

# 近50年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应

高照良, 付艳玲, 张建军, 张晓萍, 万龙

(西北农林科技大学/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)

**摘要:**为明确黄河中游地区水土流失综合治理、退耕还林(草)政策的水沙效应问题,选择黄河中游风沙-丘陵过渡区、典型丘陵区以及土石山林区5条典型流域,用降雨及面积对水文站实测径流量、输沙量数据进行处理,探讨了近50a来流域水沙及其关系的演变过程。结果表明:5条流域标准化年径流量、标准化年输沙量均表现出显著减少趋势,且两者发生跃变时间基本一致。时段频率上的河流输沙量减少程度较径流量大,零输沙天数逐时段增加。植被覆盖度低的风沙-黄土丘陵过渡区流域,较植被覆盖度高的土石山林区流域,径流量和输沙量年均变化斜率大,跃变时间早。5条流域汛期径流量和输沙量的关系表明,植被覆盖度低的风沙-黄土丘陵过渡区流域的输沙量分布域较植被覆盖度高的土石山林区流域大一个数量级,其产沙动力也最强。近50a来,5条流域的水沙动力系数均呈现逐时段降低趋势。20世纪70~80年代水土流失综合治理使5条流域水沙动力系数平均降低24.5%,1999年后的退耕还林(草)工程则使其平均降低70.6%。流域水沙拟合线性关系常数项绝对值,以及流域冲淤平衡时的径流量呈现随时段减小趋势,进一步说明水土流失治理及退耕还林(草)措施对流域水沙动力关系的削弱效应。

**关键词:**径流,泥沙输移,植被,水土保持,退耕还林(草)

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.06.013

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-06-0099-07

高照良,付艳玲,张建军,等.近50年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J].农业工程学报,2013,29(6): 99-105.

Gao Zhaoliang, Fu Yanling, Zhang Jianjun, et al. Responses of streamflow and sediment load to vegetation restoration in catchments on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 99-105. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

黄土高原上世纪70年代以来开展了大规模的水土保持工作,1999年国家实施了退耕还林(草)工程后,生态环境大幅度改善。下垫面覆被格局的变化方向及程度深刻影响着流域的水土流失及水沙演变过程<sup>[1-4]</sup>。大量研究表明,在降雨等气候因素以及人类活动影响下,50a来黄河中游主要泥沙来源区径流量和泥沙量均显著减少,水土保持工程减水减沙效益十分显著<sup>[5-6]</sup>。从含沙量变化<sup>[7]</sup>、高含沙水流<sup>[8]</sup>等典型流域时段水沙行为特征等角度,认为水土保持措施及植被改善降低了年均含沙量,减少了高含沙水流发生频率,流域水沙协同性趋于稳定<sup>[9]</sup>。植被是遏制侵蚀、减少水土流失的根本措施<sup>[10-11]</sup>。然而小区、小流域及区域的不同空间尺度上,水土流失治理及植被恢复引起水沙关系演变的结论却不尽一致,如潘贤娣、

Rustomji等认为流域及区域尺度上水土保持工程实施并没改变暴雨洪水期降雨-产流、降雨-输沙以及径流-输沙关系<sup>[12-13]</sup>,郑明国应用对比小流域研究也表明,洪水期治理流域与非治理流域水沙关系一致<sup>[14]</sup>,冉大川研究认为流域水土保持综合治理对单位减沙效益年来沙系数影响不大<sup>[15]</sup>。说明黄河中游流域下垫面覆被格局演变对水沙过程影响的复杂性<sup>[16-18]</sup>,黄河中游水土保持措施的水沙效应和下垫面覆被格局演变的响应规律和机理仍需要进一步探讨。

本文选取黄河中游由北至南风沙-丘陵过度区、典型丘陵区及土石山区不同植被覆盖度的5条典型流域为研究对象,基于实测水文和气象资料,进行数据标准化处理,分析流域径流量、输沙量演变趋势及水沙关系的响应规律,深入探讨环境建设的生态效应机理,为区域生态环境建设提供科学依据。

## 1 研究区概况

黄河中游的河口镇到龙门区间,面积约 $11.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是黄河下游河道 $>0.1 \text{ mm}$ 粗泥沙的集中来源区。年均温 $6 \sim 14$ ,年降水量 $300 \sim 580 \text{ mm}$ ,年潜在蒸发量 $1500 \sim 2000 \text{ mm}$ (观测值:

收稿日期: 2012-04-30 修订日期: 2013-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(41101265)和国家自然科学基金重点项目(41230852)

作者简介: 高照良(1969-),博士,副研究员,从事水土流失规律与综合治理技术研究。杨凌 中科院水利部水土保持研究所,712100。

Email: gzl@ms.iswc.ac.cn

仪器分别是 20 cm 的小型蒸发器和 E601 蒸发皿, 经过系数换算得到的研究区域的潜在蒸发状况), 干旱半干旱气候。年降水量的 60%~70% 发生在 6-9 月, 主要以暴雨形式出现。以黄土丘陵沟壑侵蚀地貌为主, 海拔 1 100~1 500 m, 切割深度 100~500 m, 地表裂度 30%~70%。西北部是毛乌素沙地, 鄂尔多斯高原边缘地带, 地表以固定沙丘沙地为主, 呈干旱草原景观。南部和东部为低中山地貌, 分布次生落叶阔叶林和温带针叶林、针阔叶混交林。黄土深厚, 水土流失严重。考虑植被、面积等情况, 选择秃尾河、佳芦河、延河, 云岩河和仕望川等 5 条支流作为典型流域进行研究。各流域位置、自然状况和森林覆盖度如图 1 和表 1<sup>[19]</sup>。

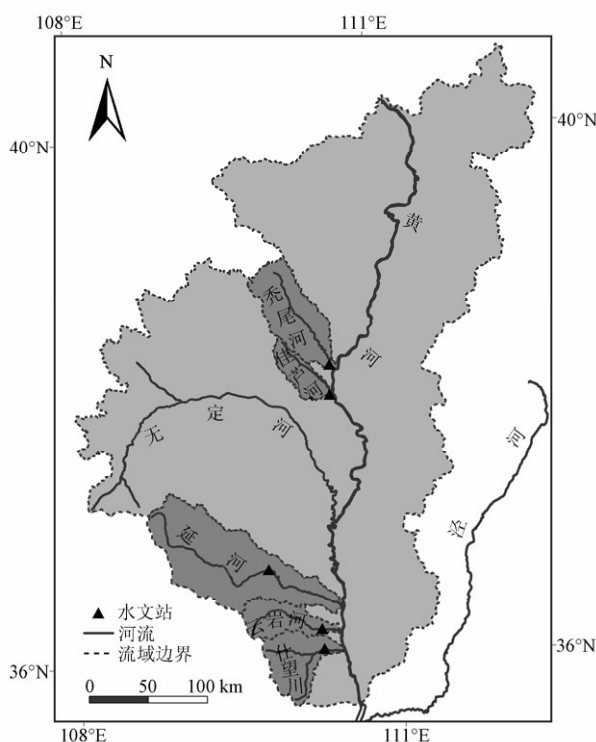


图 1 5 条流域在河龙区间位置

Fig.1 Location of five catchments in He-Long region of Yellow River

表 1 研究流域自然特征

Table 1 Natural features of five catchments

流域	秃尾河	佳芦河	延河	云岩河	仕望川
水文站	高家川	申家湾	甘谷驿	新市河	大村
控制面积/km <sup>2</sup>	3253	1121	5891	1662	2141
平均降雨/mm	403	412	514	541	561
平均径流量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	3.4	0.6	2.1	0.3	0.7
多年平均输沙/(10 <sup>8</sup> t)	0.18	0.13	0.46	0.03	0.02
森林覆盖度/%	9.8	3.3	9.2	44.7	66.5
地貌类型区	风沙-黄土丘陵过渡区		黄土丘陵区	土石山林区	

注: 森林覆盖度为 1997 年数据<sup>[20]</sup>, 只代表林地覆盖, 不含草地。  
Note: The forest coverage was only the coverage of forest in 1997, the grass coverage was not involved.

## 2 数据及研究方法

### 2.1 数据获取及处理

文章采用了 5 条流域水文站建站以来到 2010 年的逐月径流量和输沙量资料, 并累加到年值。对国家统计局数据网河龙区间气象站实测月降雨量用 KRIGING 方法进行空间插值, 与流域界限叠加, 面积加权获得流域同序列的各流域年降雨量数据<sup>[21-22]</sup>。在全黄土高原近 100 个气象站点基础上, 采用 KRIGING 方法进行插值, 获取 1957-2010 年的区域面降雨量, 然后在 ARCGIS 中用研究流域边界进行裁剪得到各流域的面降雨量值。插值中采用了 500 m 的栅格, 而我们的研究流域最小为 1 121 km<sup>2</sup>, 因此其精度能满足对大流域在年-月时间尺度上的水文分析<sup>[22]</sup>。5 条流域资料序列除 2007 年径流、泥沙数据空缺外, 其序列长度为: 秃尾河 1956-2010 年, 佳芦河 1957-2010 年, 延河 1956-2010 年, 云岩河 1966-2010 年, 仕望川 1959-2010 年。水文数据来自于黄河中游水文站整编资料。为了降低降雨、流域面积等因素对流域间水文要素的影响, 将年(月)径流量和输沙量值分别用该流域年(月)降雨量及控制面积进行标准化处理, 得到标准化径流量  $R_S$  (m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·mm)) 和标准化输沙量  $S_S$  (t/(km<sup>2</sup>·mm))<sup>[23]</sup>

$$R_S = \frac{R}{A \cdot P}, \quad S_S = \frac{S}{A \cdot P}$$

式中,  $R$  为径流量, m<sup>3</sup>;  $A$  为流域面积, km<sup>2</sup>;  $P$  为流域内月加权降水量, mm;  $S$  为输沙量, t。

$R_S$  和  $S_S$  实际上反映了单位面积和单位降雨条件下的流域产流和产沙量, 用其变化特征反映流域对下垫面改变响应的差异。

### 2.2 水文要素变化的趋势分析及跃变点确定

水文要素变化的趋势分析采用 Mann-Kendall 法。Mann-Kendall 方法是 FAO 组织在 1975 年推荐使用的非参数统计法<sup>[24]</sup>。径流量和输沙量的跃变时间确定采用 Pettitt 方法<sup>[23]</sup>。Pettitt 法是 1979 年提出的一种非参数统计检验法, 与 Mann-Kendall 方法相结合进行水文、气象要素趋势分析及跃变时间确定。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域径流量变化趋势分析

#### 3.1.1 径流量变化趋势及跃变时间分析

近 50 a 来, 5 条流域年标准化径流量均表现出减少趋势, 如表 2 所示, 北部风沙-黄土丘陵过渡区佳芦河、秃尾河、南部土石山林区云岩河、仕望川流域呈现 0.001 极显著水平, 年均变率分别为 -3.323、-3.127、-0.431、-0.928 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·mm·a)。Pettitt

检验表明 4 条流域年径流量跃变均在 0.001 显著水平上发生,但时间不一致。佳芦河流域发生在 1982 年,时间较早,秃尾河流域发生在 1983 年,云岩河和仕望川流域径流量发生跃变的时间最晚,分别在 1995 和 1988 年。利用 Mann-kendall 突变点检验表明,延河流域具有多个突变,最大的突变发生在 1977 年,其年均变率为如表 2 所示。

佳芦河流域水土保持措施实施力度较大,1979

年该流域水土流失治理累积面积在 5 条流域中最大,为 16.5%。秃尾河流域该区域地下水水位较高,使得该河流基流量非常丰富(秃尾河高家川站基流量占年径流量比例高达 91.7%),径流对水保措施的实施以及地表径流的变化不敏感。云岩河和仕望川 2 条流域水土流失治理措施累积规模达到效应显现的时间较晚。云岩河流域 1985 年时水土流失治理措施累积面积达到 14%,而仕望川直到 1994 年才达到近 15%<sup>[19]</sup>。

表 2 流域年径流量变化趋势及跃变时间检验  
Table 2 Trend of annual streamflow and change point test in catchments

流域	径流					输沙				
	Mann-Kendall 检验			Pettitt		Mann-Kendall 检验			Pettitt	
	Z	P	$\beta/(m^3 \cdot km^2 \cdot mm^{-1} \cdot a^{-1})$	跃变时间	P	Z	P	$\beta/(t \cdot km^2 \cdot mm^{-1} \cdot a^{-1})$	跃变时间	P
秃尾河	-5.58	***	-3.127	1983	***	-5.18	***	-0.298	1978	**
佳芦河	-7.33	***	-3.323	1982	***	-6.04	***	-0.740	1977	***
延河	-1.78	Ns	-0.266	1977(MK)	-	-3.12	**	-0.230	1980(MK)	Ns
云岩河	-3.61	***	-0.431	1995	**	-3.67	***	-0.066	1982	*
仕望川	-4.50	***	-0.928	1988	**	-6.22	***	-0.051	1982	***

注: Z 为统计量,用来检验在给定显著水平时有序数据的秩变化趋势;  $\beta$  为趋势变化斜率,正值表示正趋势,负值表示负趋势; P 表示检验的显著性水平,\*\*\*、\*\*、\* 分别表示信度为 0.001、0.01 和 0.05 的显著性; Ns 代表不显著,-表示未涉及; 1977(MK)表示由 Mann-Kendall 检验得出。

Note: Z, the statistic in Mann-Kendall test, is used to test the rank trend of a data sequence in a given significant level;  $\beta$  stands for trend change slope, the positive value indicates the upward trend, the negative value indicates the downward trend; P is the significance level of the test, the symbols of \*\*\*, \*\* and \* indicate significance level of 0.001, 0.01 and 0.05, respectively; NS is not significant, -means not involved; 1977(MK) indicates that the result tested by Mann-Kendall sequential test.

### 3.1.2 不同时期径流量频率变化分析

利用上述标准化径流量跃变时间,和国家退耕还林政策实施时间,将水文序列划分为 3 个时段,即前期(跃变时间前)、后期(跃变时间至 1999 年)和退耕还林期(2000 年以后)。

时段内丰水(5%)、平水(50%)和枯水(95%)时的标准化值在时段间的变化量(表 3)表明,减少程度在流域间,以及时段的丰、平、枯水的变化上均有差异。历时曲线表明,佳芦河和秃尾河流域径流量在时段间变化最大,1982 - 1999 年的径流跃变后期和 2000 年后的退耕还林期,佳芦河丰水和平水期标准化月径流量减少 47.4%、42.3%和 81.2%、69.8%,秃尾河为 43.7%、23.3%和 60.1%、43.8%。位于土石山林区的云岩河和仕望川流域丰水和平水期径流量分别减少 38.8%、28.4%、53.6%、40.5%和 46.2%、37.8%,40.9%、48.2%。延河流域前 2 个时期径流量变化不显著,甚至还稍有增加,在退耕还林后较跃变时段前期丰水和平水期径流量有显著减少。

## 3.2 流域输沙量变化趋势分析

### 3.2.1 年输沙量变化趋势及跃变时间分析

5 条流域 50 a 来标准化输沙量均呈减少趋势。风沙-黄土丘陵过渡区的秃尾河和佳芦河,以及土石山林区的云岩河和仕望川,显著水平达到 0.001,延河流域达到 0.01 的显著水平,其年均变率分别为-0.298,

-0.740、-0.066、-0.051t/(km<sup>2</sup>·mm·a),如表 2 所示。

流域年标准化输沙量的跃变时间与径流量相近,其中云岩河时间相差较大。说明流域内水土保持措施的实施,是通过减少地表径流量以及削弱其对土壤的冲蚀能力,达到减少侵蚀和输沙的效果。

### 3.2.2 不同时期输沙量频率变化分析

按各流域标准化年输沙量的跃变时间判断,分为前期、后期、退耕期 3 时段,用月标准化输沙量分析流域历时曲线及不同时段 5%、50%和 95%频率时的变化情况,如表 3。

表 3 5 条流域时段标准化输沙量相对前期减少量  
Table 3 Reduction of sediment yield in comparison with before-change point period in five catchments

流域	时段	标准化月径流量频率/%			标准化月输沙量频率/%		
		5	50	95	5	50	95
秃尾河	后期	-43.7	-23.3	-16.2	-59.2	-36.0	-38.6
	退耕期	-60.1	-43.8	-38.8	-90.9	-85.9	-60.0
佳芦河	后期	-47.4	-42.3	-37.3	-63.9	-91.9	—
	退耕期	-81.2	-69.8	-89.6	-96.8	-100	—
延河	后期	-10.9	13.0	42.4	-35.3	-100	—
	退耕期	-38.0	-15.1	40.1	-75.0	—	—
云岩河	后期	-38.8	-28.4	-0.1	-40.0	—	—
	退耕期	-53.6	-40.5	-44.2	-75.5	—	—
仕望川	后期	-46.2	-37.8	-23.2	-77.8	—	—
	退耕期	-40.9	-48.2	-44.5	-96.0	—	—

注: —表示上一个研究期该频率上为 0。  
Note: — indicates that the value of the frequency in last period is 0.

各流域标准化月输沙量均呈现减少趋势,尤其在 2000 年后退耕还林期间,各流域时段频率上减沙幅度十分显著,零输沙天数有持续增加趋势。流域时段频率变化明显,如表 3 所示。丰水期输沙量,5 条流域后期较前期减少量最少为 35.3% (延河),最多为 77.8% (仕望川),退耕还林期较前期输沙量更是大幅度减少,最少为 75.0% (延河),最多为 96.8% (佳芦河)。平水期输沙量甚至达 100%。地下水丰富的秃尾河,枯水期输沙量 2 时段内也分别减少了 38.6% 和 60.0%。

分析其原因,各流域上世纪 70 - 80 年代持续开展水土流失治理,1999 年后进行大规模退耕还林(草),减少径流量的同时,也大幅度减少了河流输沙量。

### 3.3 流域水沙关系分析

流域水沙关系具有明显的正相关性,本文采用一次函数简化水沙关系,其一次项系数可近似反应产沙动力,常数项则表示了流域在地表环境演变引起的水文效应还未达到使水文情势发生统计上显著变化时的泥沙存储状态。5 条流域标准化径流量及标准化输沙量全时段内的分布范围差异较大。位于风沙-黄土丘陵过度区的秃尾河和佳芦河径流量及输沙量分布域较广,径流量/输沙量分布在 $[0, 1300]/[0.01, 1000]$ 。秃尾河径流量主体  $> 100$ , 与

其丰富的地下基流量关系密切。而位于土石山林区的云岩河及仕望川流域径流量及输沙量分布域则较小,绝大部分在 $[0, 400]/[0.01, 100]$ 。位于黄土丘陵区的延河流域径流量及输沙量的分布域则位于中间程度。洪水期的输沙量流域间要相差一个数量级,这与流域的植被覆盖条件不同密切相关。

将表 4 水沙关系线性拟合的一次项系数视为流域产沙动力系数,则从各流域跃变时段前期可以看出,一次项系数在佳芦河、秃尾河流域较大,云岩河、仕望川流域最小,延河流域居中。说明单位标准化径流量条件下,风沙-黄土丘陵区流域的产沙动力最强,土石山林区流域的产沙动力最弱。与林地覆被削弱降雨动能、增加入渗、减少地表径流、减少侵蚀产沙有关。

经过上世纪 70 - 80 年代水土保持治理、2000 年后退耕还林政策的实施,5 条流域 3 时期的水沙动力系数均呈现降低趋势,跃变后较跃变前平均降低 24.5%,最大为 40.9% (佳芦河),退耕还林期降幅大于跃变前期,平均值为 70.6%,最大值为 96.9% (仕望川),如表 4 所示。50 年来,位于风沙-黄土丘陵过度区的秃尾河和佳芦河以及土石山林区的仕望川产沙动力降低幅度较大,黄土丘陵区的延河则变化幅度最小,与产流产沙结论一致。

表 4 5 条流域不同时段水沙关系参数及其变化量比较

Table 4 Comparison of parameters of relationship of streamflow and sediment in five catchments

时段 流域	跃变前期			跃变后期			退耕还林期			跃变前-后期变率			跃变前-退耕期变率		
	$a$	$b$	$A$	$a$	$b$	$A$	$a$	$b$	$A$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta A$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta A$
秃尾河	0.326	79.96	245.48	0.238	43.20	181.51	0.058	6.31	108.71	-26.9	-46.0	-26.06	-82.2	-92.1	-55.7
佳芦河	0.654	74.15	113.29	0.387	23.78	61.45	0.219	6.05	27.62	-40.9	-67.9	-45.8	-66.5	-91.8	-75.6
延 河	0.532	22.97	43.16	0.433	20.12	46.47	0.400	15.86	39.71	-18.7	-12.4	7.7	-25.0	-30.9	-8.0
云岩河	0.243	6.27	25.82	0.224	7.01	31.24	0.042	0.090	2.14	-7.6	11.8	21.0	-82.7	-98.6	-91.7
仕望川	0.060	-	-	0.043	1.18	27.67	0.0019	-	-	-28.5	-	-	-96.9	-	-
均 值	0.363	45.84	106.94	0.265	19.06	69.67	0.144	7.08	44.54	-24.5	-28.6	-10.8	-70.6	-78.4	-57.8

注:  $a$  为线性拟合一次项系数,即水沙动力系数;  $b$  为常数项绝对值,即泥沙存储量;  $A$  为截距,即冲淤平衡流量; -表示根据方程计算值为负,是这个意义上不存在的现象。

Note:  $a$  means the coefficient of the linear regression equation, namely sediment generation coefficients;  $b$  means the absolute value in the equation, and  $A$  means the intercept in the equation, the scour and silting balance stream flow. - indicates that the value is negative, and the phenomenon doesn't exist.

由表 4 可知,与一次项系数表现的规律类似,5 条流域前期的常数项绝对值即泥沙存储量,表现为风沙-黄土丘陵区流域最大(秃尾河:79.96,佳芦河:74.15),土石山区流域最小(云岩河:6.27),黄土丘陵区延河流域居中(22.97)。经过水土保持治理以及退耕还林的 2 个时期,常数项值呈现下降趋势,尤其在风沙-黄土丘陵过渡区流域表现得更为突出,如佳芦河,与跃变前期相比,跃变后期及退耕还林期流域泥沙存储量分别减少了 67.9%、91.8%。

从整个方程来看,输沙量为 0 时的径流量,可以理解为流域出现冲淤平衡时所需的径流量大小,

如表 4 所示。5 条流域冲淤平衡时的径流量,表现出跃变前期大于或持平于后期,更大于退耕还林期的趋势,尤其在风沙-黄土丘陵过渡区的佳芦河表现得非常典型,较前期流域冲淤平衡径流量分别减少了 45.8%、75.6%。说明了水土流失治理以及退耕还林(草)工程对流域水沙动力的削弱效应。延河流域径流量、输沙量以及水沙关系减少程度较弱的结论,有多篇文献提及<sup>[17,24-26]</sup>,可能与流域中人类活动对产输沙过程的正、副效应有关<sup>[26]</sup>。

黄河流域径流和输沙变化是降水和人类活动共同影响的结果,目前对变化的数量和各因素的作用大小莫衷一是,目前研究认为人为因素作用大小

介于 15%~90% 之间<sup>[6-8,10,12-14,17,20,24-26]</sup>,不同研究之间差别较大,关于各种方法之间优劣的探讨还需要深入研究,具有广泛代表性的定量化表述方法的确立还需要长期的研究。

#### 4 结 论

本文选取黄河中游不同植被覆盖度的典型流域为研究对象,基于实测水文、气象资料,进行数据标准化处理,分析流域径流量、输沙量演变趋势及水沙关系对水土保持措施和退耕还林的响应规律。结论如下:

1) 5 条流域年标准化径流量、年标准化输沙量均表现出显著减少趋势,风沙-黄土丘陵区植被覆盖度低的流域径流、输沙较土石山林区植被覆盖度高的流域的趋势变化要大。流域的径流量、输沙量有较为一致的、显著的跃变时间,风沙-黄土丘陵区流域的跃变时间要早于土石山林区流域。

2) 黄河中游上世纪 70 - 80 年代持续开展的大面积的水土流失治理,以及 1999 年后进行大规模退耕还林(草),随着时间进展,流域在时段丰、平、枯水期径流量减少的同时,也大幅度减少了同时段同频率上的河流输沙量,零输沙天数逐时段增加。由于植被覆盖条件的差异,50 年来,汛期径流量和输沙量的分布域在流域间差异较大,风沙-黄土丘陵过度区流域的产沙动力最强,其洪水输沙量较土石山林区流域大一个数量级。土石山林区流域的产沙动力最弱,黄土丘陵区延河流域居中。

3) 上世纪 70 - 80 年代水土流失治理、1999 年后退耕还林(草)政策的实施,5 条流域的产流产沙动力系数(水沙线性拟合的一次项系数)均呈现逐时段降低趋势。水土流失治理使 5 条流域水沙动力系数平均降低 24.5%,1999 年后的退耕还林(草)工程则使其平均降低 70.6%。拟合线性关系的常数项绝对值,以及流域冲淤平衡时的径流量,也表现出随时段减小趋势,说明水土流失治理及退耕还林(草)措施对流域水沙动力关系的削弱效应。

#### [参 考 文 献]

[1] 赵文武,傅伯杰,陈利顶,等. 黄土丘陵沟壑区集水区尺度土地利用格局变化的水土流失效应[J]. 生态学报, 2004(7): 1359 - 1364.  
Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Effects of land use pattern change on soil and water loss at the catchments scale in the hilly and gully area of the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1359 - 1364. (in Chinese with English abstract)

[2] 余新晓,张学霞,李建牢,等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 1 - 8.  
Yu Xinxiao, Zhang Xuexia, Li Jianlao, et al. Effects of vegetation cover and precipitation on the process of sediment produced by erosion in a small drainage basin of Loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)

[3] 索安宁,熊友才,王天明,等. 黄土高原子午岭森林破碎化对流域水文过程的影响[J]. 林业科学, 2007(6): 13 - 19.  
Suo Anning, Xiong Youcai, Wang Tianming, et al. Effect of deforestation on watershed hydrological process in Ziwuling on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007(6): 13 - 19. (in Chinese with English abstract)

[4] 王计平,杨磊,卫伟,等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响-景观水平与多尺度比较[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5531 - 5541.  
Wang Jiping, Yang Lei, Wei Wei, et al. Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of loess plateau in China: landscape-level and comparison at multi scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5531 - 5541. (in Chinese with English abstract)

[5] 张学成,王玲,高贵成. 黄河泥沙动态分析[J]. 泥沙研究, 2002(1): 43 - 52.  
Zhang Xuecheng, Wang Ling, Gao Guicheng. Dynamic analysis of sediment in the Yellow river[J]. Journal of Sediment Research, 2002(1): 43 - 52. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323 - 330.  
Liu Changming, Zhang Xuecheng. Causal analysis on actual water flow reduction in the main stream of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 323 - 330. (in Chinese with English abstract)

[7] 韩鹏,李天宏. 黄河中游水保前后河流含沙量变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(2): 212 - 216.  
Han Peng, Li Tianhong. Sediment concentration variation in the Tributaries of the middle Yellow river[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(2): 212 - 216. (in Chinese with English abstract)

[8] 廖建华,许炯心,杨永红. 黄土高原区高含沙水流发生频率空间分异及其影响因素[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 160 - 170.  
Liao Jianhua, Xu Jiongxin, Yang Yonghong. Study of the spatial differentiation of hyper concentrated flows frequency in the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 160 - 170. (in Chinese with English abstract)

[9] 汪丽娜,穆兴民,高鹏. 基于水沙协同图谱的流域自适应能力研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 669 - 675.  
Wang Lina, Mu Xingmin, Gao Peng. Auto-adapted ability of river basin based on water on water and wand

- coordination atlas Arid Land Geography[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5): 669 - 675. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土区森林植被对流域径流和输沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 48 - 53.  
Zhang Xiaoming, Yu Xinxiao, Wu Sihong, et al. Influence of forest vegetation on runoff and sediment transport of watershed in Loess area[J]. Science of soil and Water Conservation, 2006, 4(3): 48 - 53. (in Chinese with English abstract)
- [11] 余新晓, 毕华兴, 朱金兆, 等. 黄土地区森林植被水土保持作用研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 433 - 440.  
Yu Xinxiao, Bi Huaxing, Zhu Jinzhao, et al. Soil and water conservation by forest vegetation in Loess area[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(5): 433 - 440. (in Chinese with English abstract)
- [12] 潘贤娣, 李勇, 张晓华. 河龙区间流域综合治理对水沙特性的影响[J]. 人民黄河, 1999, 21(8): 13 - 15.  
Pan Xiandi, Li Yong, Zhang Xiaohua. The influences of water and sediment characteristics on watershed comprehensive management of Hekou-Longmen Region in Huanghe River Basin[J]. Yellow River, 1999, 21(8): 13 - 15. (in Chinese with English abstract)
- [13] Rustomji P, Zhang X P, Hairsine P B, et al. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China[J]. Water Resources Research, 2008, 44(9): 1 - 17.
- [14] 郑明国, 蔡强国, 陈浩. 黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3572 - 3581.  
Zheng Mingguo, Cai Qiangguo, Chen Hao. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in Gullied-hilly Area of the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3572 - 3581. (in Chinese with English abstract)
- [15] 冉大川, 郭宝群, 张晓华, 等. 泾河流域来沙系数变化与响应分析[J]. 泥沙研究, 2009, 4(2): 60 - 67.  
Ran Dachuan, Guo Baoqun, Zhang Xiaohua, et al. Journal of Sediment Research Analysis on variation and response of incoming sediment coefficient of the Jinghe River basin [J]. Journal of Sediment Research, 2009, 4(2): 60 - 67. (in Chinese with English abstract)
- [16] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration[J]. Journal of hydrology, 1982, 55(4): 3 - 23. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张晓萍, 张槽, 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[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 19 - 26.  
Zhang Xiaoping, Zhang Lu, Wang Yong, et al. Tempo-spatially responses of the annual stream flow to LUCC in the middle reaches of Yellow River[J]. China Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 19 - 26. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68 - 73.  
Liu Bin, Luo Quanhua, Chang Wenzhe, et al. Relationship between percentage of vegetative cover and soil erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 68 - 73. (in Chinese with English abstract)
- [19] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等编著. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000: 69 - 75.
- [20] 张晓萍, 董冰让, 李锐, 等. 黄河中游河龙区间土地利用与林地覆被格局变化研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 163 - 166.  
Zhang Xiaoping, Dong Bingrang, Li Rui, et al. Study of land use and forest cover pattern change in Hekou-Longmen section of the middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5): 163 - 166. (in Chinese with English abstract)
- [21] Wan Long, Zhang Xiaoping, Ma Qin, et al. Spatio-temporal Trends of Precipitation on the Loess Plateau of China[C]// International Congress on Modelling and Simulation. MODSIM, Perth, Australia. 2011.
- [22] 万龙, 马芹, 张建军, 等. 黄土高原降雨量空间插值精度比较-KRIGING与TPS法[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 79 - 87.  
Wan Long, Ma Qin, Zhang Jianjun, et al. Precise comparison of spatial interpolation for precipitation using KRIGING and TPS (thin plate smoothing spline) methods in Loess Plateau[J]. Science of soil and water conservation, 2011, 9(3): 79 - 87. (in Chinese with English abstract)
- [23] 穆兴民, 巴桑赤烈, 张槽, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J]. 泥沙研究, 2007(2): 36 - 41.  
Mu Xingmin, Basang Chilie, Zhang Lu, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 36 - 41. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zhang X P, Zhang L, Zhang J, et al. Responses of stream flow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Research, 2008, 44(10): 1 - 12.
- [25] 于浩, 张晓萍, 李锐. 延河流域径流和输沙周期变化特征的小波分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 18 - 22.  
Yu Hao, Zhang Xiaoping, Li Rui. Periodic variation of

the stream flow and sediment transport in Yanhe River using wavelet analysis test[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(4): 18 - 22. (in Chinese with English abstract)

[26] 戴明英. 延河水沙变化的分析研究[M] 汪岗. 黄河水沙变化研究: 第一卷(下册). 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 623 - 643.

## Responses of streamflow and sediment load to vegetation restoration in catchments on the Loess Plateau

Gao Zhaoliang, Fu Yanling, Zhang Jianjun, Zhang Xiaoping, Wan Long

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming in Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water and Resources /Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** To reduce the severe soil erosion on the Loess Plateau, a great number of soil and water conservation measures was implemented in 1970s-1980s, and after that, Grain for Green project was applied since 1999. The great anthropogenic forces resulted in the decreasing trend of stream flow and sediment load on the Loess Plateau. However, the relationship between streamflow and sediment load wasn't clear. Understanding the change of streamflow, sediment load, and their relation was helpful to enable sustainable catchment management in the region. The monthly streamflow and sediment load data were used in the study and summed annually to check the trends in the past five decades. To compare the impacts between catchments, the data were standardized with precipitation at a corresponding temporal scale and catchment area. The results showed that all the 5 catchments in the study had a statistically significant negative trend in annual streamflow and sediment load given by the M-K trend test. Change points given by the Pettitt test in streamflow of the catchments occurred were basically consistent with that of sediment load. The extent of reduction in the sediment load was much greater than that of streamflow with the periods altered, and an increasing number of zero-sediment load days was observed. The average annual reduction both in streamflow and sediment load was much greater in the low-vegetation-coverage catchments than that in the high-vegetation-coverage catchments, and the change point was also earlier. The scattered distribution for monthly streamflow and sediment load for the wet season indicated that the low-vegetation-coverage catchments have wider domain by one order of magnitude in sediment load than that of the high-vegetation-coverage catchments. The sediment load was simply regressed with the streamflow, and the regression coefficient was considered as the sediment production coefficient here. The sediment production coefficient of the 5 catchments was observed to decrease by periods during the past 50 years. Implementation of soil and water conservation measures, and "Grain for Green" application in latter periods, led to an average reduction in the sediment production coefficient of 24.5% and 70.6%, respectively. It was also detected that the absolute value of the constant in the linear regression and the streamflow volume when the catchments reach scour and silting balance decreased by periods. The impacts of soil and water conservation implementation and Grain for Green policy application on streamflow, sediment load and their relation was further illustrated.

**Key words:** stream flow, sediment transport, vegetation, soil and water conservation, Grain for Green project