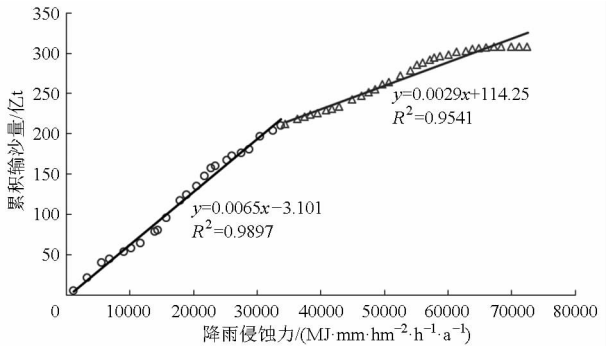


图 6 河龙区间输沙量-降雨侵蚀力双累积曲线

Fig.6 Double mass curve of rainfall erosivity and sediment discharge in He - Long reach

将突变年份之后各年降雨侵蚀力数据代入双累积曲线建立的回归方程,得到计算年输沙量。不同时段计算值之间的差值,即为降雨侵蚀力变化的影响量;同期计算值与实测值之差即为人类活动减沙量。表 3 表明,20 世纪 80 年代和 21 世纪的前 12 a 人类活动对输沙量的影响较大,其贡献率分别达到 77.4% 和 81.0%,而降雨侵蚀力的贡献率分别为 22.6% 和 19.0%;20 世纪 90 年代人类活动对输沙变化的影响程度略高于降雨侵蚀力变化对输沙量变化的影响,其贡献率为 55.7%。

变化。1980—1989 年输沙量均值为 3.7 亿 t,2000—2011 年输沙量均值为 1.2 亿 t,二者差值为 2.5 亿 t,比值大于 3,后者比前者减少了 67.6%。由此推出,2000—2011 年输沙量变化均由人类活动引起。通过计算得出,21 世纪的前 12 a 人类活动每年减少输沙量 2.5 亿 t。这一时期的人类活动主要是 1999 年国家开始实施的退耕还林还草工程。Mann - Kendall 非参数检验也表明(图 7), U_F 曲线和 U_B 曲线在 2000 年附近出现交点,进一步说明了 1999 年实施的退耕还林还草工程对 2000—2011 年

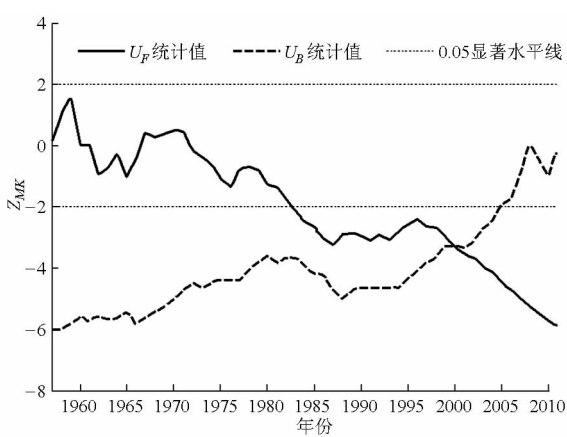


图 7 河龙区间输沙量变化的 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 7 Mann-Kendall mutation test of annual sediment discharge in He-Long reach

输沙量的影响达到突变。

3 结论

(1)河龙区间近 55 a 的降雨侵蚀力均值为 1 319.7 MJ·mm/(hm²·h·a),极值比为 6.1,变异系数为 0.3,呈中等程度变异。整个研究期内降雨侵蚀力 M-K 趋势系数为 -1.1,呈不显著减小趋势,每年减小量为 9.7 MJ·mm/(hm²·h·a);近 55 a 降雨侵蚀力变化过程可划分为 3 个阶段:1957—1974 年为快速下降阶段,下降率 83.7%;1975—1999 年为缓慢下降阶段,下降率 66.6%;2000—2011 年为缓慢回升阶段,上升率 42.7%。以 1957—1969 年降雨侵蚀力为基准,20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世

纪的前 12 a 降雨侵蚀力分别减小了 15.9%、19.5%、27.5% 和 22.7%。

(2)河龙区间近 55 a 输沙量均值为 5.60 亿 t,极值比为 89.04,变异系数为 0.87,年际波动非常剧烈。整个研究期内输沙量 M-K 趋势系数为 -5.95,呈极显著下降趋势,下降速率为 0.19 亿 t/a。以 1957—1969 年输沙量为基准,20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世纪的前 12 a 输沙量分别减少了 27.3%、64.1%、54.8% 和 88.7%。经 Mann-Kendall 非参数检验法和累计曲线法综合判定,1979 年为河龙区间泥沙量突变年份。

(3)无论基准期(1957—1979 年)、检验期(1980—2011 年),还是整个研究期内,输沙量与降雨侵蚀力都有极好的线性相关性。通过建立二者双累积曲线方程计算得出,20 世纪 80、90 年代和 21 世纪的前 12 a 降雨侵蚀力变化对输沙量变化的贡献率分别为 22.6%、44.3% 和 19.0%,而人类活动对输沙量变化的贡献率分别为 77.4%、55.7% 和 81.0%,人类活动对输沙量变化的影响程度较大。

(4)以 1980—1989 年降雨侵蚀力为基准,2000—2011 年降雨侵蚀力几乎未发生变化。在基本相同的降雨侵蚀力条件下,后者的输沙量与前者相比发生了巨大变化,减少了 67.6%,由此推断出,2000—2011 年输沙量变化均由人类活动引起。经计算得出,21 世纪的前 12 a 人类活动每年减少输沙量 2.5 亿 t。

参 考 文 献

- 1 Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington, DC: USDA-ARS, 1978; 34-38.
- 2 Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Washington, DC: USDA-ARS, 1997; 25-31.
- 3 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征 [J]. 山地学报, 2003, 21(1): 33-40.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(1): 33-40. (in Chinese)
- 4 冉大川, 吴永红, 李雪梅, 等. 河龙区间近期人类活动减水减沙贡献率分析 [J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 84-86.
Ran Dachuan, Wu Yonghong, Li Xuemei, et al. Analysis on contribution rate of water and sediment reduction by human activities in Hekouzhen-Longmen Region in last years [J]. Yellow River, 2012, 34(2): 84-86. (in Chinese)
- 5 冉大川, 刘斌, 白志刚, 等. 河龙区间减沙效益与水土流失治理度的关系 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 24-34.
Ran Dachuan, Liu Bin, Bai Zhigang, et al. Relationship between sediment reduction benefit and control degree of soil erosion in region from Hekouzhen to Longmen [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 24-34. (in Chinese)
- 6 高鹏. 黄河中游水沙变化及其对人类活动的响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Gao Peng. Stream flow and sediment discharge change trend and its response to human activities in the middle reaches of the Yellow River [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 7 穆兴民, 巴桑赤烈, Zhang Lu, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应 [J]. 泥沙研究, 2007(2): 36-41.
Mu Xingmin, Basang Chilie, Zhang Lu, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekouzhen-Longmen region of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 36-41. (in Chinese)
- 8 董亚维, 吴永红, 马卫星, 等. 基于遥感监测的河龙区间水土保持效果分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1):

157 – 160.

Dong Yawei, Wu Yonghong, Ma Weixing, et al. Analysis on effectiveness of soil and water conservation in Hekouzhen – Longmen Region based on remote sensing monitoring [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(1): 157 – 160. (in Chinese)

- 9 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169 – 175.

Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169 – 175. (in Chinese)

- 10 刘建祥, 李智广, 张晓萍, 等. 最近 30 年河龙区间降雨侵蚀力的时空演变特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 6 – 13.
Liu Jianxiang, Li Zhiguang, Zhang Xiaoping, et al. Spatial-temporal variation characteristics of rainfall erosivity in He – Long region during last 30 years [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 6 – 13. (in Chinese)

- 11 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 in the Pearl River Basin during 1960—2012 [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 159 – 167. (in Chinese)

- 12 Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C] // Proceedings of 12th ISCO Conference, Vol II — process of soil erosion and its environment effect. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 21 – 25.

- 13 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究 [J]. 泥沙研究, 2005(4): 1 – 6.
Jiang Zhongshan, Zheng Fenli, Wu Min. Prediction model of water erosion on hillslope [J]. Journal of Sediment Research, 2005(4): 1 – 6. (in Chinese)

- 14 范瑞瑜. 黄河中游地区小流域土壤流失量计算方程的研究 [J]. 中国水土保持, 1985(2): 12 – 18.
Fan Ruiyu. Research on soil loss calculation equation of small watershed in the middle reaches of the Yellow River [J]. Soil and Water Conservation in China, 1985(2): 12 – 18. (in Chinese)

- 15 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.

- 16 Xu J X. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China [J]. CATENA, 1999, 36(1 – 2): 1 – 19.

- 17 龚时旸, 熊贵枢. 黄河泥沙来源和地区分布 [J]. 人民黄河, 1979(1): 7 – 18.
Gong Shidang, Xiong Guishu. The source and regional distribution of sediment in the Yellow River [J]. Yellow River, 1979(1): 7 – 18. (in Chinese)

- 18 牟金泽, 孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J]. 泥沙研究, 1982(2): 60 – 65.
Mou Jinze, Meng Qingmei. The sediment delivery ratio in sediment yield calculation of watershed [J]. Journal of Sediment Research, 1982(2): 60 – 65. (in Chinese)

- 19 景可. 黄土高原泥沙输移比的研究 [C] // 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989: 14 – 26.

- 20 景可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

- 21 蔡强国, 陈浩, 马绍嘉, 等. 黄土丘陵沟壑区羊道沟小流域次降雨泥沙输移比研究 [C] // 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集. 北京: 地质出版社, 1991: 105 – 113.

- 22 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系 [J]. 地理学报, 2000, 55(3): 354 – 363.
Chen Hao. Relationship between erosion and sediment yield in drainage basins of loess gully-hilly areas [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 354 – 363. (in Chinese)

- 23 陈浩, 蔡强国, 陈金荣, 等. 黄土丘陵沟壑区人类活动对流域系统侵蚀、输移和沉积的影响 [J]. 地理研究, 2001, 20(1): 68 – 75.

Chen Hao, Cai Qiangguo, Chen Jinrong, et al. Influence of human activities on erosion, delivery and deposit of basin system in loess hilly-gully region [J]. Geographical Research, 2001, 20(1): 68 – 75. (in Chinese)

- 24 谢旺成, 李天宏. 流域泥沙输移比研究进展 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(4): 685 – 694.

Xie Wangcheng, Li Tianhong. Research comment on watershed sediment delivery ratio [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(4): 685 – 694. (in Chinese)

- 25 许炯心, 孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响 [J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 29 – 34.

Xu Jiongxin, Sun Ji. Effect of erosion control measures on sediment delivery ratio [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 29 – 34. (in Chinese)

- 26 郑明国. 黄土丘陵沟壑区多重空间尺度泥沙输移研究 [R] // 坡沟系统侵蚀耦合机制之泥沙输移比研究. 郑州: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2015.

- 27 李林育, 焦菊英, 李锐, 等. 松花江流域河流泥沙及其对人类活动的响应特征 [J]. 泥沙研究, 2009(2): 62 – 70.
Li Linyu, Jiao Juying, Li Rui, et al. Response characteristics of sediment to human activities in the Songhua River Basin [J]. Journal of Sediment Research, 2009(2): 62 – 70. (in Chinese)

process[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(1): 21 – 32.

16 Fang M X, Ma Q H, Wang Z, et al. A novel method to recover ammonia loss in ammonia-based CO₂ capture system: ammonia regeneration by vacuum membrane distillation[J]. Greenhouse Gases Science and Technology, 2015, 5(4): 487 – 498.

17 Bonmatí A, Flotats X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterization and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion[J]. Waste Management, 2003, 23(3): 261 – 272.

18 Gústin S, Mariñsek-Logar R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(1): 61 – 66.

19 EL-Bourawi M S, Khayet M, Ma R, et al. Application of vacuum membrane distillation for ammonia removal[J]. Journal of Membrane Science, 2007, 301(1 – 2): 200 – 209.

20 晏水平, 陈竞翔, 贺清尧, 等. 氨基酸盐吸收剂的沼气 CO₂ 吸收特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(增刊 2): 127 – 133. Yan Shuiping, Chen Jing'ao, He Qingyao, et al. Performance of CO₂ absorption by using novel amino acid salts[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2012, 40(Supp. 2): 127 – 133. (in Chinese)

21 Lei X H, Sugiura N, Feng C P, et al. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 145(3): 391 – 397.

22 晏水平, 贺清尧, 蔡凯, 等. 有机胺基氨基酸盐吸收剂的沼气 CO₂ 分离特性[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 199 – 205. Yan Shuiping, He Qingyao, Cai Kai, et al. Performance of CO₂ removal from biogas by using amine-based amino acid salts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 199 – 205. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 192 页)

28 张世杰, 焦菊英, 李林育, 等. 黄河河龙区间河流泥沙对相关重大事件与政策的响应 [J]. 地理科学, 2009, 29(6): 905 – 910. Zhang Shijie, Jiao Juying, Li Linyu, et al. Response of sediment to correlative significant events and policies of Hekou – Longmen Region in the Yellow River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(6): 905 – 910. (in Chinese)

29 秦伟, 朱清科, 刘广全, 等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应 [J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1325 – 1332. Qin Wei, Zhu Qingke, Liu Guangquan, et al. Regulation effects of ecological conservation on runoff and sediment in the upper reaches of the Beiluo River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1325 – 1332. (in Chinese)

30 Klein Tank M G, Wijngaard J B, Van Engelen A. Climate of Europe: assessment of observed daily temperature and precipitation extremes [R]. De Bilt: KNMI, 2002.

31 Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions of American Geophysical Union, 1958, 39(3): 285 – 291.

32 Richardson C W. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 1983, 26(1): 153 – 157.

33 卜兆宏, 董勤瑞, 周伏建, 等. 降雨侵蚀力因子算法的初步研究 [J]. 土壤学报, 1992, 29(4): 408 – 417. Bu Zhaohong, Dong Qinrui, Zhou Fujian, et al. A preliminary study of rainfall erosivity algorithm [J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(4): 408 – 417. (in Chinese)

34 Lo A, EI-Swaify S A, Dangler E W, et al. Effectiveness of  $EI_{30}$  as an erosivity index in Hawaii soil erosion and conservation [M]. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1985: 384 – 392.

35 刘春利, 杨勤科, 谢红霞. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 850 – 857. Liu Chunli, Yang Qinke, Xie Hongxia. Spatial and temporal distributions of rainfall erosivity in the Yanhe River Basin [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2010, 31(4): 850 – 857. (in Chinese)

36 Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245 – 259.

37 Kendall M G, Gibbons J D. Rank correlation methods [M]. London: Oxford University Press, 1990.