

无定河黄土区降水和产沙的相关性及其时空变异

张萍^{1,3}, 郑明国², 蔡强国^{1,3}, 马小晴^{1,3}

(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.广东省生态环境技术研究所,广东省农业环境综合治理重点实验室,广州 510650; 3.中国科学院大学资源环境学院,北京 100049)

摘要: 通过泰森多边形加权变差系数法研究了黄河中游无定河流域黄土区降水和侵蚀产沙的空间变异规律,并用线性回归分析探究两者空间变异性的相关性。以黄河主要泥沙来源区之一的无定河流域为例,分析了该流域黄土区 1959—2015 年水土保持措施综合治理前后降水和侵蚀产沙的时空变异规律,所选用的降水特征为汛期降水(P_{flood})和汛期降雨侵蚀力(R_{flood}),用产沙模数(SSY)表示该流域产沙量的多少。结果表明:(1)在水土流失治理前(1959—1970年),该地区降水特征与产沙模数在时间上的增减变化趋势一致,而且两者呈显著的幂函数相关关系($P < 0.01$), P_{flood} 和 R_{flood} 对侵蚀产沙的影响一致;在大规模水土流失治理后(1971—2015年),由于该流域修建了大量淤地坝等水土保持措施,产沙量骤减,降水特征和产沙模数无显著相关关系。(2)在多年时间尺度上(1959—2015年),汛期降水的空间变异性为8%,汛期降雨侵蚀力的空间变异性系数为15%,汛期降水的空间变异性小于汛期降雨侵蚀力;1959—1970年期间产沙模数的空间变异性小于1971—2015年期间。在1959—1970年期间,降水特征和产沙模数的空间变异性呈显著的二次多项式相关关系($P < 0.01$),而且汛期降雨侵蚀力与产沙模数的空间变异性的相关性更加显著($R^2 = 0.76, P < 0.01$);1971—2015年降水特征与产沙模数的空间变异性无显著相关关系。在人类活动以前流域产沙空间变异性的主要影响因素为汛期降雨侵蚀力的空间变异性,而在水土流失治理之后降水的空间变异性对流域产沙空间变异性的影响减小,此时流域产沙的空间变异主要受人类活动的影响。

关键词: 降水特征; 流域产沙; 空间变异性; 无定河流域; 黄土区

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0008-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.002

Correlation and Spatial-Temporal Variation of Precipitation and Sediment Production in Wuding River Loess Area

ZHANG Ping^{1,3}, ZHENG Mingguo², CAI Qiangguo^{1,3}, MA Xiaoqing^{1,3}

(1.Key Laboratory of Terrestrial Water Circulation and Surface Processes, Institute of Geographic

Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing 100101; 2.Guangdong Key Laboratory of Integrated

Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-environment Science & Technology,

Guangzhou 510650; 3.College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The spatial variation of precipitation and erosion sediment production in loess areas of Wuding River basin in the middle reach of the Yellow River were studied by using Thiessen polygon weighted coefficient of variation method, and the correlation between the spatial variability was explored by using linear regression analysis. Based on Wuding River basin, one of the main sediment source area of the Yellow River, this paper analyzed the temporal and spatial variation of precipitation and sediment yield of the loess area in 1959—2015 before and after the soil and water conservation measures, choosing flood season precipitation (P_{flood}) and flood season rainfall erosivity (R_{flood}) for the precipitation characteristics, and specific sediment yield (SSY) for sediments production. The results showed that: (1) Before soil and water conservation measures (1959—1970), the trend of precipitation characteristics in this region was consistent with the change of SSY in time, and the two precipitation characteristics showed a significant power function correlation ($P < 0.01$). The effects of P_{flood} and R_{flood} on erosion sediment yield were consistent. After large-scale soil and water conservation measures (1971—2015), due to the construction of a large number of silt-dam in study area, sediment yield decreased sharply, and there was no significant correlation between precipitation characteristics and SSY. (2) On the multi-year time scale (1959—2015), the spatial variability of P_{flood} was

收稿日期:2019-07-31

资助项目:国家自然科学基金项目(41671278)

第一作者:张萍(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:zhangp.17s@igsrr.ac.cn

通信作者:郑明国(1971—),男,副研究员,主要从事河流地貌与水土保持研究。E-mail:mgzheng@soil.gd.cn

8%, and the spatial variation coefficient of R_{flood} was 15%, and the spatial variability of P_{flood} was less than that of R_{flood} . The spatial variability of SSY between 1959—1970 was smaller than that between 1971—2015. During 1959—1970, the spatial variability of precipitation characteristics and SSY showed a significant quadratic polynomial correlation ($P < 0.01$), and the correlation between R_{flood} and SSY was more significant ($R^2 = 0.76$, $P < 0.01$). There was no significant correlation between precipitation characteristics and SSY from 1971 to 2015. The results showed that the spatial variability of SSY before human activities was mainly affected by the spatial variability of R_{flood} , while the spatial variability of SSY as mainly affected by human activities after soil and water conservation measures.

Keywords: precipitation characteristics; specific sediment yield; Spatial-Temporal variation; Wuding River basin; loess region

无定河流域是黄河泥沙的主要来源区,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,引起了国内外广泛关注^[1]。许炳心^[2]认为,汛期降水的减小是入黄泥沙减少的主要原因之一,1960 年代流域内侵蚀产沙严重,产沙量是 1970 年代的 1.62 倍,1980 年代的 3.16 倍,1990 年代的 1.71 倍^[3]。自 20 世纪 70 年代以来,无定河流域修建了大量的淤地坝等水土保持措施,人类活动对产沙量变化的贡献率呈增大趋势^[4];1998 年以后,产沙量和降水量之间不相关,决定系数仅为 0.017^[5],人类活动对产沙量变化的贡献率达到 65%。

降水是引发黄土地区水土流失的重要因素之一^[6],流域产沙的空间变化也受降水空间分布特征的影响^[7-8],流域输沙率随降水空间分布均匀性系数的增大而减小^[9]。降水量的大小及空间分布,反映了降水侵蚀的动力及输沙能力的大小,在黄土高原地区,>12 mm 的日降水量就能引发土壤侵蚀^[10],降水量越大,则径流冲刷能力与输沙能力越大,引发的侵蚀产沙越剧烈;降水量的空间变异性越大,不同时间段的局地流域产沙越集中,相同降水量时的产沙量越多^[11]。

流域水文过程中降水径流产沙的空间变异性问题的核心是尺度,在小时间尺度上空间变异很大的降水径流产沙过程,在较大的时间尺度会发生很大的变化,这种现象在黄河流域的侵蚀产沙研究中十分突出,然而目前在多年时间尺度上对于影响流域产沙的降水特征的空间变异性的相关研究^[12]较少。无定河流域次降水的空间变异性很大,使得每次降水形成的侵蚀产沙的空间变异大^[9],但有研究^[13]表明,在多年时间尺度上无定河流域产沙量的空间变异性很小。降水特征及流域产沙的空间变异性的研究对了解流域产沙空间分布特征的机理具有重要的意义。

流域侵蚀产沙空间分布研究不仅对水土流失的定量评价、规划治理以及土地资源的合理利用具有重要意义^[14-15],也有助于侵蚀产沙模型参数的优化及预测精度的提高^[16],相关研究^[17]需要在多重时空尺度上广泛开展。然而,相对于降水和人类活动导致侵蚀

产沙时间变化的大量研究^[18]而言,侵蚀产沙空间变化研究目前不仅数量上很少,研究程度也相对滞后,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^[19]。本文以黄土高原典型多沙粗沙区无定河黄土区为研究对象,分析时间上降水对流域产沙变化的影响,以及空间上降水的空间分布对产沙空间分布特征的影响,探求引起流域水沙变化的主要原因,以及影响产沙空间分布的主要因子。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

无定河流域(108°18′—111°45′E,37°14′—39°35′N)位于黄河中游河口镇—龙门区间的黄土高原和毛乌素沙漠的过渡带(图 1)。长城以北为干旱风沙草原滩地半荒漠景观;长城以南为半干旱草原森林地带,地貌上表现为黄土丘陵沟壑。黄土区的面积为 14 660 km²,占全流域面积的 41.2%。

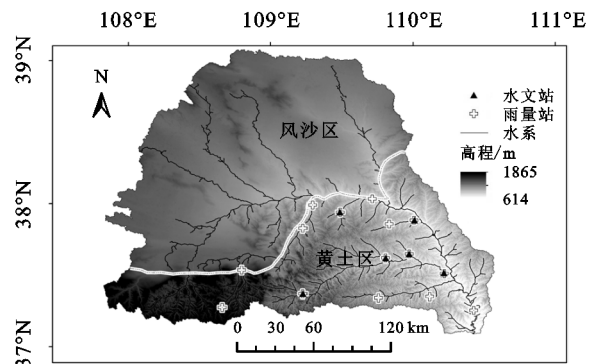


图 1 无定河流域黄土区雨量站及水文站的分布

无定河是黄土高原处于风沙黄土交错带的典型河流,由于风沙区河流的地表径流不发育,加之河流动能小,所以河流的含沙量远小于黄土区,输沙率更是微不足道,无定河流域的侵蚀产沙主要来源于黄土区^[20]。鉴于黄土区河流极高的输沙率及产沙模数,本文将重点针对无定河流域黄土区进行降水特征以及流域产沙空间变异性展开研究。

1.2 数据来源

为研究降水特征和产沙的空间分布,以及降水特征对流域产沙的影响,本文引入的指标有:汛期降水、汛期

降雨侵蚀力和侵蚀产沙模数。所用的降水数据资料和侵蚀产沙数据资料都来源于《中华人民共和国水文年鉴》^[21]、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/>)。

由于各雨量站和水文站的数据起始时间和数据缺失情况不同,最终选取白家川、绥德、曹坪、李家河、赵石窑、殿市、横山、靖边、青阳岔、武镇、石嘴驿、马湖峪、赵石畔、南沟岔、新城 15 个雨量站,以及殿市、马湖峪、青阳岔、绥德、李家河、曹坪 6 个水文站 1959—2015 年的逐日降水资料和产沙模数资料进行降水特征以及流域产沙空间变异性的研究(其中 1990—2007 年的数据资料缺失),产沙模数定义为单位面积上的产沙量(t/km^2)。

1.3 研究方法

1.3.1 降水特征的计算 本文所涉及的降水特征包括汛期降水量(P_{flood} , mm)和汛期降雨侵蚀力(R_{flood} , $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$)。通过计算无定河流域 1959—2015 年多年平均月降水量占多年平均降水量的比例,得出该流域年内 70% 以上的降水量都集中于 6—9 月(表 1),无定河流域年内的产沙性降水^[22]和 96% 的输沙量主要集中在汛期^[4],因此本文将针对 6—9 月的资料进行降水特征和产沙模数的统计计算。

表 1 年内降水量的分布

降雨及比例	观测时间	绥德	曹坪	李家河	殿市	青阳岔	马湖峪
	1月	3	3	3	2	3	2
	2月	6	6	6	4	4	5
	3月	12	10	11	9	9	10
	4月	22	20	21	21	24	20
降 水 量/ mm	5月	35	37	35	32	34	31
	6月	53	51	47	46	49	49
	7月	110	110	105	94	97	100
	8月	100	106	103	102	104	100
	9月	81	77	80	64	72	65
	10月	30	27	29	23	29	25
	11月	15	13	14	11	12	13
	12月	2	2	2	1	2	2
6—9月降水 占全年比例/%		73	75	74	75	73	74

降雨侵蚀力是指降水引起土壤侵蚀的潜在能力^[23]。有学者^[24]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,结果表明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。

$$R_k = \alpha \sum_{m=1}^n (P_{d \geq 12})_m^{1.7265} \quad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.3937 & \text{暖季(5—9月)} \\ 0.3101 & \text{冷季(1—4, 10—12月)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_k 为某半月时段的降雨侵蚀力值($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$); n 为半月时段内的天数; $(P_{d \geq 12})_m$ 为半月时段内第 m 天 ≥ 12 mm 的侵蚀性日雨量(mm); α 为模型参数。

1.3.2 泰森多边形加权法计算面雨量以及空间变异系数 泰森多边形插值法(图 2)是根据雨量站点降水资料估算流域面雨量的方法,估算流域面雨量的相对误差较小^[7](公式(3));但由于其对流域降水空间变异性的描述能力较差,为加强对降水特征空间变异性的描述,本文选取泰森多边形加权的变异系数(CV-Thiessen)来计算降水特征的空间变异性^[7](公式(5))。一般降水特征值及流域产沙的空间变异性可用变异系数指标来表示,变异系数是均方差与均值的比值,无量纲,可表示不同均值系列的离散程度。泰森多边形加权的变异系数 CV-Thiessen 越大,表示离散程度越大, CV-Thiessen 越接近于 0,表示离散程度越小。

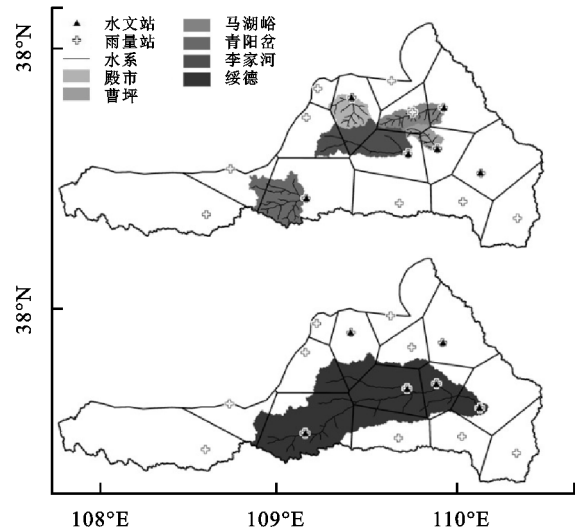


图 2 泰森多边形插值法及水文站控制面积示意

产沙模数表示 1 个流域范围内单位面积的产沙量,本身就是 1 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))。

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

$$\overline{R_{flood}} = \frac{\sum_{i=1}^j (S_i \times R_i)}{\sum_{i=1}^j S_i} \quad (4)$$

$$CV-Thiessen = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^j \sqrt{\frac{S_i (P_i - \overline{P})^2}{\sum_{i=1}^j S_i}}}{\sum_{i=1}^j \frac{S_i P_i}{\sum_{i=1}^j S_i}} \quad (5)$$

$$CV-ssy = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q (ssy_i - \overline{ssy})^2 / q}}{\sum_{i=1}^q ssy_i / q} \quad (6)$$

式中: $\overline{P_{flood}}$ 为研究区内或水文站控制面积内的面汛期降水(mm); $\overline{R_{flood}}$ 为研究区内或水文站控制面积内的面汛期降雨侵蚀力($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$); R_i 为第 i 个雨量站的降水量(mm); α 为均方差; μ 为均值; j 为流域内(或水文站的控制面积内)雨量站的个数(个); S_i 为第 i 个雨量站泰森多边形的面积(或落在水文站控制面积内的该多边形的面积)(km^2); P_i

为第 i 个雨量站的降水量 (mm); \bar{P} 为 j 个雨量站的平均降水量 (mm); t 为水文站; q 为水文站的个数 (个); ssy_t 为该水文站的产沙模数 (t/km^2)。

2 结果与分析

2.1 雨量站密度的确定

用泰森多边形法进行插值,如果有数量足够的雨量站,而且分布均匀,能够反映降水量的空间分布特征,就可以计算流域内有足够精度的面平均雨量,然而这对降水资料的要求较高,在实际运用中很难实现^[8]。为探究在无定河流域黄土区选择何种密度的雨量站才能充分反映降水特征的空间特性,本文选择研究区的白家川、绥德、曹坪、李家河、赵石窑、殿市、横山、靖边、青阳岔、武镇、石嘴驿、马湖峪、赵石畔、南沟岔、新城 15 个分布均匀、具有代表性的雨量站(雨量站的空间分布见图 1),分析日尺度降水量、半月尺度降水量和月尺度降水量的空间分布特征,在雨量站间距离的基础上,运用正六边形空间结构估算雨量站的代表性面积,进一步确定合适的雨量站数量。

流域内任意 2 个雨量站之间降水量的相关性可用二者的降水量相关系数 (r) 来反映,值越大则 2 个雨量站间降水量的相关性越好。同时,相关系数的大小和 2 个雨量站间距离 (L) 有关,以雨量站间距离为边长的正六边形结构则为雨量站的代表性面积,以此结构计算得到的雨量站数量满足流域内用最少雨量站代表最大空间范围的条件,此距离称为 2 个雨量站的相关域 (L_a),用相关域计算雨量站数量的公式^[26]为:

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} L_a^2 \quad (4)$$

$$n = S/A \quad (5)$$

式中: A 为雨量站代表面积 (km^2); L_a 为 2 个站距离 (km),同时为六边形边长; n 为流域内雨量站个数 (个); S 为流域面积 (km^2)。

对日尺度降水量、半月尺度降水量和月尺度降水量的面代表性进行分析,图 3 为不同时间尺度降水相关系数和雨量站距离的关系。日尺度、半月尺度和月尺度拟合的均为线性方程,斜率表示每变化一定的相关系数,雨量站点间的距离发生的变化,时间尺度越小,则变化相同相关系数的距离越小。日尺度和半月尺度的方程决定系数大致为 0.8 ($P < 0.01$),月尺度的方程决定系数为 0.7 ($P < 0.01$),3 个方程拟合效果都很显著,方程中 L 的置信区间为 $[L - 16.6, L + 154.7]$ 。如果取相关水平 r 为 0.8 时,日降水量的相关域为 17.1 km,半月降水量的相关域为 64.7 km,月降水量的相关域为 111.9 km。通过计算可得,在本研究区进行泰森多边形插值,日尺度降水量需要 58 个雨量站,半月尺度降水量需要 4 个雨量站来反映降

水量的空间分布特征,因此,在半月及更大的时间尺度上 15 个雨量站足以满足插值要求。

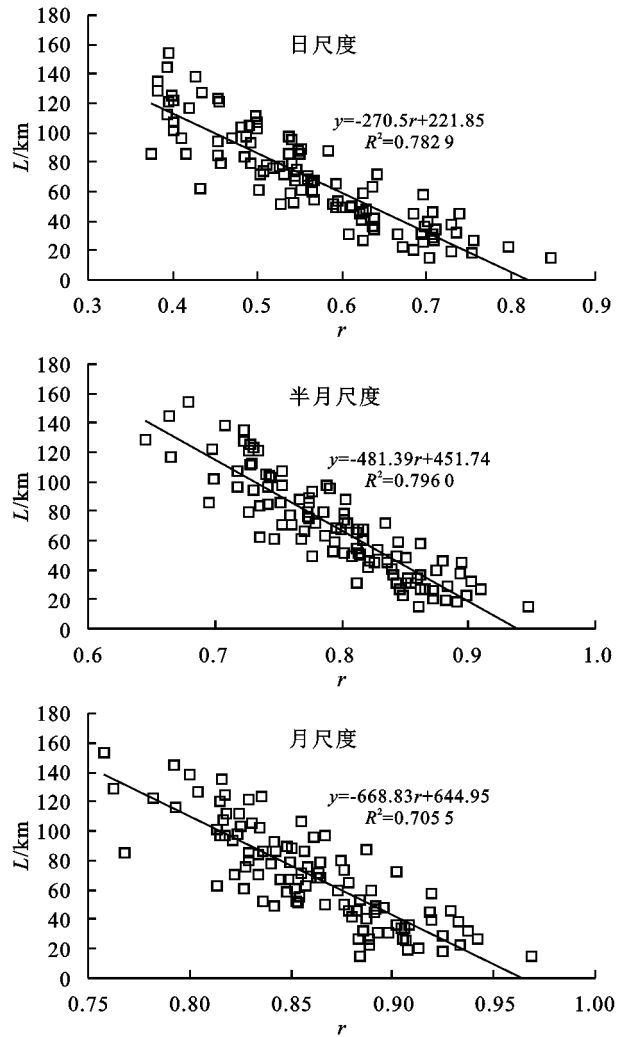


图 3 降水量相关系数 r 与雨量站距离 L 的关系

2.2 降水特征及流域产沙随时间变化的趋势及其相关性

由图 4 可知,对 6 个水文站 1959—2015 年(1990—2007 年缺测)汛期降水、汛期降雨侵蚀力和产沙模数的年际变化趋势进行了分析,结果表明,(1)1959—2015 年期间汛期降水和汛期降雨侵蚀力 2 个降水特征在时间序列上具有相同的变化趋势。(2)根据线性回归趋势分析以及无定河流域 1959—2015 年期间水土保持措施的修建和修缮,将该期间内产沙模数的变化趋势分为 4 个阶段:①1959—1970 年,无定河流域为大规模水土流失治理前的“准自然”阶段^[27]。此阶段内由于降水特征的大幅年际波动,流域产沙也相应表现出较大的年际波动,变化趋势和降水特征一致,并且产沙量保持在较高的水平。②1971—1986 年,为大规模水土流失治理阶段,此阶段流域内修建了大量梯田和淤地坝等水土保持措施,使得流域产沙大幅减少^[28]。但是在 1977 年由于暴雨洪水导致淤地坝垮坝^[29],所以这一年该流域产沙量有明显的增加。③1986—1989 年,

此阶段由于该流域内大部分小型淤地坝淤满失去效用^[30],所以这一时期的流域产沙明显的增加。④ 2008—2015年,此阶段由于国家从1998年开始在这一地区实施了以大规模退耕还林还草为重点的生态环境建设以及2002年以后的骨干淤地坝建设,使得无定河流域的产沙量大幅减少。

无定河黄土区1959—2015年第1个阶段的流域产沙与降水特征的变化趋势一致,说明降水特征在1970年以前是影响流域产沙的主要因子之一。但是在1970年以后,由于人类活动的影响,流域产沙大幅减少,不再有和降水特征相同的变化趋势,说明在此阶段降水特征已不是影响流域产沙的主导因素。

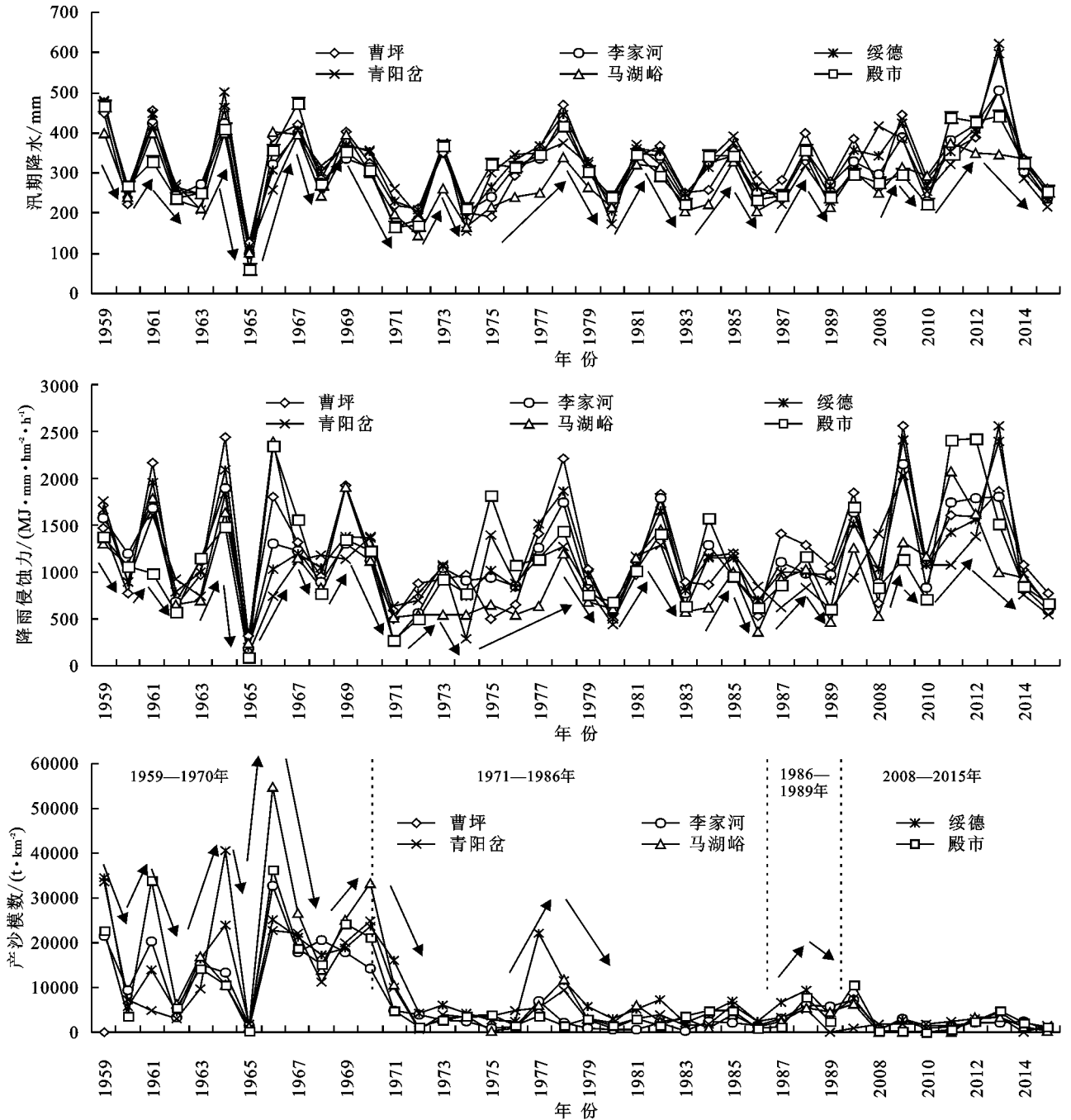


图4 降水特征和流域产沙随时间的变化趋势

为进一步分析降水特征和产沙模数在时间序列上变化趋势的相关性,利用线性回归法,对6个水文站1959—2015年汛期降水、汛期降雨侵蚀力和产沙模数的关系进行回归分析。

分析结果(图5)表明,(1)在1959—1970年期间,产沙模数随汛期降水和汛期降雨侵蚀力呈幂函数关系急剧增加,达到 $\alpha=0.01$ 显著性水平,决定系数

都在0.7左右,汛期降水和汛期降雨侵蚀力与产沙模数的决定系数并无明显区别。(2)1971—2015年期间,产沙模数与汛期降水和汛期降雨侵蚀力之间无明显函数关系,这是由于该流域在1970年后采取大规模水土保持措施实施后,该研究区内产沙量大幅减少,产沙模数维持在降低的稳定水平,降水特征不再是其主要影响因子。

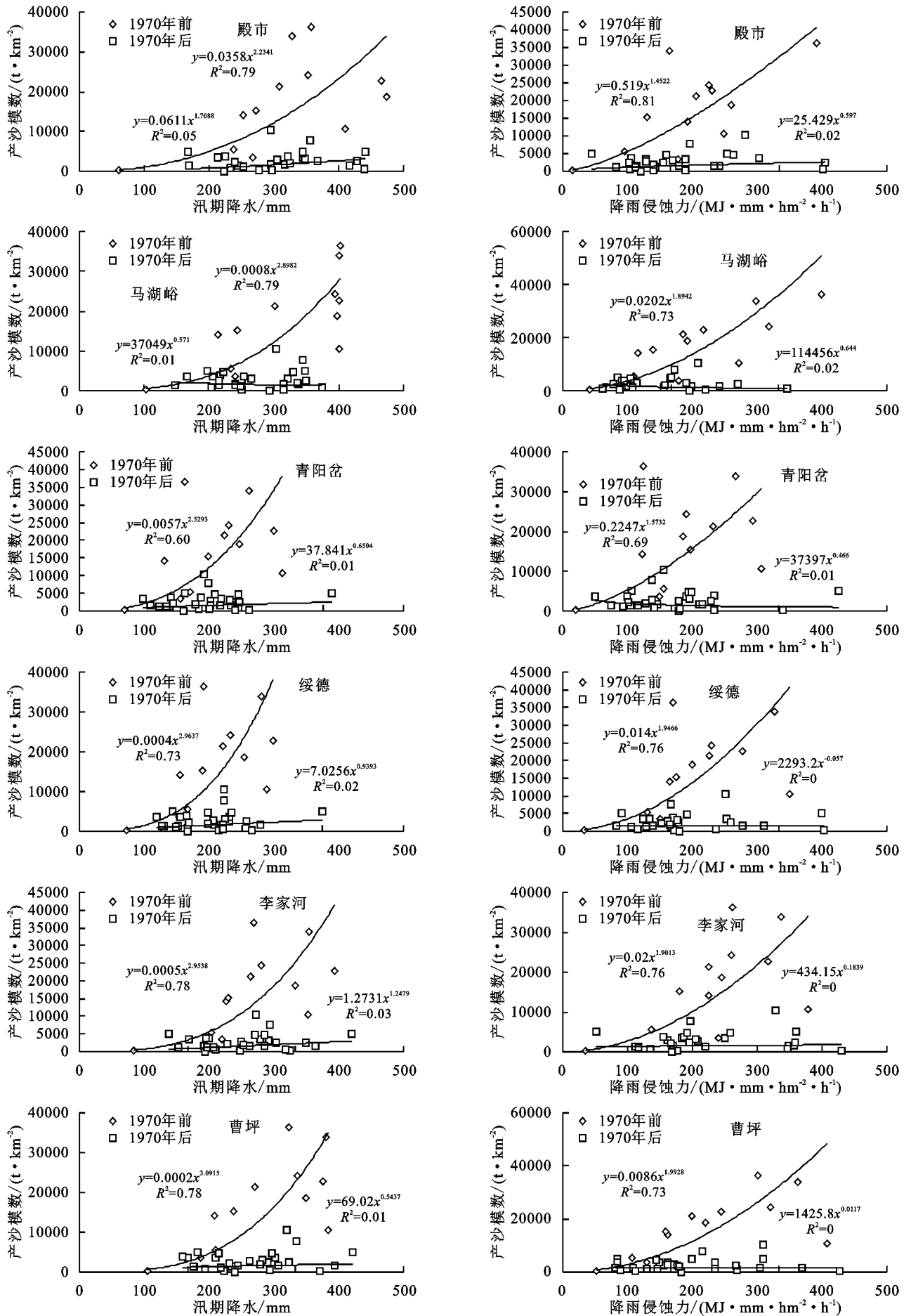


图 5 水文站的降水特征和产沙模数的关系

2.3 降水特征和流域产沙的空间变异性

由图 6 可知,无定河流域黄土区多年平均汛期降水和汛期降雨侵蚀力从南到北呈减小的趋势,汛期降水的空间变异程度为 8%,最大值为 354 mm,最小为 269 mm;汛期降雨侵蚀力的空间变异程度为 15%,最大值为 1 474 (MJ·mm)/(hm²·h),最小为 928 (MJ·mm)/(hm²·h)。

变异性分析结果表明,无定河流域黄土区的汛期降水和汛期降雨侵蚀力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远大于汛期降水,二者的空间变异性相差 1.89 倍。

从 1959—2015 年无定河黄土区产沙模数的空间变异性呈增大的趋势(其中 1990—2005 年的产沙数据缺测)。从图 7 可以看出,1971—2015 年该地区产沙模数的空间变异程度明显大于 1959—1970 年期间。

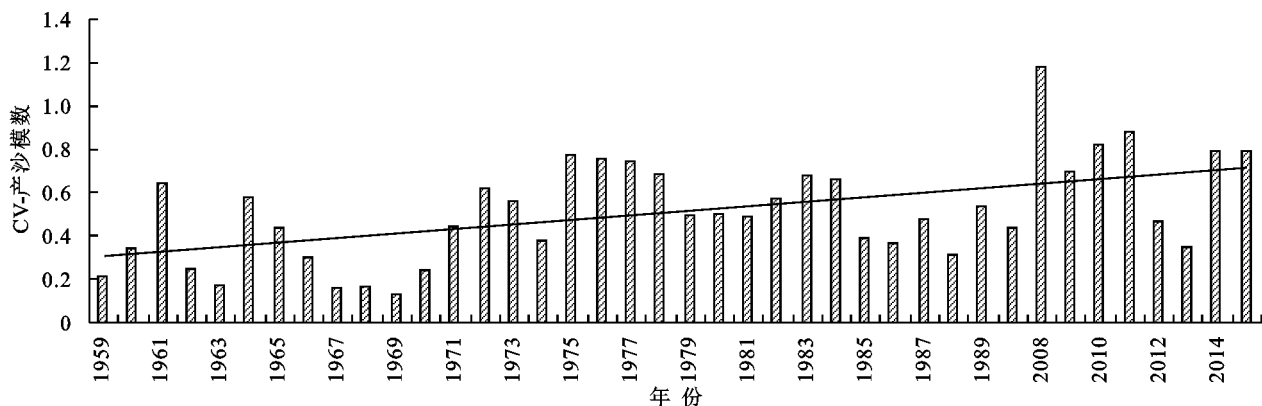


图 7 无定河黄土区 1959—2015 年产沙模数的空间变异性

2.4 降水特征与流域产沙空间变异的相关性

本文计算了 1959—2015 年无定河流域黄土区汛期降水、汛期降雨侵蚀力及产沙模数的空间变异系数。由图 8 可知,在 1959—1970 年期间产沙模数空间变异性的变化趋势与汛期降水和汛期降雨侵蚀力的变化趋势符合二次多项式函数关系,且关系显著 ($P < 0.01$)。其中汛期降水与产沙模数的空间变异性的决定系数 $R^2 = 0.54$,汛期降雨侵蚀力与产沙模数的空间变异性的决定系数 $R^2 = 0.76$,变化趋势均为开口向上的抛物线左半侧,即随降水特征的增大,产沙模数增长趋势迅速增加,降水量越大的年份降水特征和产沙模数的空间变异性越大。

在水土流失综合治理以前无定河流域的泥沙输移比接近 1^[28],所以流域内的产沙模数的空间变异性相对较小。但是在 1970 年以后,由于流域中大规模修建淤地坝,大量泥沙被拦截,导致该流域泥沙输移比急剧下降^[30],即产沙量小于输沙量,并且流域内不同地区由于淤地坝修建数量不同,导致全流域产沙模数的空间变异性增加。

在 1971—2015 年期间,产沙模数的空间变异性与降水特征的空间变异性无显著相关关系,说明在此

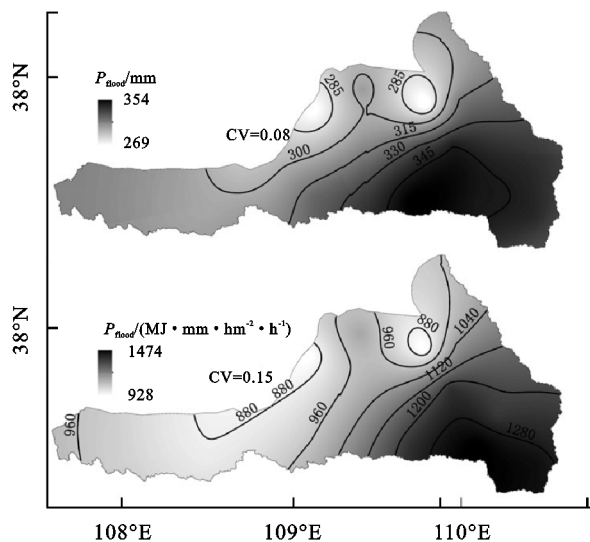


图 6 无定河黄土区 1959—2015 年降水特征的空间变异性

阶段,无定河黄土区流域产沙的空间变异不受降水特征空间变异的影响。

3 讨论

(1)汛期降水和汛期降雨侵蚀力在 1959—2015 年期间的增减变化趋势一致,但是产沙模数只有在 1959—1970 年水土保持措施前才与降水特征保持一致的增加趋势,在 1971—2015 年由于人类活动的影响,无定河流域的侵蚀产沙量大幅减少,并且一直保持降低的稳定水平,与降水特征值无相同的增减变化趋势,这说明在人类活动以前该流域的侵蚀产沙主要受降水特征的影响。

(2)对无定河黄土区 6 个典型水文站集水区域内的汛期降水、汛期降雨侵蚀力与产沙模数的相关性进行分析,研究结果表明,在 1959—1970 年水土流失治理以前, P_{flood} 和 R_{flood} 与 SSY 呈显著的幂函数相关关系,6 个水文站的决定系数为 0.6~0.81,但是在 1971—2015 年水土流失治理以后, P_{flood} 和 R_{flood} 与 SSY 无显著相关关系,说明在水土保持措施以前,该地区的流域侵蚀产沙主要与降水相关,但是在 1971 年及以后主要受人类活动的影响大幅减小。

(3)在无定河黄土区内,汛期降水的空间变异性为

0.08,汛期降雨侵蚀力的空间变异性为 0.15,可以看出,汛期降水的空间变异性远小于汛期降雨侵蚀力。

(4)对降水特征与产沙模数空间变异性的相关性进行分析,结果表明,在 1959—1970 年水土保持措施以前,汛期降水和汛期降雨侵蚀力均与产沙模数呈

显著二次多项式相关,汛期降水与产沙模数空间变异性的决定系数为 0.54,汛期降雨侵蚀力与产沙模数空间变异性的决定系数为 0.76,可以看出,汛期降雨侵蚀力的空间变异性对流域产沙的空间变异的影响更加剧烈。

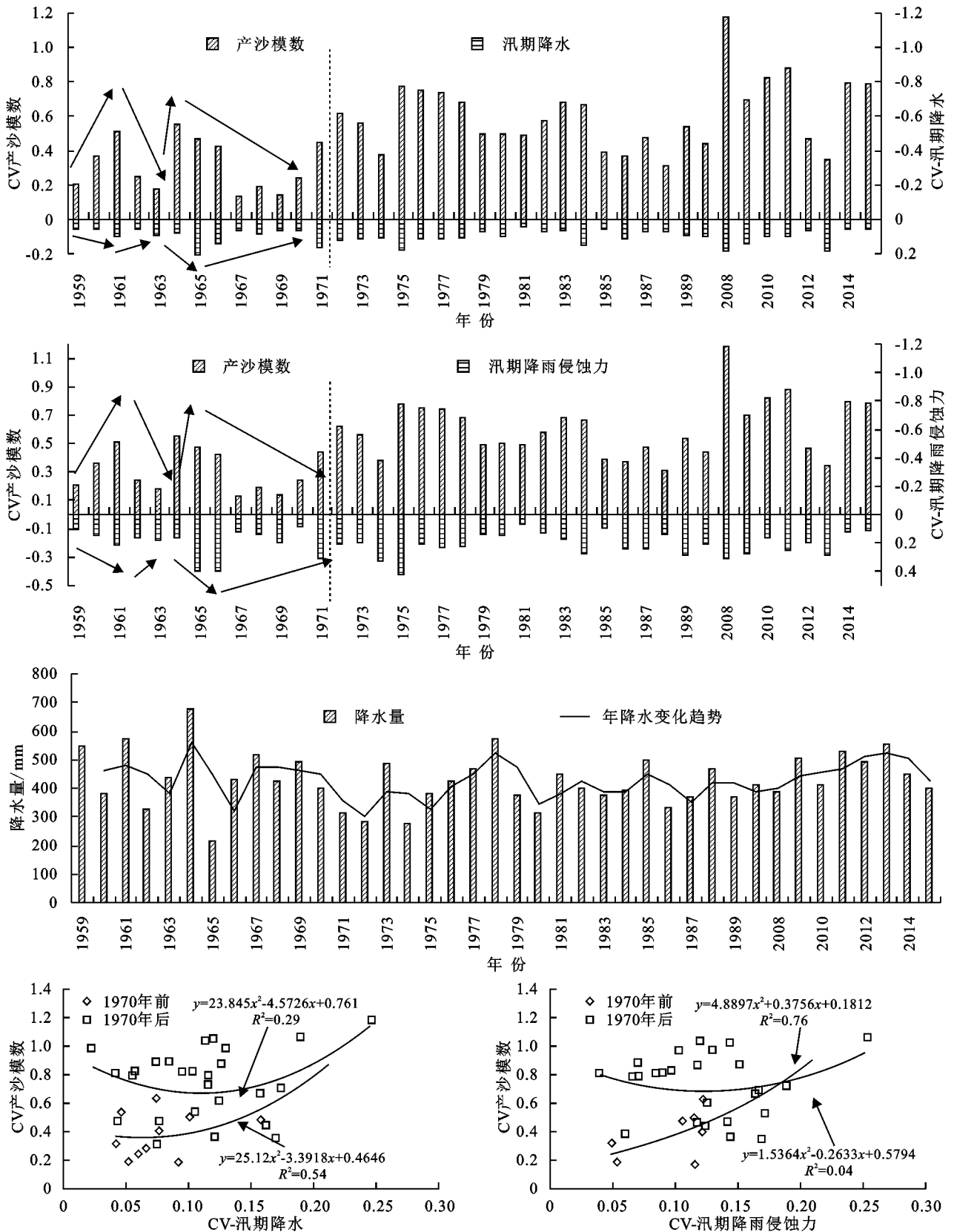


图 8 降水特征和产沙模数空间变异的相关性

4 结论

在 1970 年无定河流域黄土地区水土流失治理以前,流域侵蚀产沙主要受降水的影响,汛期降水和汛期降雨侵蚀力对其影响程度无差异;1971—2015 年水土流失治理以后,该地区的流域产沙量主要受人类活动的影响而大幅减少。在 1959—1970 年水土流失治理以前,该地区侵蚀产沙的空间变异性主要受降水特征的空间变异的影响,其中受汛期降雨侵蚀力的空间变异性的影响最剧烈;1971—2015 年由于人类活动的影响,该地区的流域产沙的空间变异性与降水特征的空间变异性已无显著相关关系。

参考文献:

- [1] 张洪波,李娇娇,辛琛,等.黄河中游支流无定河流域水沙情势与变异特[J].地球科学与环境学报,2019,41(2):241-252.
- [2] 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,2004,2(7):7-10,48.
- [3] 廖义善,卓慕宁,蔡强国,等.大理河流域不同时间尺度水沙变化影响因素及趋势研究[J].水土保持学报,2009,23(6):51-56.
- [4] 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.
- [5] 许炯心.黄河中游多沙粗沙区 1997—2007 年的水沙变化趋势及其成因[J].水土保持学报,2010,24(1):1-7.
- [6] 秦瑞杰,李桂芳,李平.降水和土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):29-34,40.
- [7] 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,2004,11(1):9-12.
- [8] 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,2003,22(5):446-453.
- [9] 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,1997,11(4):45-50.
- [10] 王麒麟,范晓辉,王孟本.近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征[J].生态学报,2011,31(19):5512-5523.
- [11] 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,1996,11(3):177-183.
- [12] 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,2001,20(4):355-363.
- [13] Zheng M. 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):1450-1462.
- [14] İrvem A, Topaloğlu F, Uygur V. Estimating spatial distribution of soil loss over seyhan river basin in Turkey [J]. Journal of Hydrology,2007,336(1):30-37.
- [15] Cerdan O, Govers G, Leblissonnais Y, et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A Study based on erosion plot data [J]. Geomorphology,2010,122(1):167-177.
- [16] 王万忠,焦菊英,魏艳红,等.近半个世纪以来黄土高原侵蚀产沙的时空分异特征[J].泥沙研究,2015,11(2):9-16.
- [17] 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,2002,16(1):108-111.
- [18] 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.
- [19] Jetten V, Govers G, Hessel R. Erosion models: Quality of spatial predictions [J]. Hydrological Processes,2010,17(5):121-129.
- [20] 王随继.无定河流域不同地貌区水沙过程对比[J].地理研究,2007,26(3):508-517.
- [21] 水利部黄河水利委员会会刊.中华人民共和国文化年鉴[M].郑州:黄河水利委员会,2015.
- [22] 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.
- [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,2002,22(6):705-711.
- [26] 殷水清,谢云.黄土高原地区中小流域日降雨空间分布特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(1):89-91.
- [27] 杨媛媛,李占斌,任宗萍,等.人类活动对无定河流域不同地貌区水沙变化的影响[J].泥沙研究,2017,42(5):50-56.
- [28] 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.
- [29] 崔殿河,刘玉斗,赵梅.1977 年黄河与孤山川河洪水遭遇分析[J].东北水利水电,2012,30(8):31-32.
- [30] 许炯心.无定河流域的人工沉积汇及其对泥沙输移比的影响[J].地理研究,2010,29(3):397-407.