

近 60 年来汾河上游汛期悬移质输沙量变化及驱动力分析

张 鸾¹, 郭 伟¹, 苏常红¹, 潘玉娟²

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 北京水保生态工程咨询有限公司, 北京 100055)

摘要: 利用汾河上游出口控制站兰村水文站 1954—2013 年汛期降雨、径流和输沙实测资料, 采用线性趋势分析和双累积曲线法分析了汾河上游汛期悬移质输沙变化特征和驱动力对输沙的影响。结果表明, (1) 近 60 年来汾河上游汛期悬移质输沙量和径流量下降显著, 且输沙量变化幅度大于径流量。(2) 近 60 年来汾河上游汛期降雨量变化不显著, 但降雨量与径流量($P < 0.01$)、降雨量和输沙量($P < 0.01$)均显著线性相关。(3) 近 60 年来特别是 2000 年以后汾河上游发生洪水特别是较大洪水的次数显著减少。(4) 近 60 年汾河上游悬移质输沙量的变化大致分为 4 个阶段, 1959 年、1981 年和 2002 年是 3 个转折点。1959 年以前主要受降雨和径流的影响; 1959—1981 年, 汾河水库的修建是悬移质输沙量减少的主要驱动力; 1981—2002 年, 降水减少、经济活动和水土保持使得径流量减少, 输沙能力减弱; 2002 年以后, 降雨减少特别是暴雨减少, 经济活动和水土保持使得径流量和输沙量继续减少, 而汾河二库的建设, 则使得兰村站悬移质输沙量变为 0。

关键词: 悬移质输沙量; 径流量; 驱动力; 汾河上游

中图分类号: P333; TV141

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0064-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.011

The Variation of Suspended Sediment Load in Rainy Season and Its Driving Factors in the Upper Fen River Watershed in Recent 60 Years

ZHANG Luan¹, GUO Wei¹, SU Changhong¹, PAN Yujuan²

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006;

2. Soil Conservation And Ecology Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing 100055)

Abstract: Fen River watershed was located in the middle reaches of the Yellow River. The variation of runoff volume and sediment load in this area especially the upper watershed had an indicating significance to the change of water-sand regime of the Yellow River. The Lancun station was the most important hydrological monitoring station on the upper Fen River. Based on runoff, suspended sediment load data observed at Lancun station in rainy season from 1954 to 2013, the characteristics and driving factors of suspended sediment load variation were analyzed by using linear trend analysis. The results showed that the declined trend of sediment and runoff were obvious in recent 60 years. But the changes of them not synchronous which the former's trend was stronger than the latter's. The precipitation showed no trending variation. However, the precipitation and runoff ($P < 0.01$), precipitation and sediment load ($P < 0.01$) showed a significant linear correlation. Floods had a decreased tendency, and this trend was the most evident in the beginning of the 21st century. Using the analysis of double-mass curve, the effect of driving factors on the variation in suspended sediment load had been studied. The double-mass curve showed three breaks (1959, 1981 and 2002) which divided the evolution process of suspended sediment load into four typical periods. The suspended sediment load was mainly affected by rainfall and runoff. Then it decreased significantly after 1959 which might be explained by Fen River reservoir construction. During the period from 1981 to 2002, the runoff and suspended sediment load decreased again. It could be related to the rainless, large-scale mining, urban construction, soil and water conservation measures. The runoff and sediment yield decreased significantly since 2002. In addition to the above reasons, reduction in precipitation especially storm and the second Fen River reservoir trapping sediment were the major cause for sediment reduction in the upper Fen River.

Keywords: suspended sediment load; runoff volume; driving factors; Upper Fen River

气候变化和人类活动影响下的侵蚀产沙和河流
水沙过程的变化,是河流地貌学的重要理论问题^[1]。
近几十年来,在全球变暖的背景下,随着人类活动的
增强,河流输沙过程的响应出现了新的特点^[2-5]。分
析近期输沙过程的变化,对于深入认识气候变化下水
资源开发利用和社会经济活动产生的环境效应,更好
地进行流域管理,有十分重要的意义。河流的悬移质
输沙量及其变化可以有效反映河流输沙过程和产流
特性的变化。已有研究表明,黄河中游多沙粗沙区近
年来输沙量表现出明显的减小趋势^[6-8]。汾河入黄
输沙量也呈明显减少趋势^[9-10],除了与流域暖干化^[11]、
降雨和径流量的减少^[12]有关以外,人为活动的影响,
尤其是水利水保工程措施^[13]的影响更为重要。汾河
上游流域是汾河流域重要的生态屏障,也是山西省会
太原的水源涵养地和供水区,其输沙变化特征及驱动
因素值得深入研究。由于汾河上游流域汛期输沙量
(6—9 月)可以占到全年输沙量的 80% 以上^[9-10],而
且非汛期水沙变化受水库运行方式、人为因素的影响
波动较大,基于此,本文以汾河上游出口控制站兰村
水文站的水文资料为基础,着重研究近 60 年来汛期
悬移质输沙过程对驱动力的响应。

1 研究区概况

汾河发源于宁武县东寨镇雷鸣寺,自北向南流经
静乐、太原、介休、灵石、霍州、临汾、河津等县市,至万
荣县荣河镇注入黄河,全长 710 km,流域面积 39 471
km²。太原兰村以上为上游区,地理坐标 37°40′N—
39°00′N, 111°21′E—113°09′E,此间河道长 217.3
km,流域面积 7 705 km²。从行政区域划分,汾河上
游主要涉及宁武、静乐、岚县、娄烦、古交、阳曲各县市
及太原市尖草坪区。流域属温带大陆性季风气候,属
温带半湿润落叶阔叶林与森林草原褐土景观。主要
支流有洪河、西碾河、东碾河、岚河。流域内地貌根据
地面物质组成及侵蚀特征划分为黄土丘陵沟壑区、土
石山区、河川阶地区 and 峡谷区 4 大类型区。汾河上游
共有 2 座大型水库,汾河水库位于娄烦县境内,于
1961 年投入运行,汾河二库位于太原市北郊,于 2000
年投入运行。早在 20 世纪 50 年代国家水利部门在
汾河上游先后设置了静乐、上静游、汾河水库、寨上和
兰村等水文站点进行水沙状况的连续监测,各站点分
布情况如图所示(图 1)。

2 数据来源和方法

2.1 数据来源

本文选取汾河上游出口控制站——兰村水文站
1954—2013 年 6,7,8,9 月的悬移质输沙量和径流量
实测资料分析汾河上游汛期悬移质输沙量和径流量

变化特征。流域面降雨量由汾河上游流域内分布较
为均匀的 11 个雨量站(岔口、东寨、宁化堡、静乐、汾
河水库、米峪镇、普明、上静游、娑婆、寨上、兰村)6,7,
8,9 月降雨量实测数据经泰森多边形推算得到。下
文提到的输沙量、径流量与降雨量均指汛期悬移质输
沙量、汛期径流量与汛期降雨量。此外还收集了汾河
上游 1961—2010 年实测洪峰 >100 m³/s 和 >300
m³/s 的洪水流量资料。以上资料均来自《中华人民
共和国水文年鉴黄河流域水文资料》。

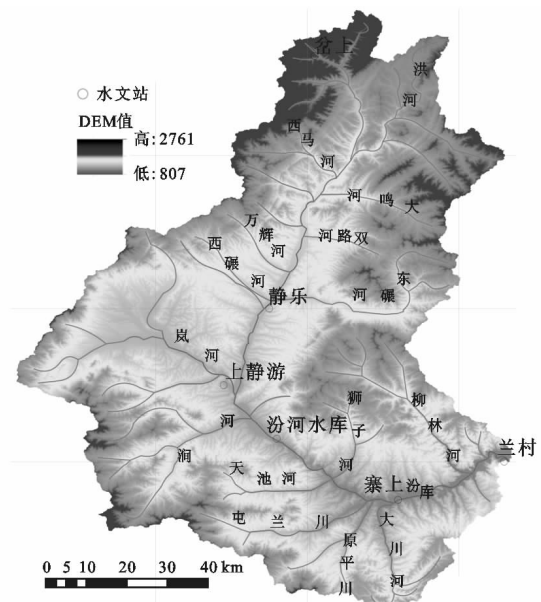


图 1 汾河上游流域范围

2.2 分析方法

采用统计方法检验水文变量是否表现出明显的变
化趋势;采用双累积曲线法分析流域汛期降雨量与径流
量、输沙量时间序列的变化规律,根据其拐点揭示流域
水沙阶段性变化对驱动因素的响应,方法见文献^[1]。

3 结果与分析

3.1 输沙量变化

兰村站不同时期汛期输沙量见表 1。自 20 世纪
50 年代以来,汛期输沙量平均值基本呈下降趋势。20
世纪 50 年代为最高水平,60 年代迅速下降,降幅达
69%;20 世纪 70 年代输沙量进一步下降,降幅为
41%;80 年代,输沙量继续下降,这个时期比上阶段降
幅有所增加,达到 62%;20 世纪 90 年代,输沙量与之
前几次相比下降幅度减小得多,仅为 18%;到 21 世纪
初,输沙量再次出现大幅下降,下降幅度达到 100%。

图 2 点绘了兰村站汛期输沙量随时间的变化,并
给出拟合直线和回归计算得到的相关系数平方 R^2 值,
以反映输沙量变化的大致趋势。如图 2 所示,输沙量
总体呈现波动下降趋势,统计检验发现,显著性概率 P
小于 0.001,说明兰村站近 60 年来汛期输沙量下降趋
势异常显著。另外,兰村站汛期输沙量在 1954 年、

1958 年、1967 年、1977 年、1988 年、1996 年出现峰值。

3.2 驱动力分析

3.2.1 径流量 径流是输沙的动力,对同期径流量进行分析显示,除 20 世纪 90 年代径流量略有回升外,径流量的变化趋势与输沙量基本同步。20 世纪 50 年代汛期径流量最高,60 年代迅速下降,下降幅度达到 34%;20 世纪 70 年代进一步下降,80 年代继续下降,下降幅度达到 47%;20 世纪 90 年代,径流量略

有回升;到 21 世纪初,径流量再次出现大幅下降,下降幅度达到 78%。兰村站汛期输沙量随时间的变化及拟合直线见图 3。从图 3 可以看到,与汛期输沙量的变化趋势类似,汛期径流量总体呈现波动下降趋势,统计检验得到显著性概率 P 小于 0.001,说明近 60 年来兰村站汛期径流量也存在显著减小的趋势。另外,汛期径流量在 1954 年、1959 年、1967 年、1977 年、1988 年、1996 年也出现了峰值。

表 1 兰村站汛期水沙数据统计

年份 (年)	输沙量		径流量		降雨量	
	平均值/ 10^4 t	变异系数/%	平均值/ 10^4 m ³	变异系数/%	平均值/mm	变异系数/%
1954—1959	3 053	75	50.85	54	430	30
1960—1969	939	79	33.36	58	358	38
1970—1979	551	52	18.6	55	353	25
1980—1989	211	109	9.92	50	321	30
1990—1999	172	125	10.6	130	334	34
2000—2009	0	174	2.34	53	373	18
2010—2013	0	200	6.56	70	437	16
均值	606	192	17.46	112	362	29

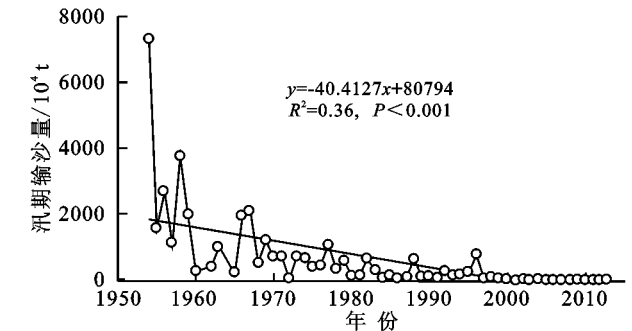


图 2 汛期输沙量随时间的变化

3.2.2 降雨量 以上对兰村站汛期输沙量和径流量的变化趋势进行了讨论。在以降水为主要补给来源的汾河上游流域,可以认为,降水是天然径流最直接的影响因素。从表 1 也可以看出,在 2000 年以前兰村站的汛期降雨量平均值与径流量平均值的变化有较好的同步性。对兰村站汛期降雨量随时间的变化进行统计检验,显著性概率 P 大于 0.5(图 4),说明近 60 年来兰村站汛期降雨量并无显著减小。那么,是不是说明降雨量与输沙量和径流量没有关系? 分别对汛期输沙量、径流量与降雨量进行偏相关分析,比较各变量之间的相关系数。通过比较,汛期输沙量、径流量和降雨量两两相关系数均通过了信度水平为 0.05 的检验。说明 3 个变量之间存在相关关系。在相关分析基础上进行曲线拟合,依据数据具有的函数特性和图形的分布特点引入多种模型,通过比较判定系数的大小,最终确定兰村站汛期输沙量、径流量与降雨量之间为线性拟合,回归模型见表 2。

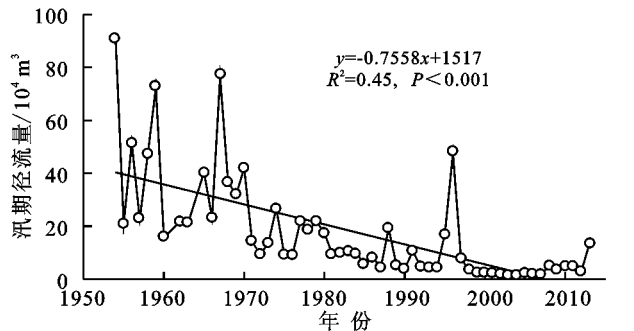


图 3 汛期径流量随时间的变化

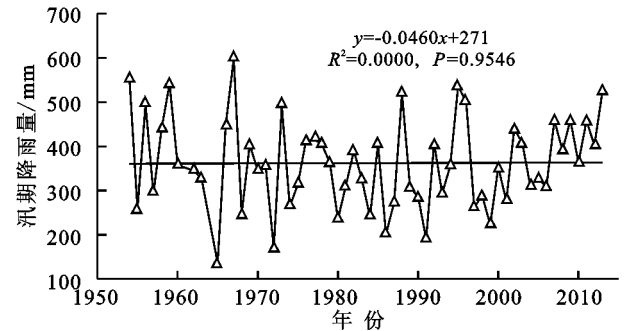


图 4 汛期降雨量随时间的变化

表 2 汛期降雨量与输沙量和径流量的关系

变量	回归模型	R^2	F
输沙量与径流量	$y=47.743x-227.251$	0.645	101.844
输沙量与降雨量	$y=4.862x-1153.922$	0.189	13.041
径流量与降雨量	$y=0.079x-11.213$	0.177	12.049

3.2.3 洪水 由图 2、图 3、图 4 可知,汛期降雨量出现峰值的年份(1954 年、1958 年、1967 年、1988 年、1996 年)与输沙量和径流量出现峰值的年份较为一致。查阅相关记载^[14-15],这几年均有发生暴雨或大暴

雨的记录,暴雨引发洪水,进而使得径流量和输沙量出现峰值。出于这个考虑,我们收集了汾河上游 1961—2010 年实测洪峰 $>100\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $>300\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水流量资料并统计发生的次数,从图 5 可以看出,发生 $>100\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $>300\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水次数有减少趋势。特别是 2000 年以后 $>100\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水次数只有 2 次。经检验,显著性 P 分别小于 0.05 和 0.001,说明近年来汾河上游发生洪水特别是较大洪水的次数显著减少。这就启示我们,发生暴雨特别是大暴雨的次数显著减少,以 2000 年以后尤为突出。

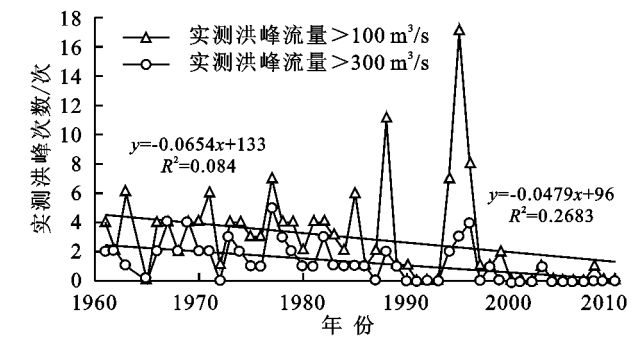


图 5 实测洪峰 $>100\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $>300\text{ m}^3/\text{s}$ 次数统计

3.2.4 其他驱动力 近 60 年来兰村站汛期输沙量的变化除降雨这个因素外,还有没有受到其他因素的影响? 为了回答这个问题,采用了双累积曲线法,将累积汛期降雨量作为横坐标,累积汛期输沙量作为纵坐标,绘制双累积曲线。在下文中,基于双累积曲线进行分析,希望揭示驱动力与双累积曲线上转折点的对应关系,以期发现引起输沙量变化的其他驱动力。

图 6 显示,兰村站汛期输沙量—降雨量双累积曲线向右发生了偏转,即表示相对于降雨量而言,输沙量有所减小。换言之,有其他因素影响了输沙量的减小。为了消除因径流量变化引起输沙量的变化,分别点绘了汛期累积输沙量与径流量、汛期累积径流量与降雨量的双累积曲线。如图 6 所示,汛期输沙量—径流量双累积曲线与汛期输沙量—降雨量双累积曲线的趋势一致,大致以 1959 年、1981 年和 2002 年为转折点,以转折点为界,将汛期输沙量近 60 年的变化划分为 1954—1959 年、1959—1981 年、1981—2002 年和 2002—2013 年 4 个阶段。图中用不同的符号区分了各阶段数据点并按线性关系给出了各阶段的拟合直线和回归方程。

- (1)1954—1959 年:这个时期输沙量的变化主要受降雨和径流的影响。
- (2)1959—1981 年:汛期输沙量在 1959 年大幅减小,斜率从 61.006 直接降到 28.674。这个变化可以用水库的建设来解释。汾河水库 1958 年动工修建,随着投入使用,水库上游主要产沙源的来沙几乎全部被拦蓄,使得兰村站输沙量急剧减小。

(3)1981—2002 年:这一阶段双累积直线继续向右偏转,形成新直线的斜率比前一阶段形成的右偏直线的斜率要小。这说明 1981 年以后,汾河上游的输沙量继续减少了,但减小幅度不大。这一阶段降雨由丰向枯变化,伴随区域经济的增长,生产生活用水量增加;大规模煤炭开采造成采空区地表径流下渗加剧;对地下水的开采导致地下水位下降,包气带拦蓄大气降水增多,地表径流量减少,挟沙能力减弱进而输沙量减小;另一方面,由于工矿、城市建设引起的人为采沙、挖沙增多,汾河上游开展的水土保持效益逐渐显现,也使得输沙量减少。

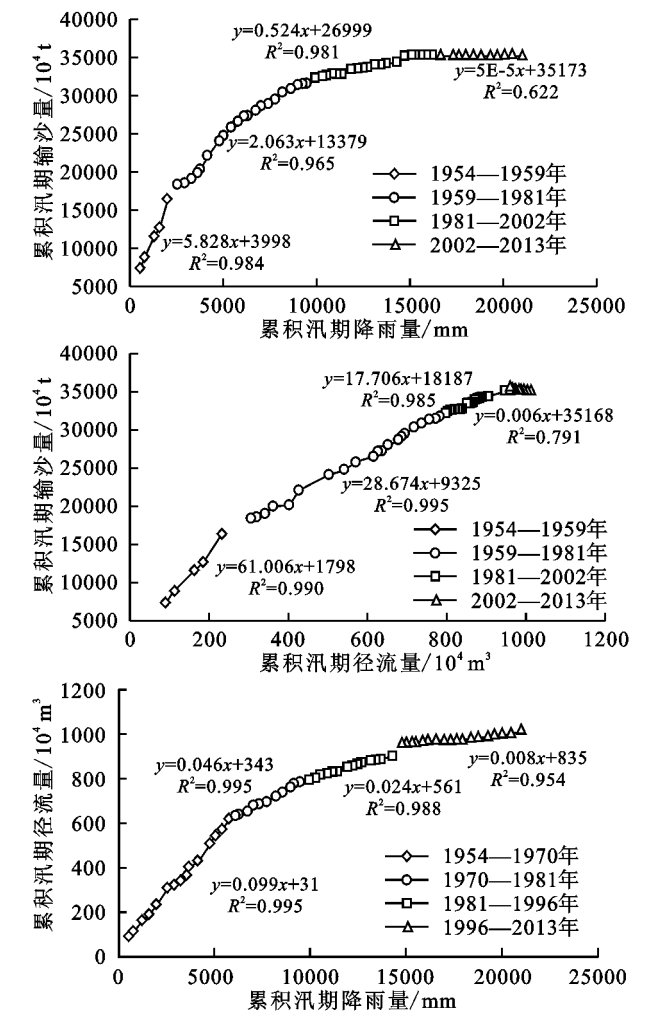


图 6 汛期输沙量—降雨量、汛期输沙量—径流量和径流量—降雨量双累积曲线

(4)2002—2013 年:2002 年以后输沙量—降雨量以及输沙量—径流量双累积曲线形成的直线与 X 轴接近平行。这个时期虽然降雨量没有减少,但由于暴雨减少,引起侵蚀的降雨侵蚀力减小,加上植被覆盖度增加,水土保持效益显现,降雨多被截流、入渗,使得地表径流减少,侵蚀产沙减少,从而输沙量减少。另外,2000 年汾河二库建成蓄水,汾河水库至汾河二库之间的泥沙全部被拦蓄致使兰村站输沙量变为 0。

4 结果与讨论

本文利用汾河上游出口控制站兰村水文站 1954—2013 年 6—9 月降雨、径流和输沙实测资料,采用线性趋势分析了汾河上游汛期悬移质输沙量变化特征,并利用双累积曲线法分析了输沙量变化的驱动因素。得出以下主要结论:

(1)近 60 年来汾河上游汛期输沙量和径流量下降显著,且输沙量变化幅度大于径流量。

(2)近 60 年来汾河上游汛期降雨量变化不显著,但降雨量与径流量($P<0.01$)、降雨量和输沙量($P<0.01$)均显著线性相关。

(3)近 60 年来特别是 2000 年以后汾河上游发生洪水特别是较大洪水的次数显著减少。

(4)近 60 年汾河上游悬移质输沙量的变化大致分为 4 个阶段,1959 年、1981 年和 2002 年是 3 个转折点。1959 年以前主要受降雨和径流的影响;1959—1981 年,汾河水库的修建是悬移质输沙量减少的主要驱动力;1981—2002 年,降水减少、经济活动和水土保持使得径流量减小,输沙能力减弱;2002 年以后,降雨减少特别是暴雨减少,经济活动和水土保持使得径流量和输沙量继续减少,而汾河二库的建设,则使得兰村站悬移质输沙量变为 0。

本文分析了汾河上游汛期悬移质输沙量和径流量近 60 年的变化,得到的结论与刘宇峰等^[7]对汾河流域悬移质输沙量和径流量变化趋势的结论一致,说明汾河上游与汾河流域的水沙变化有较好的同步性。对驱动力因子与输沙量变化之间因果关系的解释,认为输沙量的减少不仅与流域水土保持措施有关,降雨特别是暴雨减少也是输沙量减少的又一重要原因。由于资料所限,未能深入分析暴雨对汾河上游水沙变化的影响机制,更深入的工作有待今后进行。另外,除兰村水文站外,汾河上游还有静乐、寨上、上静游等长期观测

的水文站,对多个站点的水沙变化进行系统分析和研究,有助于深入了解汾河上游水沙在驱动力响应过程中出现的复杂空间行为,对此将另文讨论。

参考文献:

[1] 许炯心,孙季. 长江上游干支流悬移质含沙量的变化及其原因[J]. 地理研究,2008,27(2):332-342.

[2] 杜俊,师长兴,张守红,等. 人类活动对长江上游近期输沙变化的影响[J]. 地理科学进展,2010,29(1):15-22.

[3] 师长兴. 长江上游输沙量阶段性变化和原因分析[J]. 泥沙研究,2009(4):17-24.

[4] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J]. 水利学报,2012,43(5):571-579.

[5] 任宗萍,张光辉,杨勤科. 近 50 年延河流域水沙变化特征及其原因分析[J]. 水文,2012,32(5):81-86.

[6] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区 1997—2007 年的水沙变化趋势及其原因[J]. 水土保持学报,2010,24(1):1-7.

[7] 郭巧玲,陈新华,孙斌. 窟野河水沙变化及驱动力分析[J]. 水土保持学报,2015,29(1):17-20.

[8] 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.

[9] 原志华,延军平,刘宇峰. 1950 年以来汾河水沙演变规律及影响因素分析[J]. 地理科学进展,2008,27(5):57-63.

[10] 刘宇峰,孙虎,原志华. 近 60 年来汾河入黄河水沙演变特征及驱动因素[J]. 山地学报,2010,28(6):668-673.

[11] 梁丽霞,任志远,王丽霞,等. 汾河流域气温变化时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(1):52-57.

[12] 左海凤. 近 50 年汾河上中游流域径流对气候变化的响应分析[J]. 水文,2006,26(5):72-75.

[13] 胡彩虹,管新建,吴泽宁,等. 水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析[J]. 水土保持学报,2011,25(5):12-16.

[14] 李英明. 山西水利要事纪略(1949—2002 年)[M]. 太原:山西科学技术出版社,2005:351-352.

[15] 山西省水利厅. 汾河志[M]. 太原:山西人民出版社,2006:154-172.

(上接第 63 页)

[17] Omernik J M, Abernathy A R, Male L M. Stream nutrient levels and proximity of agricultural and forest land to streams: some relationships[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1981,36(4):227-231.

[18] 单保庆,尹澄清,于静,等. 降雨—径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报,2001,21(1):7-12.

[19] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. Ecology,1996,77(2):364-374.

[20] Dupouey J L, Dambrine E, Laffite J D, et al. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity

[J]. Ecology,2002,83(11):2978-2984.

[21] Fraterrigo J M, Turner M G, Pearson S M, et al. Effects of past land use on spatial heterogeneity of soil nutrients in southern Appalachian forests[J]. Ecological Monographs, 2005,75(2):215-230.

[22] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths[J]. Global environmental change,2001,11(4):261-269.

[23] Kong X, Zhang F, Wei Q, et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of north China[J]. Soil and Tillage Research, 2006,88(1):85-94.