

泾河流域高含沙水流的尺度效应研究

颜明, 贺莉, 郑明国, 孙莉英, 裴亮, 王随继

(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)

摘要: 基于泾河流域 1965—2014 年 5—9 月的逐日降雨量、逐日径流量和逐日含沙量数据, 选取日含沙量 $\geq 100 \text{ kg/m}^3$ 作为高含沙水流, 分析了泾河高含沙水流的空间特征及其变化, 并参考降雨量探讨变化成因。结果表明, 研究期内泾河流域的高含沙水流变化可以分为 3 个阶段: 1965—1978 年为多发期, 1979—1990 年为略微减少期, 2006—2014 年为显著减少期。将泾河流域分为南北两个分支, 高含沙水流具有明显的尺度效应, 北支的产沙模数随流域面积增加而减少, 产流模数随流域面积增加而增加, 南支的产沙模数随流域面积增加而增加, 产流模数也随流域面积增加而增加。南北两个分支的产流模数和产沙模数在 3 个阶段经历了相似的变化, 先是 1979—1990 年略微减少, 之后在 2006—2014 年显著减少, 使最初的复杂尺度效应转变为后期简单的线性尺度效应。分析结果说明泾河流域内部各区域在水土保持措施长期实施下高含沙水流均得到有效控制。

关键词: 泾河流域; 高含沙水流; 尺度效应

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0075-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.013

Scale Effect of Hyper-concentrated Flows in Jinghe River Basin, Yellow River

YAN Ming, HE Li, ZHENG Mingguo, SUN Liying, PEI Liang, WANG Suiji

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Based on the data measured in the Jinghe River Basin (JRB) between 1965 and 2014 (including daily precipitation, runoff and concentration), the spatio-temporall characteristics of hyper-concentrated flow were analyzed. Flows with daily concentration greater than 100 kg/m^3 were identified as hyper-concentrated flows. Analysis showed that, the occurrences of hyper-concentrated flows in the JRB can be grouped into three periods, which were 1965—1978, 1979—1990 and 2006—2014. Hyper-concentrated flows occurred frequently before 1978, and the occurrence decreased dramatically after 2006. Moreover, the JRB is divided into two parts, the north and the south part, where the temporal distributions of hyper-concentrated flows had different characteristics. For the north part, the sediment yield modus decreased with the increasing drainage area, while the runoff modus increased with increasing drainage area. For the south part, the modus of the runoff and sediment yield both might increase with the increasing drainage area. The temporal characteristics of hyper-concentrated flow were the same in the south and north part, JRB. So, the complex effect sizes during the first period changed to linear relation gradually. Analysis indicates that hyper-concentrated flows are effectively controlled by water and soil conservation practices in the JRB.

Keywords: Jinghe River basin; hyper-concentrated flow; scale effect size

高含沙水流是黄土高原地区普遍存在的危害巨大的高强度集中性侵蚀现象^[1-2], 作为一种强大的侵蚀和搬运营力, 造成了黄土高原大面积严重的水土流失^[3]。近 40 年来, 许多研究者对高含沙水流的物理力学特性、侵蚀特性、输沙特性和造床特性进行了深入的研究, 并从自然地理因素的角度解释了黄土高原

高含沙水流的成因^[4]。随着黄河中游水土保持工作的开展, 对黄河中游多沙粗沙区的地表状况进行了全面的改造, 有效地减少了水沙的入河量, 特别是在减少高含沙水流方面起到了重要作用^[5-6], 因此, 减水减沙的效应和发生机制成为目前研究的热点^[7-8]。泾河流域属于黄河中游高强度侵蚀产沙区, 因为其上游的

马莲河为多沙粗沙区,高含沙水流侵蚀事件频发,随着上世纪 70 年代水土保持措施在该流域的广泛开展,流域内的水土流失问题得到了一定程度地缓解^[9]。目前的研究多围绕整个黄河中游或单个支流的水沙减少情况开展,对流域内部的水沙变化研究还不多,高含沙水流方面的报道也不多见,对其的变化情况和成因有待深入分析。水沙的尺度效应是研究流域内径流和泥沙的变化在空间上是否存在差异的有效工具,这里所指的尺度是指从流域上游至流域出口,水沙随集水面积不断扩大产生的空间效应。已经有一些研究者在径流和泥沙的研究中使用该工具进行空间变异分析^[10-12],对于黄土高原水沙的尺度效应有了基本认识^[13],前人也利用尺度效应分析了泾河流域的径流和泥沙随时间和空间的变化,掌握了该流域水沙时空变化的基本特征^[14],在这些工作的基础上,将尺度效应用于高含沙水流的研究,有助于剖析高含沙水流在流域内的沿程变化,以及随时间变化在空间上呈现的差异,揭示其成因和机制。

综上所述,本研究将利用长期积累的泾河流域的日尺度的水沙数据进行高含沙水流的尺度效应分析,首先通过累积曲线和累积距平百分率两种方法对张家山站的水沙数据进行时间分析,获取高含沙水流水沙随时间变化的信息,根据水沙的转折变化分为不同的时期;然后分析泾河流域高含沙水流尺度效应的基本特征,以及不同时期径流和泥沙的尺度效应的变化;最后参照降雨量和水土保持措施的基本情况分析气候变化和人类活动对泾河流域高含沙水流尺度效应的影响。

1 研究区概况

泾河流域是黄河中游渭河上的一条重要支流,发源于宁夏泾源县尾巴梁东南六盘山东麓^[15],全长 455 km,流域面积 45 421 km²,本研究以张家山水文站为把口水文站,控制面积为 43 216 km²(图 1)。泾河流域地形总体特征为西北高东南低,北部为贺兰山、鄂尔多斯高原,南为秦岭山脉,西为六盘山脉,东为子午岭山系,三面环山,仅出口朝向东南的冲洪积平原。地貌为黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区、土石丘陵区、黄土丘陵林区和黄土阶地区 5 种地貌类型^[9],前两种类型占地面积最大,面积分别为 18 775 km² 和 18 053 km²,分别占研究区总面积的 43.45% 和 41.77%。泾河流域属大陆性季风气候,雨量 and 气温由东南向西北逐渐递减,水系多年年均降水量 506.8 mm,年平均气温 10℃ 左右,加上地形的影响,南侧为山地,降雨量高于北部。泾河北侧有三水河、马莲河、蒲河、茹河、洪河等支流,南侧有汭河、黑河、

达溪河等支流。泾河流域水土流失面积 33 220 km²,占全流域的 73.1%,为黄土高原严重水土流失区和黄河粗泥沙主要来源区。泾河多年平均径流量 16.4×10^8 m³,输沙量 2.22×10^8 t,径流量、输沙量主要集中在汛期 7—10 月份,分别占年径流量、输沙量的 62.5%, 91.1%^[11]。泾河流域汛期常发生高含沙水流,张家山站发生 >400 kg/m³ 高含沙水流的频率超过 17 天/年。植被整体上为温带森林草原过渡类型,但气候的地域分异导致了植被格局的空间递变,从黄土区山地、残塬沟壑区到黄土丘陵沟壑区依次出现了森林、灌丛和草地。



图 1 研究区概况

1.1 数据来源及研究方法

本研究数据主要来源于黄河水利委员会积累的水利年鉴,收集的资料主要是 5—9 月泾河流域 18 个水文站实测的逐日含沙量和逐日径流量以及 250 个雨量站监测的逐日降雨量,时间段为 1965—2014 年,缺失 1991—2005 年(图 1)。目前在高含沙水流的含沙量上尚无确定的标准值,在河流地貌研究中多采用超过 300 kg/m³ 或 400 kg/m³ 作为高含沙水流^[1-2,4],而万兆惠等^[16]的研究表明当含沙量大约为 150~200 kg/m³ 时开始显现高含沙水流状态;邓安军等^[17]研究表明在含沙量大于 100 kg/m³ 后出现某些高含沙水流的性质,从泾河流域产出的泥沙量来看,大部分泥沙都是由含沙量高于 100 kg/m³ 的水流输出的。因此,本研究以日均含沙量 ≥ 100 kg/m³ 作为泾河流域高含沙水流的标准值。保留 5—9 月日含沙量 ≥ 100 kg/m³ 的值,并与相应日期的径流量相乘,得到某日的高含沙水流输沙量,加和 5—9 月所有的高含沙水流输沙量得到某年洪水期时的总输沙量,加和高含沙水流时的径流量得到年高含沙水流径流量,降雨

量的值取5—9月所有日降雨量的和值。

对比分析近几十年泾河高含沙水流的变化,分别对张家山站每年发生高含沙水流的径流量和输沙量进行统计,通过累积曲线和累积距平百分率两种方法来判断张家山站1965—2014年期间高含沙水流随时间的变化,确定时间上的转折点。

泾河流域有很明显的水沙异源特性,马莲河上游西川流域富集了大量的沙黄土,成为多沙粗沙区的一个重要组成部分,多年平均侵蚀模数 $7\,958\text{ t/km}^2$,而流域南侧的支流上游产沙量较少,尤其是泾川站以上,形成北部支流沙多水少,南部支流水多沙少的格局。根据水沙异源特征,将泾河流域分为南北两支,北支从马莲河上游东川到张家山站,南支从泾河源到张家山站,两个分支共同拥有景村—张家山之间的集水区。在体现尺度效应时,分别将南北两分支的高含沙水流的径流量和输沙量从上游向下游累积,除以控制站的面积,得到沿程控制站的径流模数和输沙模数,将径流模数和输沙模数分别在图上点绘出来,寻找最优分布曲线,用于解释水沙沿程的分布特征,揭示其形成机理。并将降雨量数据也按同样方法进行

处理,分析降雨量的尺度效应以及降雨变化对高含沙水流的影响。

2 结果与分析

2.1 1965—2014年高含沙水流随时间的变化

以泾河流域张家山站每年发生高含沙水流的产流模数和产沙模数作为衡量流域高含沙水流变化的控制站,利用累积曲线和累积距平百分率两种方法来判断1965—2014年水沙的变化情况。水沙变化存在两个明显的时间点,一个是1978年,另一个是1990年(图2)。

通过对累积曲线不同阶段的产流模数和产沙模数进行拟合,拟合形式都为线性,曲线斜率都是阶段性减小的,尤其是2006年以后的斜率值减少得尤为明显。产流模数和产沙模数的累积距平百分率几乎重合,在1978年以前,百分率不断的上升,1979—1990基本维持在一个水平线上,从2006年开始,呈连续下降形态。这基本呈现了研究期内高含沙水流年内水沙产出的变化情况:1978年以前产流和产沙都较多,1979—1990年产出的水沙略有减少,2006年以后水沙明显减少。

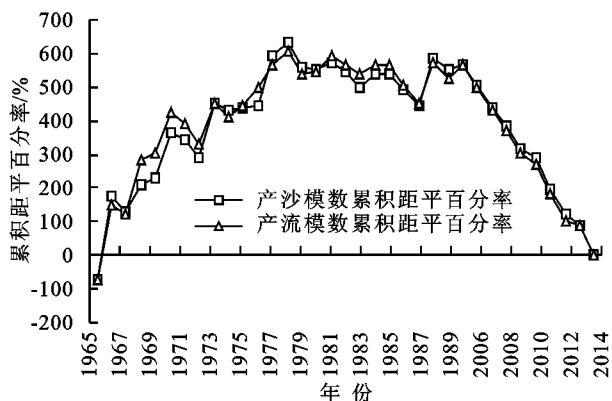
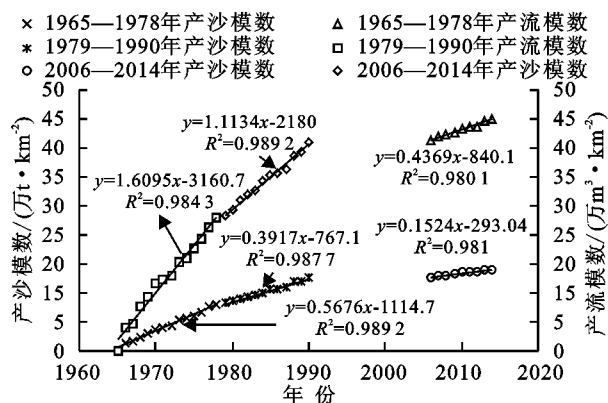


图2 张家山站高含沙水流的累积曲线和累积距平百分率

2.2 高含沙水流尺度效应的特征分析

由于后期水沙都有不同程度的减少,削弱了尺度效应的表现,因此,这里仅用第一个阶段(1965—1978年)的产流模数和产沙模数来分析泾河流域高含沙水流的尺度效应。北支高含沙水流的产沙模数随面积增大而逐渐减少,从上游的 $14\,000\text{ t/km}^2$ 减少到出口站的 $5\,000\text{ t/km}^2$,而产流模数随面积增加而增多,从上游的不足 $9\,000\text{ m}^3/\text{km}^2$ 增加到下游的 $14\,000\text{ m}^3/\text{km}^2$ (图3北支),两者之间存在反向变化,这是由于北支的上游是多沙粗沙区,极易发生高含沙水流,较少的径流可以产生较多的泥沙,而下游的黄土由粒径更细的风相沉积物构成,具有更高的黏结力,比上游更难侵蚀,下游植被条件也更好,增加了对径流的缓冲和吸收能力,降低了对黄土的侵蚀。

南支高含沙水流的产沙模数随面积增大而增加,表

明从上游到下游的产沙模数是逐渐增加的,这与北支的情形是截然相反的,南支的产流模数与产沙模数在空间上具有相同的变化趋势,也是随面积增大而增加,且表现几乎同步(图3南支)。上游的产流模数小仅表示产生高含沙水流的径流量较少,实际上,南支上游无论是年内还是汛期都是整条河流产流模数最高的区域。导致产沙模数数值较小的原因是上游为裸石山区,缺乏可侵蚀物质,使得发生高含沙水流的机会降低,即使发生,输沙强度也较小,随着黄土富集量向下游增加,发生高含沙水流的频率和侵蚀泥沙量也随之增加,因此,表现出产流模数和产沙模数都随面积增大而增加的情形。

2.3 1965—2014年高含沙水流尺度效应的转变

根据张家山站高含沙水流在1965—2014年的阶段划分,对整个流域的水文站水沙资料按这3个阶段进行划分,并取每个时期的平均值,计算出南北分支

高含沙水流不同阶段的均值,点绘于图中,分析南北

两分支高含沙水流的尺度效应的变化情况。

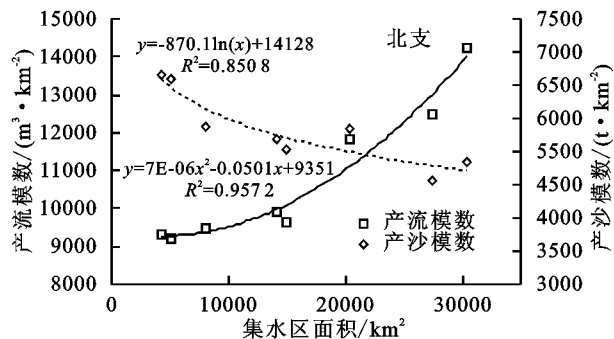
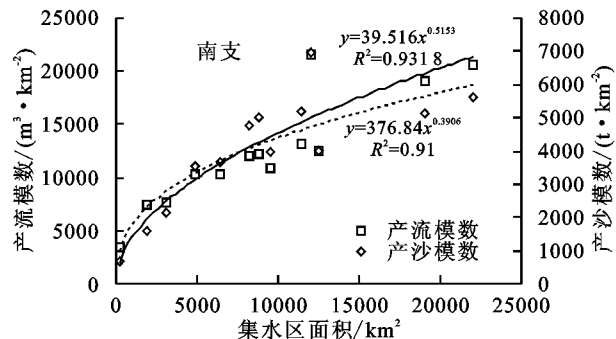


图 3 泾河流域南北分支 1965—1978 年高含沙水流尺度效应

2.3.1 北支高含沙水流的尺度效应随时间的变化

1965—2014 年,泾河流域高含沙水流发生了明显变化,分为三个阶段:第一阶段为 1965—1978 年,整个北支的高含沙水流产沙量都较高,产沙模数随面积增加而减少;第二个阶段为 1979—1990 年,在空间变化趋势上与第一阶段相同,产沙模数也是随面积增加而减少,但出现了一些变化,庆阳水文站以上的产沙模数有明显增加,庆阳至雨落坪之间保持不变,而雨落坪以下明显减少;第三个阶段为 2006—2014 年,变化最为明显,整个北侧分支的高含沙水流比前期明显减少,产沙模数的尺度效应也由前两个阶段的对数关系转变为线性关系,即随面积增加表现为线性减少,从



上游到下游逐渐减少(图 4 产沙模数)。

产生高含沙水流的径流与泥沙的阶段性变化基本相似(图 4 产流模数),在第一阶段,整个流域产流模数都较高,产流模数随面积增加而增加,函数关系式为二次多项式;第二阶段的产流模数随面积基本不发生变化,相比第一阶段,上游略有增加,下游明显减少,第一阶段和第二阶段拟合曲线形成的交叉形态与产沙模数前两个阶段拟合曲线的交叉形态相似;第三阶段的产流模数从上游到下游比前期都明显减少,平均减少约 3 000 m³/km²,虽然拟合关系式为二次多项式,但与线性拟合也非常接近,从上段到下段的变化为先略微增加后略微减少。

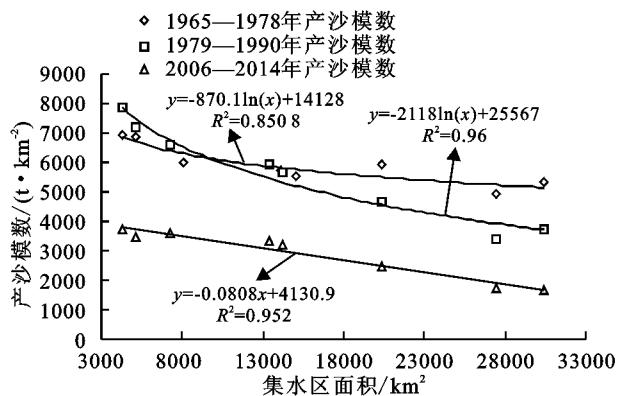
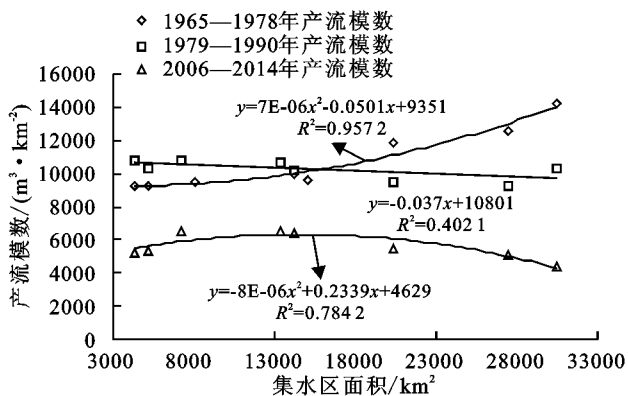


图 4 1965—2014 年北支高含沙水流的阶段性变化

2.3.2 南支高含沙水流的尺度效应随时间的变化

南支高含沙水流的产沙模数在 1965—2014 年期间具有显著变化,1965—1978 年的产沙模数随面积增加是逐渐增加的,拟合关系式为指数函数;而 1979—1990 年的最优拟合转变为二次多项式,这个转变是由于杨家坪水文站以下区域的产沙模数显著减少引起的;2006—2014 年的产沙模数降低得尤为明显,拟合关系已经转变为线性关系,也就是从上游向下游逐渐减少(图 5 产沙模数)。产流模数的变化与产沙模数极其相似,拟合关系式也是从指数函数转变为二次多项式,最终变为线性关系式(图 5 产流模数)。水沙的减少都开始于 1979—1990 年这个时期,首先发生在雨落坪和杨家坪水文站以下的区域,然后在



2006—2014 年,水沙的减少向雨落坪和杨家坪水文站以上的区域发展,最终使得全流域的高含沙水流显著减少。

2.4 气候变化和人类活动对泾河流域高含沙水流的影响

从 1970 年开始,黄河中游进行了大规模的水土保持工作,取得的成果也有众多报到,而对于水土保持工作对高含沙水流在流域上的整体表现上的研究工作还不多,这里借助降雨量的变化来探讨气候变化和人类活动对泾河流域高含沙水流的影响。虽然缺乏大范围的泾河流域水土保持措施实施的统计数据,但泾河流域内有大量的降雨量测站,本研究统计了 1965—2014 年 5—9 月份流域内 250 个雨量站的降

雨量,以此代表夏季雨水丰沛期的侵蚀能量。南北两分支的降雨量随面积的增加表现出相反的趋势,南支的降雨量随面积增加而减少,北支的降雨量随面积增加而增加。从阶段性变化来看,北支降雨量前两个阶

段非常接近,2006—2014年的降雨量有明显增加。对比南支3个阶段的降雨量变化,数据点十分接近,不具有明显差别,仅在2006—2014年,上段和下段的降雨量略高于前期(图6)。

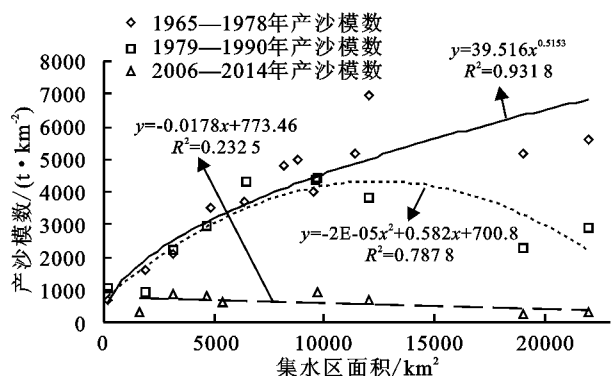
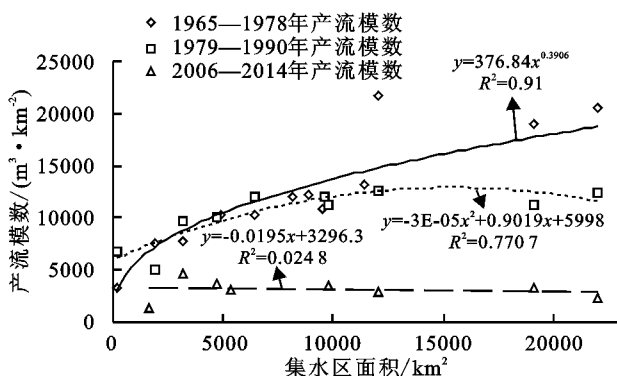


图5 1965—2014年南支高含沙水流的阶段性变化

从降雨量及前人研究^[18]判断,降雨量的变化幅度有限,其对高含沙水流的影响不大,尤其是对于几乎看不出明显变化的北侧分支的降雨量,那么,在降雨量变化不大的情况下,使得水沙明显减少的原因是长期、广泛开展水土保持措施,尤其是近年开展的重点区水土保持工程,取得的效果尤为显著^[19]。前两个时期(1965—1979年和1979—1990年)的降雨量非常接近,不存在明显的差异,但水沙已经表现出减少趋势,与1965—1979年的高含沙水流相比,1979—1990年发生高含沙水流的产沙模数由5 776.37 t/km²减少为3 755.56 t/km²,减少了35%,产流模数由16 333.69 m³/km²减少为11 022.68 m³/km²,减少了32.5%,这个时期水沙的减少主要发生在下游,也就是雨落坪和杨家坪水文站以下的区域,雨落坪和杨家坪水文站至张家山水文站之间的年均输沙模数从1968—1978年的2 863.41 t/km²减少到649.5 t/km²,径流模数由15 554.91 m³/km²减少到8 045.4 m³/km²,分别减少了77%和48%。而2006—2014年5—9月年均降雨量不但没有减少,反而略有增加,在此期间,下游的水沙进一步减少,产沙模数减少到128.46 t/km²,径流模数减少到2 802.23 m³/km²,上游的水沙也有明显的减少,雨落坪和杨家坪以上区域,1965—1978年期间的产沙模数和产流模数分别为6 902.04 t/km²和16 634.64 m³/km²,2006—2014年的多年平均值减少为2 012.72 t/km²和4 734.85 m³/km²,分别减少了71%和72%。降雨量增加的同时,侵蚀量并没有增加,这主要得益于水土保持措施在全流域的广泛开展,但也可能存在年内多雨期降雨量增加改善了局部气候,促进了多雨期植被的生长,增加了地表对降雨和径流的缓冲、拦截能力,但这种效应是否存在以及具有多大效力,还有待利用



进一步的数据来证明。

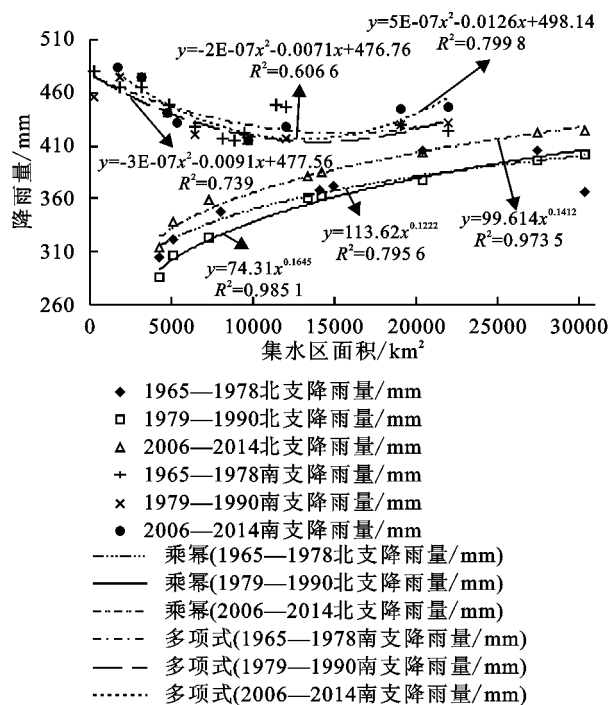


图6 1965—2014年5—9月泾河流域南北两分支3个阶段的降雨量变化

3 结论

通过对泾河流域1965—2014年高含沙水流尺度效应的分析,发现泾河流域的高含沙水流具有明显的尺度效应,南北两分支的产沙模数具有相反的空间变化特征,北支的产沙模数随面积增加逐渐减少,南支的产沙模数随面积增加而增加,产生高含沙水流的产流模数的变化与产沙模数的空间变化具有相反的空间特性,北支的产流模数随面积增加而增加,南支的产流模数随面积增加而减少,出现这种现象主要是由降雨和黄土的空间分布差异引起的。南北两分支的高含沙水流的变化分为3个阶段:1965—1978年,1979—1990年和

2006—2014 年。流域的高含沙水流经历了第二阶段的略微减少到第三阶段的显著减少,第二个阶段是局部减少,第三个阶段出现整体性的减少。高含沙水流的减少并不是由降雨量减少引起的,其发生的根本原因是水土保持措施大大降低了高含沙水流的频率和强度,使得整个泾河流域高含沙水流减少。

参考文献:

- [1] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面—沟道系统中的高含沙水流(I):地貌因素与重力侵蚀的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 12(1): 55-60.
- [2] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面—沟道系统中的高含沙水流(II):泥沙存储—释放及降雨、径流特征的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 25-31.
- [3] 郑委, 郭庆超, 陆琴. 高含沙水流基本理论综述[J]. 泥沙研究, 2011(2): 75-80.
- [4] 许炯心. 风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2005, 35(9): 103-110.
- [5] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土高原水土保持建设的环境效应[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 29-32.
- [6] 姚文艺, 茹玉英, 康玲玲. 水土保持措施不同配置体系的滞洪减沙效应[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 28-31.
- [7] 楚纯洁, 李亚丽. 近 60 年黄河干流水沙变化及其驱动因素[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 41-47.
- [8] 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.
- [9] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J]. 人民黄河, 2001(2): 6-8.
- [10] 王飞, 李锐, 杨勤科, 等. 水土流失研究中尺度效应及其机理分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 167-169.
- [11] 丁婧祎, 赵文武, 王军, 等. 降水和植被变化对径流影响的尺度效应:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 1039-1051.
- [12] 闫云霞, 王随继, 颜明, 等. 海河流域产沙模数尺度效应的空间分异[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 57-64.
- [13] 闫云霞, 许炯心. 黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2006, 36(8): 767-776.
- [14] 颜明, 郑明国, 舒畅, 等. 泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 184-188.
- [15] 陈晨, 罗军刚, 解建仓, 等. 泾河流域近 80a 径流变化趋势及特征分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 26-28.
- [16] 万兆惠, 宋天成. 细颗粒含量对粗颗粒含沙量分布及挟沙能力的影响[J]. 水利学报, 1987, 18(8): 20-31.
- [17] 邓安军, 郭庆超, 陈建国. 挟沙水流综合糙率系数的研究[J]. 泥沙研究, 2007(5): 24-29.
- [18] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近 50 年泾河流域降雨—径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165-171.
- [19] 王鸿斌, 刘斌, 张志萍, 等. 黄河水土保持生态工程蓄水减沙作用分析:以泾河流域砚瓦川项目区为例[J]. 中国水土保持, 2014(11): 16-18.
- (上接第 68 页)
- [7] 付秋萍, 王全九, 樊军. 盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 56-62.
- [8] 付秋萍, 王全九, 樊军. Philip 公式确定吸渗率时间尺度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 65-70.
- [9] Wooding R A. Steady infiltration from a circular shallow circular pond[J]. Water Resources Research, 1968, 4(6): 1259-1273.
- [10] Hu W, Shao M A, Wang Q J, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 355-366.
- [11] 余冬立, 刘营营, 俞双恩, 等. 不同土地利用方式下土壤水力性质对比研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 175-179.
- [12] Watson K, Luxmoore R. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 578-582.
- [13] 刘芳芳, 王伟, 雷廷武. 点源入流测量条件下水质对盐碱土入渗性能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 179-184.
- [14] 李莎, 何新林, 王振华, 等. 入渗水矿化度对点源滴灌土壤水盐运移特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 79-81.
- [15] Zhou X, Lin H S, White E A. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes[J]. Catena, 2008, 73(2): 180-188.
- [16] 樊军, 邵明安, 王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 114-119.
- [17] 史晓楠, 王全九, 苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 516-520.
- [18] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮空间变异性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 89-96.
- [19] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 壤土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 50-58.
- [20] 吉恒莹, 邵明安, 贾小旭. 水质对层状土壤入渗过程影响的实验研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 183-188.
- [21] 马东豪, 王全九, 苏莹, 等. 微咸水入渗土壤水盐运移特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 62-66.
- [22] 吴忠东, 王全九. 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 53-58.
- [23] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 105-111.