

黄河中游输沙与减沙的时空分异特征

马丽梅¹, 王万忠^{1,2}, 焦菊英^{1,2}, 简金世¹

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

摘 要: 利用黄河中游主要水文站输沙量数据和 48 个雨量站降雨数据, 分析了黄河中游 1955 年以来输沙与减沙特征, 以及降雨与人类活动对输沙量变化的影响。结果表明: 1955—2007 年黄河中游输沙量总体呈下降趋势, 20 世纪 70 年代后较 70 年代前减沙 46.8%, 其中减幅较大的有汾河 99.8%、岚漪河 73.9%、州川河 71.9%、三川河 70.3%; 退耕还林还草时期(1998—2007 年)输沙量下降趋势最为明显, 较 70 年代前减沙 74.2%, 除黄浦川、孤山川、佳芦河、屈产河、清涧河、延水之外, 黄河中游大多数流域达到轻度侵蚀及以下; 降雨因素和人类活动对输沙量变化的贡献率分别为 37.6% 和 62.4%。

关键词: 黄河中游; 退耕还林; 输沙量; 减沙幅度

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0067-06

Spatial-temporal Characteristics of Sediment Discharge and Sediment Reduction in the Middle Reaches of the Yellow River

MA Li-mei¹, WANG Wan-zhong^{1,2}, JIAO Ju-ying^{1,2}, JIAN Jin-shi¹

(1. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the present study, the characteristic of sediment discharge, sediment reduction and the influence of human activities and rainfall on the sediment discharge in the past 50 years (since 1955) were analyzed based on the data collected from 48 rainfall stations and the main hydrometric stations in the middle reaches of the Yellow River. The results showed that sediment discharge has been decreasing totally from 1955 to 2007, it reduced by 46.8% relative to sediment yield before 1970. The reduction rates which were greater than 70% were Lanyihe (73.9%), Sanchuanhe (70.3%) and Zhouchuanhe (71.9%). In different controlled periods, the reduction during the period of conversion of cropland into forestland (1998—2007) is the most obvious and sediment reduction rate is 74.2% relative to the sediment yield before 1970. Soil erosion intensities of the most of tributaries became the light erosion and below light erosion, except Huangpuchuan, Gushanchuan, Jialuhe, Quchanhe, Qingjianhe and Yanshui. The contribution rates of rainfall and human activities to sediment reduction were 37.6% and 62.4%, respectively.

Key words: the middle reaches of the Yellow River; conversion of cropland into forestland; sediment discharge; sediment reduction rate

河流输沙量变化是流域水土流失强度变化的重要体现, 是全球水土流失研究的重要内容^[1]。黄河流域土壤侵蚀严重, 河床不稳定, 生态环境十分脆弱, 导致黄河成为世界上含沙量最多的河流^[2]。黄河中游水土流失十分严重, 致使下游河道严重淤积, 河床平均每年抬高约 10 cm, 形成“地上悬河”, 对人类生存

与社会发展造成重大影响^[3]。近几十年, 黄河中游地区气候暖、干化趋势明显, 人类活动加剧, 特别是大型水库、淤地坝、梯田等水利水保措施工程和植树造林、退耕还林(草)等活动的开展, 使得黄河中游地区输沙量显著减少, 引起了各方面的极大关注^[4-5]。黄河中游及各流域在不同治理时期特别是退耕还林草以来

收稿日期: 2010-06-09

资助项目: 国家科技支撑计划项目课题“黄土高原水土流失综合防治技术研究”(2006BAD09B10); 国家重点基础研究发展计划项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”课题“区域水土流失过程与趋势分析”(2007CB407203)

作者简介: 马丽梅(1985—), 女, 甘肃金昌人, 在读硕士, 主要从事侵蚀产沙研究。E-mail: mlm1101@163.com

通信作者: 焦菊英(1965—), 女, 陕西宝鸡人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为植被恢复与水土保持环境评价。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

的减沙情况,以及降雨与人类活动对输沙量的影响如何呢?这些问题都是黄河中游水土保持及下游河道治理研究中亟待解决的问题。为此,利用黄河中游不同区间和河龙区间 22 条支流的输沙量数据,分析了 50 多年来(1955—2007 年)输沙量的时空变化特征以及降雨与人类活动对输沙量变化的影响和贡献率,以期增强对黄河中游及其各支流区间的输沙量时空变化的认识,定量认识降雨和人类活动对输沙量变化的影响,为黄河中游生态环境的可持续发展和宏观决策提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

黄河中游河段流经黄土高原地区,支流带入大量的泥沙,中游陕县水文站最大年输沙量为 391 000.0 万 t(1933 年)。黄河中游河口镇到龙门区间(简称河龙区间)及泾河、渭河、北洛河、汾河流域,面积约 28.7 万 km²,是黄河流域水土流失最为严重的地区^[6]。区内降水量时空分布不均匀,呈现由东南向西北递减的趋势;降雨主要集中在夏季,且常以暴雨为主。区内增加的水量占黄河上中游总水量的 39.0%,而增加的沙量占上中游总沙量的 90.0%,为黄河的主要泥沙来源区^[1]。我国自 20 世纪 70 年代起,投入了大量的人力、物力和财力进行黄河中游的水土流失治理,使得黄河中游水土保持措施年均(1970—1996 年)减沙 32 000.0 万 t^[7]。

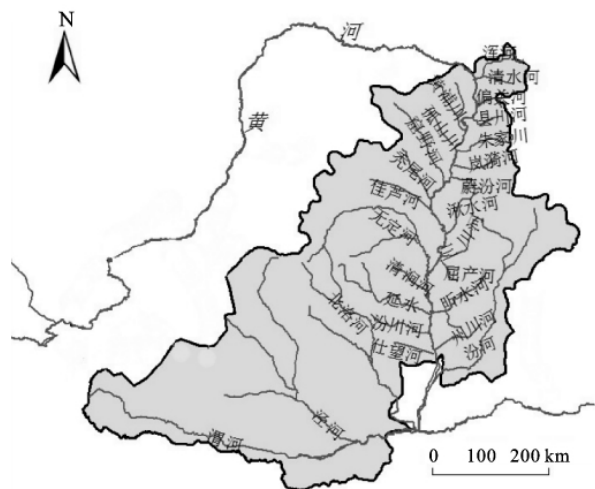


图 1 研究区概况图

1.2 分析方法

1.2.1 资料来源 输沙量数据来源于黄河泥沙公报,降雨数据来自国家气象局,数据资料序列为 1955—2007 年。在黄河中游 48 个气象站降雨数据的基础上,经过 Kriging 空间插值处理,采用面积加权法获得黄河中游面降雨数据。

1.2.2 分析方法

(1)从 3 个空间层次,即黄河中游(头道拐至潼关(陕县)站)、不同区间(中游北部河龙区间,中游南部北洛河、泾渭河,中游东部分河)、不同支流(浑河、偏关河等),分析黄河中游输沙与减沙特征。

(2)已有的研究将 1970 年做为黄土高原未治理与治理的分界线,认为 70 年代以前黄河水沙主要受降雨的影响,20 世纪 70 年代以后水沙主要受水利水保措施和降雨等的综合影响^[8-10]。新中国成立以来,水土保持的治理主要可分为 3 个阶段:一是 1949—1969 年,为零星治理阶段,人们一般试着进行少许治理或未治理阶段;二是 1970—1989 年,以解决群众吃饭问题为主要目的的初期治理阶段,是一个从初期的以梯田建设为主体的单项措施治理逐渐过渡到小流域综合治理阶段;三是 1990 至今,是以从解决吃饭问题转向改善生态环境为目的的中期治理阶段,是一个从多元化的小流域治理过渡到集中连片、大规模林草建设阶段,特别是退耕还林还草的近 10 年(1998—2007 年)。为了解不同时期研究区输沙量变化情况,以 1970 年为界,将 1970 年以前作为分析对比的基准期,1970 年以后作为治理期,从 1955—1969 年、1970—2007 年、1970—1989 年、1990—2007 年、1990—1998 年及 1998—2007 年 6 个不同时间层次来分析黄河中游输沙与减沙特征。

(3)一般认为,黄土高原泥沙输移比为 1^[11],即输沙量等于侵蚀量,因此,输沙模数就等于侵蚀模数^[12]。本研究土壤侵蚀强度根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),分为微度(<1 000 t/(km²·a))、轻度(1 000~2 500 t/(km²·a))、中度(2 500~5 000 t/(km²·a))、强烈(5 000~8 000 t/(km²·a))、极强烈(8 000~15 000 t/(km²·a))、剧烈(>15 000 t/(km²·a))6 个等级。

(4)采用水文法^[13]计算降雨和人类活动对输沙量变化的影响和贡献率。

2 结果与分析

2.1 黄河中游输沙量年际变化与减沙幅度分析

图 2 为黄河中游 1955—2007 年输沙量年际变化特征图。从图 2(a)可以看出,1955—2007 年黄河中游年输沙量总体呈减小趋势;20 世纪 70 年代以前,年输沙量减小幅度的较小,且大部分都在年平均值以上,实测多年平均输沙量为 142 908.0 万 t,输沙模数为 5 043.0 t/(km²·a),属强烈侵蚀;70 年代以后年输沙量减大幅度相对较大,且大部分都在平均值以

下,实测多年平均输沙量为 83 545.0 万 t,输沙模数为 2 684.2 t/(km²·a),属中度侵蚀,70 年代后期较前期减沙 46.8%。

虽然 20 世纪 70 年代以后输沙量总体趋势是下降的,但在不同时期其变化趋势不同,如图 2(b)所示,1970—1989 年输沙量呈下降趋势,多年平均输沙量为 94 254.5 万 t,输沙模数为 3 326.1 t/(km²·a),属中度侵蚀,较 70 年代前减沙 34.1%;1990—

1998 年亦呈下降趋势,多年平均输沙量为 77 825.2 万 t,输沙模数为 2 746.3 t/(km²·a),属中度侵蚀,较 70 年代前减沙 44.3%;1998—2007 年下降趋势明显,多年平均输沙量为 36 864.0 万 t,输沙模数为 1 300.9 t/(km²·a),属轻度侵蚀,较 70 年代前减沙 74.2%;1990—2007 年,多年平均输沙量为 55 852.6 万 t,输沙模数为 1 970.9 t/(km²·a),属轻度侵蚀,较 70 年代前减沙 51.5%。

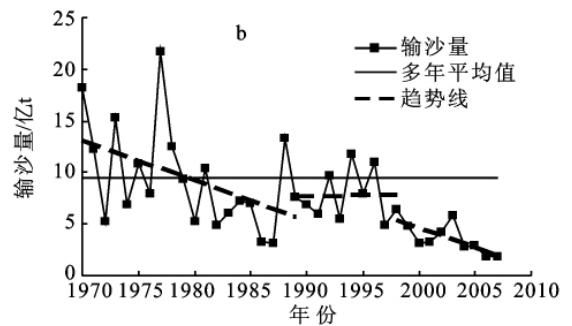
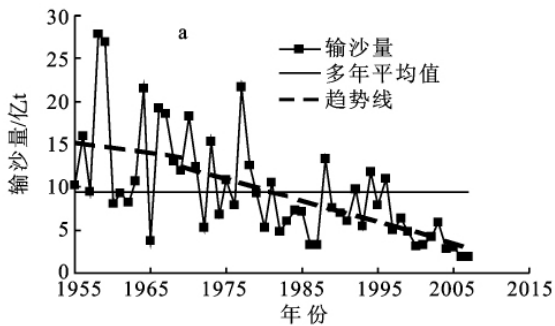


图2 黄河中游输沙量年际变化特征

黄河中游输沙量总体减少的原因可能有二个:(1)近年来,气候暖、干化趋势加强,降雨总体上呈现减少趋势^[4,14],从而使得输沙量的变化受到一定影响。(2)20 世纪 70 年代以来,大规模水利水保工程措施的开展,如水库、淤地坝、梯田、林草建设,特别是退耕还林(草)工程的实施,起到了一定的拦蓄作用,从而使中游的输沙量减少。

2.2 黄河中游不同区间输沙量年际变化与减沙幅度分析

图 3 分别列出了黄河中游北部河龙区间、南部北洛河和泾渭河、东部汾河 1955—2007 年输沙量的年际变化特征。可以看出,20 世纪 70 年代以前,各区间输沙量变化幅度较大,除汾河外,河龙区间、泾渭河、北洛河的输沙量均呈增加趋势。输沙量的增加可能与该时期内发生的重大事件和政策有关,如大开荒、大跃进、文化大革命等人为活动的影响导致的^[15]。70 年代以后,各区间输沙量均呈减小趋势,且大部分在平均值以下,但北洛河在 1994 年输沙量高达 26 300 万 t,原因是 1994 年 8 月北洛河上游降特大暴雨(暴雨中心沙集 12 h 的雨量达 383 mm,最大 1 h 雨强达 120 mm),发生了历史上罕见的特大洪水(最大洪峰流量达 7 040 m³/s),导致北洛河洪水猛涨,输沙量猛增^[16]。

20 世纪 70 年代后,各区间输沙量在不同治理时期表现出不同的变化特征。1970—1989 年,不同区间输沙量均呈减小趋势;1990—2007 年,河龙区间、北洛河、泾渭河输沙量下降趋势均明显,而汾河的输沙量相对很低,多年平均输沙量为 180.1 万 t,输沙模数为 1 851.6 t/(km²·a),属轻度侵蚀;但 1990—

1998 年河龙区间、北洛河、汾河输沙量均有增加,可能是因为 20 世纪 70 年代修建的淤地坝等措施的拦沙作用降低,以及矿山、建设用地的增加造成输沙量增加^[17];1998—2007 年各区间输沙量的减少与退耕还林还草的实施有很大的关系。

比较黄河中游各区间 1955—1969 年、1970—2007 年、1970—1989 年、1990—2007 年 1990—1998 年、1998—2007 年不同时期的年均输沙量与减沙幅度(表 1)可以看出,黄河中游各区间在不同治理时期输沙量较基准期均呈减少趋势,而各区间减沙最大的时期均为 1998—2007 年,即退耕还林(草)工程实施以后,其中:中游北部河龙区间的平均输沙模数为 1 774.4 t/(km²·a),属轻度侵蚀,较 70 年代前减沙 79.6%;中游南部泾渭河的平均输沙模数为 1 577.1 t/(km²·a),属轻度侵蚀,较 70 年代前减沙 64.0%;中游南部北洛河的平均输沙模数为 1 750.8 t/(km²·a),也属轻度侵蚀,较 70 年代前减沙 56.5%;中游东部汾河的平均输沙模数仅为 3.0 t/(km²·a),属微轻度侵蚀,较 70 年代前减沙 99.8%。

不同治理时期各区间减沙比例最大的是汾河(平均减沙 89.8%),其次依次为河龙区间(平均减沙 58.1%)、泾渭河(平均减沙 44.9%)、北洛河(平均减沙 35.0%)。各治理时期汾河减沙最为明显的原因有二个^[18-20]:(1)20 世纪 50 年代以来,山西省陆续在汾河流域的干支流上兴建了汾河、文峪河、子洪等 14 座大中型水库和大量的引水灌溉工程,起到了很好的蓄水拦沙的作用;(2)山西省对汾河水土流失治理的高强度集中投入,营造水土保持林、封山育林、修建淤

地坝等措施,起到了高效拦截泥沙的作用。而不同治理时期北洛河减沙幅度最小,原因是该区横跨著名的

子午岭林区和黄龙山林区,原本植被就较好,土壤侵蚀相对较轻^[21]。

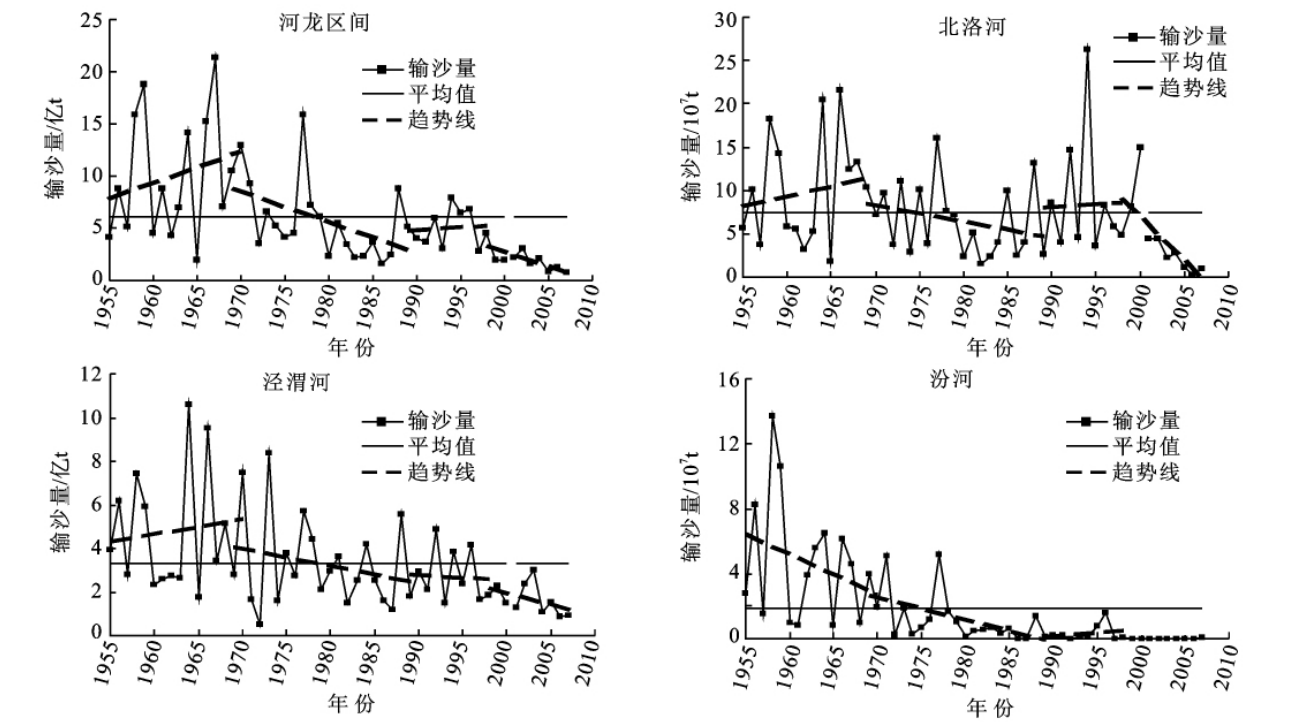


图 3 黄河中游不同区间输沙量的变化趋势

表 1 黄河中游不同区间不同治理时期的减沙幅度

时 段	项 目	中游(北)	中游(南)		中游(东)
		河龙区间	泾渭河	北洛河	汾河
1955—1969 年	平均值/万 t	98336.7	46586.7	10124.9	4751.7
	减沙比例/%	—	—	—	—
1970—2007 年	平均值/万 t	45584.2	27971.7	6500.8	706.8
	减沙比例/%	53.6	40.0	35.8	85.1
1970—1989 年	平均值/万 t	56249.5	32998.5	6357.2	1180.9
	减沙比例/%	42.8	29.2	37.2	75.2
1990—2007 年	平均值/万 t	33733.9	22386.4	6657.2	180.1
	减沙比例/%	65.7	52.0	34.3	96.2
1990—1998 年	平均值/万 t	50247.4	28188.9	8964.4	351.1
	减沙比例/%	48.9	39.5	11.5	92.6
1998—2007 年	平均值/万 t	20050.3	16795.5	4404.0	11.7
	减沙比例/%	79.6	64.0	56.5	99.8

2.3 河龙区间主要支流减沙幅度分析

由于受降雨和水利水保措施空间分布不均匀等因素的影响,不同流域的输沙量变化存在一定差异。对河龙区间 22 条主要支流不同治理时期的输沙量进行统计表明(表 2),不同治理时期各支流的输沙量较基准期均减少,各支流减沙最大的时期是 1998—2007 年(平均减沙 83.1%),减沙最小的时期是 1970—1989 年(平均减沙 36.5%)。

20 世纪 70 年代后,输沙量较 70 年代前减沙幅度在 70%以上的为岚漪河 73.9%、州川河 71.9%、三川河 70.3%;减沙幅度在 50%~70%之间的有浑河、偏

关河、秃尾河、佳芦河、无定河、昕水河、仕望河、蔚汾河、湫水河,在 30%~50%之间的有黄浦川、清水河、县川河、孤山川、窟野河、清涧河、延水、屈产河;小于 30%的有朱家川、汾川河。

各支流 1990—2007 年较 1970—1989 年减沙幅度普遍提高,其中减沙幅度提高 50%以上的为清水河、黄浦川、窟野河、孤山川、仕望河。清水河 1990—2007 年平均输沙模数为 4 292.0 t/(km²·a),属中度侵蚀,减沙幅度较 1970—1989 年提高 59.1%;黄浦川 1990—2007 年平均输沙模数为 6 067.1 t/(km²·a),属强烈侵蚀,减沙幅度较 1970—1989 年提高 57.0%;

窟野河 1990—2007 年平均输沙模数为 4 792.0 t/(km² · a),属中度侵蚀,减沙幅度较 1970—1989 年提高 54.8%;孤山川 1990—2007 年平均输沙模数为 5 756.3 t/(km² · a),属强烈侵蚀,减沙幅度较 1970—1989 年提高 54.5%;仕望河 1990—2007 年平均输沙模数为 173.6 t/(km² · a),属微度侵蚀,减沙幅度较 1970—1989 年提高 51.2%。虽然黄浦川和孤山川的减沙效益提高了,但仍然属于强烈侵蚀。

表 2 河龙区间不同治理时期主要支流的输沙量与减沙幅度

流域名	项目	1955—1969	1970—2007	1970—1989	1990—2007	1990—1998	1998—2007
浑河	平均值/万 t	2284.8	765.0	1175.7	308.7	509.9	128.3
	减沙比例/%	—	66.5	48.5	86.5	77.7	94.4
偏关河	平均值/万 t	1818.2	646.1	1001.2	251.6	415.7	104.6
	减沙比例/%	—	64.5	44.9	86.2	77.1	94.2
黄浦川	平均值/万 t	5835.6	3691.8	5267.6	1940.9	2803.4	1261.5
	减沙比例/%	—	36.7	9.7	66.7	52.0	78.4
清水河	平均值/万 t	926.1	603.4	862.6	315.5	513.8	121.6
	减沙比例/%	—	34.8	6.9	65.9	44.5	86.9
县川河	平均值/万 t	1059.3	669.6	905.0	408.0	690.1	130.7
	减沙比例/%	—	36.8	14.6	61.5	34.9	87.7
孤山川	平均值/万 t	2565.3	1462.3	2124.0	727.0	1039.5	435.5
	减沙比例/%	—	43.0	17.2	71.7	59.5	83.0
朱家川	平均值/万 t	675.2	491.8	598.3	373.4	590.2	203.3
	减沙比例/%	—	27.2	11.4	44.7	12.6	69.9
岚漪河	平均值/万 t	1676.5	437.4	538.9	324.6	509.4	161.7
	减沙比例/%	—	73.9	67.9	80.6	69.6	90.4
窟野河	平均值/万 t	11802.4	7284.7	10346.0	3883.3	7156.7	928.0
	减沙比例/%	—	38.3	12.3	67.1	39.4	92.1
秃尾河	平均值/万 t	2884.6	1274.9	1670.3	835.7	1407.1	337.8
	减沙比例/%	—	55.8	42.1	71.0	51.2	88.3
佳芦河	平均值/万 t	2432.8	827.3	1122.0	499.8	722.6	293.6
	减沙比例/%	—	66.0	53.9	79.5	70.3	87.9
湫水河	平均值/万 t	2960.5	1091.1	1610.9	513.5	689.2	358.3
	减沙比例/%	—	63.1	45.6	82.7	76.7	87.9
三川河	平均值/万 t	3385.6	1004.8	1397.7	568.3	890.3	259.3
	减沙比例/%	—	70.3	58.7	83.2	73.7	92.3
屈产河	平均值/万 t	1305.9	712.1	830.6	580.4	736.3	437.2
	减沙比例/%	—	45.5	36.4	55.6	43.6	66.5
无定河	平均值/万 t	20529.3	7564.4	8433.5	6598.7	8955.6	4659.6
	减沙比例/%	—	63.2	58.9	67.9	56.4	77.3
清涧河	平均值/万 t	4818.7	2982.4	2858.5	3120.0	3990.8	2514.3
	减沙比例/%	—	38.1	40.7	35.3	17.2	47.8
昕水河	平均值/万 t	2731.8	992.9	1303.1	648.2	913.1	393.1
	减沙比例/%	—	63.7	52.3	76.3	66.6	85.6
延水	平均值/万 t	6275.9	3636.7	3937.0	3303.0	4568.7	2111.5
	减沙比例/%	—	42.1	37.3	47.4	27.2	66.4
汾川河	平均值/万 t	314.1	237.6	311.8	155.1	227.0	91.1
	减沙比例/%	—	24.4	0.7	50.6	27.7	71.0
仕望川	平均值/万 t	360.2	134.2	221.5	37.2	58.3	14.9
	减沙比例/%	—	62.8	38.5	89.7	83.8	95.9
州川河	平均值/万 t	580.6	163.2	276.5	37.4	56.3	24.0
	减沙比例/%	—	71.9	52.4	93.6	90.3	95.9
蔚汾河	平均值/万 t	1440.5	525.0	706.8	323.0	506.8	160.9
	减沙比例/%	—	63.6	50.9	77.6	64.8	88.8

各支流 1998—2007 年较 1990—1998 年减沙幅度普遍提高,其中减沙幅度提高 50% 以上的为朱家

川、县川河、窟野河。朱家川 1998—2007 年的平均输沙模数为 $705.5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属微度侵蚀, 减沙幅度较 1990—1998 年提高 57.3%; 县川河 1998—2007 年的平均输沙模数为 $837.02 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属微度侵蚀, 减沙幅度较 1990—1998 年提高 52.8%; 窟野河 1998—2007 年的平均输沙模数为 $1\,073.4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属轻度侵蚀, 减沙幅度较 1990—1998 年提高 52.7%。

退耕还林(草)以来, 侵蚀强度达到轻度侵蚀及以下的流域有 16 个, 分别为: 浑河、偏关河、清水河、县川河、朱家川、岚漪河、窟野河、秃尾河、湫水河、三川河、无定河、昕水河、汾川河、仕望川、州川河、蔚汾河; 在中度侵蚀及以上的流域有 6 个: 黄浦川、孤山川、佳芦河、屈产河、清涧河、延水。因此, 对于达到轻度侵蚀及以下的流域应采取重点维护管理与治理并举, 对于中度侵蚀及以上的流域应重点加强治理。

2.4 降雨与人类活动对黄河中游输沙量变化的影响分析

黄河中游输沙量变化主要受降雨变化和人类活动的影响。降雨是流域产流产沙的直接影响因素, 通过影响径流量来间接作用于输沙量, 而人类活动的影响主要包括水利水电工程和水利水保工程两方面^[1]。

根据研究区的年输沙量和面降雨量数据, 建立治理前(1955—1969 年)的年降雨量和输沙量的回归方程:

$$S = 435.54P - 79093.896 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.470 \quad n = 15)$$

式中: S ——年均输沙量(万 t); P ——年均面降雨量(mm); n ——样本数。

将研究区 1970—2007 年各年的降雨数据分别代入式(1), 计算出未治理状态下研究区可能产生的沙量, 即天然产沙量。以此与治理后实测输沙量比较, 其差值即为人类影响减少的输沙量, 与治理前实测输沙量比较, 其差值即为降雨对输沙量变化的影响量。结果表明: 本研究区因降雨因素影响减少的输沙量为 25 145.2 万 t, 由人类活动影响减少的输沙量为 41 698.7 万 t; 降雨因素和人类活动对输沙量的贡献率分别为 37.6% 和 62.4%。

3 结 论

(1) 受气候暖干化和人类活动的影响, 黄河中游 1955—2007 年输沙量总体呈递减趋势, 20 世纪 70 年代后年平均输沙模数为 $2\,684 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属中度侵蚀, 较 70 年代前减沙 46.8%, 其中 1970—1989 年、1990—1998 年、1998—2007 年、1990—2007 年较 70 年代前分别减沙 34.1%、44.3%、74.2%、51.5%。

(2) 20 世纪 70 年代前, 除汾河外, 河龙区间、泾渭河、北洛河的输沙量均呈增加趋势, 而 70 年代以

后, 各区间输沙量总体呈下降趋势, 但不同治理时期存在一定差异, 其中退耕还林(草)时期(1998—2007 年)减沙幅度最大; 退耕还林还草实施以来, 汾河减沙最为明显, 其年平均输沙模数仅为 $3.0 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属微度侵蚀, 较 70 年代前减沙 99.8%, 其次依次是河龙区间(79.6%)、泾渭河(64.0%)、北洛河(56.5%)。

(3) 河龙区间各支流 20 世纪 70 年代后较 70 年代前减幅较大的为岚漪河 73.9%、州川河 71.9%、三川河 70.3%; 减幅最大治理时期为实施退耕还林(草)的 1998—2007 年(平均 83.1%)。退耕还林(草)以来, 各支流减沙幅度较 1990—1998 年普遍提高, 其中减沙幅度提高 50% 以上的有朱家川、县川河、窟野河, 平均输沙模数分别为 $705.5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $837.0 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $1\,073.4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

(4) 退耕还林(草)以来, 达到微度侵蚀的支流有汾河、浑河、偏关河、县川河、朱家川、岚漪河、三川河、昕水河、汾川河、仕望川、州川河; 轻度侵蚀的有泾渭河、北洛河、清水河、窟野河、秃尾河、湫水河、无定河、蔚汾河; 中度侵蚀的有黄浦川、孤山川、佳芦河、屈产河、延水; 只有清涧河属强烈侵蚀。

(5) 黄河中游因降雨影响减少的输沙量为 25 145.2 万 t, 因人类活动影响减少的输沙量为 41 698.7 万 t; 降雨因素和人类活动对输沙量的贡献率分别为 37.6% 和 62.4%。

参考文献:

- [1] 饶素秋, 霍世青, 薛建国, 等. 黄河上中游水沙变化特点分析及未来趋势展望[J]. 泥沙研究, 2001(2): 74-77.
- [2] 王兆印, 田世民. 黄河的综合治理方略[J]. 天津大学学报, 2008, 41(9): 1131-1135.
- [3] 钱乐祥, 王万同, 李爽. 黄河“地上悬河”问题研究回顾[J]. 人民黄河, 2005, 28(5): 1-6.
- [4] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近 50 年黄土高原水土流失的时空变化[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [5] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因[J]. 泥沙研究, 2004(2): 5-10.
- [6] 倪晋仁, 韩鹏, 王光谦, 等. 黄河中游水保措施对入黄干支流泥沙特性的影响: I. 泥沙粒径变化[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 32-38.
- [7] 冉大川. 黄河中游水土保持措施减沙量宏观分析[J]. 人民黄河, 2006, 28(11): 39-41.
- [8] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原水土保持减沙效益预测[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [9] 倪晋仁, 王光谦. 黄河中游水保措施对入黄干支流泥沙特性的影响: II. 减沙效益分析[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 126-132.

外,其它土地利用类型 VC 的变化对扎龙地区整个生态系统服务总价值的变化影响不大。

4 结 论

(1)从生态系统服务价值组成来看,湿地、水域和草地所表现出很高的生态服务价值,占生态系统总服务价值的 97% 以上,说明扎龙自然保护区生态系统的服务价值主要是通过湿地、水域和草地体现出来。

(2)对比 1989 年、1999 年、2006 年扎龙自然保护区生态价值得出生态系统服务价值表现出明显的下降趋势,由原来的 $7.511\ 65\times 10^9$ 元降为 $7.269\ 79\times 10^9$ 元,价值损失为 $2.418\ 6\times 10^8$ 元,损失率为 3.22%。1989—1999 年和 1999—2006 年两个时间段,后一时间段的生态系统服务价值减少量和变化率明显小于前一时间段,说明扎龙自然保护区生态环境恶化趋势正在逐步减缓。

(3)对扎龙自然保护区生态系统单项服务功能的价值分析,废物处理功能、水源涵养功能和气候调节功能的价值贡献最大,占生态系统总服务价值的 79% 以上,是扎龙自然保护区生态系统服务功能的主要表现形式。

(4)各土地利用类型的敏感性指数均小于 1,说明他们对生态系统价值变化缺乏弹性。其中湿地的敏感度指数为 0.88,而其它土地利用类型的敏感度指数均在 0.1% 以下,说明对扎龙地区整个生态系统服务价值影响较大的土地类型为湿地,因此加强对湿地的保护是保持扎龙地区生态系统服务价值的重要途径。

(上接第 72 页)

- [10] 冉大川. 黄河中游水土保持措施减沙量宏观分析[J]. 人民黄河,2006,28(11):39-41.
- [11] 景可. 长江上游泥沙输移比初探[J]. 泥沙研究,2002(1):53-59.
- [12] 景可,师长兴. 流域输沙模数与流域面积关系研究[J]. 泥沙研究,2007(1):17-23.
- [13] 熊贵枢. 黄河流域水利水保措施减少减沙分析方法简述[J]. 人民黄河,1994,17(11):33-36.
- [14] 张建兴,马孝义,金娜. 气候变化对黄河中游河龙区间径流量的影响分析[J]. 水土保持研究,2007,14(4):197-201.
- [15] 张世杰,焦菊英,李林育,等. 黄河河龙区间河流泥沙对相关重大事件与政策的响应[J]. 地理科学,2009,29(6):905-910.
- [16] 景效礼,宋志林. 陕西省北洛河“94·8”暴雨洪水分析[J]. 水文,2000,20(1):56-59.
- [17] 闫云霞,许炯心,廖建华,等. 黄土高原多沙粗沙区高含沙水流发生频率的时间变化[J]. 泥沙研究,2007(4):27-33.
- [18] 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):57-64.
- [19] 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):72-78.
- [20] 张健. 汾河上游水土保持综合治理工程成绩斐然[J]. 中国水土保持,2005(10):9-10.
- [21] 刘斌,冉大川,罗全华,等. 北洛河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J]. 人民黄河,2001,23(2):12-14.
- [1] 毕晓丽,葛剑平. 基于 IGBP 土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估[J]. 山地学报,2004,22(1):48-53.
- [2] 谢春花,王克林. 土地利用变化对洞庭湖区生态系统服务价值的影响[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(2):191-195.
- [3] 梁欣,臧淑英,张思冲. 基于土地利用变化的生态服务价值损益估算:以大庆市为例[J]. 自然灾害学报,2006,15(2):68-72.
- [4] 杨忠东,谷松岩,邱红,等. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究[J]. 遥感学报,2004,8(2):113-120.
- [5] Costanza R, d'Arge R, Groot R, et al. The value of the worlds ecosystem and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(5):253-260.
- [6] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [7] 陈克龙,李双成,周巧富,等. 近 25 年来青海湖流域景观结构动态变化及其对生态系统服务功能的影响[J]. 资源科学,2008,30(2):274-279.
- [8] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接评价[J]. 生态学报,2004,24(6):1101-1110.
- [9] 蔡庆华,唐涛,邓红兵. 淡水生态系统服务及其评价指标体系的探讨[J]. 应用生态学报,2003,14(1):135-138.
- [10] 张华,武晶,孙才志,等. 辽宁省湿地生态系统服务功能价值测评[J]. 资源科学,2008,30(2):267-273.
- [11] 毛德华,吴峰,李景保,等. 洞庭湖湿地生态系统服务价值评估与生态恢复对策[J]. 湿地科学,2007,5(1):39-44.
- [12] 王宗明,张柏,张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究[J]. 自然资源学报,2004,19(1):55-61.
- [13] 喻建华,高中贵,张露,等. 昆山市生态系统服务价值变化研究[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(2):213-217.