

黄河下游汛期输沙效率和排沙比阶段性变化及其 主控因素分析

王随继^{1,2}, 刘 慰^{1,2}, 颜 明¹, 贺 莉¹

(1.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; 2.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要:为了揭示黄河下游河道泥沙冲淤变化趋势及其主要影响因素,以黄河下游花园口站和利津站 1960 年以来的实测水沙数据为基础,利用双累积曲线方法分析了汛期断面水沙关系的阶段性变化特征,进而利用线性回归分析法获得了各阶段汛期断面径流输沙效率和汛期河段排沙比数值。结果表明:自 1960 年以来黄河下游汛期断面径流输沙效率明显存在着大小交替的 5 个不同变化阶段(1960—1965 年、1966—1981 年、1982—1987 年、1988—1999 年、2000—2015 年),花园口和利津断面汛期的平均径流输沙效率值在这 5 个时期分别为 2.1,4.3,2.6,4.1,0.8 t/100 m³,而同期花园口至利津河段的排沙比分别为 1.34,0.78,1.01,0.62,1.48。汛期河道断面输沙效率和河段排沙比交替性阶段变化揭示了该河段河道冲淤演变的本质特征。黄河流域的气候变化和水土保持措施仅会引起产水产沙量的变化,对黄河下游汛期输沙效率和排沙比影响有限,而不同时期黄河主河道大型水库的建成及其运行方式,则是其变化的主控因素。此外,1988—1999 年中上游淤地坝的自然毁损对黄河下游同期的输沙效率和排沙比的变化影响显著。

关键词:输沙效率;排沙比;黄河下游

中图分类号:TV141.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0104-08

Stepped Changes in Suspended Sediment Transport Efficiency and Discharge Ratio and the Main Causes in the Lower Reaches of Yellow River

WANG Suiji^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, YAN Ming¹, HE Li¹

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

2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The purpose of this paper is to reveal the change trend of sediment scouring and silting and its main influencing factors in the lower reaches of Yellow River. Based on the measured data of runoff and suspended sediment load (SSL) at the Huayuankou and Lijin stations (channel cross-sections) in the lower reaches of the Yellow River since 1960, the phased variations of the runoff and SSL in flood seasons was analyzed by means of double cumulative curve analysis. By using linear regression analysis, the suspended sediment transport efficiency (SSTE) at the channel cross-sections and suspended sediment discharge ratio (SSDR) in the channel reach between the stations for flood seasons of different stages are obtained. The results showed that five different stages, 1960—1965, 1966—1981, 1982—1987, 1988—1999, and 2000—2015, appeared in the STE variations at the cross-sections since 1960, when the average SSTE of the two cross-sections was 2.1, 4.3, 2.6, 4.1, 0.8 t/100 m³, respectively, while the SSDR in the river reach from Huayuankou to Lijin stations of the lower reaches of Yellow River was 1.34, 0.78, 1.01, 0.62, 1.48, respectively; the phased variations of SSTE and SSDR in flood seasons revealed the essential characteristics of erosion and siltation evolution in this reach; the climate change and soil and water conservation measures in the Yellow River Basin just caused changes in water and sediment yield, and had a limited effect on SSTE and SSDR in the lower reaches

收稿日期:2018-11-26

修回日期:2019-04-26

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402503);国家自然科学基金(41571005;41271027)

第一作者:王随继(1966—),男,甘肃静宁人,博士,副研究员/岗位教授,主要从事河流沉积学、地貌学及流域地表过程研究。E-mail:wangsj@igsnrr.ac.cn

of Yellow River during flood seasons; however, the construction and operation mode of the large reservoirs in the main river channel of the Yellow River are the main control factors on SSTE and SSDR change; in addition, the natural damages of some silt storage dams in the middle and upper reaches of the Yellow River have the significant effect on the variations of SSTE and SSDR in the lower reaches of Yellow River during the period 1988—1999.

Keywords: suspended sediment transport efficiency; suspended sediment discharge ratio; the lower reaches of Yellow River

黄河是世界上著名的多泥沙河流,黄河下游河道强烈的泥沙淤积是导致黄河下游曾经发生严重洪水泥沙灾害的重要原因。黄河中上游主支流流经多处大面积的黄土区和风沙区,为黄河下游带来了大量的泥沙,同时,黄土高原的严重水土流失造成了区内居民在农业和环境方面的巨大损失。为了减轻黄土高原的水土流失和黄河下游的河道泥沙淤积,黄河中上游流域大规模的水土保持活动成为优先选择的面上治理措施。同时,一些基于河道径流泥沙调控方法等其他工程措施也成为线上治理的潜在措施而在逐步探索之中,比如,为了有效降低黄河下游河道的泥沙淤积而减轻潜在的洪水泥沙灾害,钱宁等^[1]提出了通过水库的调水调沙来达到消减黄河下游河道淤积,这一河道治理思想推动了黄河下游河道治理的多元化。此后,有关这方面的一系列研究成果逐渐问世,结合水库调水调沙的实践也逐渐展开,尤其是小浪底水库建成之后实施的清水冲沙的实践也基本抑制了黄河下游悬河的进一步发展。

近年来,在年际、年代时间尺度上,不同的研究者对于黄河下游河道的冲淤演变进行了多方面的研究^[2-6],也对人类活动的影响进行了必要探讨^[7-10],取得了显著的研究进展。众所周知,黄河下游河道演变最为剧烈的时段是每年汛期(5—10月),这是受季风气候的影响黄河流域降水量主要发生在汛期,而汛期径流量和输沙量则决定着黄河下游的年径流量和年输沙量,每年汛期洪水的输沙能力和输沙效率则决定着黄河下游河道呈现年内净冲刷还是净淤积的态势。因此,黄河下游河道汛期泥沙冲淤的年际和年代际变化必然成为研究者关注的重要研究方面。前人对黄河下游洪水泥沙输移进行过大量研究^[11-13],并提出了高效输沙洪峰的概念^[14],并对黄河下游洪水的输沙效率进行过系统研究^[15]。这些以及其他相关的研究工作推动了黄河下游洪水输沙的研究进展,并为黄河下游河道治理提供了理论指导。

汛期是黄河下游河道冲淤演变最剧烈的时段,而汛期的河道断面输沙效率和河段排沙比的大小变化和增减趋势往往决定着河道的冲淤态势,因此,揭示

黄河下游河道汛期断面径流输沙效率及河道排沙比的变化趋势及其主要影响因素是黄河下游河道演变研究中的科学问题之一。本文选择黄河下游冲积河段的两个控制水文站——入口处的花园口站和出口处的利津站,以这两个水文站的多年观测资料为基础,对黄河下游河道汛期径流输沙特征、汛期径流输沙效率和汛期河段排沙比的阶段性变化特征进行系统研究,期望揭示黄河下游冲积河段汛期径流输沙效率及汛期河段排沙比的变化特点及变化趋势,进而分析其阶段性变化的主要影响因素。研究结果可为更加有效地增大黄河下游洪水输沙能力和提高汛期径流输沙效率以减少河道淤积、消除洪水泥沙灾害的措施制定提供理论依据。

1 数据和研究方法

1.1 数据来源

黄河下游是指铁谢至利津河段,而河道变化最剧烈的河段当属花园口至利津河段,因此,该研究选取黄河下游河道变化最为剧烈河段的入口水文站花园口站(113°39'E, 34°55'N)和出口水文站利津站(118°18'E, 37°31'N)的实测水文资料来分析其汛期输沙效率的变化特征,所涉及的数据主要是这两个水文站自1960年以来各年汛期(5—10月)径流量和输沙量资料,原始数据为日均径流量和日均输沙量,来源于黄河水利委员会实测数据。上述两个水文站各年汛期总径流量和总输沙量是根据日均数据计算所得。

1.2 研究方法

该研究用到序列分析、双累积曲线分析和线性回归分析等研究方法。利用汛期径流量和汛期输沙量年变化序列对比方法来分析汛期水沙年际变化特征;利用汛期径流量和汛期输沙量双累积曲线方法来揭示汛期水沙组合体变化过程中可能存在的多重突变年份和多阶段性;利用线性回归分析方法来确定以突变年份分割的各个时期内累积径流量和累积输沙量二者间的线性关系,这些关系的斜率具有重要意义,可以据其求取其变化率。

河道断面水流输沙效率和河段排沙比等指标可

以表征给定河段的冲淤演变特征。河流断面水流输沙效率的表示方式有多种,既可以表示为输送单位泥沙的耗水量(m^3/t),也可以表示为单位水流的输沙量(t/m^3),前者重点强调输送单位泥沙所需要的水量,突出水资源因素;后者重点强调单位水量所能输送的泥沙量,突出泥沙因素,二者都可以从不同侧面来揭示河道的冲淤态势。本文拟揭示黄河下游河道在汛期的冲淤变化态势,故采用给定河道断面在汛期的单位水流输沙量这一概念来计算河道断面汛期输沙效率(简称汛期输沙效率)。为消除径流量和输沙量彼此间存在的数量级差异,本文采用汛期 100 m^3 水流的输沙量作为河道断面汛期径流的输沙效率($\text{t}/100 \text{ m}^3$),汛期累积径流量和累积输沙量间的线性关系式的斜率(t/m^3)除以 100 即是本文所定义的汛期输沙效率($\text{t}/100 \text{ m}^3$)。汛期河段排沙比是指给定河段在汛期的输出沙量与输入沙量的比值,当该比值小于(大于)

1 时,表示该河段汛期出现净淤积(净冲刷);当该比值等于 1 时,表示该河段汛期冲淤平衡。

2 结果与分析

2.1 汛期径流量和输沙量年际变化

1960 年以来,黄河下游花园口站和利津站的汛期径流量变化趋势基本相似(图 1),其中 1960—1965 年显著增大;1965—1972 年在波动之中大幅减小;1972—1983 年呈现波动性增加变化趋势;1983—1997 年呈现波动性减小直到最低值;此后维持低幅波动且略有增大的变化趋势。然而,两个水文站间也存在较大差异之处,在 1970 年之前,年汛期径流量在这两个水文站大致相等,此后各年,随着黄河下游平原区工农业发展的需要而从黄河引水量明显增大,使得 1970 年之后每年汛期利津站的径流量总是小于花园口的。

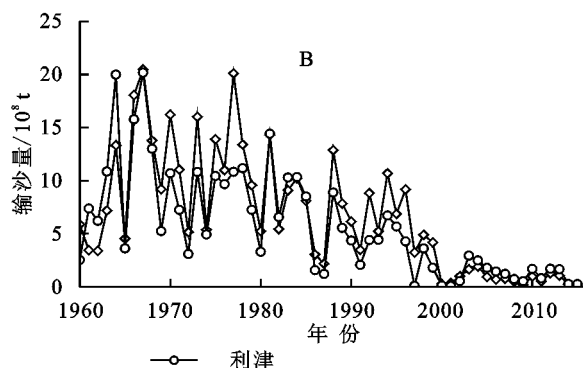
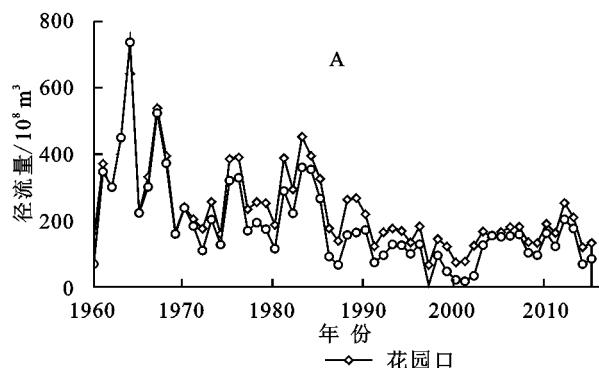


图 1 黄河下游花园口和利津水文站汛期径流量和输沙量年际变化特征

汛期输沙量的变化与汛期径流量的变化明显不同(图 1),除了在 1960—1965 年显著增大、1965—1977 年在大幅波动中总体上呈现高值外,此后在这两个水文站都基本呈现波动性变小趋势。花园口和利津水文站的年汛期输沙量在 1964—1968 年、1981—1985 年大致相等;在 1969—1980 年、1986—2002 年前者大于后者,河道段汛期以泥沙净淤积为主;而在 2003—2015 年则是后者大于前者,河道段则以泥沙净侵蚀为主。

2.2 汛期水沙与全年水沙比值变化

如图 2A 所示,1960—2015 年汛期径流量占全年径流量的比例在花园口和利津水文站的增减趋势基本相似,且在 70% 上下波动。1960—1987 年,这两个水文站的该比值基本相等且等幅波动;自 1987 年以后,这一比值发生分化,总体上表现为花园口站的大于利津站的。另外,这一比值的低值出现在 1997—2001 年,这主要是小浪底大坝建设末期拦蓄大量汛期径流从而引起黄河下游汛期径流量相对减小的缘故。

1960—2015 年,这两个水文站汛期输沙量占全

年输沙量的百分比(图 2B)除个别年份外都在 90% 上下波动,而且,这一比值在利津站比在花园口站略高。与径流量占比变化一样,汛期输沙量占比的主要低值区也出现在 1997—2001 年,这同样是小浪底大坝建设末期拦蓄大量汛期泥沙的缘故。此外,2014—2015 年花园口站汛期输沙量占比明显减小,这是经过十多年人为控制的清水冲沙后花园口所在河段的河床上可以冲洗悬浮的细泥沙相对减小的缘故。显然,黄河下游河流输沙基本发生在汛期,汛期的输沙量大小及其变化趋势基本决定着全年的输沙量大小及其变化趋势。

2.3 汛期径流量和输沙量关系

根据 1960—2015 年黄河下游花园口和利津站年汛期径流量和输沙量统计结果(图 3)可见二者基本遵循线性关系,其中花园口站二者的相关性较差,决定系数仅为 0.387,而利津站的相对较好,决定系数达到 0.709。显然,由于花园口水文站比利津水文站更接近其上游的大型水库,汛期水库防洪库容调整及运行方式变化等管理措施使得花园口站水

沙关系较差,而利津站距离这些水库较远,沿程的冲淤调整使得人为影响的水沙关系沿程逐渐趋向于

天然河道动力的需求,从而使得二者在利津站呈现较高的相关性。

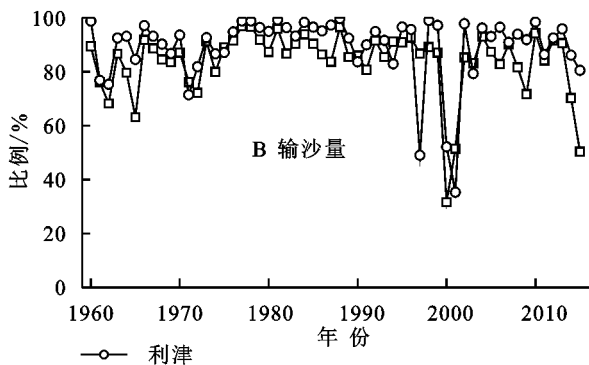
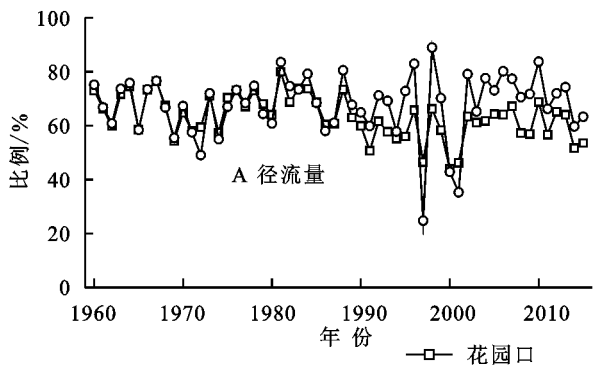


图 2 黄河下游花园口和利津水文站汛期径流量和输沙量分别占全年径流量和输沙量的百分比

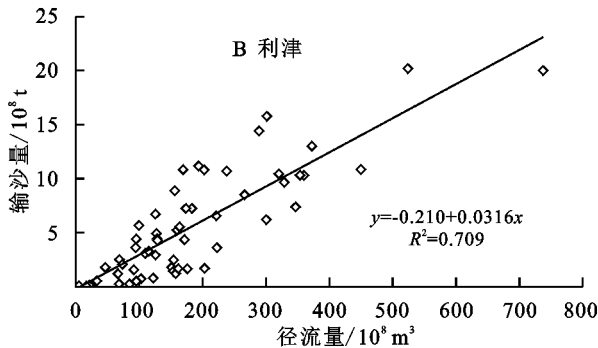
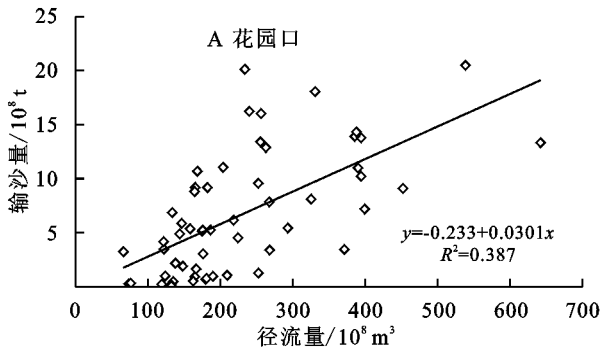


图 3 1960—2015 年黄河下游花园口和利津水文站汛期径流量和输沙量关系

由前述可见,黄河下游汛期径流量和输沙量关系在上下河段存在着不协调特征,为了阐明黄河下游汛期水沙过程及其潜在的变化特征,需要利用更加有效的方法去揭示。下面,将利用累积距平和双累积曲线分析方法对其变化特征进行进一步的分析。

2.4 汛期输沙效率的阶段性变化

2.4.1 汛期水沙关系突变年份及阶段划分 累积距平分析方法可以发现某类数据序列的距平值累积变化过程中的主要突变点^[16-19],但是,对于密切关联的两类数据序列的突变分析上则难以应用,这时,

采用双累积曲线分析方法则更加简明方便。黄河下游汛期径流量和输沙量的突变分析采用双累积曲线方法。

花园口和利津水文站 1960—2015 年年汛期径流量和输沙量双累积曲线如图 4 所示,其汛期径流量和输沙量综合体的阶段性变化明显,都清晰呈现 1965 年、1981 年、1987 年、1999 年 4 个同步突变年份,以这些年份为时间序列的分界可以划分出 5 个不同的变化阶段(表 1),而不同阶段中累积径流量和累积输沙量间存在极好的线性关系,其决定系数都大于 0.95。

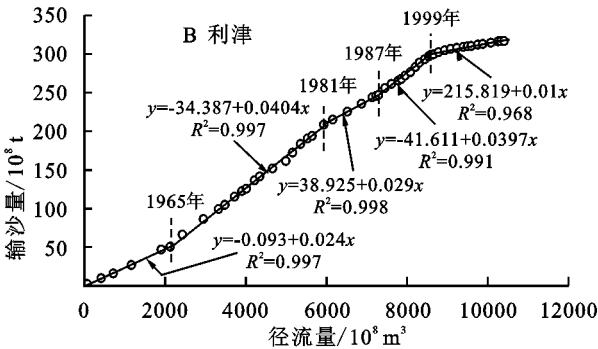
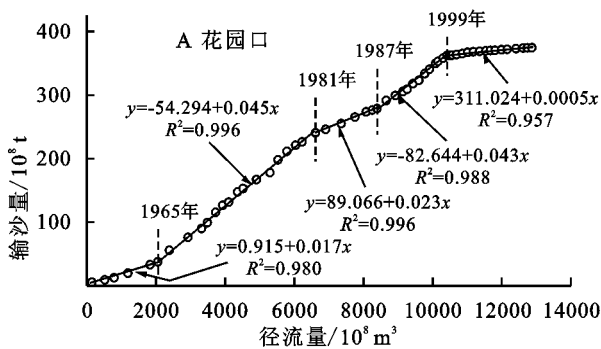


图 4 1960—2015 年黄河下游花园口和利津站汛期径流量和输沙量双累积曲线及其不同时期的线性拟合关系

2.4.2 汛期径流输沙效率的阶段性变化 图 4 中每个线性关系式中因变量的系数也即其拟合直线的斜率,其单位为 t/m^3 ,意指汛期断面单位水流的输沙效率,该值乘以 100 就可转换得到汛期径流的输沙效率

($t/100 m^3$)。提取这两个水文站被突变点分割的不同时期的拟合关系的斜率值并转换为汛期径流的输沙效率,进而分别计算这两个水文站汛期径流输沙效率的基变率[某一时期汛期输沙效率占基准期(1960—1965

年)输沙效率的百分比]和递变率(某一时期汛期输沙效率占前一时时期输沙效率的百分比)(表 1)。

表 1 黄河下游花园口和利津水文站汛期径流输沙效率及其变化率

时期	花园口			利津		
	径流输沙效率/(t/100 m ³)	基变率/%	递变率/%	径流输沙效率/(t/100 m ³)	基变率/%	递变率/%
1960—1965	1.7			2.4		
1966—1981	4.5	164.7	164.7	4.04	68.3	68.3
1982—1987	2.3	35.3	−48.9	2.9	20.8	−28.2
1988—1999	4.3	152.9	87.0	3.97	65.4	36.9
2000—2015	0.5	−70.6	−88.4	1.0	−58.3	−74.8

将 1960—1965 年作为基准期,那么相对于基准期,花园口和利津站汛期径流平均输沙效率(给定时期的多年平均值)在 1966—1981 年、1982—1987 年、1988—1999 年都有不同程度的增加,其基变率分别为 164.7%,35.3%,152.3%和 68.3%,20.8%,65.4%;而在 2000—2015 年则显著变小,其基变率分别为−70.6%,−58.3%。

上述 4 个时期汛期径流平均输沙效率的递变率在花园口站分别为 164.7%,−48.9%,87.0%,−88.4%,在利津站分别为 68.3%,−28.2%,36.9%,−74.8%。显然,汛期径流平均输沙效率在这两个水文站的变化趋势相同,但花园口站的汛期平均输沙效率的变化率(增减)都明显大于利津站的。

2.4.3 汛期河段排沙比的阶段性变化 洪水的排沙比可以用某次洪水中输送到某一河段出口断面的泥沙量与进入该河段入口断面的泥沙量的比率来表示^[15],那么汛期排沙比可以表达为某一河段整个汛期出口断面的输出沙量与入口断面的输入沙量的比值。当某一河段没有汇流和分流时,汛期河段排沙比可以反映某河段汛期泥沙净冲淤态势,当汛期排沙比等于 1 表明该河段泥沙冲淤平衡、大于 1 表明发生了净冲刷、而小于 1 表明发生了净沉积。黄河下游花园口—利津河段某年的汛期排沙比可以表达为当年汛期利津站总输沙量与花园口总输沙量的比值。

1960 年以来黄河下游花园口—利津河段汛期排沙比的年际变化如图 5 所示,其中在 1965—1980 年、1986—2002 年汛期排沙比小于 1,表明该河段在上述两个时期的汛期总体上处于净沉积状态;在其他时期,尤其是 2003 年以来汛期排沙比明显大于 1,表明这些时期该河道段汛期处于净冲刷状态。

根据花园口和利津站汛期径流泥沙双累积曲线所呈现的 5 个不同的变化时期,花园口和利津站在这 5 个时期中的年均汛期输沙量差别明显,故而引起区间排沙比发生了明显的阶段性变化(图 5),花园口—利津河段汛期年均排沙比在这些阶段分别为 1.34,0.78,1.01,0.62,1.48(表 2),具有冲淤交替变化特征,

其中区间净沉积发生在 1966—1981 年、1988—1999 年这两个时期,1982—1987 年则处于准冲淤平衡状态,其他两个时期则表现为净冲刷。正是由于该河段在上述 5 个时期发生明显的冲淤交替,其排沙比的基变率在介于−41.8%~64.2%,而递变率则更大,介于−41.8%~138.7%(表 2)。

3 讨论

影响径流量变化的自然因素主要是气候变化,降水量和蒸散量变化是导致流域径流量变化的气候因子,随着径流量发生变化其输沙量也会发生相应的调整。近几十年来,人类活动对于干旱、半干旱地区的流域径流量变化的影响逐渐加剧且往往成为主导因素^[17-19]。下面,将从气候变化和人类活动两个方面来讨论它们对黄河下游输沙效率阶段性变化的影响程度。

3.1 气候变化的影响

根据黄河流域数百个气象站 1950 年以来的实测资料的统计分析结果表明,黄河流域蒸散量变化对流域内径流量变化的贡献率仅占 4%左右^[17],显然,蒸散量对于黄河流域径流量及输沙量变化的影响可以忽略不计,因此,蒸散量对于黄河下游输沙效率阶段性变化的影响也可忽略。

黄河流域百年尺度下气候的波动性变化导致降水量的变化主要是年际间的波动,而趋势性变化不明显。已有的研究表明,黄河源区和下游区年降水量无明显的长期变化趋势,中游在 1988—2007 年降水量平均值较多年平均值约下降 10%,而黄河的径流量主要来源于兰州以上,表明降水量对黄河流域年径流量变化的影响不是主要控制因素^[20];黄河流域年降水量变化率具有明显的空间差异性,总体表现为上游地区为正、中游为负的特点^[21],这种不同地区降水量正负变化对流域径流量变化可以起到部分相互抵消的作用,可认为黄河流域的降水量变化对其下游年径流量变化的影响有限。还有研究表明,1950 年以来,黄河流域径流量变化受到降水量和

蒸散量变化的综合影响约占 8%,而人类活动的影响高达 92%左右^[17],这也说明气候因素对黄河流域径

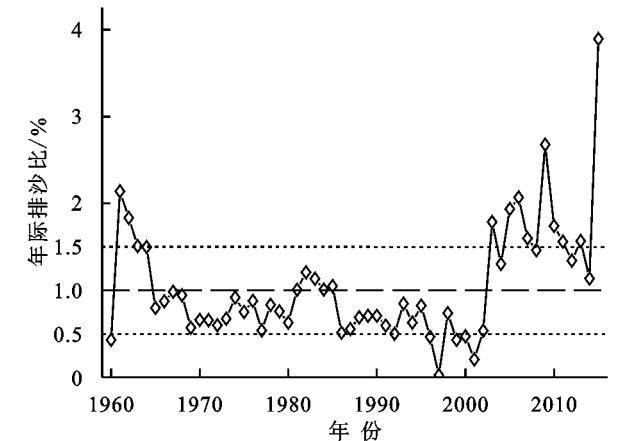


图 5 黄河下游花园口—利津河段汛期排沙比年际和阶段性变化

表 2 黄河下游花园口—利津河段汛期排沙比及其变化率			
时期	河段排沙比	基变率/%	递变率/%
1960—1965	1.34		
1966—1981	0.78	—41.8	—41.8
1982—1987	1.01	17.2	29.5
1988—1999	0.62	—29.1	—38.6
2000—2015	1.48	64.2	138.7

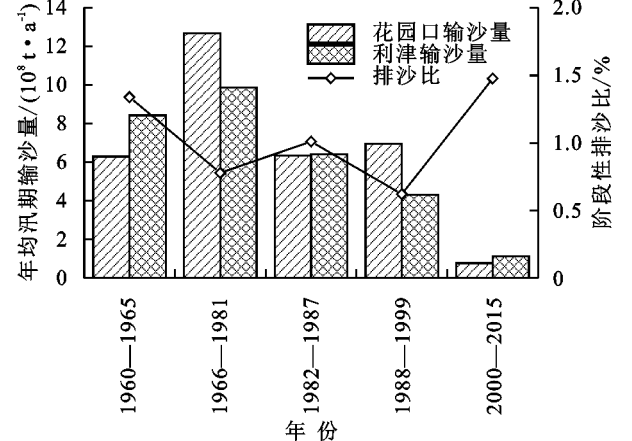
对于黄河下游汛期径流量变化来说,年际波动的汛期降水量对它会有一定的影响,但是对径流量时间尺度达年代际的阶段性变化来说,其影响同样有限。常军等^[22]认为黄河流域夏季平均降水量为 261.4 mm,在 20 世纪 70 年代偏多,90 年代以来偏少;秋季平均降水量为 116 mm,在 20 世纪 60 年代显著偏多,90 年代偏少,自 21 世纪 00 年代有增加趋势。因夏秋季基本是汛期,故黄河流域汛期降水量在 20 世纪 60 年代和 70 年代偏多而 90 年代偏小,对比黄河下游径流量年际变化(图 1)可以发现,除了 90 年代降水量偏小与黄河下游径流量变小大致一致外,其他时期则并不相符。显然,黄河流域汛期降水量对其下游汛期径流量虽然有一定影响,但其影响程度仍然很小。汛期径流的输沙能力与径流量大小密切相关,黄河下游无论是上段的花园口站还是下段的利津站,汛期径流量与输沙量都具有明显的正相关关系(图 3),因此,由黄河流域汛期降水量变化对其下游汛期径流量变化影响有限可以推知,汛期黄河流域降水量变化对其下游汛期输沙量变化的影响同样有限。

从上述讨论可知,气候因素对黄河下游汛期径流输沙效率和排沙比的阶段性变化的影响有限,因而,人类活动才是其主控因素。

3.2 人类活动的影响分析

3.2.1 水保措施的影响分析 黄河流域自 20 世纪

流量变化影响甚微,而人类活动是黄河流域径流量变化的主控因素。



70 年代以来实施的水保措施对于防治流域内水土流失卓有成效。这些水保措施主要有坡地地区的梯田建设和造林种草,沟道地区的淤地坝建设,以及 2000 年以来有效实施的坡地退耕还林措施,这些水保措施对拦水减沙影响有一定的差别。大规模的梯田建设有效减少了其分布区域的产流产沙能力,从而降低了该区域的输水输沙量,这会有效减少黄河下游的来水来沙量;造林种草以及退耕还林都是以增加坡面植被的方法增大了土壤水分的入渗能力、减小了地表汇流能力,相应地减少了坡面产输沙能力,同样也会减少黄河下游的来水来沙量;沟道淤地坝工程则是对径流及其携带的泥沙进行直接拦截作用,当非暴雨发生时淤地坝上游区域的来水量往往不足以充满淤地坝,这时淤地坝拦截了全部的水沙,导致输沙量同比例减小,而当暴雨发生时,淤地坝以上区域的来水量往往会超过淤地坝库容,则有相对较多的泥沙沉积在淤地坝中,这导致流出淤地坝的径流量相对输沙量较多一些,无论如何,淤地坝的拦水拦沙作用也会明显引起其下游水沙量减少,众多淤地坝的综合拦水拦沙作用也会明显减少黄河下游的来水来沙量。上述各类水保措施所覆盖的区域基本上都是逐渐增加的,因此,其减水减沙量也有增强的趋势。因此,总体上来说,各种水土保持措施是引起黄河下游径流量和输沙量显著减小(图 1)的主要原因,它们对流域内径流量和输沙量的减少基本上具有同比例特性,因而不会明显引起黄河下游输沙效率及排沙比的阶段性变化。但是,唯一例外的是,在 20 世纪 90 年代黄河中上游地区的淤地坝由于管理不善而出现了部分毁损现象,淤地坝的毁损会导致其拦截水沙量减少,而更为关键的是部分淤地坝内早年拦截的泥沙会在淤地坝毁损中被洪水侵蚀而向下游输送,这是黄河下游 1987—

1999 年花园口和利津站输沙效率都较前一时段(1981—1987 年)显著增大的主要原因。相应地,这些增加的泥沙由于在中下游河道缺乏有效的大坝拦沙库容(三门峡水库泥沙冲淤平衡无拦沙功能,小浪底水库尚未建成运行)而直接输送到黄河下游,其中相当一部分泥沙沉积在下游河段,使得 1987—1999 年黄河下游的排沙比相对于前一时段明显变小。

此外,黄河中上游流域水土保持工作的持续推进对于汛期小浪底入库水沙有着一定的影响,但由于库区泥沙的自然淤积和汛期出库水沙的部分人为控制,使得汛期下游河道输水输沙和水沙关系也必然受到人类活动的强烈影响,造成 2000—2015 年黄河下游断面径流输沙效率很低而河段排沙比很高的新现象。显然,随着人类活动尤其是大型水库的相继建成对水沙的拦蓄及调节,极大程度上改变了黄河下游汛期原有的水沙运行规律,造成断面径流输沙效率和河段排沙比的阶段性变化。

3.2.2 水库建设及其运行的影响分析 黄河下游汛期输沙效率和排沙比的阶段性变化基本与黄河主河道上几个大型水库的建成时间节点相吻合,1960 年建成的三门峡水库在初期蓄水拦沙、在 1962—1973 年滞洪排沙^[7],使得 1960—1965 年黄河下游来沙量小于来水量,从而形成该时期河道断面输沙效率很低、下游河段排沙比很高的特征,使得黄河下游河道普遍发生冲刷。因为三门峡水库泥沙严重淤积致使库区及库上平原区河道发生严重泥沙灾害,为了减小泥沙灾害,在 1964 年改造三门峡大坝、1969 年开挖 8 个导流底孔以利于泄流排沙、1973 年起的蓄清排浑^[7],加之 1968 年建成的刘家峡水库,这两个水库运行的综合调节引起黄河下游花园口、利津站汛期的水沙关系进入新的变化阶段(1966—1981 年),这时的花园口来沙量多,黄河下游沙量过载,虽然河道断面输沙效率高,但是河段排沙比较低,使得河段发生淤积。

1986 年建成的龙羊峡水库,在汛期拦蓄洪水以减少黄河中下游的径流量,从而实现有效防洪的目的,加上三门峡水库在 1990 年又打开 4 个底孔排沙,使得汛期黄河下游水沙关系进入断面输沙效率高而河段排沙比很低的另一变化阶段(1988—1999 年)。1997 年实现截流、2001 年竣工的小浪底水库,控制了 92.3% 的黄河流域面积、约 90% 的径流量和近 100% 的来沙量^[10,23],汛期拦蓄洪水以及冲沙运行使得黄河下游水沙关系又有新的变化,从此,黄河中上游流域的来水来沙都经由小浪底水库的拦截和调节,黄河下游汛期输沙量和输沙效率则严重依赖于该水库的运行方式。小浪底水库在

2002—2016 年进行了 19 次调水调沙,使黄河下游主河道全线平均刷深 1.85 m,平滩流量从 1 800 m³/s 增至 4 310 m³/s^[10,23],改变了水库运行之前黄河下游河道淤积萎缩的严峻态势。

4 结 论

(1) 黄河下游汛期径流量和输沙量在 1960—2000 年大幅降低,这主要是黄河流域各类水土保持措施的实施以及水库建设导致的;而在 2000 年之后汛期流量略有增多并呈低幅波动,而输沙量达到历史低值,小浪底水库建成及人为控制的运行方式是其主要影响因素。

(2) 自 1960 年以来黄河下游汛期断面径流输沙效率明显存在着高低交替变化的 5 个不同阶段:1960—1965 年、1966—1981 年、1982—1987 年、1988—1999 年、2000—2015 年,其时花园口和利津断面的平均径流输沙效率分别为 2.1,4.3,2.6,4.1,0.8 t/100 m³。

(3) 黄河下游花园口至利津河段在上述时段的汛期排沙比分别为 1.34,0.78,1.01,0.62,1.48,也呈现出明显的冲淤交替阶段性变化特征。

(4) 黄河下游汛期径流输沙效率及河段排沙比的阶段性变化受气候变化的影响较小,而人类活动则是其主要影响因素,尤其受到不同时期大型水库建成及其运行方式所控制。此外,1988—1999 年黄河下游汛期输沙效率的增大和排沙比的变小受到黄河中上游淤地坝自然毁损的显著影响。相对来说,逐渐扩大的流域水土保持措施实施面积对流域的产水产沙量减少明显,但对于黄河下游输沙效率和排沙比的阶段性变化影响不明显。

参考文献:

- [1] 钱宁,张仁,赵业安,等.从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J].地理学报,1978,33(1):13-26.
- [2] 许炯心,孙季.黄河下游游荡河道萎缩过程中的河床演变趋势[J].泥沙研究,2003(1):10-17.
- [3] 姚文艺,常温花,夏修杰.黄河下游游荡性河段清水下泄期河道断面形态的调整过程[J].水利学报,2003(10):75-80.
- [4] 申冠卿,张原锋,尚红霞,等.不同时期黄河下游河道泥沙沉积与纵横断面调整[J].泥沙研究,2005(3):30-34.
- [5] 王随继.黄河流域河型转化现象初探[J].地理科学进展,2008,27(2):10-17.
- [6] 王随继.黄河下游不同河型河道的水沙效应及演变趋势分析[J].沉积学报,2009,27(6):1163-1171.
- [7] 段敬望,王海军,李星瑾,三门峡水库“蓄清排浑”运行探索与实践[J].华中电力,2004,17(4):34-37.

[8] 王浩,贾仰文,王建华,等.人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探[J].自然资源学报,2005,20(2):157-162.

[9] 陈建国,周文浩,孙高虎.论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控[J].泥沙研究,2016(4):1-8.

[10] 胡春宏.我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践.水利学报,2016,47(3):283-291.

[11] 齐璞,刘月兰,李世滢,等.黄河水沙变化与下游河道减淤措施[M].郑州:黄河水利出版社,1997.

[12] 赵业安,周文浩,费祥俊,等.黄河下游河道演变基本规律[M].郑州:黄河水利出版社,1998.

[13] 许炯心.黄河下游洪水的泥沙输移特征[J].水科学进展,2002,13(5):362-368.

[14] 钱意颖,叶青超,周文浩.黄河干流水沙变化与河床演变[M].北京:中国建材工业出版社.

[15] 许炯心.黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系[J].泥沙研究,2009(4):45-50.

[16] 冉立山,王随继,范小黎,等.黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应[J].地理学报,2009,64(5):531-540.

[17] Wang S, Yan M, Yan Y, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River[J]. Quaternary International, 2012,282:66-77.

[18] 王随继,闫霞霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.

[19] Wang S, Wang Y, Ran L, et al. Climatic and anthropogenic impacts on runoff changes in the Songhua River basin over the last 56 years(1955—2010), North-eastern China[J]. Catena, 2015,127:258-269.

[20] 刘成,王兆印,隋觉义.黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J].水利水电科技进展,2008,28(3):1-7.

[21] 刘勤,严昌荣,张燕卿,等.近 50 年黄河流域气温和降水量变化特征分析[J].中国农业气象,2012,33(4):475-480.

[22] 常军,王永光,赵宇,等.近 50 年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(1):43-54.

[23] 李立刚,陈洪伟,李占省,等.小浪底水库泥沙淤积特性及减淤运用方式探讨[J].人民黄河,2016,38(10):40-42.

(上接第 98 页)

[12] 丘雯文,钟涨宝,原春辉,等.中国农业面源污染排放的空间差异及其动态演变[J].中国农业大学学报,2018,23(1):152-163.

[13] 杨滨键,尚杰,于法稳.农业面源污染防治的难点、问题及对策[J].中国生态农业学报,2019,27(2):236-245.

[14] 蒋倩文,刘锋,彭英湘,等.生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应[J].环境科学,2019,40(5):2194-2201.

[15] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.

(上接第 103 页)

[19] 徐勇,田均良,刘普灵,等.黄土高原坡耕地水土流失地形分异模拟[J].水土保持学报,2005,19(5):18-25.

[20] 陈光荣,张国宏,高世铭,等.粮草豆隔带种植保护性耕作对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):54-58.

[21] 王立,黄高宝,王生鑫,等.粮草豆隔带种植保护性耕作水土流失规律[J].水土保持学报,2012,26(2):54-57.

[22] 张晓艳,王立,黄高宝,等.道地药材保护性耕作对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):58-61.

[23] 顾朝军,穆兴民,孙文义,等.极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究[J].自然资源学报,2017,32(10):1755-1767.

[24] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J].生态学报,2006,26(11):3847-3853.

[25] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.

[26] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析[J].自然资源学报,2019,34(7):1405-1406.

[27] 王丰,徐佩,严坤,等.三峡库区典型农作物对降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):92-101.

[28] 高磊,饶良懿,崔飞波,等.太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):5-11.

[29] 苗全安,曹凑贵,汪金平,等.丹江口库区坡耕地不同作物对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(5):11-14.

[30] 宋江平,李忠武,刘春,等.湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J].水土保持学报,2018,32(1):32-38.