

皇甫川流域 1955—2013 年水沙变化趋势与周期特征

魏艳红¹, 焦菊英^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为揭示黄河流域重要的产沙支流皇甫川在新时期水沙如何变化,采用 Mann-Kendall 检验、Pettitt 检验及 Morlet 小波变换,分析了皇甫川流域 1955—2013 年水沙变化的趋势、突变和周期变化特征。结果表明:在 99% 显著性水平下,皇甫川流域的年径流量和输沙量均呈显著减少趋势,且径流量的减少大于输沙量的减少,进入 21 世纪以来,水沙年际变异更为显著;径流量、输沙量序列一级突变点均发生在 1984 年,二级突变点有所不同,年输沙量序列突变时间(2003 年)晚于年径流量序列突变的时间(1998 年);水沙演化过程中均存在 4 个尺度的周期变化,分别为 22~32, 13~21, 7~12, 3~6 a 和 23~32, 13~22, 7~12, 3~6 a;在径流量和输沙量整体减少的趋势下,2011—2020 年径流量将处于相对偏丰阶段,而输沙量在 2013—2018 年将处于相对偏多沙时期。研究表明,皇甫川流域径流量和输沙量的减少是气候的暖干化和渐强的人类活动综合作用的结果,而大规模的水土保持措施是水沙减少的重要影响因素。

关键词:水沙变化; 周期变化; Mann-Kendall 趋势检验; Pettitt 突变检验; Morlet 小波变换

中图分类号:P343.1;P332.4;P332.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0001-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.001

Variation Tendency and Periodic Characteristics of Streamflow and Sediment Discharge in Huangfuchuan Watershed from 1955 to 2013

WEI Yanhong¹, JIAO Juying^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To reveal how streamflow and sediment discharge change in the new period of importance producing sediment of Huangfuchuan Watershed, the tributary of Yellow River. The Mann-Kendall test, Pettitt's test and wavelet transform were applied to detect the trends, abrupt changes and periodical variation of streamflow and sediment discharge from 1955 to 2013 in the Huangfuchuan Watershed. The results showed that significant reductions in both streamflow ($Z = -5.01$) and sediment discharge ($Z = -4.55$) were detected with a significance level of 99%, as well as the reduction of streamflow ($\beta = -0.03$) was greater than sediment discharge ($\beta = -0.01$). Especially in the 21st century, the interannual variability of streamflow and sediment discharge was more significant. The first abrupt change points of both annual streamflow and sediment discharge appeared in 1984, while the second abrupt change points of these were not in the same year, for sediment discharge in 2003 later than streamflow in 1998. The periodic variation of streamflow and sediment discharge had four scales, there were 22~32 years, 13~21 years, 7~12 years, 3~6 years scales and 23~32 years, 13~22 years, 7~12 years, 3~6 years scales. As the amounts of streamflow and sediment discharge reducing as a whole, the streamflow would be in the wet period in 2011—2020, while the sediment discharge would be in the high sediment in 2013—2018. The research results showed that the decrease in the streamflow and sediment discharge in Huangfuchuan Watershed was the result of the combination with warming and drying climate and intensive human activities. However, a series of large-scale soil and water conservation measures were the vital factors leading to significant reduction in streamflow and sediment discharge in Huangfuchuan Watershed.

Keywords: variation in streamflow and sediment discharge; periodical variation; Mann-Kendall trend test; Pettitt abrupt change test; Morlet wavelet transform

收稿日期:2016-05-17

修回日期:2016-06-23

资助项目:中国科学院重点部署项目“黄土高原及周边沙地近代生态环境的演变与可持续性”子课题“不同区域典型支流水沙变化对坝库工程的响应”(KZZD-EW-04-03-04)

第一作者:魏艳红(1988—),女,甘肃白银人,博士研究生,研究方向为流域水文过程与水土保持。E-mail:yhweigo@163.com

通信作者:焦菊英(1965—),女,陕西宝鸡人,博士,研究员,主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail:jjiao@ms.iswc.ac.cn

黄河中游河口镇—龙门区间(简称河龙区间)流域面积 11.4 万 km^2 , 占黄河流域总面积的 15.1%, 产流量不足全流域的 14%, 但产沙量却占到 60% 以上^[1]。其中位于河龙区间、泾河支流马莲河上游和北洛河上游的多沙粗沙区, 面积 7.86 万 km^2 , 是黄河主要的产沙区^[2]。黄河多沙粗沙区的一级支流皇甫川, 流域面积 0.32 万 km^2 , 其多年平均(1970—1995 年)粗沙量占到河龙区间粗沙量的 14.8%^[3]。因此, 皇甫川不仅是黄河泥沙的重要来源支流之一, 也是水土保持治理的重点区域之一。目前, 关于该流域的研究主要集中于水沙变化^[3-5]、土壤侵蚀^[6-7]、水土保持^[8-9]和土地利用变化^[7,10-11]等方面。随着气候变化和人类活动的影响, 皇甫川流域径流与输沙在多年变化中均呈明显减少趋势^[4,12], 尤其在 20 世纪 80 年代之后, 减少更加显著^[5]。人类活动对该流域水沙变化的贡献占主导因素, 约为 70%, 而降水所占比例为 30% 左右^[5]。其中皇甫川流域水土保持措施减沙量占黄河下游减淤量的 16%^[3], 这对黄河下游水沙情势的改变具有重要指示意义。同时, 近年来黄河水沙的新变化再次成为人们关注的焦点, 潼关站年均径流量和输沙量已由 20 世纪 70 年代前的 441.7 亿 m^3 , 16 亿 t 分别锐减到 2000—2010 年的 215.3 亿 m^3 , 3.03 亿 t。那么, 作为黄河流域重要的产沙支流皇甫川, 在新时期水沙如何变化, 将对以后黄河流域的治理开发和黄土高原水土保持措施的合理配置提供参考价值。因此本文以皇甫川流域为例, 对其近 60 a 来的水沙变化特点、变化趋势和周期变化特征进行分析, 旨在为流域未来水资源的开发利用和管理以及黄河干流水沙锐减的原因提供指导作用和理论依据。

1 研究区概况

皇甫川(110°20′—111°15′E, 39°12′—39°59′N)位于黄土高原与荒漠草原的过渡地带, 是黄河中游右岸的一级支流, 流经内蒙古自治区准格尔旗, 在陕西省府谷县巴兔坪汇入黄河, 干流长 137 km, 流域面积 3 246 km^2 。皇甫川流域出口的皇甫水文站控制面积 3 175 km^2 , 1954 年开始监测。皇甫川流域水系主要由干流纳林川和支流十里长川组成。该流域由于地势高差较大和暴雨侵蚀强烈使得流域水系充分发育, 加之人为水土流失的加速, 形成了梁峁窄小、沟壑众多、地形破碎的丘陵沟壑地貌^[13]。流域地处内陆, 属大陆性季风气候, 年平均气温 9.1℃; 降水的年际和年内变率大, 年内降水集中于 6—9 月, 占全年的 80% 以上^[14]。由于气候变化和人类砍伐, 该流域天然疏林及灌木草原基本消失, 原生草地植被因清末以来农垦的扩

张被人工植被或次生草地植被所代替^[15]。皇甫川流域是典型的农牧交错带, 土地利用形成了以草地为主、耕地和林地零星分布以及侵蚀沟网嵌套的格局^[10]。皇甫川流域土壤主要以砒砂岩、风沙土和黄土为母质, 土壤侵蚀类型可划分为砒砂岩丘陵沟壑区、黄土丘陵沟壑区和沙化黄土丘陵沟壑区 3 类, 其中砒砂岩丘陵沟壑区是黄河粗泥沙的主要来源地之一^[16]。

2 数据与方法

2.1 数据获取

根据皇甫川流域皇甫水文站 1955—2013 年的径流泥沙数据, 分析皇甫川流域水沙变化趋势与周期变化特征。其中 1955—1989 年资料来源于黄河流域水文年鉴, 1990—2013 年的资料来源于黄河泥沙公报。

2.2 研究方法

应用变差系数(C_v)与年际极值比来说明水沙年际变化特征。变差系数 C_v 可反映径流、输沙年内变化的不均匀性, $C_v < 0.1$ 表示相对稳定, $0.1 \leq C_v \leq 1$ 表示中度变异, $C_v > 1$ 表示变异强烈^[17]。Mann-Kendall 趋势检验 Z 值为正表示增加趋势, 为负表示减少趋势。| Z | $\geq 1.28, 1.64, 2.32$ 时表示分别通过了置信度为 90%, 95%, 99% 显著性检验。

长时间序列水文要素变化趋势的分析采用 FAO 推荐的 Mann-Kendall 检验。水沙突变点分析应用 Pettitt 非参数检验方法, 首先找出整个时间序列(1955—2013 年)的一级突变点, 然后根据一级突变点将时间序列划分为前后两个时段, 再分别对前后时段样本做 Pettitt 检验, 得出二级突变点, 进而计算出各时段的所有突变点, 直到各序列均没有突变点出现。

应用 Morlet 小波变换来分析皇甫川流域不同时间尺度下径流和输沙的周期变化、分布特征及未来变化趋势。小波系数实部等值线图, 横坐标为时间, 纵坐标为时间尺度, 等值线为小波系数实部值, 正值代表丰水期或多沙期, 用实线绘出, “H”表示; 负值表示枯水期或少沙期, 用虚线绘出, “L”表示。

3 结果与分析

3.1 皇甫川流域水沙变化趋势分析

近 60 a 来, 皇甫川流域径流量和输沙量变化线性趋势和特征如图 1, 表 1 所示。年径流量和输沙量呈显著减少趋势, 1955—2013 年径流量和输沙量平均值分别为 1.229 亿 m^3 , 0.391 亿 t; 除 60 年代外, 其余各年代径流量和输沙量呈逐年代减少趋势, 分别由 1955—1959 年的最大值 2.169 亿 m^3 , 0.742 亿 t 减少至 2000—2013 年的最小值 0.367 亿 m^3 , 0.086 亿 t。

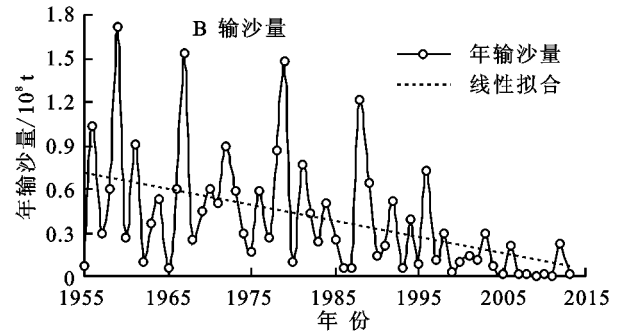
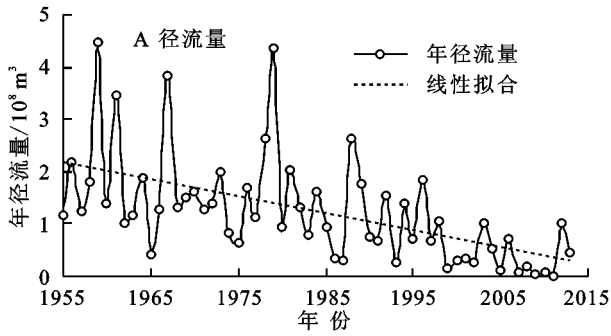


图 1 皇甫川流域 1955—2013 年径流量和输沙量变化趋势

皇甫川 1955—2013 年径流和输沙变差系数和极值比分别为 0.82, 1.03, 120.11, 295.85, 表明皇甫川流域径流量和输沙量年际变异较大。径流变差系数在 1955—1999 年基本稳定, C_v 值范围为 0.59~0.63; 2000—2013 年 C_v 值增大到 0.93, 表明进入 21 世纪以来径流分布极不均匀。除 70, 80 年代外, 径流极值比在 1955—2013 年持续增大, 表明年际变化也越来越大。输沙变差系数除 70 年代基本接近外, 其余均大于同期径流变差系数, 1955—1999 年 C_v 值为 0.61~0.90, 2000—2013 年 C_v 值达到最大值 1.11, 该时段输沙变异强烈。输沙极值比呈增大—减小—增大趋势, 年际变化反复且不均匀。进入 21 世纪以来, 水沙年际变异显著。

表 1 皇甫川径流输沙年际变化特征值

时期	径流量			输沙量		
	平均值/ 10^8 m^3	C_v	K	平均值/ 10^8 t	C_v	K
1955—1959 年	2.169	0.62	3.81	0.742	0.88	22.77
1960—1969 年	1.723	0.63	9.35	0.504	0.88	29.50
1970—1979 年	1.758	0.62	6.76	0.625	0.61	8.71
1980—1989 年	1.272	0.59	8.74	0.428	0.87	21.14
1990—1999 年	0.903	0.61	12.60	0.255	0.90	26.43
2000—2013 年	0.367	0.93	27.73	0.086	1.11	50.24
1955—2013 年	1.229	0.82	120.11	0.391	1.03	295.85

注: C_v 表示变差系数, K 表示极值比。

在 99% 显著性水平下, 径流量和输沙量 Z 值均为负数, 由此可知皇甫川流域的年径流量 ($Z = -5.01$) 和年输沙量 ($Z = -4.55$) 均呈显著减少趋势, Sen's 斜率值 (β) 表明径流量 ($\beta = -0.03$) 的减少大于输沙量 ($\beta = -0.01$) 的减少 (表 2)。

表 2 皇甫川流域径流量和输沙量趋势分析

水文要素	Z 值	显著性水平	Sen's 斜率
径流量	-5.01	99%	-0.03
输沙量	-4.55	99%	-0.01

3.2 皇甫川流域水沙突变特征

从图 2—3 中可以看出, 皇甫川流域 1955—2013

年径流量和输沙量一级突变点均出现在 1984 年, 显著性水平为 0.05。以一级突变点 1984 年为界, 将整个研究时段划分为前后两个阶段, 第一阶段 (1955—1984 年) 径流量和输沙量序列均没有发生突变; 第二阶段 (1985—2013 年), 在 0.05 显著性水平下, 径流量突变点在 1998 年, 而输沙量突变点在 2003 年。由此可知, 皇甫川流域水沙序列一级突变点均出现在 1984 年, 二级突变点有所不同, 输沙量序列突变时间 (2003 年) 晚于径流量序列突变的时间 (1998 年)。

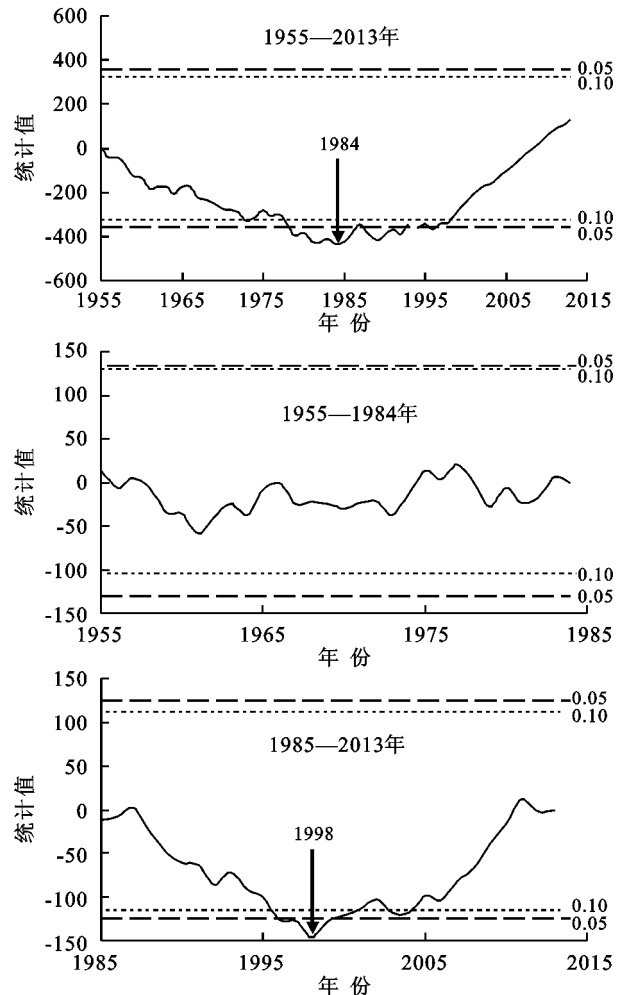


图 2 皇甫川流域径流量 Pettitt 检验

3.3 皇甫川流域水沙周期变化特征

从图 4A 可以看出, 皇甫川流域径流演化过程中

存在多时间尺度特征,从上往下出现了 22~32,13~21,7~12,3~6 a 共 4 个尺度的周期变化。对应于图 5A 径流小波方差图中的 4 个较为明显的峰值,从大到小分别是 29,15,4,9 a 的时间尺度,是径流演化过程中存在的主周期。

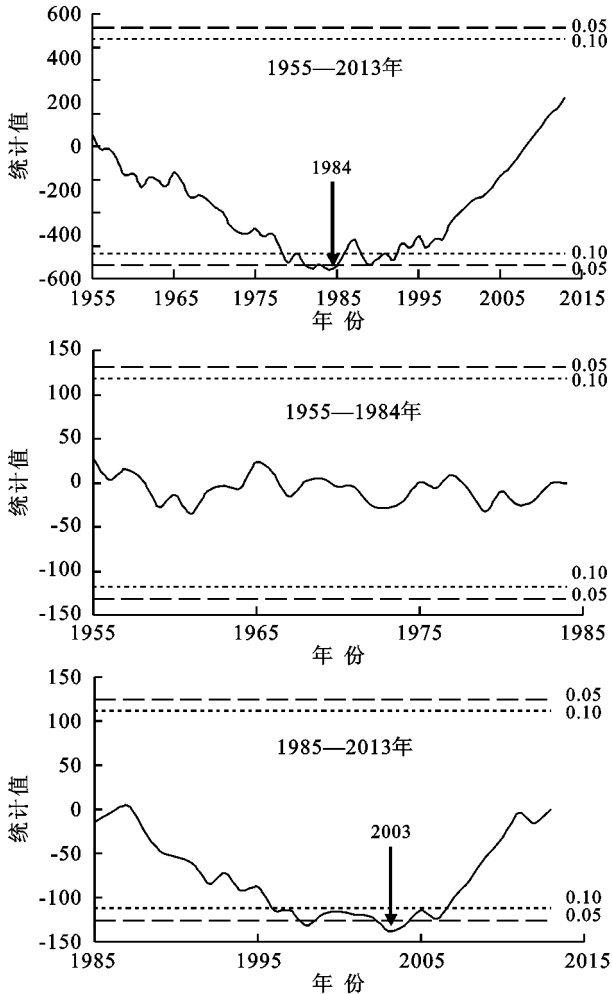
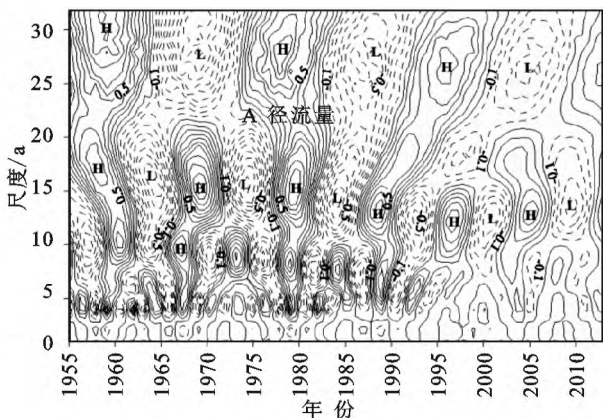


图 3 皇甫川流域输沙量 Pettitt 检验
在 22~32 a 尺度上,出现了丰—枯交替的准 3



次震荡,尺度中心在整个时段上约是以 29 a 为中心的周期变化,对应着径流小波方差第一峰值 29 a 时间尺度,是径流变化的第一主周期。在 13~21 a 尺度上,出现了丰—枯交替的准 6 次震荡,尺度中心在整个时段上是约以 15 a 为中心的周期变化,第二峰值 15 a 时间尺度对应着第二主周期。在 7~12 a 尺度上,出现了枯—丰交替的准 8 次震荡,仅在 90 年代中期前表现为约以 9 a 为尺度中心的周期变化,第四峰值 9 a 时间尺度对应着第四主周期。在 3~6 a 尺度上,仅在 80 年代中期前表现为约以 4 a 为尺度中心的周期变化,第三峰值 4 a 时间尺度对应着第三主周期。

根据径流小波方差检验的结果,绘制了径流第一主周期趋势图(图 6A)。在第一主周期 29 a 尺度上,年径流变化的平均周期为 10.5 a 左右,在 1955—1964 年、1974—1983 年和 1993—2001 年处于丰水期,而在 1965—1973 年、1984—1992 年和 2002—2010 年处于枯水期。

输沙演变过程中也存在着 23~32,13~22,7~12,3~6 a 共 4 个尺度的周期变化(图 4B)。其中,具有全域性的 23~32 a 和 13~22 a 时间尺度,分别出现了丰—枯交替的准 3 次和准 5 次震荡,尺度中心在整个时段上分别是约以 28 a 和 16 a 为中心的周期变化,依次对应着第四和第一主周期(图 5B)。具有局部性的 7~12 a 和 3~6 a 尺度,分别仅在 90 年代中期前和 80 年代中期前是约以 10 a 和 4 a 为中心的周期变化,依次对应着第三和第二主周期。图 6B 中第一主周期 16 a 尺度上,年输沙变化的平均周期约为 6.5 a 左右,在 1955—1961 年、1967—1972 年、1978—1982 年、1988—1992 年和 1999—2006 年处于多沙期,而在 1962—1966 年、1973—1977 年、1983—1987 年、1993—1998 年和 2007—2012 年处于少沙期。

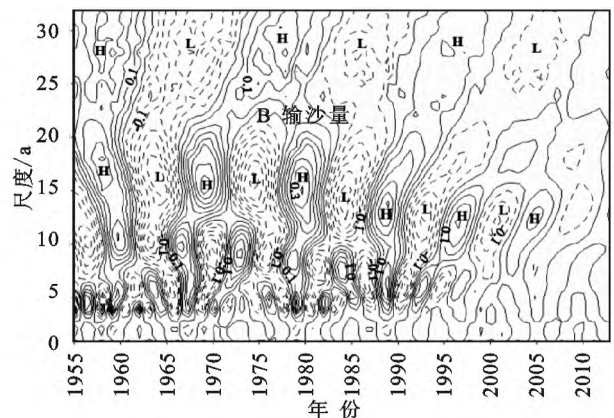


图 4 皇甫川流域 1955—2013 年水沙小波系数实部等值线

总体而言,上述 4 个尺度的周期波动控制着流域水沙在整个时间域内的变化特征。前两个尺度的周期变化在整个分析时段表现非常稳定,具有全域性,后两个

尺度的周期变化在 80,90 年代中期前局部稳定。通过分析皇甫川流域水沙第一主周期趋势图,可知在径流量和输沙量整体减少的趋势下,2011—2020 年径流量将处于

相对偏丰阶段,输沙量在 2013—2018 年将处于相对偏多沙时期。随着时间的推移,水沙小波系数波动振幅减小,

径流量和输沙量周期变化趋于不明显,说明今后一段时期内水沙进一步减少的趋势仍将继续。

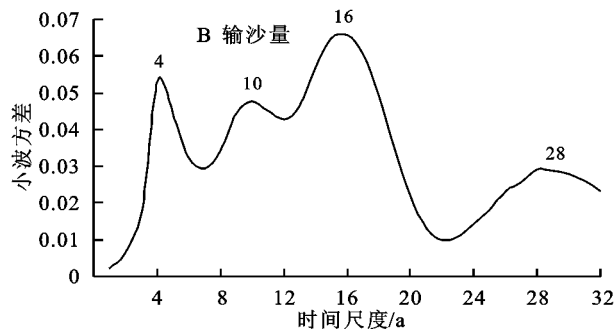
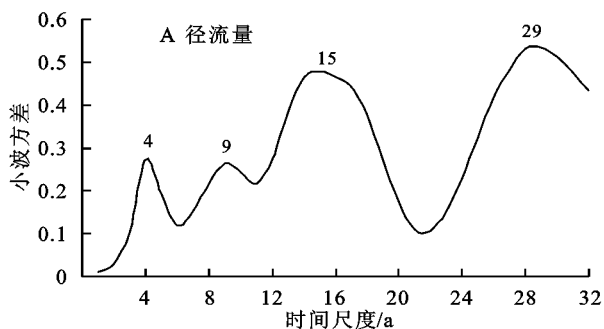


图 5 皇甫川流域 1955—2013 年水沙小波方差

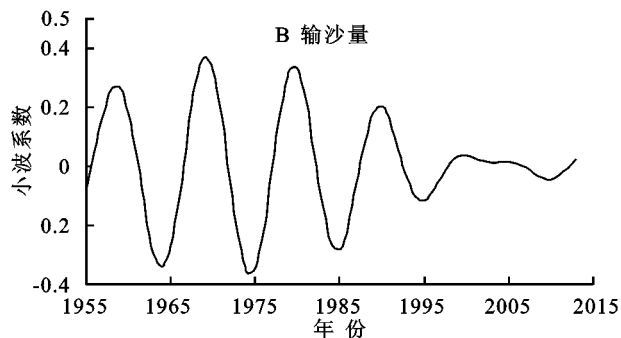
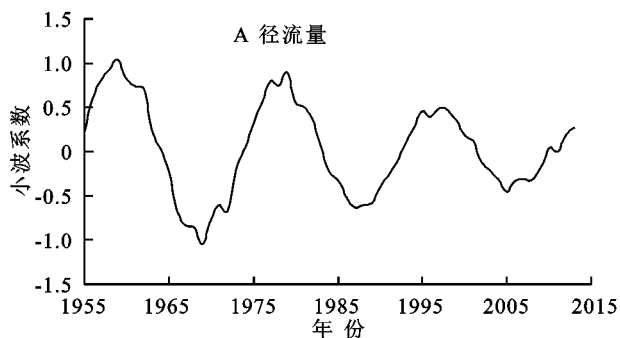


图 6 皇甫川流域 1955—2013 年水沙第一主周期趋势

4 讨论

4.1 气候变化对皇甫川水沙变化的影响

皇甫川流域地处温带半干旱区,生态环境脆弱,对气候变化十分敏感。研究表明皇甫川流域年降雨有下降趋势,但下降趋势不明显,而年均气温显著上升,近 40 a 来升高了 0.4°C ,是影响径流量减少的主要气候因子^[13,18-19]。可见,皇甫川流域气候的暖干化趋势明显,这将对流域水沙的演变趋势产生重要影响。赵广举等^[5]的研究表明,皇甫川降水量变化对径流量的贡献率为 25.8%,对输沙量的贡献率为 32.3%;类似的,王随继等^[20]的研究明确了降水量变化对皇甫川径流减少的相对贡献率在 1980—1997 年为 36.43%,在 1998—2008 年为 16.81%。另外,其他一些相关研究应用水文法计算了不同年代降雨量减少对水沙变化的影响。其中,王金花等^[8]的研究表明皇甫川流域降雨量变化占减沙量的比例在 1970—1979 年、1980—1989 年、1990—1996 年和 1997—2006 年分别为 33.3%、85.8%、4.3%和 44.1%。而王正文等^[21]的研究分析了降雨量变化对径流量和输沙量的影响,减水减沙比在 80 年代和 90 年代分别为:51.6%、31.0%和 40.7%、46.0%。以上各研究表明皇甫川流域气候的暖干化是水沙减少的重要原因。

4.2 人类活动对皇甫川水沙变化的影响

皇甫川是黄河中游的一条多沙粗沙支流,20 世

纪 50 年代治理初期,流域仅建成淤地坝 3 座,淤积库容 83 万 m^3 ;70 年代后被列为重点治理流域之一,建成淤地坝 80 座,淤积库容 3 102 万 m^3 ,坝地发展较快(表 3);1983 年被列入全国八片水土保持重点治理区之一,开展综合治理^[9],第一期工程治理重点小流域 46 条,林草面积快速增加,流域的水土保持综合治理是水沙一级突变点产生的主要影响因素之一,也是 3~6 a 尺度周期变化在 80 年代中期前表现稳定的重要原因。第二期工程于 1993 年开始实施,重点治理了 32 条小流域,各类水保措施面积平稳增加,至 1997 年底流域治理度已达 28.2%^[22],二期治理导致了流域径流的二级突变,使得 7~12 a 尺度周期变化在 90 年代中期前表现稳定;随着 2003 年淤地坝作为水利“亮点”工程,加之前期二期工程治理的显著成效,两者共同作用下引起了流域输沙二级突变的发生。表 3 为 2009 年淤地坝安全大检查皇甫川流域淤地坝建设发展的基本情况,截至 2008 年底,皇甫川流域共建淤地坝 507 座,总库容 4.38 亿 m^3 ,淤积库容 1.44 亿 m^3 。王向东等^[23]的研究表明,皇甫川长滩流域及皇甫区间进入 70 年代以来,水土保持工程起了较高的减水减沙作用。从 1987—2011 年,皇甫川流域土地利用变化剧烈,土地利用类型以草地和灌丛为主,建设用地、林地面积逐渐增加,水体面积逐渐减少^[24]。自 80 年代以来,皇甫川流域淤地坝建设的快速发展以及林灌草措施的大力跟进,这些都在很大程

度上改变着流域的水沙状况。王随继等^[20]的研究表明人类活动对皇甫川流域径流量减少的相对贡献率在 1980—1997 年和 1998—2008 年分别为 63.57%，83.19%。同样的，赵广举等^[5]的研究则分析了皇甫川流域人类活动对径流量和输沙量减少的贡献率分别为 74.2%，67.7%。以上研究均表明人类活动已经成为皇甫川流域径流量和输沙量减少的主要原因。

表 3 皇甫川流域不同时期淤地坝的建设与发展

时期	总数	总库容/ 10 ⁸ m ³	淤积库容/ 10 ⁸ m ³	剩余库容/ 10 ⁸ m ³	剩余库容比例/%
50 年代	3	0.010	0.008	0.002	15.3
60 年代	23	0.129	0.088	0.041	31.7
70 年代	80	0.506	0.310	0.196	38.7
80 年代	58	0.588	0.383	0.205	34.9
90 年代	79	1.011	0.471	0.540	53.5
2000—2008 年	264	2.133	0.175	1.958	91.8
合计	507	4.377	1.435	2.942	67.2

5 结论

(1) 在 99% 显著性水平下，皇甫川流域的年径流量 ($Z = -5.01$) 和年输沙量 ($Z = -4.55$) 均呈显著减少趋势，且径流量的减少大于输沙量的减少。

(2) 皇甫川 1955—2013 年径流和输沙变差系数和极值比分别为 0.82, 1.03, 120.11, 295.85, 表明皇甫川流域径流和输沙年际变化较大。

(3) 皇甫川流域径流、输沙序列一级突变点均发生在 1984 年，而二级突变点有所不同，分别是 1998 年和 2003 年。

(4) 径流、输沙演化过程中均存在 4 个尺度的周期变化，分别为 22~32, 13~21, 7~12, 3~6 a 和 23~32, 13~22, 7~12, 3~6 a。径流和输沙第一主周期分别为 29 a 和 16 a 时间尺度；年径流和输沙变化的平均周期分别为 10.5 a 和 6.5 a 左右；在径流量和输沙量整体减少的趋势下，2011—2020 年径流量将处于相对偏丰阶段，而输沙量在 2013—2018 年将处于相对偏多沙时期。

(5) 皇甫川流域径流量和输沙量的减少是气候的暖干化和渐强的人类活动综合作用的结果，而大规模的水土保持措施是水沙减少的重要影响因素。

参考文献：

[1] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.
 [2] 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.
 [3] 冉大川, 高健翎, 赵安成, 等. 皇甫川流域水沙特性分析及其治理对策[J]. 水利学报, 2003(2): 122-128.

[4] 王小军, 蔡焕杰, 张鑫, 等. 皇甫川流域水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 222-226.
 [5] 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[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1-8.
 [6] 张平仓, 刘玉民, 张仲子. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J]. 水土保持通报, 1992, 12(2): 15-24.
 [7] 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 等. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1947-1956.
 [8] 王金花, 张胜利, 孙维营, 等. 皇甫川流域近期水土保持措施减沙效益分析[J]. 中国水土保持, 2011(3): 57-60.
 [9] 朱岐武, 樊万辉, 茹玉英, 等. 皇甫川流域水土保持措施减水减沙分析[J]. 人民黄河, 2003, 25(9): 26-27.
 [10] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价[J]. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653.
 [11] 张程, 李晓兵, 张立, 等. 皇甫川流域土地利用/覆盖变化对生态服务价值的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 399-403.
 [12] 赵梅, 刘玉斗, 崔殿河. 皇甫川流域水文情况分析[J]. 东北水利水电, 2015, 33(5): 41-42.
 [13] 高清竹, 江源, 李立业. 黄河中游砒砂岩地区皇甫川流域气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 116-121.
 [14] 李世全, 杨建虎, 李小冰. 皇甫川流域径流变化规律研究[J]. 地下水, 2012, 34(4): 103-105.
 [15] 金争平, 史培军, 侯福昌. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
 [16] 叶浩, 石建省, 侯宏冰, 等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 402-405.
 [17] Miao C Y, Ni J R. Variation of natural streamflow since 1470 in the Middle Yellow River, China[J]. International journal of environmental research and public health, 2009, 6(11): 2849-2864.
 [18] 邵广文, 管仪庆, 管章岑, 等. 皇甫川径流变化趋势及成因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 53-56.
 [19] 孙特生, 李波, 张新时. 皇甫川流域气候变化特征及其生态效应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 1-7.
 [20] 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[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.
 [21] 王正文, 韩学士, 赵昕, 等. 皇甫川流域水沙变化原因分析[J]. 中国水土保持, 2000(5): 21-22.
 [22] 慕星, 张晓明. 皇甫川流域水沙变化及驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 933-939.
 [23] 王向东, 谢树南, 陈海迟. 皇甫川流域产流产沙数学模型及水沙变化原因分析[J]. 泥沙研究, 1999(5): 56-66.
 [24] 许吉仁, 董霁红, 杨宏兵. 近 25 年来中国典型温带草原系统土地覆被变化及 NPP 响应: 以皇甫川流域为例[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 118-125.