黄河河口—龙门区间降雨时空分布特征及其与流域产沙的关系

张 萍[1,2], 蔡强国[1,2], 郑明国[3], 何天乐[2,4]

(1.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2.中国科学院大学 资源环境学院, 北京 10049; 3.广东省科学院生态环境与土壤研究所 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心 广东省农业环境综合治理重点实验室 广东省面源污染防治工程技术研究中心, 广东 广州 510650; 4.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)

摘 要:[目的] 揭示黄土高原典型多沙粗沙区河口—龙门区间降雨时空分布特征及其与流域产沙的关系,为区域水土保持规划的制定提供科学依据。[方法] 基于降雨和产沙模数资料,采用泰森多边形加权变差系数法、K-means 聚类分析以及线性回归分析,系统研究河口—龙门区间降雨和产沙的空间变异规律。[结果] 1959—2015 年期间,河龙区间汛期降雨和汛期降雨侵蚀力具有相同的空间分布特征,但是汛期降雨侵蚀力表现出更强的空间变异性,两者在年内和年际时间尺度上分别表现出相同的空间分布特征,并且具有纬度地带性($p<0.01$)。汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在支流尺度上的空间变异性差异不大,具有同增同减的变化趋势。[结论] 1959—2015 年期间,水土流失大规模治理以前,河口—龙门区间流域产沙主要受降雨的影响($p<0.01$),水土流失治理以后,流域产沙量锐减,降雨和流域产沙模数无显著相关关系。

关键词:汛期降雨;汛期降雨侵蚀力;流域产沙;时空分布;河龙区间

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2020)04-0025-07 **中图分类号**:S157

文献参数:张萍, 蔡强国, 郑明国, 等.黄河河口—龙门区间降雨时空分布特征及其与流域产沙的关系[J].水土保持通报,2020,40(4):25-31. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.004; Zhang Ping, Cai Qiangguo, Zheng Mingguo, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation in Hekou-Longmen region and its relationship with sediment yield [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(4):25-31.

Spatial and Temporal Distribution of Precipitation in Hekou-Longmen Region and Its Relationship with Sediment Yield

Zhang Ping[1,2], Cai Qiangguo[1,2], Zheng Mingguo[3], He Tianle[2,4]

(1. *Key Laboratory of Terrestrial Water Circulation and Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing* 100101, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Engineering Research Center for Non-point Source Pollution Control, Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong* 510650, *China*; 4. *State Key Laboratory of Resource and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial distribution of rainfall and its relationship with sediment yield in Hekou-Longmen region of the middle reaches of the Yellow River was studied in order to provide basis for erosion control and soil and water conservation planning. [Methods] Based on the data of rainfall and sediment yield modulus, the spatial variation rules of rainfall and sediment yield in Hekou-Longmen region was systematically studied by using Tyson polygon weighted variation coefficient method, K-means clustering analysis and linear regression analysis. [Results] From 1959 to 2015, the precipitation and rainfall erosivity

收稿日期:2019-10-09 **修回日期**:2020-04-22

资助项目:国家自然科学基金项目"黄河中游多沙粗沙区流域产沙空间分布及其演变"(41671278)

第一作者:张萍(1994—),女(汉族),新疆维吾尔自治区阿勒泰市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email:zhangp.17s@igsnrr.ac.cn。

通讯作者:郑明国(1971—),男(汉族),湖北省钟祥市人,研究员,主要从事河流地貌与水土保持方面的研究。Email:mgzheng@soil.gd.cn。

in flood season showed the same spatial distribution characteristics, but the spatial variability of rainfall erosivity in flood season was stronger. The spatial distribution characteristics of precipitation and rainfall erosivity in flood season were the same in the annual and inter annual time scales, and they had latitude zonality ($p<0.01$). The spatial variability of precipitation in flood season and rainfall erosivity in flood season had little difference at tributary scale, and the variation trend was similar. [Conclusion] From 1959 to 2015, before large-scale soil erosion control, sediment yield in Hekou-Longmen region was mainly affected by rainfall ($p<0.01$), but after soil erosion control, sediment yield in the basin decreased dramatically, and there was no significant correlation between rainfall and sediment yield modulus in the basin.

Keywords: precipitation in flood season; rainfall erosive force in flood season; sediment yield in river basin; spatial and temporal distribution; Hekou-Longmen region

流域径流产沙的空间变异性问题的核心是尺度[1],不同时空尺度上的降雨及径流产沙过程变化较大,这种现象在黄河流域尤为突出。然而,目前多年时间尺度上对于影响流域产沙的降雨空间变异性研究较少[2]。黄土高原地区次降雨的空间变异性较大,使得次降雨下侵蚀产沙过程的空间变异大[3]。但有研究[4]表明,多年时间尺度上无定河流域产沙量的空间变异性确很小。降雨是影响流域产沙的主要动力因素之一[5],特别是汛期降雨影响着黄河流域的侵蚀产沙[6-7],降雨的空间变化对流域产沙空间分布有着重要影响[8-9]。降雨量空间变异性越大,不同时段流域产沙就越集中,相同降雨量时产沙量就越多[10]。降雨特征空间分布的研究需要在多重时空尺度上广泛开展[11]。然而,相对于降雨和人类活动导致侵蚀产沙时间变化的大量研究而言,影响侵蚀产沙空间变化的降雨特征的空间分布相关研究目前不仅数量上很少[12-14],这在一定程度上影响了侵蚀产沙空间分布式模型预报精度的提高[15]。河口—龙门区间(以下简称"河龙区间")是黄河泥沙的主要来源区[16],但自20 世纪 70 年代以来该流域水沙特征发生了明显的变化,产沙量呈现剧烈减少的趋势[17],1972—1998 年期间有 21 a 黄河出现断流[18]。造成黄河径流和产沙减少的主要因素是降雨等气象要素发生显著变化以及黄河流域内剧烈的人类活动[19]。因此,本研究以黄土高原典型多沙粗沙区河龙区间为研究对象,分析了该区域降雨特征的空间分布形式,以及在大规模水土流失治理措施实施前后降雨特征对流域产沙影响的变化。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

河龙区间位于黄河中游上段,包括陕西、山西省和内蒙古自治区的 50 个县,面积约为 1.13×10^5 km^2。该区地貌上表现为黄土丘陵沟壑区、黄土峁状丘陵沟壑区、风沙黄土丘陵沟壑区、森林黄土丘陵沟壑区、湿润类黄土丘陵沟壑区、黄土残垣沟壑区、风沙草原区和高原土石山区。该区属于温带大陆性气候,年均温度 6～14 ℃;植被以草原为主,自西北向东南依次分布着荒漠草原、干旱草原和森林草原。区间有 83.45%的土地为水土流失区,多年平均输沙量高达 9.08×10^5 t,占黄河全年粗沙输沙量的 72%[20]。

1.2 数据来源

为研究降雨特征的空间分布及降雨特征对流域产沙的影响,本文引入汛期降雨,汛期降雨侵蚀力和侵蚀产沙模数指标。降雨和侵蚀产沙数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》、黄土高原科学数据中心(http://loess.geodata.cn/)和中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。利用陕西、山西和内蒙古地区 3 个省的降雨资料,得到河龙区间 1959—2015 年(其中 1990—2007 年的数据资料缺失)有效的雨量站点为 79 个,除去降雨缺测的年份共计有 40 a 的有效降雨资料。为了探究河龙区间不同时间尺度降雨的空间变异特征,本文从半月、月以及 1 a,2 a,4 a,5 a,8 a,10 a,20 a,40 a 等时间尺度上对降雨特征的空间变异性进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨特征的计算 本文所涉及的降雨特征包括汛期降雨量(P_{flood}, mm)和汛期降雨侵蚀力〔R_{flood}, MJ·mm/(hm^2·h)〕。通过计算河龙区间 1959—2015 年多年平均月降雨量占多年平均降雨量的比例,得出该流域年内 70%以上的降雨量都集中于 6—9 月。研究表明河龙区间年内的产沙性降雨[21]和 96%的输沙量主要集中在汛期[22]。因此,本文将针对 6—9 月的降雨和产沙资料进行降雨特征和产沙模数的统计计算。降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力[23]。有研究者对比了国内外常用的降雨侵蚀力简易计算模型在中国东部地区的适用性[24],发现全国第一次水利普查采用的简易降雨侵蚀力计算模型[25]可直接用于降雨侵蚀力的计算〔公式(1)—(2)〕。

$$R_k=\alpha\sum_{m=1}^{n}(P_{d\geqslant 12})_m^{1.726\,5} \tag{1}$$

$$\alpha=\begin{cases}0.393\,7 & 〔暖季(5—9\ 月)〕\\ 0.310\,1 & 〔冷季(1—4,10—12\ 月)〕\end{cases} \tag{2}$$

式中:R_k 为某半月时段的降雨侵蚀力值〔MJ · mm/(hm² · h)〕;n 为半月时段内的天数;$(P_{d\geqslant 12})_m$ 为半月时段内第 m d≥12 mm 的侵蚀性日雨量;α 为模型参数。

1.3.2　面雨量及空间变异系数　面雨量是指某一时段内一定面积上的平均雨量,准确地计算面雨量对流域产沙的研究具有重要意义[26]。面雨量的计算方法有很多,主要有逐步订正格点法、三角形法、等雨量法和泰森多边形法等。泰森多边形插值是根据雨量站点降雨资料估算流域面雨量的方法[8](公式 3)。但由于其对流域降雨空间变异性的描述能力较差,本文选取泰森多边形加权变异系数(C_v-Thiessen)来计算降雨特征的空间变异性[8](公式 5)。降雨特征值及流域产沙的空间变异性用变异系数指标来表示。泰森多边形加权的变异系数 C_v-Thiessen 越大,离散程度越大,C_v-Thiessen 越接近于 0,离散程度越小。

产沙模数表示一个流域范围内单位面积的产沙量,本身就是一个面指标,所以产沙模数的变异系数不需要再做面积加权(公式 6)。

$$\overline{P_{\text{flood}}}=\sum_{i=1}^{j}\left(\frac{S_i}{\sum_{i=1}^{j}S_i}\times P_i\right) \tag{3}$$

$$\overline{R_{\text{flood}}}=\sum_{i=1}^{j}\left(\frac{S_i}{\sum_{i=1}^{j}S_i}\times P_i\right) \tag{4}$$

$$C_v\text{-Thiessen}=\frac{\sigma}{\mu}=\sum_{i=1}^{j}\sqrt{\frac{S_i(P_i-\overline{P})^2}{\sum_{i=1}^{j}S_i}}\Big/\sum_{i=1}^{j}\frac{S_iP_i}{\sum_{i=1}^{j}S_i} \tag{5}$$

$$C_v-\text{ssy}=\frac{\sigma}{\mu}=\frac{\sqrt{\sum_{t=1}^{q}(\text{ssy}_t-\overline{\text{ssy}})^2/q}}{\sum_{t=1}^{q}\text{ssy}_t/q} \tag{6}$$

式中:R_i 为第 i 个雨量站的降雨侵蚀力值;α 为均方差;μ 为均值;j 为流域内雨量站个数;S_i 为第 i 个雨量站泰森多边形的面积;P_i 为第 i 个雨量站的降雨量;$\overline{P}$ 为 j 个雨量站的平均降雨量;t 为支流;q 为支流的个数,ssy_t 为流域产沙模数;C_v-Thiessen 为泰森多边形加权空间变异系数;C_v-ssy 为产沙模数的空间变异系数。

1.3.3　K 均值聚类法(K-means)　聚类分析是将数据按照一定规则进行分类的数据处理分析过程,同一类内的对象相似性较高,而类与类之间的差异较大[27]。K-means 聚类法原本是基于距离特征的算法[28],有研究表明聚类分析法可用于气候分类区划[29]。本文中采用汛期降雨量和汛期降雨侵蚀力值,对降雨特征的空间分布进行聚类分析,可将研究区根据降雨量和降雨侵蚀力的大小分为多个类型区。K-means 算法[30]为:

在数据集中随机选取 k 个雨量站作为 k 个簇(类群)的中心,分别计算其它雨量站的汛期降雨量和汛期降雨侵蚀力值到各个簇中心的差值,将这些雨量站点分别划分到最近的簇中,差值的大小以欧氏距离的计算方法为基础:

$$d_{(i,j)}=\sqrt{〔X_{(i1)}-X_{(j1)}〕^2+〔X_{(i2)}-X_{(j2)}〕^2+\cdots+〔X_{(in)}-X_{(jn)}〕^2} \tag{7}$$

式中:$d_{(i,j)}$ 为两个雨量站间降雨特征的差值;$i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})$,$j=(x_{j1},x_{j2},\cdots,x_{jn})$为两个 n 维的数据对象。

根据聚类结果,通过计算簇中数据对象的算术平均值重新确定簇中心,然后按照新中心进行重新聚类,直到下列函数收敛(簇中心不再变化):

$$\text{SSE}=\sum_{i=1}^{k}\sum_{p\in C_i}|p-m_i|^2 \tag{8}$$

式中:SSE 为综合平方误差,SSE 值越小,表明越接近簇中心,聚类效果越好;p 为空间点;m_i 为簇 C_i 的平均值。

2　结果与分析

2.1　不同时间和空间尺度上降雨的空间变异性

本文在不同时间尺度上对汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异性进行了分析,分析结果可以得出,在半月、月以及 1 a 等年内时间尺度上,汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异系数随着时间尺度的增大而锐减。汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在半月时间尺度上空间变异系数的平均数分别为 0.66 和 1.68,相差 2.6 倍;汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在 1 a 时间尺度上空间变异系数的平均数分别为 0.25 和 0.54,相差 2.2 倍。在年内和月际时间尺度上汛期降雨的空间变异性要明显小于汛期降雨侵蚀力。在2,4,5,8,10,20 a 以及 40 a 等年际时间尺度上,汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异系数随着时间尺度的增大而缓慢减小。汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在 2 a 时间尺度上空间变异系数的平均数分别为 0.44 和 0.20,相差 2.2 倍;汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在 40 a 时间尺度上空间变异系数的平均数分别为 0.20 和 0.13,相差 1.54 倍。在年际时间尺度上汛期降雨的空间变异性要明显大于汛期降雨侵蚀力。在河龙区间选取了偏关河、皇甫川、孤山川、朱家川、岚漪河、窟野河、蔚汾河、秃尾河、佳芦河、湫水河、三川河、无

定河、清涧河、延水、昕水河、汾川河、州川河以及仕望川等 18 个主要支流，探究了河龙区间降雨特征在支流上的空间变异特征。

河龙区间各个支流汛期降雨的空间变异系数的最大值为 0.22，最小为 0.11，相差 2 倍；汛期降雨侵蚀力的空间变异系数的最大值为 0.51，最小为 0.25，相差 2 倍。支流间汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异性相差不大，并且汛期降雨的空间变异性大的支流相应的汛期降雨侵蚀力的空间变异性也大。

2.2 降雨对流域输沙模数的影响

为分析降雨和流域产沙在 1959—2015 年大规模水土保持措施实施前后的相关性，本文利用线性回归法，对河龙区间 9 个主要支流偏关河、皇甫川、朱家川、窟野河、蔚汾河、秃尾河、三川河、无定河以及昕水河 1959—2015 年汛期降雨、汛期降雨侵蚀力等和产沙模数进行回归分析。结果发现（见图 1—2），在 1959—1970 年期间，产沙模数与汛期降雨和汛期降雨侵蚀力呈显著幂函数关系（$p<0.01$），决定系数都在 0.7 左右，并且在 9 个支流都表现出产沙模数随降雨特征的增加而急剧增加的趋势。相比之下，1971—2015 年期间，产沙模数与汛期降雨和汛期降雨侵蚀力之间无明显相关关系，这是由于该区域在 20 世纪 70 年代起实施了大规模水土保持措施，例如将坡地改造为梯田，使局部微地形改变，田面坡度大大减小，有效增加了降雨的入渗，使产流减少，因而侵蚀产沙减少；黄河中游地区的沟谷侵蚀和重力侵蚀十分剧烈，大量修筑淤地坝对侵蚀的泥沙进行拦截，增加流域中泥沙的存贮，从而减少了产沙量[17]。由于以上人类活动的干预导致降雨对产沙模数的贡献率极大减小。

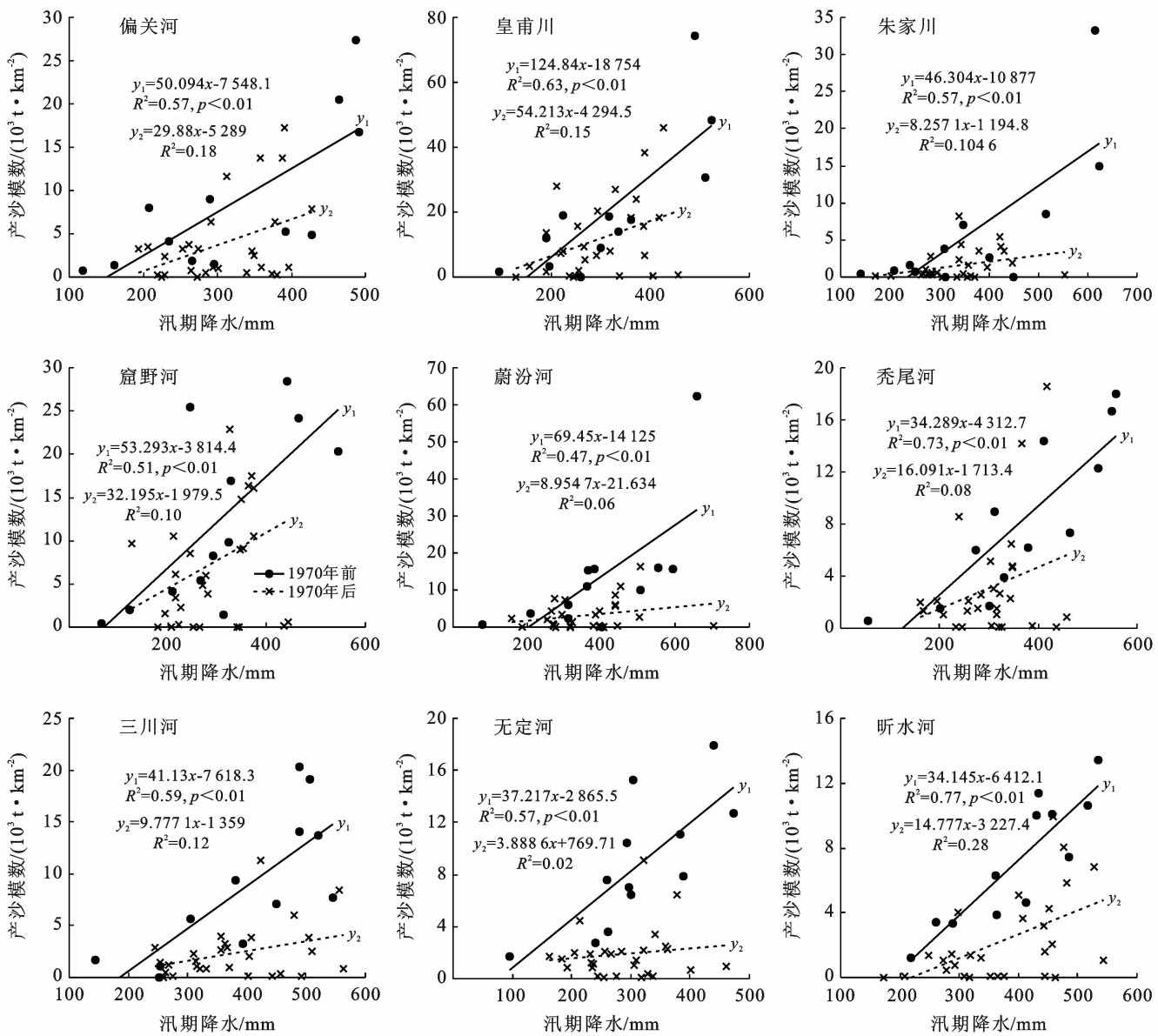


图 1 河龙区间主要支流 1959－2015 年 P_{flood} 对流域产沙的影响

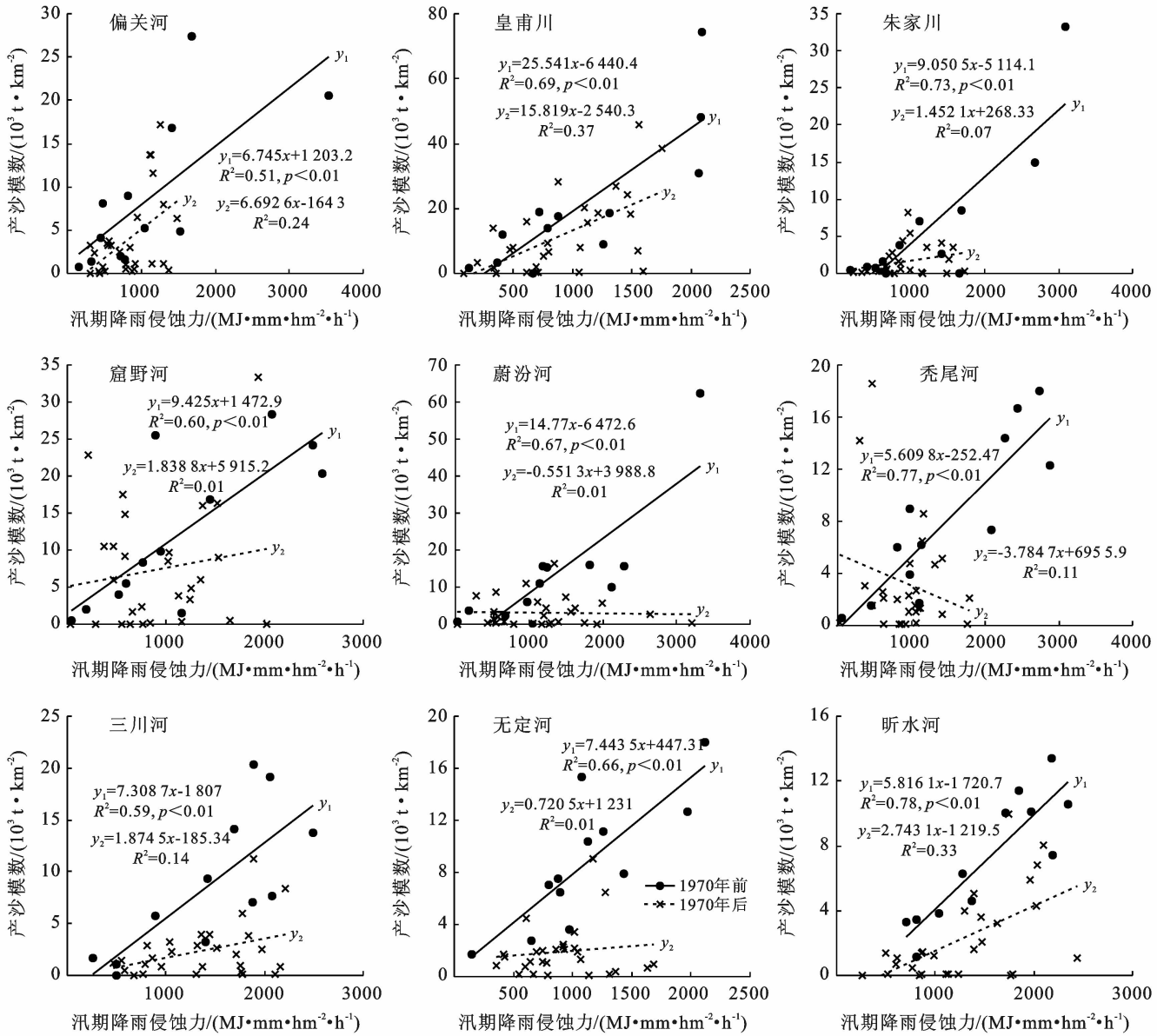


图 2　河龙区间主要支流 1959—2015 年 R_{flood} 对流域产沙的影响

2.3　降雨的空间分布特征

通过泰森多边形加权法计算了河龙区间 1959—2015 年(1990—2007 年降雨资料缺测)79 个雨量站的面降雨量以及面降雨侵蚀力,得出汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异系数,再用普通克里金法进行插值做降雨和降雨侵蚀力的空间变异分析,结果表明,河龙区间汛期降雨和汛期降雨侵蚀力表现出由东南到西北逐渐减小的空间变化趋势。汛期降雨的空间变异程度为 12%,最大的区域为 411,最小的区域为 244 mm;汛期降雨侵蚀力的空间变异程度为 20%,最大的区域可达 1 474,最小的区域为 645 MJ·mm/(hm^2·h),两个降雨特征的最大区域都位于在河龙区间西南区域,最小区域位于河龙区间西部区域。河龙区间的汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在整个空间范围内都表现出一定的空间变异性,其中汛期降雨侵蚀力的空间变异性显著大于汛期降雨,两者的空间变异性相差 1.67 倍,但是两个降雨特征在河龙区间内的空间分布特征一致。本文在半月、月、1 a 以及 2 a,4 a,5 a,8 a,10 a,20 a 以及 40 a 等 40 的公约数的时间尺度上对汛期降雨和汛期降雨侵蚀力进行了聚类分析。聚类的特征指标选取多年平均汛期降雨量和多年平均汛期降雨侵蚀力值。聚类分析结果表明,当聚类簇数为 3 时(k=3),河龙区间的降雨特征表现出一定的空间分布特性。通过聚类分析可以得出,汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在半月、月、1 a 等年内时间尺度上表现出相同的空间分布特征,这 3 种类别的分界线基本与纬度平行;汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在 2 a,4 a,5 a,8 a,10 a,20 a 以及 40 a 等年际

时间尺度上表现出的空间分布特征，这 3 种类别的分界线与水平方向呈一定夹角，与穆兴民等[31]利用年降水趋势面模型绘制的黄土高原年降水量空间结构趋势面结果一致，该区域年降水形成以东南及东来暖湿气流为主，东南气流作用稍强。聚类分析结果表明，年内和年际时间尺度上汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间分布特征不同，在不同时间尺度上，汛期降雨和汛期降雨侵蚀力都表现为相同的空间分布特征。汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在年际时间尺度上所表现出的空间对河龙区间 79 个雨量站各个时间尺度的汛期降雨量和汛期降雨侵蚀力值进行经度和纬度的线性回归分析。由分析结果可知，汛期降雨和汛期降雨侵蚀力与雨量站相应的纬度呈显著正相关关系（$p<0.01$），与经度无显著相关关系，表明汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间分布存在纬度地带性，并且汛期降雨侵蚀力的纬度地带性要大于汛期降雨的纬度地带性（$R^2_{R-\text{flood}}=0.48$，$R^2_{P-\text{flood}}=0.42$）。穆兴民等通过研究发现，黄土高原地区太阳辐射沿纬度的规律性变化，使地面热量、高空大气环流等要素随纬度而有规律的变化，导致降雨出现纬度地带性规律[32]。

3 结 论

（1）1959—2015 年河龙区间汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间分布特征一致，都表现出从东南先西北区域减小的趋势。汛期降雨的空间变异性为 12%，汛期降雨侵蚀力的空间变异性为 20%，汛期降雨侵蚀力的空间变异性要远远大于汛期降雨。

汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在所有时间尺度上的空间分布特征一致，具有显著的纬度地带性（$p<0.01$），且汛期降雨侵蚀力的纬度地带性要强于汛期降雨。汛期降雨和汛期降雨侵蚀力在年内时间尺度上空间变异系数随时间尺度的增大而锐减，并且汛期降雨的空间变异性小于汛期降雨侵蚀力；在年际时间尺度上汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异性随时间尺度的增大缓慢减小，汛期降雨的空间变异性大于汛期降雨侵蚀力。

（2）河龙区间 18 个主要支流汛期降雨和汛期降雨侵蚀力的空间变异程度差异不大，汛期降雨空间变异性大的支流相应的汛期降雨侵蚀力的空间变异性也大，支流间汛期降雨和汛期降雨侵蚀力空间变异性的差异与其面积大小无关。

（3）1959—1970 年期间，河龙区间 SSY 与 P_{flood} 和 R_{flood} 呈显著正相关关系（$p<0.01$）；1971—2015 年，SSY 与 P_{flood} 和 R_{flood} 无明显相关关系，降雨对流域产沙的贡献率大大减小。

[参 考 文 献]

[1] 刘宇，赵亮. 基于过程—效应—功能—服务级联机制的森林减沙服务传输研究[J]. 长江流域资源与环境，2019，28(4)：883-892.

[2] 张士锋，贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响[J]. 地理科学进展，2001，30(4)：355-363.

[3] 李占斌，符素华，靳顶. 流域降雨侵蚀产沙过程水沙传递关系研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报，1997，30(4)：45-50.

[4] Zheng Mingguo. Scale independence and spatial uniformity of specific sediment yield in loess areas of the Wuding River basin, Northwest China: Basin sediment yield in the Chinese Loess Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(4): 177-186.

[5] 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.

[6] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因[J]. 中国水土保持，2004，30(7)：7-10，48.

[7] 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.

[8] 张雪松，郝芳华，张建永. 降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究，2004，30(1)：9-12.

[9] 郝芳华，陈利群，刘昌明，等. 降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响[J]. 地理科学进展，2003，30(5)：446-453.

[10] 李占斌. 黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究[J]. 西安理工大学学报，1996，30(3)：177-183.

[11] 邱扬，傅伯杰，王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系[J]. 水土保持学报，2002，30(1)：108-111.

[12] 卢玉东，谭钦文. 土壤侵蚀空间变异性及趋势预测的地统计学分析[J]. 水土保持研究，2005，30(5)：153-156.

[13] 陈志强，陈志彪，陈明华. 福建省水土流失强度的地统计分析[J]. 自然资源学报，2011，26(8)：1394-1400.

[14] Oost K V, Govers G, Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage [J]. Landscape Ecology, 2000, 15(6): 577-589.

[15] Jetten V, Govers G, Hessel R. Erosion models: Quality of spatial predictions [J]. Hydrological Processes, 2010, 17(5): 595-603.

[16] 周才钰，何毅，穆兴民，等. 黄河中游极端降雨对输沙量影响的时序分析[J]. 人民黄河，2019，41(3)：6-10，15.

[17] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的响应[J]. 地理学报，2004，30(6)：972-981.

[18] 刘昌明，成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析[J]. 地理学报，2000，30(3)：257-265.

[19] 王远见,傅旭东,王光谦.黄河流域降雨时空分布特征[J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(11):972-978.

[20] 刘都喜,赵基元,催殿和,等.黄河中游河龙区间水沙特性分析[J].东北水利水电,2011,29(6):40-41.

[21] 毕彩霞.黄河中游皇甫川流域产沙性降雨及其对径流输沙的影响[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.

[22] 司海松,沈冰,李洁,等.多沙粗沙区 5 流域水沙变化及其对人类活动的响应[J].水电能源科学,2017,35(2):86-90.

[23] Wischmeier W. Use and misuse of universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1976,31(1):5-9.

[24] 马小晴,郑明国.基于统计检验的降雨侵蚀力简易计算模型比较[J].资源科学,2018,40(8):1622-1633.

[25] 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,2002,30(6):705-711.

[26] 陈光舟,张晓红.淮河流域面雨量计算方法的比较分析[J].安徽农业科学,2009,37(24):11637-11640.

[27] 邵峰晶,于忠清.数据挖掘的原理与算法[M].北京:中国水利水电出版社,2003:177-186.

[28] 郑帅,赵晓东.基于距离函数的改进 K-means 算法[J].电脑知识与技术,2015,11(34):167-169.

[29] 么枕生.聚类统计检验用于气候分类[M].北京:气象出版社,1997.

[30] 于亚文.洞庭湖水沙变化过程及其对人类活动的响应研究[D].上海:华东师范大学,2018.

[31] 穆兴民,陈国良.黄土高原降水与地理因素的空间结构趋势面分析[J].干旱区地理,1993,30(2):71-76.

[32] 穆兴民,徐学选,陈国良.黄土高原降雨量的地理地带性研究[J].水土保持通报,1992,30(4):27-32.

(上接第 24 页)

[10] 胡立勇,汪在芹,丁树文,等.黄麻土工布与苎麻结合控制水土流失效应的研究[J].水土保持学报,2001,15(4):55-58.

[11] 张勇,丁树文,万绍文,等.黄麻土工布对不同层次土体的水土保持效用分析[J].水土保持学报,2014,28(4):23-28.

[12] 中科院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.

[13] Jiang Fangshi, Huang Yanhe, Wang Mingkun, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in Southeast China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(5):1741-1752.

[14] 丁光敏.福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究[J].水土保持通报,2001,21(5):10-15.

[15] 倪世民,张德谦,冯舒悦,等.不同质地重塑土坡面水沙定量关系研究[J].土壤学报,2019,56(6):1336-1346.

[16] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡度和雨强对花岗岩崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].水土保持研究,2014,21(1):1-5.

[17] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J].土壤学报,2014,51(5):974-982.

[18] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review [J]. Hydrological Processes, 2005,19(14):2815-2844.