

# 黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其 主控因素的贡献率

孙 倩<sup>1</sup>, 于坤霞<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 李 鹏<sup>1</sup>, 张晓明<sup>3</sup>, 龚珺夫<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

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旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

3. 中国水利水电科学研究院泥沙所 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘要:**随着气候变化和人类活动影响加剧,黄河中游多沙粗沙区的水沙变化剧烈,因此研究影响黄河中游多沙粗沙区径流量和输沙量的驱动因素对预测未来水沙变化具有重要意义。本文选取 Mann-Kendall 趋势检验法, Pettitt 突变点检验法, 位置、尺度、形状的广义可加模型以及累积量斜率变化率比较法对黄河中游多沙粗沙区 15 个水文站控制流域 1956-2010 年的年降水量、年径流量以及年输沙量变化特征及其贡献率进行分析, 确定影响黄河中游多沙粗沙区径流量和输沙量变化的主要原因。结果表明: ① Mann-Kendall 趋势检验在 5% 的显著性水平下, 表明降水量虽呈减少趋势但并不显著, 径流量和输沙量则有显著的减少趋势; ② Pettitt 突变点检验得出所研究区域径流量和输沙量的突变年份在 1972 年、1985 年以及 1996 年左右; ③ GAMLSS 模型分析结果同样表明降水的均值不随时间发生变化, 但降水的方差有减小的趋势; ④ 通过累积量斜率变化率比较法得出, 人类活动对窟野河流域径流输沙的影响大于无定河流域。通过分析黄河中游多沙粗沙区径流量和输沙量变化的原因, 可为黄河中游多沙粗沙区水资源合理分配提供一定的理论支持。

**关键词:**黄河中游多沙粗沙区; 水沙变化特征; GAMLSS 模型; 累积量斜率变化率比较法

DOI: 10.11821/dlxb201805013

## 1 研究背景

近年来气候变化和人类活动的加剧, 使得径流量和输沙量发生了较大变化。气候变化对水文循环过程造成影响, 使得水资源在时空上重新分布, 增加了洪涝灾害发生的频率; 人类活动影响主要表现在下垫面发生变化, 对径流的下渗、地表径流形成以及水资源的时空分布产生影响<sup>[1]</sup>。因此, 径流量和输沙量的减沙研究不再局限于气候变化方面, 气候变化背景下的人类活动变化对径流和输沙量的影响成为目前水文学研究的热点话题<sup>[1]</sup>。

自 20 世纪 70 年代末, 黄河径流量和输沙量呈明显的减少趋势<sup>[2]</sup>。对于黄河水沙变化以及驱动因素, 中国学者开展了大量的研究, 研究方法主要有 4 类: 基于气候弹性系数的方法<sup>[3-4]</sup>、基于水文模拟的方法<sup>[5-7]</sup>、累积量斜率变化率比较法<sup>[8-9]</sup>以及小波—神经网络模型<sup>[10]</sup>。何旭强等<sup>[8]</sup>分析了 1960-2008 年黑河中上游地区气候变化和人类活动对径流量的贡献率, 指出黑河上游径流量变化以气候变化影响为主, 人类活动影响较小; 黑河下游径

收稿日期: 2017-05-26; 修订日期: 2018-01-30

项目名称: 国家重点研发计划(2016YFC0402407); 国家自然科学基金青年项目(51509203); 国家自然科学基金重点项目(41330858) [Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0402407; National Natural Science Foundation of China, No.51509203, No.41330858]

作者简介: 孙倩(1991-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文与雨洪侵蚀。E-mail: sunqz911@163.com

通讯作者: 于坤霞(1989-), 女, 河南新乡人, 博士, 讲师, 主要研究方向为水文学及水资源。E-mail: yukunxia@126.com

流量的变化以人类活动影响为主,气候变化影响较小。党素珍等<sup>[11]</sup>分析了泾河上游1973-2010年水沙实测数据,采用弹性系数法研究了气候变化和人类变化对径流量的影响。刘二佳等<sup>[12]</sup>分析了窟野河流域1956-2005年的水文气象数据,采用降雨—径流多元线性模型估算气候变化和人类活动对径流的影响,结果表明在水土保持效应期气候与人类活动对径流变化的贡献率分别为58.62%和41.38%,煤炭开采期气候变化占21.75%,人类活动占78.25%。郑培龙等<sup>[13]</sup>分析了黄土高原藉河流域1962-2010年水文气象数据,采用双累积曲线法,结果表明土地利用变化是藉河流域径流量减少的主要驱动因素,影响贡献率为90.2%,而气候变化影响较小,贡献率仅为9.8%。已有研究没有对黄土高原多沙粗沙区进行系统的研究,仅涉及黄河中游多沙粗沙区部分流域,并不能代表整个黄河中游多沙粗沙区。此外,已有研究主要是讨论所研究区域径流量减少的驱动因素,并没有对径流量和输沙量的特征参数变化做出系统的分析。

本文以黄河中游多沙粗沙区的15个水文站控制流域为典型研究区,在对降水、径流和输沙数据进行突变点分析的基础上,分析统计参数的变化及其原因,进而确定突变前后径流量和输沙量变化的贡献率,旨在找出影响径流量和输沙量的主控原因,研究结果不仅为黄河中游多沙粗沙区水沙锐减的原因提供一定的理论支持,同时对黄河中游多沙粗沙区未来水资源开发利用有一定的指导意义。

## 2 研究区概况

本文所选的研究区为黄土高原地区无定河、秃尾河、窟野河、孤山川、皇甫川以及佳芦河6个流域的15个水文站控制流域,其中:无定河流域有8个水文站,分别为青阳岔、韩家峁、横山、殿市、李家河、绥德、赵石窑以及丁家沟;秃尾河流域有高家川水文站;窟野河流域有王道恒塔、神木和温佳川水文站;孤山川流域有高石崖水文站;皇甫川流域有皇甫水文站;佳芦河流域有申家湾水文站。所研究区域为黄河中游主要产沙区,该地区的特点为水少沙多,是黄河下游洪水和泥沙的主要来源区。该地区的年内降水高度集中,7-9月降水量约占全年降水量70%,该季节的侵蚀产沙和输移量约占全年的80%以上<sup>[14]</sup>,各个流域地理位置如图1所示。

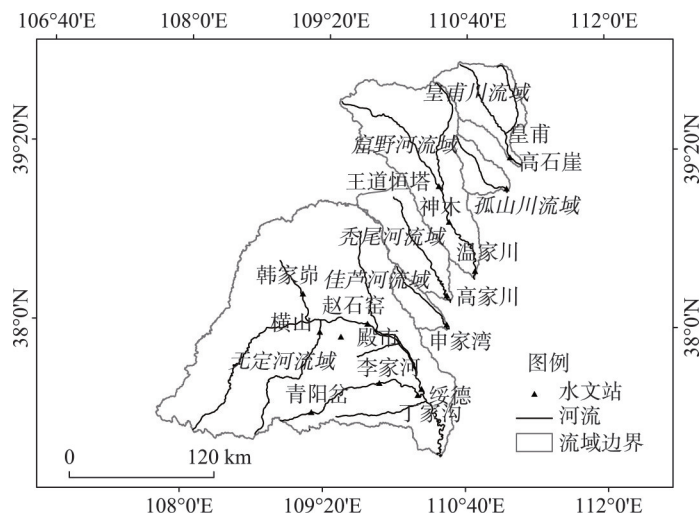


图1 典型流域位置图

Fig. 1 Location of the typical watersheds in the study area

### 3 研究方法

本文所选取数据涉及青阳岔、韩家峁、横山、殿市、李家河、绥德、赵石窑、丁家沟、高家川、王道恒塔、神木、温佳川、高石崖、皇甫以及申家湾水文站的1956-2010年的年径流量、年输沙量以及年降水量的资料。

研究方法主要包括Mann-Kendall秩次检验法<sup>[15]</sup>, Pettitt突变点检验<sup>[16]</sup>, 累积量斜率变化率比较法<sup>[9]</sup>以及位置、尺度、形状的广义可加模型 (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape, GAMLSS)<sup>[17]</sup>。

Mann-Kendall (MK) 秩次检验法用于对降水、径流以及输沙的趋势性进行检验, 当MK检验得出水文序列有显著的减少或增大的趋势时, 用Pettitt突变点检验法对有趋势变化的水文序列进行突变点检验。本文对于趋势性和突变点的分析采用R语言中的trend包来实现。

累积量斜率变化率比较法<sup>[9]</sup>是建立突变前后累积降水量—累积径流量和累积降水量—累积输沙量关系, 再通过突变前后斜率变化率得出径流量和输沙量变化的驱动因素。累积量斜率变化率比较法是定量区分降水量和其他因素对径流量和输沙量影响的计算方法<sup>[9]</sup>, 影响径流量变化的气候因素主要有降水量和气温, 降水量的变化直接导致流域径流量的变化, 而气温的变化则通过影响蒸发量从而影响径流量<sup>[9]</sup>。但是, 根据黄土高原的一些研究成果<sup>[18]</sup>, 至少近50年来年均气温与年均径流没有明显的相关性, 所以, 本文在采用累积率斜率变化率比较法计算贡献率的时候不考虑蒸发量对径流量的影响。

GAMLSS模型由随机部分、系统部分和连接函数三部分构成<sup>[19]</sup>, 具体的GAMLSS模型和AIC的计算过程参照文献<sup>[19]</sup>。首先需要建立降水、径流以及输沙的均值和方差均为常数情况下的最优函数, 接着通过GAMLSS模型与最优函数建立降水、径流以及输沙的均值和方差随时间变化的关系, 函数包括Gamma (GA)、Weibull (WEI) 以及Lognormal (LOGNO), 通过Akaike Information Criterion (AIC) 最小准则, 最终得出降水、径流以及输沙的均值和方差的变化趋势。通过R语言实现AIC的计算, 而最优函数的选取以及他们均值和方差随时间变化的关系是通过R语言中的gamlss包实现的。

### 4 结果分析

#### 4.1 Mann-Kendall秩次检验和Pettitt突变点检验

通过对15个水文站的年降水、年径流量以及年输沙量进行MK趋势检验和Pettitt突变点检验, 分析年降水量、年径流量以及年输沙量的一致性。

降水量MK趋势检验分析 (表1), 黄土高原近50年降水一致性较好, 无明显的增加或减少趋势。从表2和表3可以看出, 在5%显著水平下, 黄河中游15个水文站的年径流量和年输沙量大部分具有明显的减少趋势, 但是绥德年径流量和年输沙量、神木的年输沙量、殿市的输沙量以及李家河的年输沙量虽然有减少的趋势, 但是并不显著, 因此不需要对其进行突变点的分析; 对于径流量和输沙量有明显减少趋势的需进行突变点分析, 突变点均在20世纪70年代及其之后, 主要是因为20世纪60年代末开始兴修水利、梯田等水土保持工程, 重视植被恢复, 导致径流量和输沙量明显减少<sup>[20]</sup>。

径流量突变分析结果表明无定河流域径流量突变年份主要集中在1972年左右; 除殿市和韩家峁外, 佳芦河、孤山川、秃尾河、窟野河的王道恒塔以及皇甫川径流量的突变

表1 黄河中游多沙粗沙区不同流域年降水统计特征和趋势

Tab. 1 Precipitation statistics and trends for the sand area in the middle reaches of the Yellow River

流域	站名	年份	统计参数			MK 检验	
			均值	Cv	Cs	Z	Pmk
无定河	青阳岔	1959-2010年	407.8	0.28	0.56	-0.2	0.86
	李家河	1979-2010年	368.0	0.25	0.49	1.2	0.24
	绥德	1959-2010年	398.0	0.26	0.53	-0.2	0.86
	丁家沟	1956-2010年	373.3	0.24	0.7	-0.4	0.66
	赵石窑	1956-2010年	376.0	0.25	0.9	-0.3	0.75
	殿市	1958-2005年	377.9	0.26	0.52	-0.8	0.40
	横山	1956-2005年	389.7	0.25	0.66	-0.3	0.76
	韩家峁	1958-2005年	356.8	0.3	0.67	-0.6	0.54
佳芦河	申家湾	1956-2010年	396.7	0.27	0.68	-0.7	0.48
秃尾河	高家川	1956-2010年	400.3	0.33	0.65	-1.0	0.31
窟野河	王道恒塔	1956-2010年	378.4	0.29	0.58	-1.3	0.2
	神木	1956-2010年	385.3	0.29	0.58	-1.2	0.22
	温佳川	1956-2010年	385.3	0.28	0.56	-1.1	0.28
孤山川	高石崖	1956-2010年	397.2	0.32	0.72	-0.7	0.48
皇甫川	皇甫	1956-2010年	380.5	0.27	0.54	-1.1	0.29

注：Cv表示变异系数；Cs表示偏态系数；Z表示mk检验统计量；Pmk表示mk检验的概率。

表2 黄河中游多沙粗沙区年径流量趋势和突变点检验

Tab. 2 Annual streamflow trends and abrupt change time-points for the sand area in the middle reaches of the Yellow River

流域	站名	Mann-Kendall 检验			Pettitt 检验			
		Z	Pmk	显著性	Max(KT)	Ppt	突变点年份	显著性
无定河	青阳岔	-2.4	0.02	*	405	0.00	1971	**
	李家河	-2.6	0.01	**	326	0.02	1970	**
	绥德	-1.9	0.06					
	丁家沟	-5.9	0.00	**	535	0.00	1973	**
	赵石窑	-6.5	0.00	**	630	0.00	1973	**
	殿市	-3.7	0.00	**	403	0.00	1985	**
	横山	-5.6	0.00	**	585	0.00	1973	**
	韩家峁	-5.2	0.00	**	649	0.00	1985	**
佳芦河	申家湾	-6.2	0.00	**	670	0.00	1978	**
秃尾河	高家川	-7.2	0.00	**	697	0.00	1982	**
窟野河	王道恒塔	-5.8	0.00	**	553	0.00	1985	**
	神木	-2.3	0.02	*	216	0.05	1996	*
	温佳川	-5.1	0.00	**	560	0.00	1996	**
孤山川	高石崖	-5.1	0.00	**	496	0.00	1979	**
皇甫川	皇甫	-4.0	0.00	**	539	0.00	1982	**

注：Z表示mk检验统计量；Pmk表示mk检验的概率；Max(KT)表示pettitt检验统计量；Ppt表示Pettitt检验概率；\*表示差异达显著水平（ $P < 0.05$ ）；\*\*表示差异达极显著水平（ $P < 0.01$ ）。

表3 黄河中游多沙粗沙区年输沙量趋势和突变点检验

Tab. 3 Annual sediment transport trends and point mutation tests for the sand area in the middle reaches of the Yellow River

流域	站名	Mann-Kendall 检验			Pettitt 检验			
		Z	Pmk	显著性	Max(KT)	Ppt	突变点年份	显著性
无定河	青阳岔	-3.5	0.00	**	354	0.01	1969	**
	李家河	-0.5	0.59					
	绥德	-0.9	0.36					
	丁家沟	-4.0	0.00	**				
	赵石窑	-5.7	0.00	**	502	0.00	1979	**
	殿市	-1.0	0.33					
	横山	-4.7	0.00	**				
	韩家峁	-6.6	0.00	**				
佳芦河	申家湾	-3.9	0.00	**	324	0.00	1978	**
秃尾河	高家川	-4.3	0.00	**	375	0.00	1978	**
窟野河	王道恒塔	-4.5	0.00	**	404	0.00	1996	**
	神木	-1.3	0.19					
	温佳川	-5.4	0.00	**				
孤山川	高石崖	-5.8	0.00	*	486	0.00	1989	**
皇甫川	皇甫	-3.1	0.00	**	230	0.02	1984	**

注: Z表示mk检验统计量; Pmk表示mk检验的概率; Max(KT)表示pettitt检验统计量; Ppt表示Pettitt检验概率; \*表示差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ); \*\*表示差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

年份相近, 为1982年左右; 这与研究流域20世纪70年代以来大规模实施的水土保持措施有关<sup>[21]</sup>。窟野河的神木和温佳川径流量的突变年份为1996年, 这与20世纪80-90年代提出综合小流域治理政策<sup>[21]</sup>以及窟野河流域的煤炭开采有关<sup>[12]</sup>。输沙量的突变年份基本与径流量突变年份保持一致。无定河流域输沙量的突变年份主要集中在1972年左右, 除丁家沟和韩家峁外; 佳芦河突变年份在1978年; 皇甫川以及孤山川输沙量突变年份集中在1987年左右。

Mann-Kendall 秩次检验分析结果表明径流量和输沙量的变化与降水量的变化不同步, 但需要进一步对比分析基于GAMLSS模型的线性趋势分析结果, 得出可靠的结论。

4.2 基于GAMLSS模型的线性趋势分析

采用GAMLSS模型对水文序列的均值和方差进行趋势分析, 目的在于通过分析水文序列的均值从而反映水文序列的整体是如何变化的, 而分析水文序列的方差反映的是在整体趋势变化不明显时, 用于表征水文序列在研究时段内是否随时间发生波动。

通过GAMLSS模型对降水量、径流量以及输沙量的统计参数进行线性趋势分析, 首先分别建立降水量的函数分布, 参数均值 $\mu$ 和均方差 $\sigma$ 默认为常数, 即均不随时间发生变化, 然后每个函数得出一个AIC, 根据AIC最小原则, 选取AIC最小对应的函数为对应水文站的最优降水函数, 具体如表4所示, 径流量和输沙量同理。降水量选取的Gamma函数、Weibull函数以及对数正态分布函数, 3个函数分别计算得出的AIC值中最小对应的函数即为该水文站的最优函数。

依照前文的原理, 可得出黄河中游多沙粗沙区域对应的降水、径流以及输沙的最优函数如表5所示。



通过表 5 得出的降水、径流以及输沙的最优函数, 建立统计参数与时间  $t$  的线性函数, 共包含 4 个情况, 分别为:  $\mu$  和  $\sigma$  均为常数,  $\mu$  变、 $\sigma$  不变,  $\mu$  不变、 $\sigma$  变以及  $\mu$  和  $\sigma$  均变。根据 AIC 最小准则得出模型拟合效果达到最优的组合, 与统计参数均为常数情况下模型的拟合结果对比, 如果前者拟合效果优于统计参数为常数的情况, 则认为相应的统计参数具有显著的线性趋势。具体结果如图 2 所示。

对于降水量的特征参数而言, 根据 AIC 最小准则进行选取最优模型, 结果如图 2a 所示, 无定河流域的横山、窟野河的温佳川以及皇甫川的皇甫降水量均值和方差均不随时间  $t$  发生变化; 无定河流域的李家河降水量均值随时间发生变化, 虽然与 MK 检验得出的降水量均值没有显著的趋势性变化相同, 但通过 GAMLSS 模型分析得出, 降水量的方差随时间  $t$  的增大而减小, 即在长序列时间段内, 降水的总量并未发生变化, 但降水的波动幅度减小。

对于径流的特征参数而言, 基于 AIC 最小准则选取最优模型, 结果如图 2b 所示, 无定河流域的青阳岔、李家河、殿市以及韩家峁, 佳芦河流域, 孤山川流域以及皇甫川流

表 4 黄河中游多沙粗沙区降水量最优函数选取  
Tab. 4 Selection of the optimal function for precipitation in the sand area of the middle reaches of the Yellow River

流域	站名	AIC		
		GA	WEI	Lognormal
无定河	青阳岔	528.87	524.32	531.44
	李家河	427.95	427.77	429.28
	绥德	632.58	634.10	634.97
	丁家沟	599.76	607.35	600.13
	赵石窑	592.40	601.00	591.77
	殿市	379.75	379.07	382.06
	横山	620.71	628.73	620.29
	韩家峁	521.20	526.76	521.60
	佳芦河	582.90	586.49	584.09
秃尾河	高家川	678.92	681.24	682.06
窟野河	王道恒塔	636.14	636.84	639.28
	神木	529.56	527.83	532.68
	温佳川	517.16	519.59	518.25
孤山川	高石崖	596.47	597.13	596.23
皇甫川	皇甫	1032.39	1032.85	1036.45

表 5 黄河中游多沙粗沙区水文变量最优函数选取  
Tab. 5 Selection of the optimal function for hydrological variation in the sand area of the middle reaches of the Yellow River

流域	站名	降水模型	径流模型	输沙模型
无定河	青阳岔	WEI	Lognormal	Lognormal
	李家河	WEI	Lognormal	Lognormal
	绥德	GA	Lognormal	GA
	丁家沟	GA	Lognormal	WEI
	赵石窑	Lognormal	WEI	WEI
	殿市	WEI	Lognormal	WEI
	横山	Lognormal	Lognormal	Lognormal
	韩家峁	GA	WEI	Lognormal
	佳芦河	GA	Lognormal	Lognormal
秃尾河	高家川	GA	Lognormal	Lognormal
窟野河	王道恒塔	GA	Lognormal	GA
	神木	WEI	WEI	GA
	温佳川	GA	WEI	GA
孤山川	高石崖	Lognormal	GA	WEI
皇甫川	皇甫	GA	GA	Lognormal

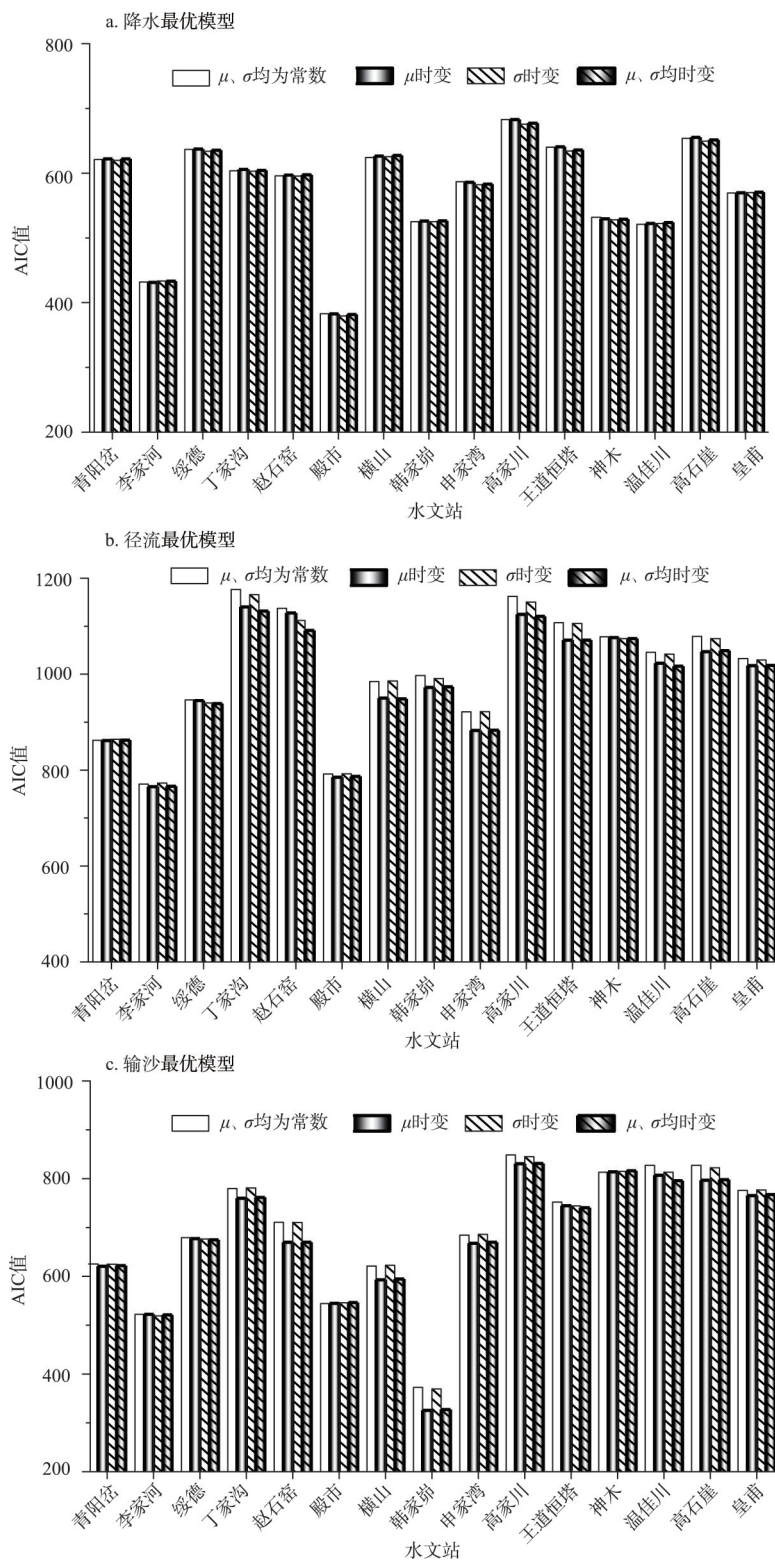


图2 降水、径流和输沙最优模型选取

Fig. 2 Precipitation, streamflow, and sediment optimal model selection

域径流量的均值随时间 $t$ 发生变化;且无定河流域的绥德、丁家沟、赵石窑、横山,秃尾河流域、以及窟野河流域径流量的均值和方差均随时间 $t$ 发生变化。综上所述,对于径流量均值趋势的检验GAMLSS模型与MK方法的结果基本一致,部分水文站径流量除了均值发生变化外方差也发生了变化。

对于输沙的特征参数而言,如图2c所示,GAMLSS方法对于输沙量均值趋势检验的结果也与MK趋势的结果一致,除了李家河、绥德、殿市和神木水文站以外,其他11个水文站输沙均值都有减少的趋势。对于方差的变化分析结果,表明窟野河流域的温佳川和王道恒塔2个水文站的输沙量不仅均值发生了变化,方差也随时间 $t$ 发生变化,而无定河流域的李家河和绥德均值没有发生变化,但方差随时间 $t$ 发生变化。

#### 4.3 径流量和输沙量影响因素贡献率分析

基于GAMLSS模型对均值和方差的分析结果表明,在长序列研究时段内降水量总量虽没有发生变化,但降水量方差(均值上下幅度)发生变化,因此为了进一步分析降水量和人类活动对输沙量和径流量的变化,本文通过累积量斜率变化率比较法计算降水和人类活动对径流和输沙的贡献率,通过降水一年径流量和降水一年输沙量双累积曲线进行分析计算。

将发生突变临界年份之前的时期作为基准期,将发生突变临界年份之后的时期作为措施期。将措施期各年累积降水量代入基准期双累积曲线建立的回归方程,得到计算年径流量和年输沙量。不同时期计算值之差,为降水变化的影响量;而同时期计算值与实测值之差,为人类活动影响的减水减沙量;同时期人类活动影响的减少量与计算值相比,为人类活动的减水减沙效益。需计算突变前后的径流输沙量,对于无突变年份的水文站不需要进行贡献率计算,对其他11个水文站的年径流量和年输沙量变化原因分析结果如表6所示。

从表6可以看出,人类活动对窟野河流域的径流量的贡献率为97.3%,大于无定河流域的贡献率75.5%。除韩家崙和高家川外,人类活动对无定河、佳芦河、孤山川以及皇甫川流域的影响相差不大;韩家崙的降水和人类活动的贡献率分别为41.1%、58.9%,高家川的降水和人类活动的贡献率为43.8%、56.2%;对于窟野河的温佳川和王道恒塔,降水对径流的影响最小,分别为1.0%和4.4%,温佳川和王道恒塔径流量的变化主要是由人类活动影响引起的。

输沙量贡献率识别结果表明人类活动对窟野河流域输沙量的贡献率98.9%,大于无定河流域的贡献率79.8%。除韩家崙和申家湾外,人类活动对无定河、秃尾河、孤山川以及皇甫川流域的影响相差不大;韩家崙的降水和人类活动的贡献率分别为35.0%、65.0%,申家湾的降水和人类活动的贡献率为29.2%、70.8%。窟野河的温佳川和王道恒塔降水对输沙的影响最小,分别为1.7%和6.6%,温佳川和王道恒塔输沙量的变化几乎是因为人类活动影响引起的。

综上所述,人类活动对窟野河流域的径流量和输沙量影响大于无定河及其他黄河中游多沙粗沙区流域,这与窟野河煤炭资源开采和水土保持活动有关。① 煤矿资源开采的影响:煤矿开采产生的沉陷未波及地面时,地表水与矿坑水之间没有直接的水力联系,相互之间不会产生影响。随着煤矿开采加大,产生的地面沉陷面积也增大,导致相互之间产生水力联系,使地表水转化为地下水,因而使得河流量减少<sup>[22-23]</sup>,径流量减少进而使得输沙量减少;② 水土保持活动的影响:水土保持措施主要包括梯田、造林、种草和修筑淤地坝等,这些措施的综合作用决定了水土保持的效果<sup>[24-25]</sup>,梯田、植树种草、淤地坝



表6 黄河中游多沙粗沙区降水和人类活动对径流输沙的影响

Tab. 6 Effects of precipitation and human activities on streamflow sediment transport in the sand area of the middle reaches of the Yellow River

流域	站名	突变 前后	降水 斜率	径流量			输沙量		
				斜率	降水影响(%)	人类活动影响(%)	斜率	降水影响(%)	人类活动影响(%)
无定河	青阳岔	突变前	451.8	3415.6	29.0	71.0	588.2	21.0	79.0
		突变后	393.5	2261.8			227.7		
	丁家沟	突变前	385.1	119864.0	13.9	86.1	2590.3	10.7	89.3
		突变后	357.0	76588.0			821.9		
	赵石窑	突变前	397.1	62328.0	23.2	76.8	1787.9	16.1	83.9
		突变后	355.8	41562.0			632.2		
	横山	突变前	412.9	11162.0	15.5	84.6	1118.5	19.3	80.7
		突变后	345.2	4919.4			168.3		
	韩家峁	突变前	350.4	9485.7	41.1	58.9	26.7	34.0	66.0
		突变后	252.9	4896.8			4.9		
佳芦河	申家湾	突变前	430.3	9705.3	15.8	84.2	1506.8	29.2	70.8
		突变后	343.2	3723.1			461.9		
秃尾河	高家川	突变前	433.9	41757.0	43.8	56.2	1775.8	21.9	78.1
		突变后	349.9	26966.0			207.4		
窟野河	王道恒塔	突变前	377.5	26809.0	4.4	95.6	1786.2	6.6	93.4
		突变后	353.3	10536.0			51.5		
	温佳川	突变前	371.9	60045.0	1.0	99.0	7763.0	1.7	98.3
		突变后	366.3	23958.0			789.5		
孤山川	高石崖	突变前	407.8	9819.1	13.9	86.1	1773.3	19.5	80.5
		突变后	338.3	3962.6			222.9		
皇甫川	皇甫	突变前	374.0	17089.0	18.9	81.1	4612.4	24.8	75.2
		突变后	311.5	8282.3			1507.3		

等措施改变局地能量和水量平衡，显著减少了地表径流量和输沙量<sup>[26]</sup>。

5 结论

本文以黄河中游多沙粗沙区 15 个水文站控制流域的年降水量、年径流量以及年输沙量为研究对象，通过MK 秩次检验和GAMLSS 模型对降水量、径流量以及输沙量进行趋势分析，对有显著变化的水文序列采用Pettitt 突变点法进行突变点检验以及对突变前后分别列出降水—径流量和降水—输沙量的关系式，从而得出径流和输沙变化的人类活动和气候条件的贡献率，结果表明：

(1) 通过MK 趋势检验得出，径流量和输沙量均有显著减少的趋势，降水量虽有减少的趋势，但并不显著；GAMLSS 模型对均值的检验结果与MK 结果一致，对方差的趋势检验结果表明虽然年降水量均值整体并没有发生变化，但降水方差随时间*t*发生变化，且绥德和李家河的输沙量的方差也随时间*t*发生变化，突变分析结果表明径流和输沙的突变年份主要发生在 20 世纪 70 年代及其之后。

(2) 径流量和输沙量影响因素贡献率分析表明: 人类活动对无定河流域径流和输沙量的贡献率分别为 75.5% 和 79.8%; 人类活动对佳芦河流域径流量和输沙量的贡献率分别为 84.2% 和 70.8%; 人类活动对秃尾河流域径流量和输沙量的贡献率分别为 56.2% 和 78.1%; 人类活动对窟野河流域径流量和输沙量的贡献率分别为 97.3% 和 95.8%; 人类活动对孤山川流域径流量和输沙量的贡献率分别为 86.1% 和 80.5%; 人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量的贡献率分别为 81.1% 和 75.2%。无定河流域和秃尾河流域人类活动对输沙量减少的贡献率大于径流量减少的贡献率; 而佳芦河、窟野河、孤山川以及皇甫川流域人类活动对径流量减少的贡献率大于输沙量减少的贡献率。

(3) 在 6 个研究流域中, 人类活动对窟野河流域径流量和输沙量影响最大, 该流域温佳川站以及王道恒塔站的径流和输沙的变化 90% 以上是由人类活动造成的, 主要是由于该流域煤矿资源开采致使地表水和矿坑水产生水力联系而引起径流和输沙的变化。

### 参考文献(References)

- [1] Zhao Yang, Yu Xinxiao, Zheng Jiangkun, et al. Quantitative effects of climate variations and land-use changes on annual streamflow in Chaobai river basin. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 252-260. [赵阳, 余新晓, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响. 农业工程学报, 2012, 28(22): 252-260.]
- [2] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Wen Zhongming, et al. Impacts of precipitation and human activities on streamflow and sediment load in the Huangfuchuan Watershed. Science of Soil Water Conservation, 2013, 11(4): 1-8. [赵广举, 穆兴民, 温仲明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1-8.]
- [3] Fu G, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. Water Resources Research, 2007, 43(11): 2578-2584.
- [4] Sankarasubramanian A, Vogel R M, Limbrunner J F. Climate elasticity of streamflow in the United States. Water Resources Research, 2001, 37(6): 1771-1781.
- [5] Montenegro A, Ragab R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: A modelling study. Hydrological Processes, 2010, 24(19): 2705-2723.
- [6] Wang G S, Xia J, Chen J. Quantification of effects of climate variations and human activities on streamflow by a monthly water balance model: A case study of the Chaobai River basin in northern China. Water Resources Research, 2009, 45(7): 206-216.
- [7] Li D, Tian Y, Liu C. Distributed hydrological simulation of the source regions of the Yellow River under environmental changes. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 565-573.
- [8] He Xuqiang, Zhang Bo, Sun Liwei, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the streamflow in upper and middle reaches of Heihe River basin. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2884-2890. [何旭强, 张勃, 孙力伟, 等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2884-2890.]
- [9] Wang Suiji, Yan Yunxia, Yan Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the streamflow change of the Huangfuchuan Drainage Basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388-397. [王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.]
- [10] Lai Tianzeng, Zhang Qiang, Zhang Zhenghao, et al. Quantitative evaluations of fractional contribution of human activities and climate changes to the streamflow variations across the East River basin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016, 55(4): 136-145. [赖天铨, 张强, 张正浩, 等. 人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(4): 136-145.]
- [11] Dang Suzhen, Dong Guotao, Jiang Xiaohui, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in the upper reaches of Jinghe river. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 30-34. [党素珍, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 30-34.]
- [12] Liu Erjia, Zhang Xiaoping, Zhang Jianjun, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1159-1168. [刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等.]

- 1956-2005年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168.]
- [13] Zheng Peilong, Li Yunxia, Kou Xinyue, et al. Effects of climate variation and land use change on streamflow in Jiehe Watershed of Loess Plateau. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 250-253. [郑培龙, 李云霞, 寇馨月, 等. 黄土高原窟野河流域径流对气候和土地利用变化的响应. 水土保持通报, 2016, 36(2): 250-253.]
- [14] Zhang Jia. Changes of sediment load from the main tributaries in the middle reaches of the Yellow River and their impacts on the sediment flux to the sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [张佳. 黄河中游主要支流输沙量变化及其对入海泥沙通量的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [15] Ding Jing. Stochastic hydrology [D]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 1988. [丁晶. 随机水文学[D]. 成都: 成都科技大学, 1988.]
- [16] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2):126-135.
- [17] Rigby R A, Stasinopoulos D M. Generalized additive models for location, scale and shape. Journal of Statistical Software, 2007, 23(7): 4048-4065.
- [18] Xu J. Variation in annual streamflow of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity. Quaternary International, 2011, 244(2): 230-237.
- [19] Xiong Bin, Xiong Lihua. Nonstationary frequency analysis of low-flow series considering both baseflow recession process and precipitation. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(7): 873-883. [熊斌, 熊立华. 基于基流退水过程的非一致性枯水频率分析. 水利学报, 2016, 47(7): 873-883.]
- [20] Wang Zhenhai, Li Chuanzhe, Yu Fuliang, et al. Quantitative analysis of the effect of climate change and human activities on streamflow. Journal of University of Jinan (Sci. & Tech.), 2014, 28(4): 295-299. [王振海, 李传哲, 于福亮, 等. 气候变化和人类活动对径流影响的贡献分解. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(4): 295-299.]
- [21] Wang S, Fu B, Liang W, et al. Driving forces of changes in the water and sediment relationship in the Yellow River. Science of the Total Environment, 2017, 576: 453-461.
- [22] Yang Linjie. Effect of coal mining to Kuye River streamflow change and simulation research [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014. [杨琳洁. 煤炭开采对窟野河河川径流变化影响及模拟研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.]
- [23] Qu Xiangjuan. Influence evaluation and treatment measures of coal mining on water environment in Jinzhong City. Groundwater, 2009, 31(2): 92-94. [曲红娟. 晋中市煤矿开采对水环境的影响评价及治理措施. 地下水, 2009, 31(2): 92-94.]
- [24] Xu J, Yan Y. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations. Journal of Hydrology, 2005, 307(1-4): 219-232.
- [25] Zhao Xiaokun, Wang Suiji, Fan Xiaoli. Analysis on the change trend of streamflow and influence factors in Kuye River Basin from 1954 to 1993. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(5): 32-36. [赵晓坤, 王随继, 范小黎. 1954-1993年间窟野河径流量变化趋势及其影响因素分析. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 32-36.]
- [26] Zhang Xiaoping, Zhang Lu, Wang Yong, et al. Tempo-spatially responses of the annual streamflow to LUCC in the middle reaches of Yellow River, China. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 19-26. [张晓萍, 张鲁, 王勇, 等. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 19-26.]

## The trends of streamflow and sediment and their driving factors in the middle reaches of the Yellow River

SUN Qian<sup>1</sup>, YU Kunxia<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>3</sup>, GONG Junfu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** As streamflow and sediment of the coarse sand area in the middle reaches of the Yellow River have experienced considerable change under the background of climate change and intensified human activities in recent years, it is of great importance to conduct research on their driving factors to predict future streamflow and sediment discharge of the Yellow River. We used annual precipitation, annual streamflow volume, and annual sediment discharge data from 15 hydrological stations located in the coarse sand area of the middle reaches of the Yellow River from 1956 to 2010. The Mann-Kendall trend test, Pettitt change point test, generalized additive model for location, scale, and shape model (GAMLSS), and comparison of cumulative slope change rate were applied to analyze the variation characteristics of these hydrological variables and to determine the driving factors of annual streamflow volume and annual sediment discharge. The results of the analyses are as follows: (1) The Mann-Kendall trend tests showed that annual precipitation demonstrated a non-significant decreasing trend at the 5% significance level, whereas annual streamflow volume and sediment discharge exhibited significant decreasing trends in the study area; (2) The Pettitt change point tests showed that the abrupt change of time-points for annual streamflow volume and sediment discharge occurred around 1972, 1985, and 1996; (3) The GAMLSS results indicated that the mean values of annual precipitation did not change with time, but the variance of annual precipitation showed a decreasing trend in all study areas; (4) The comparison of cumulative slope change rate showed that the influences of human activities on annual streamflow volume and sediment discharge were greater in the Kuye River basin than that in the Wuding River basin. Analyzing the driving factors of changes in annual streamflow volume and sediment discharge provides theoretical support for the rational allocation of water resources in the coarse sand area of the middle reaches of the Yellow River.

**Keywords:** coarse sand area; the middle reaches of the Yellow River; variation of streamflow and sediment; GAMLSS model; comparison of cumulative slope change rate