

1950—2015 年黄河下游河道排洪输沙时空演变

颜明¹, 贺莉¹, 王彦君², 刘慰¹, 王随继¹, 裴亮¹, 郑明国¹, 孙莉英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. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:基于 1950—2015 年长序列的水沙数据,以平滩流量作为漫滩洪水的参照值,通过时间序列分析和统计分析,研究了黄河下游不同河段的排洪和输沙能力。结果表明:黄河下游的基本排洪能力在空间上具有相似性,不同河段的排洪能力随时间变化具有比较好的一致性;排洪能力随时间变化表现为阶段性减小,与上中游来水的丰枯具有密切关系,并部分受到水库调节的影响,尤其是小浪底水库在水沙调控中的作用。并对比分析了 1950—2015 年日平均流量大于平滩流量的发生情况,发现漫滩洪水的发生频率是逐渐减小的,输送的水量与小于漫滩流量输送的水量相比也是逐渐减少的。输沙能力在空间上具有一定差异,高村以上的游荡河段在 20 世纪后期都是逐渐减小的,21 世纪初期的输沙能力逐渐提高,高村以下河段在研究期内的输沙能力变化较小,艾山—洛口河段基本不变,孙口—艾山河段和洛口—利津河段在 1998 年以前的变化不大,之后前者略有提升,后者略有减弱。研究期内黄河的排洪输沙能力总体上是减弱的,虽然现今水沙量显著减少,但河道的淤积升高仍然给排洪输沙带来很大的压力,提高黄河下游整个河道的排洪输沙能力依然是河道治理的关键所在。

关键词:黄河下游; 排洪输沙; 时空演变

中图分类号:TV14

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0001-06

Temporal and Spatial Variation of Flood-Conveying and Sediment-Transporting Capacity of the Lower Reaches of the Yellow River During 1950—2015

YAN Ming¹, HE Li¹, WANG Yanjun², LIU Wei¹, WANG Suiji¹,
PEI Liang¹, ZHENG Mingguo¹, SUN Liying¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on data measured during 1950—2015, the flood-conveying and sediment-transporting capacities were studied by methods of time series analysis and statistical analysis. Analyses showed that, flood-conveying capacities of different sub-reaches of the lower reaches of Yellow River (LYR) were similar. The variances of capacities with time in different sub-reaches were almost constant. The flood-conveying capacity decreased in different stages, and it was closely related to discharge hydrographs from the upper and middle drainage areas. It may also be partially influenced by reservoir regulation, especially the Xiaolangdi Reservoir during water-sediment regulation. For sediment-transporting capacity, capacity of the wandering sub-reach (upper Gaocun) decreased during 1995—2000, and then it showed the increasing trend after 2000. However, the sediment-transporting capacity of the sub-reach downstream Gaocun was almost constant before 1998. After 1998, capacity of Aishan-Luokou sub-reach increased with limited magnitude, and the value for Sunkou-Aishan sub-reach decreased with limited magnitude. In total, the flood-conveying and sediment-transporting capacities decreased. Despite the decreased water runoff and sediment load, deposition in the lower channel made delivering flood and sediment through the channel worse. It indicates that enlarging the capacities of

flood-conveying and sediment-transporting is the key aspect of channel regulation in the LYR.

Keywords: lower reaches of Yellow River; sediment transporting capacity; spatial and temporal variation

黄河的多沙特性使得黄河下游不断淤积抬高,近期又有严重的河道萎缩发生,使得下游承载巨大的排洪输沙压力^[1-2],随着中游水土保持工作成效的显现^[3-4],进入黄河下游的泥沙显著减少,年均输沙量由 20 世纪 50 年代的 18.19 亿 t 减少到 2000 年以后的 0.64 亿 t,输沙量已经仅为 20 世纪 50 年代的 3.5%^[5]。黄河的另一个特性是水沙异源,黄河径流主要来自于上游,气候波动和水库的修建使得输入黄河下游的水流呈现阶段性减少,20 世纪 50 年代进入黄河下游的径流多年平均值为 474.68 亿 m³,2001—2015 年的多年平均值为 261.5 亿 m³,减少了 45%^[6-7]。但由于径流与泥沙减少过程中并非同步,径流为阶段性减少,含沙量在 20 世纪并未显著减少,自 21 世纪才突然减少,这导致黄河下游河道在 20 世纪后期都是处于逐渐萎缩阶段,降低了河道的过水能力,新形势下的河道排洪输沙能力成为研究者的新问题。以前的学者对于排洪和输沙能力都分别有过深入的研究,将排洪和输沙纳入一个系统中考虑的研究还较少,本研究将排洪输沙看作黄河下游河道安全问题的两个方面,排洪与输沙之间具有相互促进和牵制关系,洪水能够很好地输沙甚至冲刷河道,将促进河道的进一步加深拓宽,提高河道的排洪能力,反之,洪水不能完全输沙,部分泥沙淤积于河道,那么河道的排洪能力将会降低,进一步降低输沙能力。

综上所述,本研究是基于黄河下游长序列的水沙数据,首先确定基本排洪输沙能力指标,进而分析黄河下游主要水文断面的排洪和输沙能力随时间的演变,并以逐日平均流量、含沙量与基本排洪输沙能力指标对比,研究洪水的输送情况,最后讨论影响排洪输沙的影响因素。从排洪输沙的整体性考虑,为黄河下游河道安全提供科学依据。

1 排洪输沙能力指标的确定

排洪输沙是一个问题的两个方面,不仅要保证洪水能顺利通过河道,还要考虑洪水所携带泥沙在河道内的冲淤,应分别对排洪和输沙进行评估,而后分析它们的整体效应。

黄河下游的排洪能力取决于多种因素,诸如河道断面面积,河道宽深比,河道比降等^[8-9],排洪能力是河道输送水流的综合反映,包括河槽内及漫滩两部分,河槽内主要以平滩流量作为参考,因而以平滩流量作为排洪基本能力的衡量指标,这是径流在河槽内的输送,这个值越大,表示河道内的输水能力越强,反之越小。漫滩洪

水存在极大的不确定性,许多年份未发生漫滩洪水。因而,本研究主要以平滩流量作为排洪能力的衡量指标,并部分参考了漫滩洪水的发生情况。

输沙能力也受到多种因素的影响,如流速、流量、河道比降等,输沙能力不仅受载体的影响^[10-11],其自身的特性也是影响输沙能力的决定性因素,尤其是泥沙的粒径组成,但输沙能力是一个综合指标,黄河下游在华北平原上游荡,是一个典型的淤积性河道,长期处于淤积中,输沙能力在反映上方的来水来沙的同时,还需反映泥沙的输出情况,因此,这里用一个冲淤比 λ_s 来表示河道的输沙能力,这个指数是在前人研究^[8,11]的基础上进行了调整得来的,首先利用下游站点的年输沙量减去上游站点的年输沙量和该河段引出的泥沙量,这个差值反映了泥沙在河道的冲淤情况,正值为冲刷,负值为淤积,然后用河道的这个冲淤值去除以上游站点的年径流量,这表示在某一时间,河道输送一定的水量时,所携带的泥沙在河道的冲淤量,用输沙指标或称单位流量的冲淤比 λ_s 表示,即:

$$\lambda_s = (Q_{s,下} - Q_{s,上} - Q_{s,div}) / Q_{w,上} \quad (1)$$

式中: $Q_{s,下}$ 为下游站点的年输沙量; $Q_{s,上}$ 为上游站点的年输沙量; $Q_{s,div}$ 为两站之间从河道引出的年泥沙量; $Q_{w,上}$ 为上游站点的年径流量。公式(1)的计算值为负,表示泥沙在河道里发生了淤积,计算值为正表示河道内的泥沙受到了冲刷。

为分析河道输沙能力随时间的变化,对河道冲淤比 λ_s 进行累积,点绘于图中,得到每个河段冲淤比随时间变化的累积曲线。

2 数据来源及处理

黄河水利委员会对黄河下游河道的断面及水沙进行了长期监测,下游干流上有 7 个主要水位站:花园口、夹河滩、高村、孙口、洛口、艾山和利津。花园口和夹河滩水文站位于游荡河段内,高村和孙口水文站在过渡河段内,洛口、艾山和利津为弯曲河段。采集了黄河下游 7 个水文站 1950—2015 年逐日平均水位、逐日平均流量、逐日平均含沙量和实测大断面等资料,部分年份存在缺失。

平滩流量是指某一断面的水位与该断面滩唇齐平时该断面所通过的流量,它是河道主河槽过流能力的重要指标。平滩流量的计算方法分为 3 步:第 1 步是确定各个水文站所在断面每年汛后的滩唇高程,第 2 步是利用逐日水位和逐日流量数据建立该断面当

年的水位—流量关系,第3步是根据汛后滩唇高程值在水位—流量拟合的关系曲线上查找该高程值对应的流量值,即为平滩流量值。平滩流量只是反映河道输送水流的基本能力,不代表最大或最小平滩流量。

输沙能力反映的是两个水文站之间河段的冲淤,因而,依据7个水文站将研究区分为6段:花园口—夹河滩、夹河滩—高村、高村—孙口、孙口—洛口、洛口—艾山和艾山—利津。利用每一河段上下两个水文站的输沙量及该河段引出的泥沙量计算出某一河段的冲淤量,再利用冲淤量除以上游水文站的年径流量得到输沙比值。

黄河下游长期处于淤积状态,分析研究期内的冲淤状态有利于河道排洪输沙能力的分析,这里以 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 这一流量值对应的水位来衡量各河段的冲淤情况,并将所有年份 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应水位点绘于图中,进而分析不同河段的冲淤随时间的变化。 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应的水位需要通过水位和流量数据拟合取得,由于洪水主要发生于7—10月,因而用7—10月4个月的逐日水位和逐日流量进行拟合,获得 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应的水位。

3 结果与分析

3.1 黄河下游 1950—2015 年基本排洪能力的变化

黄河下游的平滩流量具有以下特性:一是不同站

点的平滩流量大致相当,不存在明显差异,在时间上存在明显变化,可以分为5个阶段(图1):第1阶段是1964年以前,三门峡水库建设前及运行初期,径流量较高,最大平滩流量超过 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$;第2阶段是1965—1974年,三门峡水库的运行方式调整为蓄清排浑,平滩流量逐渐减小,最小减至 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下,基本上与三门峡水库运行方式调整为“滞洪排沙”这一阶段相对应;第3阶段是1975—1985年,在此期间平滩流量出现了波动增大,增加到 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 以上;第4阶段是1986—2002年,又开始逐渐减小,降至 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 左右;第5阶段为2003年以后,随着调水调沙的开展,平滩流量又有所增大,恢复至 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 附近。总体变化是逐渐降低的,3个峰值分别为1964年、1985年和2013年,3个谷底为1957年、1974年和2002年,都是呈阶梯型减少。第2和第4阶段的持续性减小都是由于降水偏枯造成的,第5阶段平滩流量的升高主要是通过小浪底单库及其与上方水库联合调度的方式来调水调沙,利用洪水冲刷河道,使得下游各断面都得到冲刷,提高了下游整体的排洪能力。可见,以平滩流量作为黄河下游排洪基本能力的指标,反映出黄河下游的基本排洪能力是呈阶段性减弱的,尤其是1997—2007年期间,平滩流量低于 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$,不利于大于 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 及更大级别洪水的输送。

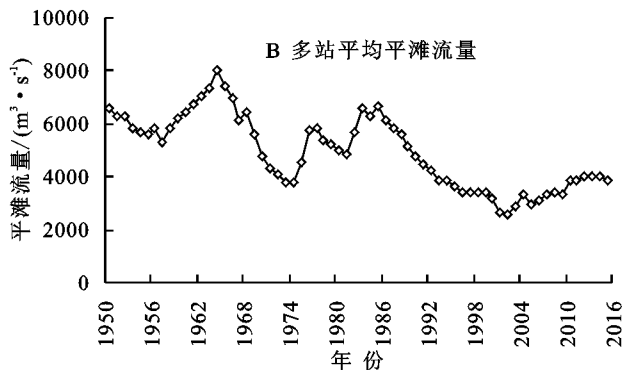
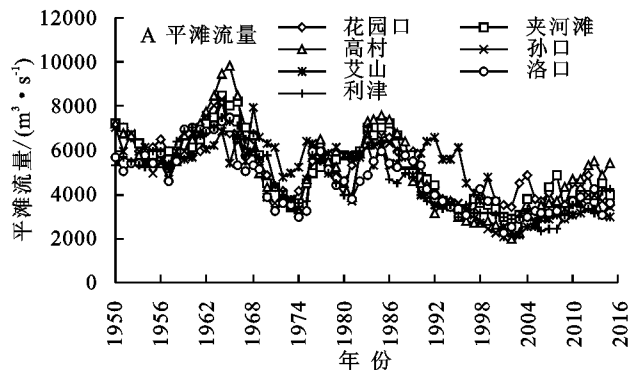


图1 1950—2015年黄河下游平滩流量随时间的变化

3.2 1950—2015年黄河下游漫滩洪水的时空演变

平滩流量只是反映河道的基本排洪能力,黄河下游发生的洪水都高于这个平滩流量,为分析黄河下游漫滩洪水的时空演变,将黄河下游每个站点年内发生漫滩洪水的日平均流量进行累加,逐年计算得到1950—2015年每一年发生漫滩洪水的累积日平均流量,计算所得的值列于表1中。漫滩洪水主要发生在3个阶段,1959年以前、1964—1985年和2002—2013年。中间夹杂两个明显的空缺时段:1960—1963年和1978—1980年,以及一个漫滩洪水发生很少的时段:1986—2001年。1959年以前的漫滩洪水为上小

下大型,从游荡段到过渡段再到弯曲河段的漫滩流量是逐渐增大的,1964—1977年的漫滩洪水以上小下大型为主,1981年以后发生漫滩洪水的流量在不同河段间差异不大。可见,漫滩洪水也是阶段性减少,并逐渐向全河段具有大致相当的漫滩流量发展。

3.3 1950—2015年黄河下游输沙能力的时空演变

根据黄河下游干流上主要站点1950—2015年含沙量的累积冲淤值来判断不同河段的输沙能力,从累积曲线看(图2),黄河下游河段的输沙能力随时间变化以减弱为主,游荡段的花园口—夹河滩、夹河滩—高村两个河段的输沙能力随时间的变化基本一致,花园口—夹河

滩段在 2000 年以前都是逐渐减小,从 1960 年的一 3.24 kg/m³ 逐渐降低到 -85.71 kg/m³,2000 年以后略有增强,至 2015 年回升到 -66.3 kg/m³;夹河滩—高村段逐渐从 1960 年的一 3.54 kg/m³ 降低到 2002 年的一 73.9 kg/m³,之后略微升高,到 2015 年为 -65.91 kg/m³;高村—孙口段从 1952 年的 0.02 kg/m³ 降至 2002 年的一 45.67 kg/m³,之后基本保持在这一水平,孙口—艾山段是唯一在研究期内输沙能力保持正值的河段,1950—1964 年逐渐增强,之后到 1980 年逐渐减弱,而后至 2015 年在震荡中攀升。艾山—洛口段的输沙能力随时间的

变化最小,只是有略微的减小,洛口—利津段在 1998 年以前变化也不明显,之后突然开始减弱,到 2002 年减小到 -29.3 kg/m³,之后的起伏较小。说明黄河下游河段的输沙能力在空间基本可以分为两段:花园口—孙口水文站之间的上段和孙口—利津水文站之间的下段,上段的输沙能力随时间以减弱为主,下段的输沙能力随时间的变化较微弱。在时间上也可以分为两个时期:2000 年以前,上段以减弱为主,下段变化较小;2000 年之后上段略有增加,下段略有减弱,可见,2000 年前后是河道冲淤转变的一个重要转折点。

表 1 黄河下游干流水文站漫滩洪水累积日平均流量

万 m³/s

年份	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	洛口	利津	年份	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	洛口	利津
1950	0	0	0	0	0	1.8	3.5	1983	1.5	0.7	0	0	0	4.7	0
1951	0	0	0	0	58.0	2.2	0.6	1984	0	0	0	1.3	4.2	2.4	1.3
1952	0	0	0	0	52.4	0	0	1985	1.5	2.3	0	0.7	1.4	1.3	0
1953	3.5	2.7	3.3	3.4	52.7	4.4	5.5	1986	0	0	0	0	0	0	0
1954	7.3	11.7	14.8	17.7	15.1	15.7	17.8	1987	0	0	0	0	0	0	0
1955	0	0.6	1.8	6.0	2.8	2.3	0.0	1988	3.1	4.1	0	1.2	0.6	0	1.5
1956	1.4	4.4	6.4	4.8	3.0	1.2	0.6	1989	0.0	1.1	0.5	0	0	0	0
1957	3.8	5.1	6.2	7.7	10.1	10.4	9.7	1990	0.0	0	0	0	0	0	0
1958	13.7	17.0	19.0	18.8	20.0	23.1	17.9	1991	0.0	0	0	0	0	0	0
1959	3.3	2.1	0.7	1.4	1.3	0.0	0.0	1992	0.5	0	0.3	0	0	0	0
1960	0	0	0	—	0	0	0	1993	0.4	0	0	0	0	0	0
1961	0	0	0	—	0	0	0	1994	1.3	0	0	0	0	0	0
1962	0	0	0	—	0	0	0	1995	0	0	0	0	0	0	0
1963	0	0	0	—	0	0	0	1996	3.5	4.7	4.8	3.1	1.0	3.8	1.5
1964	0.9	0	0	0.8	18.0	13.9	7.1	1997	0	0	0	0	0	0	0
1965	0	0	0	0	0	0	0	1998	0.4	0.4	0.6	0	0	0	0
1966	0.7	0	0	0.7	0.8	1.9	0	1999	0	0	0	0	0	0	0
1967	0.7	0	15.9	13.8	16.6	18.8	7.5	2000	0	0	0	0	0	0	0
1968	2.1	—	4.6	5.8	0	9.2	0	2001	0	0	0	0	0	0	0
1969	0	—	0	0	0	0	0	2002	0	1.2	2.4	1.9	0.7	0	0
1970	1.1	—	2.0	3.3	0	2.8	0	2003	0	0	12.3	12.9	14.3	0.3	0
1971	0	0	0	1.9	0	5.2	0	2004	0	0	0.3	0	5.5	0	0
1972	0	0	0.4	0	0	0.4	0	2005	0	4.2	0.7	2.7	2.6	0	4.1
1973	2.5	3.3	2.2	0	0	0.7	0	2006	1.9	5.3	2.6	4.4	4.9	2.8	5.0
1974	0	0.8	0.8	0.7	0	1.0	0	2007	0.8	0	1.2	4.6	5.7	3.6	5.7
1975	15.4	11.5	6.1	6.3	2.0	25.6	21.1	2008	3.1	0	1.6	2.9	3.6	3.0	4.1
1976	9.1	10.5	6.0	8.8	6.6	5.7	7.6	2009	3.5	3.8	0	3.3	3.2	3.1	3.1
1977	1.4	2.5	0	0	0	0	0	2010	0	3.1	0	0.7	4.0	0.8	0
1978	0	0	0	0	0	0	0	2011	0	0	0	0	1.6	0	0
1979	0	0	0	0	0	0.5	0	2012	0	1.2	0	0	1.4	0.7	1.0
1980	0	0	0	0	0	0	0	2013	0.4	1.2	0	0.8	6.6	0.9	8.6
1981	12.3	5.8	19.2	17.4	3.1	16.8	0	2014	0	0	0	0	0.6	0.6	0
1982	4.2	4.1	4.6	2.4	3.1	4.2	0	2015	0	0	0	0	0	0	0

注:“—”代表未发现。

3.4 黄河下游排洪输沙能力变化的影响因素

影响黄河下游排洪输沙能力最为直接的因素为:上中游来水来沙的变化和下游河道随水沙变化的调

整。上中游来水来沙需要通过下游河道输送,输送水沙的过程就是排洪输沙的过程,在排洪输沙过程中,洪水和泥沙又会影响河道,洪水冲刷河道使河道加

深,有利于更多径流和泥沙的输送,或者泥沙淤积于河道,使河道变得宽浅,阻碍后期洪水和泥沙的输送。

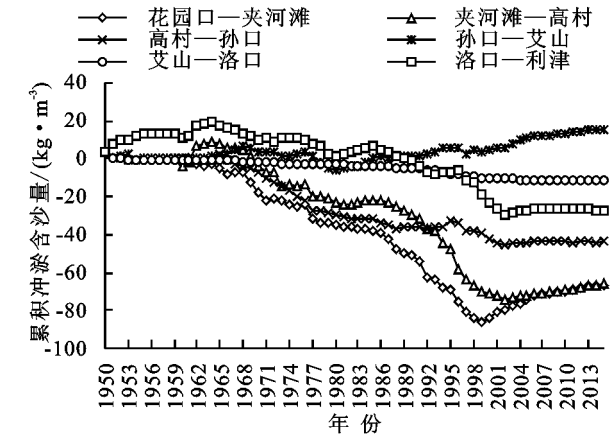


图 2 黄河下游各河段输沙能力随时间的变化

3.4.1 上中游来水来沙的变化 从平滩流量与花园口站年径流量的关系来看(图 3),两者存在强相关,

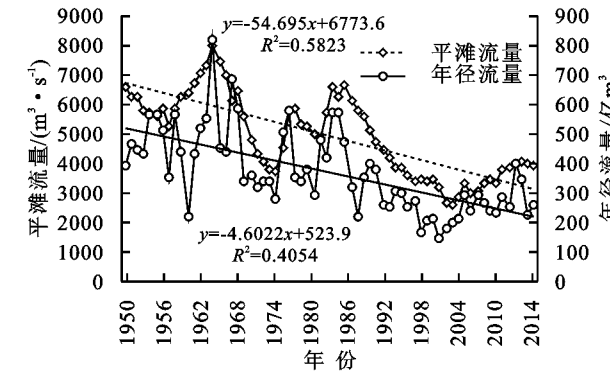
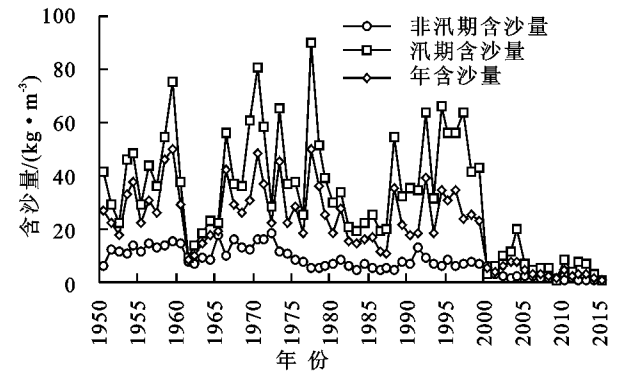


图 3 花园口站 1950—2015 年水沙的变化

3.4.2 下游河道的调整 黄河的来水明显减少,但含沙量并未明显减少,在 2000 年以前都明显较高,仅在 20 世纪 60 年代前期和 80 年代前期存在两个明显的低值时段,2000 年之后突然减少,进入一个低含沙量时段(图 4)。高含沙量使得河床淤积,不断抬高,这已是不争的事实。以 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应的水位来看,黄河下游河床在 2000 年以前整体都在抬升,花园口站从 1958—2000 年升高了 1.88 m ,夹河滩站从 1953—2002 年升高了 3.35 m ,高村站从 1950—2000 年升高了 4.19 m ,孙口站从 1952—2003 年升高了 4.05 m ,艾山站从 1952—2001 年升高了 3.93 m ,洛口站从 1958—2003 年升高了 4.46 m ,利津站从 1951—2001 年升高了 2.68 m 。从升高的程度来看,位于上段的花园口和尾端的利津升高的幅度远低于夹河滩—洛口河段,升高的幅度也说明河道淤积主要发生在夹河滩至洛口之间。在实施调水调沙后,河道开始冲刷, $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的水位逐渐下降,从上至下,到 2015 年,各站点的水位分别降至 $92.20, 72.86, 61.52, 47.96, 41.01, 29.86, 13.00\text{ m}$,与 2000 年的 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流

平滩流量与年径流量的皮尔逊相关系数为 0.77 ,随着时间的变化也具有相似性,平滩流量和年径流量两者都存在随时间减少的趋势,差异表现在花园口站年径流量的年际间波动较大,使得曲线起伏较大,而平滩流量的年际波动较小,曲线更为平滑,这是由于平滩流量具有一定的继承性,前期较大洪水会形成更大的平滩流量,而紧随其后的年份即使出现较小的径流量,河道依然能保持较大的平滩流量。也就是说,平滩流量依赖于上中游径流的塑造,但河道本身能保持对前期的继承性,但总体趋势是一致的。花园口水文站的含沙量以 2000 年为界分为明显的两个时段,在 2000 年以前含沙量较高,多年平均年含沙量为 $26.57\text{ kg}/\text{m}^3$,自 2000 年开始,含沙量急剧降低,多年平均值为 $3.81\text{ kg}/\text{m}^3$,这个突变与河道的冲淤突变是完全一致的。可见,降低含沙量才能实现黄河下游河道的冲刷。



量对应的水位相比,分别下降了 $2.13, 2.93, 2.61, 1.06, 1.69, 1.75, 1.39\text{ m}$ 。花园口和夹河滩基本回到了 50 年代的水位,而下游站点的水位回到最初的水平还有一些差距,这说明调水调沙对于高村以上河段的效果较好,而高村以下河段的冲刷少于上段,高村以下的排洪输沙压力也高于高村以上河段。

从 1950—2015 年黄河下游主要站点 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应水位之间的相关系数也可以看出(表 2),花园口仅与夹河滩和高村之间具有强相关,而与其他站点间的相关性差一些,夹河滩也存在类似情形,与高村的相关性最好,与其他站点间的相关性略差。高村及以下河段站点间的相关性都很强,说明它们之间的变化具有很好的一致性。主要站点 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应水位相关系数矩阵说明黄河下游的冲淤也是以高村站为界,高村以上的花园口、夹河滩和高村 3 个水文站之间的冲淤具有较好的一致性,高村以下的孙口、洛口、艾山和利津 4 个水文站之间的冲淤具有更强的关联,与输沙能力在空间上的差异分析是完全一致的。

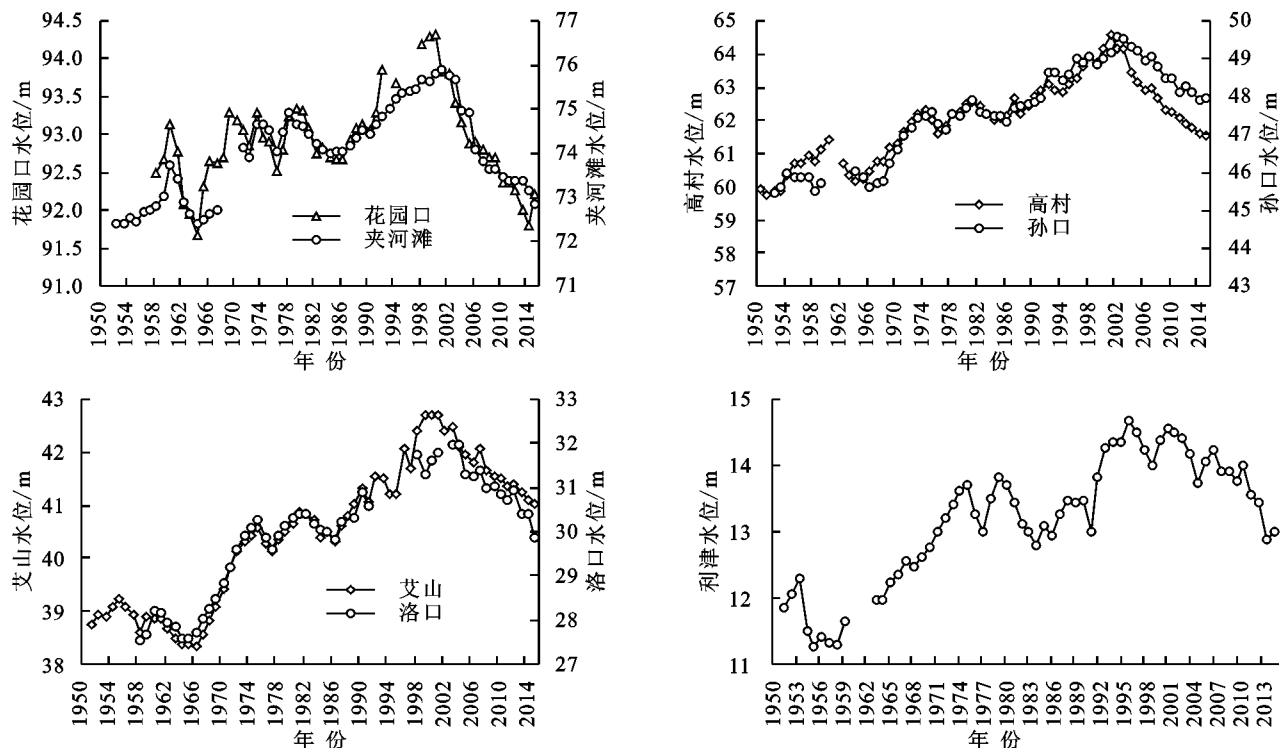


图 4 1950—2015 年黄河下游干流主要站点 $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量对应水位随时间的变化

表 2 1950—2015 年黄河下游干流主要站点 $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量对应水位之间的相关系数

站点	花园口	夹河滩	高村	孙口	洛口	艾山	利津
花园口		0.88	0.74	0.45	0.47	0.52	0.59
夹河滩			0.93	0.80	0.75	0.80	0.84
高村				0.93	0.92	0.93	0.88
孙口					0.98	0.98	0.92
洛口						0.98	0.93
艾山							0.89

4 讨论与结论

新中国建立以来,黄河下游经历了严重的淤积,随着对黄河下游水沙输送认识的提高,上中水库的建设、中游水土保持工作的全面开展,进入黄河下游的水沙发生了明显的变化,水库的建设和运行方式都是影响黄河下游的重要因素,水库的运用对进入下游水沙的影响分为两个方面:一是对洪峰的削减;二是拦蓄了大量的水沙。在 20 世纪 50 年代末期及 60 年代初期,主要受三门峡水库的影响,三门峡水库蓄水阶段,下游的平滩流量是增大的,转入滞洪排沙后开始逐渐减小,之后转为蓄清排浑,平滩流量又有所提升,这种状态持续到 1986 年龙羊峡水库的下闸蓄水,中间夹杂着 1974 年刘家峡水库的影响,可见,黄河下游排洪能力随时间变化的节点与各水库的建设使用是完全对应的。含沙量的变化存在两个重要的时间节点:1979 年和 1999 年。1979 年是水土保持措施在黄河中游效果凸显的时间节点,1999 年是黄河中游实施退耕还林还草开始实施的时间点。前一时间节点部分的与水量减少相叠

合,并未使得含沙量明显减少,而第 2 个时间点后,进入黄河下游的泥沙明显减少,使得含沙量明显降低,形成相对大的水量携带更少泥沙的局面,引起了河道的冲刷,提高了河道的排洪输沙能力。

由于河道的淤积抬升和持续萎缩,下游河道的排洪输沙能力不断降低,对水沙的调控提出越来越高的要求,经过 21 世纪初期 10 余年的水沙调控,黄河下游的淤积问题得到了部分缓解,但问题远未解决,排洪输沙依然是黄河下游河道平衡和大堤内外生产生活安全的主要问题。对黄河下游排洪和输沙时空演变分析发现:(1) 黄河下游河道各河段具有相似的平滩流量,在空间上,基本排洪能力是相当的;在时间变化上具有一致性,受径流丰枯和水库运用的影响,黄河下游的平滩流量呈阶段性减小,至 20 世纪末 21 世纪初降至最低点,之后有所增加。(2) 1950—2015 年,黄河下游的输沙能力在高村以上河道在 20 世纪后期逐渐降低,21 世纪有所提高,高村以下河段的输沙能力变动较小。(3) 排洪能力的减小既有上游水沙波动的影响,又有水库建设使用的影响,2000 年以前受上游水沙波动影响较大,2000 年以后输沙能力的影响主要是小浪底水库的使用,小浪底投入使用前,含沙量都保持比较高的水平,小浪底投入使用后,含沙量急剧降低,利用大流量的低含沙洪水对下游河道进行了冲刷,降低了河床的高度,提高了排洪输沙的能力,但高村以上河道的冲刷比高村以下河段的冲刷更明显,提高黄河下游整体的排洪输沙能力仍是未来河道整治的重点。

(下转第 12 页)

- 中:山西农业大学,2013.
- [7] 吴佳,王林华,李占斌,等.黄土高原主要秋作物坡地降雨入渗特征参数研究[J].水土保持学报,2014,28(6):115-119.
- [8] 张旭昇,薛天柱,马灿,等.雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(6):66-70.
- [9] 罗利芳,张科利,李双才.撂荒后黄土高原坡耕地土壤透水性 and 抗冲性的变化[J].地理科学,2003,23(6):728-733.
- [10] 李华林,高华端,杨涛,等.凯掌喀斯特小流域不同植被措施的减沙功能[J].浙江农林大学学报,2017,34(4):687-694.
- [11] 李瑞,李勇,熊康宁,等.黔中喀斯特区典型土地利用方式及耕作措施的水土流失调控效应[J].水土保持通报,2017,37(6):136-140.
- [12] 覃莉,刘凤仙,杨智.喀斯特地区不同坡度径流小区水土流失特征分析[J].中国水土保持,2015(8):63-65.
- [13] 李月,周运超,白晓永,等.径流小区法监测水土流失的百年历程(1915—2014年)[J].中国水土保持,2014(12):63-66.
- [14] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等.不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J].水土保持学报,2015,29(2):45-49.
- [15] 江忠善,刘志,贾志伟.地形因素与坡地水土流失关系的研究[J].水土保持研究,1990(2):1-8.
- [16] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
- [17] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
- [18] 孙家振.不同植被坡面土壤侵蚀特性研究[D].合肥:安徽农业大学,2011.
- [19] 傅伯杰.黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M].北京:商务印书馆,2002.
- [20] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [21] Steiner J L, Kanemasu E T, Clark R N. Spray losses and partitioning of water under center pivot sprinkler system[J]. Transactions of the Asae, 1982, 26(4):1128-1134.
- [22] Saffigna P G, Tanner C B, Keeney D R. Non-Uniform Infiltration Under Potato Canopies Caused by Interception, Stemflow, and Hilling[J]. Agronomy Journal, 1976, 68(2):337-342.
- [23] 朱连奇,许叔明,陈沛云.山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].地理研究,2003,22(4):432-438.
- [24] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [25] 卢龙彬,付强,黄金柏.黄土高原北部水蚀风蚀交错区产流条件及径流系数[J].水土保持研究,2013,20(4):17-23.
- [26] 李广,黄高宝.雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):85-90.
- [27] 张思毅,梁志权,谢真越,等.植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J].水土保持学报,2016,30(3):1-5.
- [28] Busscher W J. Simulation of Infiltration from a Continuous and an Intermittent Subsurface Source[J]. Soil Science, 1979, 128(1):49-55.
- [29] 寇馨月,黄俊,姜学兵,等.不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):27-31.

(上接第 6 页)

参考文献:

- [1] 任美镠.黄河的输沙量:过去,现在和将来:距今 15 万年以来的黄河泥沙收支表[J].地球科学进展,2006,21(6):551-563.
- [2] 费祥俊,吴保生.黄河下游输沙平衡关系及应用[J].水力发电学报,2015,34(7):1-11.
- [3] 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.
- [4] 冉大川.黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J].资源科学,2006,28(1):93-100.
- [5] 李文文,傅旭东,吴文强,等.黄河下游水沙突变特征分析[J].人民黄河,2012,34(10):19-20.
- [6] 楚纯洁,李亚丽.近 60 年黄河干流水沙变化及其驱动因素[J].水土保持学报,2013,27(5):41-47,132.
- [7] 胡彩虹,王纪军,柴晓玲,等.气候变化对黄河流域径流变化及其可能影响研究进展[J].气象与环境科学,2013,36(2):57-65.
- [8] 姚文艺,苏运启,李勇.黄河下游排洪输沙基本功能的影响因素及判别指标[J].泥沙研究,2009(1):1-9.
- [9] 曲少军,申冠卿,魏向阳,等.黄河下游河道排洪能力分析[J].人民黄河,2000,22(11):3-4.
- [10] 韩其为.黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J].泥沙研究,2004(3):1-13.
- [11] 许炯心.黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因[J].地理研究,2006,25(2):276-284.