

黄河流域近期水沙变化及其趋势预测

姚文艺^{1,2}, 冉大川^{1,2}, 陈江南^{1,2}

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘要: 针对黄河水沙近期发生显著变化的现象, 利用黄河上中游干支流水文泥沙定位观测资料, 综合“水文法”、“水保法”和数学模拟等多种方法, 对黄河流域1997—2006年水沙变化情势进行了评估, 分析了水沙变化机制, 并预测了未来的变化趋势。分析表明, 与多年平均相比, 黄河河源区径流量年均减少43.90亿 m^3 , 其中降雨等自然因素的影响量占92.26%, 人类活动影响量占7.74%; 与1970年前相比, 黄河实测径流量年均减少112.1亿 m^3 , 其中水利水土保持综合治理等人类活动作用占76.50%, 因降雨影响占23.50%; 实测输沙量较1970年以前年均减少11.80亿t, 其中水利水土保持综合治理等人类活动的作用为49.75%, 降雨的影响为50.25%; 人类活动与降雨变化对水沙变化的影响差异较大, 就黄河中游地区总体而言, 人类活动的减水作用远大于降雨的影响, 人类活动的减沙作用与降雨影响基本相当, 不宜笼统说黄河中游水沙变化主要是人类活动所致或主要是降雨变化所致; 2050年以前黄河来水来沙量总体呈平偏枯趋势, 但不排除个别年份或短时段仍会发生丰水丰沙的可能性。

关键词: 减水减沙; 水沙变化机制; 来水来沙预测; 黄河流域

中图分类号: TV152; P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)05-0607-10

黄河以水少沙多、含沙量高而著称, 其多年平均输沙量16亿t, 天然径流量为534.8亿 m^3 。随着气候变化和人类活动的不断加剧, 黄河水沙情势发生明显变化, 并引起一系列新的问题, 如河道萎缩、“二级悬河”加剧、断流频繁发生等。水利部于1987年专门设立“黄河水沙变化研究基金”资助专项研究^[1-2]。同时, 在国家自然科学基金等项目资助下; 评估了1996年以前黄河流域水利水土保持措施的减水减沙量, 明晰了各项措施的贡献率, 预测了未来水沙变化趋势, 为黄河治理开发决策与大型水利工程建设提供了基础数据。近年来, 胡春宏等^[3]分析了包括黄河在内的11条中国江河水沙变化趋势与主要影响因素, 认为黄河河口镇—龙门(简称河龙区间)因20世纪70、80、90年代降雨量较基准期1969年以前减少7%、11%和13%, 使年输沙量相应减少68.5%、48.9%和57.1%。1996年以来, 黄河水沙进一步发生显著变化, 实测径流量、输沙量急剧减少, 如黄河中游龙门、华县、河津、状头等断面的输沙量只有多年均值的1/3, 对黄河治理开发带来重大影响, 再次成为人们关注的热点。针对近期黄河水沙变化, 许炯心^[4]对黄河多沙粗沙区的水沙变化成因进行了分析, 认为1997—2007年多沙粗沙区产沙量变化与降水量变化的关系不大, 水利水土保持等人类活动已经完全改变了产沙量与降水量的关系, 成为支配产沙过程的主导因素; 吴荣等^[5]根据1957—2005年黄河中游河龙区间水沙变化特征, 也认为水利水土保持是该区水沙变化主要原因; 赵广举等^[6]通过对20世纪50年代到2009年黄河中游水沙系列资料的统计, 认为气候变化、降雨、水土保持等人类活动是水沙变化的主要影响因素; 高旭彪等^[7]分析了1986年以来黄河中游降水特点及其对入黄泥沙量的影响, 认为降水变化对入黄泥沙量的影响相当于泥沙变化量的30%~60%, 李焯^[8]的分析结论与文献^[7]基本一致。然而, 目前对1996年以来黄河流域水沙变化成因与机制仍缺乏系统分析, 同时, 以往分析中大多关注降雨总量, 对降雨强度的影响考虑不够, 也缺乏对未来水沙变化趋势的定量预测, 国外研究除很少涉及黄河流域外, 也缺乏对降雨、下垫面、人类活动等因子对大尺度流

收稿日期: 2012-04-17; **网络出版时间:** 2013-08-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20130814.1037.009.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB403303); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB06B01)

作者简介: 姚文艺(1957-), 男, 河南周口人, 教授级高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、河流泥沙方面的研究。E-mail: wyyao@yrihr.com.cn

域水沙变化影响的分析实例。为此,本文利用“水文模型计算法”(简称“水文法”)、“水土保持计算法”(简称“水保法”)与数学模型模拟等多种方法,综合考虑降雨强度、下垫面、人类活动、未来气候变化及水文周期变化等多因素,对1997—2006年黄河水沙变化成因进行系统分析与评价,并定量预测未来不同水平年的黄河水沙变化情势。

1 研究区域与资料

1.1 研究区域

黄河径流量主要来源于上游,而泥沙则主要来自于中游,因此以黄河河源区、中游地区作为重点研究区域,预测范围为黄河花园口断面以上区域。黄河河源区指黄河干流唐乃亥水文站以上区域,集水面积12.2万 km^2 (图1)。尽管河源区面积只占黄河流域面积的16%,但天然径流量占黄河流域的40%左右,为205.2亿 m^3 。河源区多年平均降水量为485.9 mm,蒸发量为1 200~1 600 mm。河源区降水量年际变化幅度小于天然径流量的变化幅度,前者最大最小比值为1.58~1.91,而后者则达到2.38~3.03。河源区海拔4 000~5 000 m,占优势的地貌类型是宽谷和河湖盆地,自玛多县玛查理至共和县唐乃亥区间,大部分为高山峡谷地貌,其中兼有开阔的谷地和高原湖泊沼泽、草原荒漠和青藏高原高寒草地。河源区湿地总面积1.5万 km^2 ,主要包括星宿海、扎陵湖、鄂陵湖、玛多、热曲、首曲、若尔盖等部分。



图1 研究区域

Fig. 1 Study area

黄河中游地区主要包括河龙区间的支流和泾河、北洛河、渭河与汾河(简称泾洛渭汾)流域,面积26.6万 km^2 ,其沙量占全河的90%以上。河龙区间流域面积11.4万 km^2 ,占黄河流域面积的15.1%,产流量不足全流域的14%,但产沙量却占到60%以上。河龙区间和泾洛渭汾流域也是黄河下游河道主要淤积物粗泥沙(粒径大于0.05 mm)的主要来源区,其数量占全河粗泥沙量的94.6%,其中河龙区间产生的粗泥沙占70%左右。根据支流水文站观测断面控制情况,河龙区间分为已控区和未控区。已控区指河龙区间支流水文观测断面以上的区域,而没有控制的区域称为未控区,其面积占河龙区间面积的23.3%。未控区除有个别雨量站外,均无实测水沙资料。

1.2 资料

水土保持措施资料包括河龙区间和泾洛渭汾流域1997—2006年的梯(条)田、淤地坝坝地、造林、种草和封禁治理面积。水土保持措施数量系利用25条代表小流域野外调查勘测、1997—2006年水土保持措施报表统计、遥感影像解译、39个典型样区核查分析、数理统计和专家咨询等多种方法结合确定的。1997—2006年,梯(条)田面积由1.997 7万 km^2 增加到2.854 0万 km^2 ,淤地坝坝地面积由0.096 9万 km^2 增加到0.130 0万 km^2 ,林地由2.717 7万 km^2 增加到5.861 3万 km^2 ,草地由0.693 9万 km^2 增加到1.407 3万 km^2 ,封禁治理从0.260 1万 km^2 增加到0.838 0万 km^2 ,其中以封禁治理、林地和草地面积增加率较高,均在100%以上。不包括封禁治理面积,到2006年其他措施治理面积为10.252 6万 km^2 。

河源区水文泥沙资料主要包括黄河沿、吉迈、玛多、玛曲、唐乃亥等观测站1950—2010年的气温、蒸发量、降雨量和径流量等。河龙区间21条支流及泾洛渭汾4条支流的水文泥沙资料,包括1950—2010年的逐日降雨量、逐日流量和输沙量等。

2 研究方法

2.1 水沙变化成因分析方法

为与以往研究成果衔接,仍以1970年作为黄河中游地区水土保持治理发挥效益的水沙系列年分界点^[1-2],根据降雨径流双累积曲线法统计,河源区的分界点则为1990年^[9]。减水减沙效益计算方法采用“水文法”和“水保法”或称成因分析法。所谓“水文法”就是利用治理前基准期的实测水沙资料建立降雨产流产沙数学模型,然后将治理后的降雨因子代入所建模型,计算出相当于治理前的产流产沙量,再与治理后的实测水沙量进行比较,其差值即为治理后的减水减沙量。以往成果所建模型中的降雨因子主要为降雨量,考虑到黄河中游大部分地区以超渗产流为主,降雨强度为产流产沙的主导因子,因此,在考虑雨量、雨强和空间分布共同影响的基础上,建立降雨产流产沙经验模型。所谓“水保法”或成因分析法就是通过分析水土保持试验站的径流小区观测资料,确定各项水土保持措施减水减沙指标,按各类措施分项计算,逐项线性叠加,由此得到流域水土保持措施减水减沙效益。按减水减沙指标确定方法,“水保法”又分为“以洪算法”和“指标法”等,本文同时采用这两种方法。

2.2 未来天然径流量预测方法

以黄河花园口断面现有天然径流量序列为本底,收集研究区域及相同气候区古树年轮资料、历史旱涝等级及相邻河流所重建的数百年径流量序列资料,重建花园口断面数百年天然径流量序列,并根据历史演变规律,分析花园口断面天然径流量未来变化趋势。古树年轮资料采自于阿尼玛卿山、甘肃卓尼卡车林场、陕西省双龙林场、周至县后畛子保护站等地,同时还广泛收集了流域及相邻范围内数十个树轮年表。旱涝等级资料包括中央气象局的《中国近五百年旱涝等级分布图集》给出的120站1470—1979年的旱涝分布图和旱涝等级序列表,以及续补到2000年的资料^[10-11]。

2.3 人类活动干扰后的来水来沙量预测方法

包括基于统计降尺度技术的SWAT数学模型模拟方法和“水保法”。对SWAT模型中地表径流、壤中流和地下径流的产流机制进行了改进,使之具有判别产流机制类型并能模拟超渗产流的功能^[9]。用改进后的SWAT模型预测A2和B2两种气候变化情景下^[12]典型支流在未来不同气候和人类活动条件下的产水产沙量,由不同模拟分区径流泥沙量占花园口断面径流泥沙量的权重及其对应的面积权重推算未来花园口断面的径流量、泥沙量。数学模型模拟方法是在模拟流域现状下垫面边界条件下,考虑未来气候变化的初始条件,对逐条支流未来产水产沙情势进行预测,预测的基准是现状水沙系列;“水保法”采用的未来水土保持措施量为《黄河流域综合规划》^[13]中的数据,黄河取水量、耗水量引自《黄河流域水资源综合规划》^[14]。实际上“水保法”是直接在于现状人类活动产生影响的水沙系列基准水平上,按照未来治理措施规模、分布及用水用沙等参数,对未来水平年的来水来沙量进行预测分析的。因而,无论数学模拟法还是“水保法”的预测结果均反映了1998—2050年间人类活动(如水利水土保持工程等)对水沙系列产生的影响。

3 黄河流域水沙变化及成因

3.1 降雨变化

与1956—1996年相比,1997—2006年黄河上中游地区降雨量有所减少,年均降雨量减少3%~11%,2000年以来全流域平均降雨量减少2.7%。虽然降雨量减少并不明显,但降雨强度明显降低,且降雨量年内分配发生改变。例如,近年多数支流5~10mm的低强度降雨天数增加,而大于10mm的中大降雨天数减少。同时,多数支流最大1d和最大3d降雨量减小,说明降雨强度降低。不过诸如无定河等部分支流的最大1d和最大3d降雨量是增大的,表明在支流的局部地区仍会发生强降雨过程。从年内分配变化看,河源区6~9月降雨量较多年同期均值约偏少4%,河龙区间和龙门—三门峡区间主汛期降雨量减幅达17%和10%,而秋汛期却增加18%和7%。

3.2 河源区水沙变化与成因

黄河河源区水沙变化的分界点为1990年^[9]。在1997—2006年平均降雨量较1990年之前减少不足4%的条件下,其年均径流量则明显减少,由后者的212.3亿m³减至168.4亿m³,减少43.90亿m³(表1),减幅达到21%。不过来水量年内分配没有发生变化,7~10月来水量仍占年径流量的60%左右。

表1 黄河源区主要水文站实测年均径流量

Table 1 Observed average annual runoff in main hydrological stations in Yellow River source area

水文站	不同时段实测径流量/亿 m ³							
	1950—1959	1960—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2006	1997—2006	1956—2000
黄河沿	5.05	6.44	8.82	10.88	5.04	1.60	2.04	7.27
吉迈	29.77	40.09	43.00	47.67	34.25	31.15	32.69	39.68
玛曲	112.2	154.5	145.3	168.5	128.1	116.8	121.9	145.1
唐乃亥	188.1	216.5	203.9	241.1	176.0	159.7	168.4	203.9

以1956—1990年系列作为天然条件下的对比基准期,根据该系列资料统计,黄河源区年降水量、前一年降水量、水面蒸发能力、草地退化率具有以下关系:

$$R_t = 6.93 \exp(0.004P_{t-1}) + 26.22 \exp(0.004P_t) + 3753E_t^{-1.626} - 88.99U_t - 60.20 \quad (1)$$

式中 R_t 为唐乃亥站天然年径流深, mm; P_t 为唐乃亥站以上当年降水量, mm; P_{t-1} 为唐乃亥站以上前一年降水量, mm; E_t 为黄河沿站年水面蒸发能力, mm; U_t 为黄河源区草地年际退化速率, 用负百分数表示。经验证, 式(1)复相关系数为0.93, 最大相对误差不超过 $\pm 25\%$, 累积误差在5%以下。经分析, 1956—1990年系列有一定代表性, 包含了丰平枯系列样本, 1997—2006年属于典型的枯水系列年, 因此, 利用式(1)评估1997—2006年天然径流量变化, 降雨系列不涉及外延问题, 或者说不存在插补误差。

据1997—2006年实测降水量、年水面蒸发能力、草地退化率, 由式(1)得到1997—2006年黄河源区应产生的天然径流量年均约为173.0亿m³, 较1956—1990年的平均值213.5亿m³减少40.50亿m³, 占总减水量43.90亿m³的92.26%, 这是自然因素变化造成的; 其余3.40亿m³是由于人类活动影响造成的, 占7.74%。在自然因素中, 降水、蒸发、生态环境的影响作用分别占51.60%、34.10%和14.30%。

3.3 中游地区水沙变化与成因

3.3.1 水沙变化量

与1970年以前相比, 1997—2006年黄河中游地区实测径流量年均减少112.1亿m³, 输沙量年均减少11.80亿t, 其中河龙区间实测径流量年均减少43.60亿m³, 输沙量相应减少7.77亿t; 泾洛渭汾流域实测径流量年均减少57.50%, 达68.52亿m³, 输沙量年均减少65.1%, 达到4.033亿t(表2)。

表2 黄河中游地区实测年径流量和年输沙量
Table 2 Observed annual runoff and sediment transport in the middle reaches of the Yellow River

河流(区间)	时段	年径流量/亿 m ³	年输沙量/亿 t
河龙区间	1950—1969	73.30	9.941
	1997—2006	29.70	2.172
泾河	1950—1969	19.14	2.731
	1997—2006	10.71	1.375
北洛河	1950—1969	7.736	0.960
	1997—2006	4.666	0.401
渭河 (华县以上)	1950—1969	71.72	1.596
	1997—2006	32.23	0.383
汾河	1950—1959	20.55	0.908
	1997—2006	3.020	0.003
合计	1970年以前	192.4	16.14
	1997—2006	80.33	4.334

3.3.2 水沙变化成因

(1) 水量变化成因 由“水文法”和“水保法”计算知, 1997—2006年黄河中游地区水利水土保持综合治理等人类活动年均减水量85.78亿~87.12亿m³, 占年均总减水量112.12亿m³的76.5%~77.7%; 由“水文法”计算, 因降雨减少造成的年均减水量约26.34亿m³, 占年均总减水量的23.5%。人类活动的减水作用远大于降雨的影响作用, 两者之比基本上为0.8:0.2。根据“水保法”

计算, 在人类活动中, 水土保持措施年均减水为38.38亿m³(包括减洪量26.87亿m³), 水库蓄水及其水面蒸发、灌溉等水利措施引起的年均减水48.74亿m³, 前者约为后者的80%。

“水文法”计算结果表明, 河龙区间水利水土保持综合治理等人类活动年均减水量29.90亿m³, 占该区

间年均总减水量 43.60 亿 m³ 的 68.6% ; 因降雨减少 10.2% 而引起的年均减水量为 13.70 亿 m³, 占年均总减水量的 31.4%。人类活动作用与降雨影响之比约为 0.7:0.3。根据“水保法”评估, 水利水土保持综合治理等人类活动年均减水量 26.80 亿 m³, 其中, 水土保持措施年均减水量 18.78 亿 m³ (包括减洪量 7.27 亿 m³), 水利措施年均减水量 8.02 亿 m³。与黄河中游地区平均情况不同, 水土保持措施减水作用大于水利措施的作用, 前者为后者的 2 倍多。

在泾洛渭汾流域, 由“水文法”计算, 人类活动年均减水 55.88 亿 m³, 因降雨减少 15.2% 而年均减少的水量为 12.64 亿 m³, 人类活动与降雨影响之比约为 0.8:0.2。

(2) 沙量变化成因 1997—2006 年黄河中游地区水利水土保持综合治理等人类活动年均减沙量为 5.24 亿~5.87 亿 t, 占年均总减沙量 11.80 亿 t 的 44.4%~49.7% ; 由“水文法”计算, 因降雨量减少而年均减沙量约 5.93 亿 t, 占年均总减沙量的 50.3%。人类活动作用与降雨影响作用之比约为 0.5:0.5。根据“水保法”评估, 在人类活动中, 水土保持措施年均减沙量 4.19 亿 t, 水利措施减沙量 1.05 亿 t, 分别占“水保法”估算减沙量 5.24 亿 t 的 79.96% 和 20.04%。

在河龙区间(含未控区), 根据“水文法”计算, 1997—2006 年水利水土保持综合治理等人类活动年均减沙量 3.50 亿 t, 占该区间年均总减沙量 7.77 亿 t 的 45.0% ; 因降雨减少 10.2% 引起年均减沙量为 4.27 亿 t, 占年均总减沙量的 55.0%, 基本相近于胡春宏等^[3]分析的 20 世纪 90 年代降雨变化的影响权重。降雨影响比人类活动影响大 10%。综合“水保法”分析评估, 水土保持措施年均减沙量 2.71 亿 t, 水利措施年均减沙量 0.79 亿 t。

在泾洛渭汾流域, 由“水文法”计算, 人类活动年均减沙量 2.37 亿 t, 降雨作用年均减沙量 1.66 亿 t, 人类活动与降雨影响之比为 0.6:0.4。根据“水保法”估算, 水利水土保持综合治理等人类活动年均减沙量 1.92 亿 t, 其中水土保持措施年均减沙量 1.29 亿 t, 水利措施减沙量 0.63 亿 t。

以上分析表明, 水土保持措施在减沙方面起着主导作用。与河龙区间相比, 泾洛渭汾流域近期人类活动对减水减沙的作用更大, 且人类活动对径流泥沙减少的作用大于降雨变化的作用, 其中人类活动对径流变化的影响权重更大。

为进一步分析水沙变化的成因机制, 以黄河中游主要产沙支流皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河及清水河等为典型流域, 分析了降雨、洪水、泥沙之间关系的变化。根据典型流域年径流泥沙关系分析(图 2), 近年来各支流的年径流量及年输沙量均明显减少, 其坐标点据大都分布于坐标系的左下方。不过, 近年来的水沙坐标点据仍然沿 1997 年以前的趋势分布, 各年代的点据均基本分布于同一趋势带上, 就是说这些支流的年径流量与年输沙量发生同步减少, 而年径流泥沙之间的函数关系并没有变化。

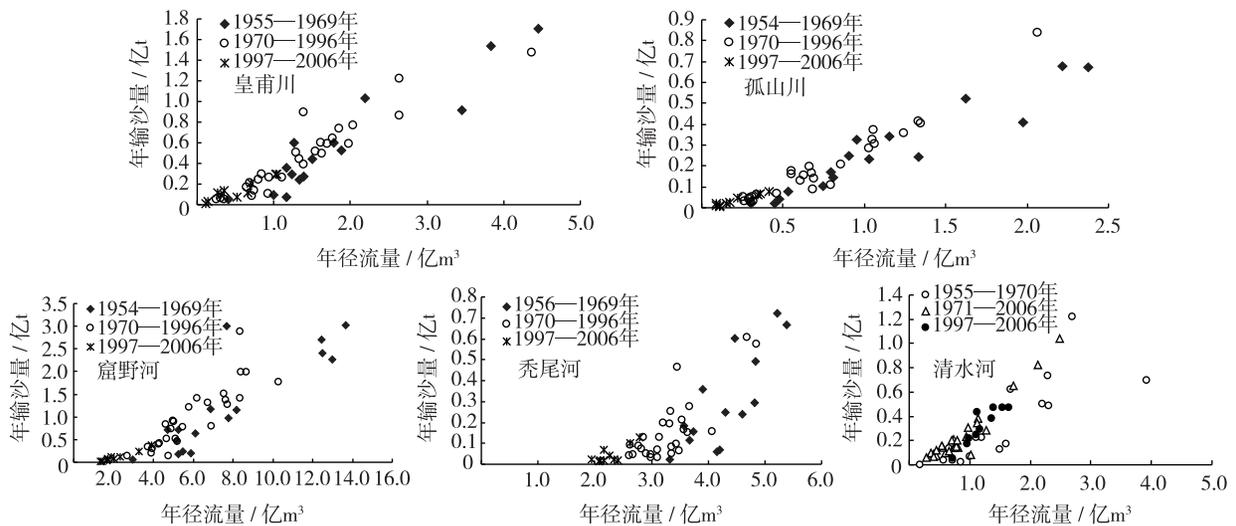


图 2 典型流域不同时段年径流与泥沙关系

Fig. 2 Annual runoff and sediment relation during various periods in typical watersheds

同样, 近年的次洪量与次洪沙量关系也表现出次洪量、次洪沙量同步减少, 而点据的分布仍然与其他年代的基本一致, 函数关系没有明显改变的特点(图3)。

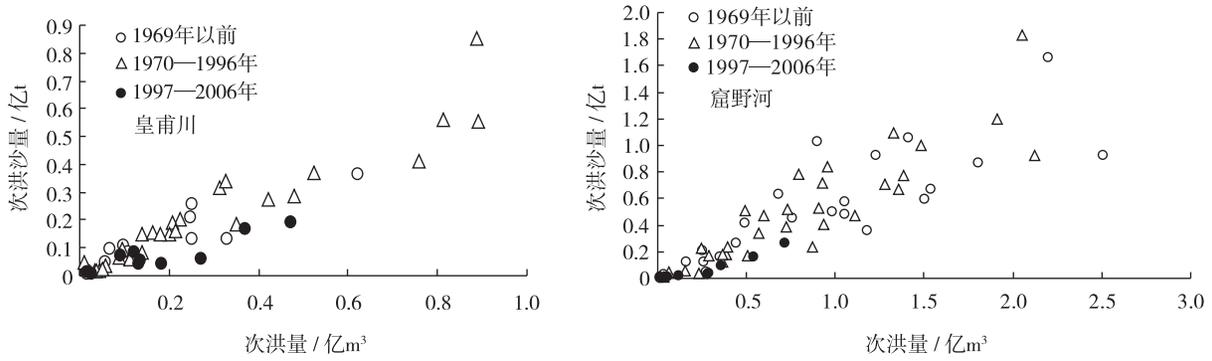


图3 典型流域不同时段次洪量与次洪沙量关系

Fig. 3 Flood and sediment relation during various periods in typical watersheds

为分析降雨产流产沙关系, 定义场次降雨强度与降雨量的乘积为降雨力 F_p , 即 $F_p = PI$, 反映降雨量与降雨强度的综合作用, 式中 P 为降雨量, I 为降雨强度。图4为皇甫川、窟野河两个代表流域降雨力与次洪流量、次洪沙量的关系。在皇甫川流域, 点据的分布特点与上述水沙关系的相近, 于降雨力明显减少的同时, 次洪沙量和洪峰流量都同时减少, 而其间的函数关系并没有发生明显改变。而在窟野河流域, 尽管近年的点据与以往年代的分布趋势基本一致, 但点据大多分布在其他年代的下方, 表明函数关系发生明显变化, 即在降雨力降低的同时, 单位降雨力的产沙量、产洪量也明显减少, 也就是说, 与往年相比, 近年窟野河次降雨的产流产沙能力降低。显然在考虑了降雨强度因子后, 得到的结论与许炯心在文献[4]中提出的认识并非完全一致。

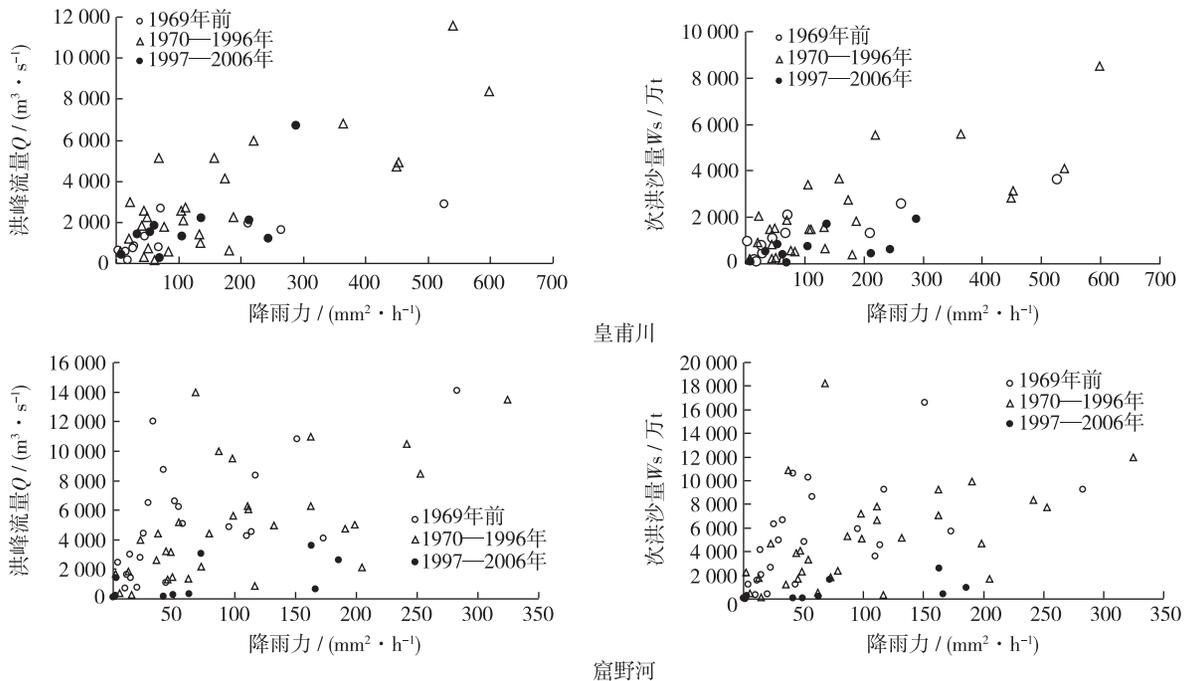


图4 典型流域降雨力与洪峰流量、次洪沙量关系

Fig. 4 Precipitation power, peak flood and sediment relations in typical watersheds

综上所述表明, 黄河中游地区大多支流的年径流泥沙关系、洪水泥沙关系的函数形式并没有变化, 即单位径流量的输沙量没有减少, 而是径流泥沙发生同步减少; 对于降雨洪水泥沙关系而言, 诸如皇甫川流域, 与其他年代相比, 1997—2006 年的函数形式也没有变化, 不过降雨力有明显降低, 所以产流产沙量较其前大大减少。但是, 窟野河流域的降雨洪水泥沙关系则发生变化, 单位降雨力的产流产沙能力降低。根据包括皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河和佳芦河等在内的陕西北片(图 5)降雨量变化过程, 自 20 世纪 80 年代以来, 最大 1 d、3 d 降雨量均明显减少, 实际上表明了相应时段内的雨强有所降低。因而, 降雨力的降低以及降雨洪水泥沙关系的变化主要是由于近年来雨强减少, 加之水土保持治理等人类活动的综合作用所致。1997—2006 年黄河水沙变化的机制并非在于径流泥沙关系的变化, 而主要在于降雨强度降低且强降雨有所减少, 以及部分流域单位降雨力的产流产沙能力降低。所以, 在有暴雨发生时, 黄河中游部分支流仍可能产生高含沙水流。

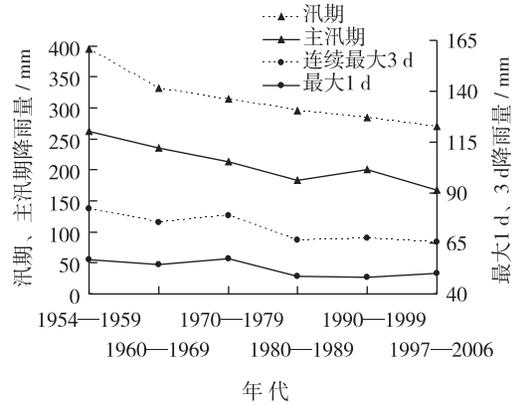


图 5 陕西北片不同时段降雨量变化过程

Fig. 5 Precipitation variation process in northern Shaanxi

4 未来水沙变化趋势分析

4.1 天然径流量

重建 1470—2007 年黄河花园口断面天然年径流量序列表明, 自 1470 年以来的 538 年内, 大体经历了 11 个枯水段和 10 个丰水段。对于 11 个枯水段来说, 其平均持续时间为 26.7 年, 最长为 66 年, 最短仅 9 年。枯水段年均天然径流量为 522.1 亿 m^3 , 较常年偏少 5.6%; 10 个丰水段的平均持续时间为 24.4 年, 最长 56 年, 最短仅 8 年, 该段年均天然径流量为 600.0 亿 m^3 , 较常年平均值偏多近 10%。功率谱分析也表明, 花园口断面 538 年天然径流量存在较为明显的周期性, 其中置信度超过 $\alpha = 0.05$ (即 F 比值 > 1.20) 的主要显著周期为 10 年、8 年、5 年、11 年、21 年、74 年、33 年和 231 年等。

统计分析发现, 取 10 年、182 年、21 年、8 年、11 年、95 年和 74 年的 7 个显著周期进行叠加拟合的效果较好, 1470—2007 年系列的相关系数高达 0.85。图 6 给出了花园口断面 1930—2007 年天然径流量的计算值与实际值的拟合情况, 可以看出, 两者的主要峰谷年都十分吻合, 由此对未来趋势外推是可信的。

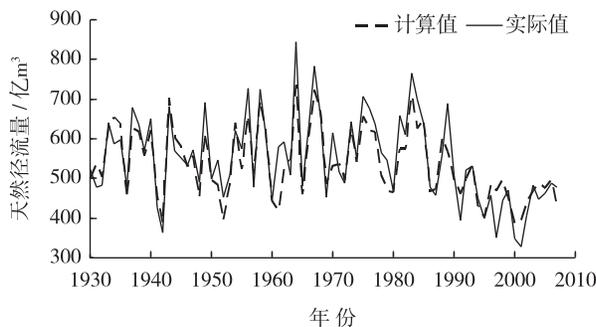


图 6 花园口断面天然年径流量拟合曲线

Fig. 6 Curve of natural runoff in Huayuankou section

根据周期叠加拟合成果, 推求花园口断面未来逐年天然径流量, 并以 7 年滑动平均的方法统计, 2020、2030、2040 和 2050 水平年的天然径流量分别为 513.7 亿 m^3 、534.8 亿 m^3 、563.5 亿 m^3 、537.0 亿 m^3 , 未来数十年花园口断面天然径流量的变化仍然表现出较为明显的阶段性, 与 1919—2007 年均值 543.8 亿 m^3 相比, 2020 水平年为枯水年, 2030 水平年属于平偏枯, 2040 水平年属于偏丰, 2050 水平年属于平偏枯。同时, 与《黄河流域综合规划》预测的 2020、2030 水平年花园口断面天然径流量 509.4 亿 m^3 、504.5 亿 m^3 相比, 本次相应时段的预测结果偏大 0.8% 和 6.0%, 差异较小。如果按高治定

等^[15]、张建云等^[16]预测的气温、降水及其与径流变化之间的关系推估, 2020、2050 水平年花园口断面天然径流量约为 509.1 亿 m^3 和 515.6 亿 m^3 , 分别较本次预测的同时段天然径流量 513.7 亿 m^3 、537.0 亿 m^3 相差

-0.90% 和 -3.99%，应该说也是比较接近的。

4.2 人类活动干扰后的来水来沙量

依据上述分析成果，综合考虑黄河上中游地区水沙变化特点，确定未来来水来沙量预测的现状水土保持措施减水减沙量分别为 35.00 亿 m^3 和 4.00 亿 t，入黄泥沙量的基准为多年平均值 16 亿 t。根据改进后的 SWAT 模型^[9]模拟及“水保法”预测，2020、2030、2050 水平年人类活动干扰后黄河花园口断面来水量分别为 229.1 亿 ~ 236.4 亿 m^3 、236.3 亿 ~ 244.3 亿 m^3 和 234.5 亿 ~ 240.6 亿 m^3 ；未来 2020—2050 年来沙量具有较为明显的阶段性特点，其中 2020、2030、2050 水平年的年输沙量分别为 9.96 亿 ~ 10.88 亿 t、8.61 亿 ~ 9.56 亿 t 和 7.94 亿 ~ 8.66 亿 t。

在预测中，以《黄河流域综合规划》和《黄河流域水资源综合规划》制定的未来 50 年黄河上中游地区建设的水利水土保持(包括植被修复)措施量、取水量和耗水量作为人类活动因素的指标；根据预测的花园口断面天然径流量水平年系列，以及考虑未来气候变化背景下预测的黄河上中游地区降雨量水平年系列作为自然因素的指标。就是说上述水沙预测结果考虑了自然因素和人类活动因素的变化趋势。从预测结果看，与黄河调水调沙后的 2003—2011 年花园口年均实测径流量 258.2 亿 m^3 相比，未来的来水来沙量会进一步减少，就 2020 水平年为例，来水量将减少 8.6% ~ 11.3%。由于降雨等条件的不确定性，并不排除期间个别年份或连续几年的来水量来沙量会大于预测的上限。

根据预测结果分析表明，水沙变化的趋势与流域水土保持治理程度密切相关。以平水年为例，随着水土保持生态建设规划实施，水土保持治理程度愈高，减水减沙幅度愈大。另外，不同来水情况下减沙量也不同，来水越多、来沙越多，减沙也越多。

5 结 论

(1) 与 1956—1990 年相比，黄河上中游地区年降雨量减少 3% ~ 11%；降雨量年内分配发生改变，如河源区 6 ~ 9 月降雨量较多年同期的偏少 4%，河龙区间和龙门—三门峡区间主汛期降雨量减幅达 17% 和 10%，但后两区的秋汛期降雨量却增加 18% 和 7%；小于 10 mm 的低强度降雨天数增加，大于 10 mm 的中、大雨天数减少，但局部地区仍会发生强降雨过程。

(2) 河源区径流减少的主要原因是自然因素，而不是人为因素，其中自然因素影响占 92.26%，人类活动因素影响占 7.74%。

(3) 与 1970 年前相比，黄河实测径流量年均减少 112.12 亿 m^3 ，根据“水文法”、“水保法”评估，其中水利水土保持综合治理等人类活动年均减水量为 85.78 亿 ~ 87.12 亿 m^3 ，因降雨量减少而引起的年均减水量为 26.34 亿 m^3 ，两者之比约为 0.8:0.2；实测输沙量年均减少 11.80 亿 t，其中水利水土保持综合治理等人类活动年均减沙量 5.24 亿 ~ 5.87 亿 t，因降雨量减少而引起的年均减沙量 5.93 亿 t，两者之比约为 0.5:0.5。因此，不宜笼统说黄河中游水沙变化主要是人类活动所致或主要是降雨变化所致。

(4) 黄河中游地区大多支流的年径流泥沙关系、洪水泥沙关系的函数形式并没有变化，即单位径流量的输沙量没有减少，而是径流泥沙发生同步减少；对于降雨洪水泥沙关系而言，有些支流的函数形式也没有变化，只是降雨量和降雨强度明显降低，致使产流产沙量较其前期大大减少，而有的支流则发生变化，降雨的产流产沙能力降低。因此，黄河中游水沙变化的机制视不同流域而不同，在有暴雨发生时，部分支流仍可能产生高含沙水流。

(5) 就模型模拟及“水保法”的预测结果平均而言，2020、2030、2050 水平年黄河花园口断面来水来沙量分别为 232.5 亿 m^3 、10.42 亿 t，240.0 亿 m^3 、9.09 亿 t，237.5 亿 m^3 、8.30 亿 t，总体呈平偏枯趋势，但不能排除个别年份或短时段内仍会发生丰水丰沙的可能性。

参考文献：

[1] 汪岗,范昭. 黄河水沙变化研究:第一卷[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002. (WANG Gang, FAN Zhao. Research on the Yellow

- River runoff and sediment variation; Volume I [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 汪岗,范昭. 黄河水沙变化研究:第二卷[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002. (WANG Gang, FAN Zhao. Research on the Yellow River runoff and sediment variation; Volume II [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press,2002. (in Chinese))
- [3] 胡春宏,王延贵,张燕菁,等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J]. 水科学进展,2010,21(4):524-532. (HU Chunhong, WANG Yangui, ZHANG Yanjing, et al. Variating tendency of runoff and sediment load in China major river and its causes[J]. Advances in Water Science,2010,21(4):524-532. (in Chinese))
- [4] 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. (XU Jiongxin. Trend sediment yield in the coarser sediment-producing area in the middle Yellow River basin in period 1997—2007 and the formative cause[J]. Journal Soil and Water Conservation,2010,24(1):1-7. (in Chinese))
- [5] 吴荣,陈高峰,张兴建. 黄河中游河口—龙门区间水沙变化特征分析[J]. 中国沙漠,2010,30(1):210-216. (WU Rong, CHEN Gaofeng, ZHANG Jianxing. Changes runoff and sediments in Hekou—Longmen section of the middle Yellow River[J]. Journal of Desert Research,2010,30(1):210-216. (in Chinese))
- [6] 赵广举,穆兴民,田鹏,等. 近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. 资源科学,2012,34(6):1070-1078. (ZHAO Guangju, MU Xingmin, TIAN Peng, et al. The variation trend of streamflow and sediment flux in the middle reaches of Yellow River over the past 60 years and the influencing factors[J]. Resources Science, 2012,34(6):1070-1078. (in Chinese))
- [7] 高旭彪,刘斌,李宏伟,等. 黄河中游降水特点及其对入黄泥沙量的影响[J]. 人民黄河,2008,30(7):27-29. (GAO Xubiao, LIU Bin, LI Hongwei, et al. Characteristics of precipitation in the middle reaches of the Yellow River and its impacts on the sediment transport into the Yellow River [J]. People's Yellow River,2008,30(7):27-29. (in Chinese))
- [8] 李焯. 黄河河口镇—龙门区间年输沙量变化成因分析[J]. 人民黄河,2008,30(8):41-42. (LI Zhuo. Causes analysis of annual sediment transport variation Hekouzheng—Longmen section in the Yellow River [J]. People's Yellow River,2008,30(8):41-42. (in Chinese))
- [9] 姚文艺,徐建华,冉大川. 黄河流域水沙变化情势评价研究[R]. 郑州:黄河水利科学研究院,2009:80-101. (YAO Wenyi, XU Jianhua, RAN Dachuan. Evaluation study on the runoff and sediment variation situation in the Yellow River[R]. Zhengzhou: Yellow River Institute of Hydraulic Research, 2009:80-101. (in Chinese))
- [10] 张得二,李小泉,梁有叶. 中国近五百年旱涝等级分布图的再续补(1993—2000)[J]. 应用气象学报,2003,14(3):379-388. (ZHANG De'er, LI Xiaoquan, LIANG Youye. Re-supplement of drought and flood grade distribution map of China in the past 500 years(1993—2000)[J]. Applied Meteorology Journal, 2003,14(3):379-388. (in Chinese))
- [11] 张得二,刘传志. 中国近五百年旱涝等级分布图续补(1980—1992)[J]. 气象,1993,19(11):41-46. (ZHANG De'er, LIU Chuanzhi. Supplement of drought and flood grade distribution map of China in the past 500 years(1980—1992)[J]. Meteorology, 1993,19(11):41-46. (in Chinese))
- [12] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2007. (State Appraisal Report on Climate Variation. State appraisal report editorial board [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [13] 黄河水利委员会. 黄河流域综合规划 [R]. 郑州:黄河水利委员会,2009. (The Yellow River Conservancy Commission. Comprehensive planning of the Yellow River [R]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Commission,2009. (in Chinese))
- [14] 黄河水利委员会. 黄河流域水资源综合规划[R]. 郑州:黄河水利委员会,2008. (The Yellow River Conservancy Commission. Comprehensive planning of the Yellow River water resources[R]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Commission, 2008. (in Chinese))
- [15] 高治定,雷鸣,王莉,等. 21世纪黄河流域气候变化预测及其影响[N]. 黄河报,2009-08-20(3). (GAO Zhiding, LEI Ming, WANG Li, et al. Prediction of Yellow River climate variation in the 21 century and its influences [N]. The Yellow River,2009-08-20(3). (in Chinese))
- [16] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, HE Ruimin, et al. Hydrological variation trend in the middle reaches of the Yellow River and their response to climate variation [J]. Advances in Water Science, 2009,20(2):153-158. (in Chinese))

Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin *

YAO Wenyi^{1,2}, RAN Dachuan^{1,2}, CHEN Jiangnan^{1,2}

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;*

2. *Key Laboratory of the Loess Plateau Soil Erosion and Water Process and Control, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)*

Abstract: The runoff and sediment regimes in the Yellow River Basin have been undergone significantly changes in recent years. This study analyzes the changes in runoff and sediment regimes during the period 1997—2006 using the combined approach of hydrological methods, soil and water conservation methods and mathematical modeling. The hydrological and sediment data measured at stations on the main stream and tributaries of the middle and upper reaches of Yellow River are used in the study. The mechanism of changes in runoff and sediment is analysed. Projections of future changes in runoff and sediment regimes are also provided. Results show that in comparison to the long-term average runoff from the source area of Yellow River, a reduction of 43.90 billion m³ in the annual runoff has been found in recent years (1997—2005). Among which, precipitation and other natural factors can account for 92.26% of the reduction and the remaining is due to the effect of human activities. The observed value of Yellow River annual runoff during the same period has decreased 112.1 billion m³ compared to that before 1970. Human activities are responsible for 76.50% of the decrease and the rest is due to the reduction of precipitation. At the same time, the observed annual sediment load has been reduced by 11.80 million tons, 49.75% of which is due to the result of human activities such as the integrated control measures on soil and water loss and the remaining portion of the reduction can attribute to the reduction of precipitation. The impacts of human activities and precipitation reduction on the changes in runoff and sediment regimes vary significantly over space. For example, the effect of human activities on runoff reductions is much greater than that of precipitation reduction in the area along the middle reach of Yellow River. While for the reduction of sediment load, the human activities contribute nearly as much as precipitation does. Despite the fact that significant changes have been found in runoff and sediment regimes, the quantitative relationships generally remain unchanged between runoff and sediment load and between precipitation, floods and sediment load in most areas of Yellow River tributary basins. For example, the hyperconcentrated flow occurs during heavy storm events. There are few exceptions on the relationships between precipitation, floods and sediment load in individual tributary basins, which are often accompanied by a significant reduction in runoff and sediment yields. A slight downward trend is projected for both runoff amount and sediment load in the coming decades until 2050 with occasional occurrences of plentiful runoff and heavy sediment load.

Key words: reduction of runoff and sediment load; mechanism of changes in runoff and sediment load regimes; projection of runoff amount and sediment load; the Yellow River basin

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2011CB403303) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2006BAB06B01).