

百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析

姚文艺¹,高亚军²,安催花³,焦鹏¹

(1. 黄河水利科学研究院,水利部水土流失过程与控制重点实验室,河南 郑州 450003;

2. 黄河水利委员会水文局,河南 郑州 450004;3. 黄河勘测规划设计有限公司,河南 郑州 450003)

摘要:根据黄河有实测资料以来的水文泥沙定位观测数据,利用非线性统计方法分析了1919—2012年黄河潼关以上河段水沙系列变化趋势。20世纪80年代中期以来水沙变化特点表明,黄河年径流量、年输沙量自20世纪80年代中期以来总体呈不断减少之趋势,而上中游水沙关系则早于20世纪60年代末已发生突变,1986年发生的突变属上中游同时发生的第2次突变。从百年尺度看,黄河水沙变化在1960年以前主要受到气候等自然因素影响,径流泥沙系列随降雨丰歉而出现相应的丰枯变化,之后黄河水沙变化受气候等自然因素和人类活动因素的双重影响,尽管不同时段降雨有丰歉变化,但径流量、输沙量都持续减少;近百年内年输沙量趋势度的绝对值明显大于年径流量趋势度的绝对值,中游的年径流量、年输沙量的趋势度的绝对值明显大于上游的;近30年是黄河水沙百年尺度中最枯的时段,其变化的突出特点表现在来水来沙量不断显著减少,水沙变化程度在空间上分布不均,泥沙主要减于中游而径流主要减于上游,水沙年内分配趋于均匀,来沙系数趋于降低,水沙搭配关系趋好。

关键词:百年尺度;径流量;输沙量;水沙关系;水沙变化;减水减沙;黄河

中图分类号:P333

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)05-0112-09

Analysis of trend of runoff and sediment load in upper and middle reaches of Yellow River at century scale//YAO Wenyi¹, GAO Yajun², AN Cuihua³, JIAO Peng¹ (1. Key Laboratory of Sediment Yield Process and Control on the Loess Plateau of MWR, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Hydrological Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: According to observed data of runoff and sediment load in the Yellow River from 1919 to 2012, the trend of the runoff and sediment load in the reaches upstream of Tongguan was analyzed with nonlinear statistical methods. The annual runoff and sediment discharge has shown a declining trend in the Yellow River since the mid-1980s, and the relationship between runoff and the sediment load in the upper and middle reaches of the Yellow River abruptly changed before the late 1960s and abruptly changed again in 1986. At the century scale, the runoff and sediment changes of the Yellow River were mainly influenced by climatic and other natural factors before 1960, high and low runoff and sediment loads occurred with changes in rainfall, while the runoff and sediment changes were influenced by human activities and natural factors since 1960. Though rainfall showed significant changes at different times, the runoff and sediment load decreased continuously. Over the last hundred years, the absolute value of the tendency of the annual sediment transport amount has been significantly higher than that of the annual runoff, and the absolute values of the tendency of annual runoff and the sediment transport amount in the middle reach have been significantly higher than those in the upper reach. Over the last 30 years, the runoff and sediment load were at their lowest levels in the Yellow River, and the outstanding characteristics were the continuous decrease of the runoff and sediment load, the uneven spatial distribution of the runoff and sediment load, the decrease of the sediment load mainly occurring in the middle reaches, and the decrease of runoff mainly occurring in the upper reaches. Thus, the annual distribution of the runoff and sediment load tended to be uniform, the incoming sediment coefficient tended to decrease, and the relation between runoff and sediment load tended to be strong.

Key words: century scale; runoff; sediment load; relationship between runoff and sediment; runoff and sediment changes; runoff and sediment reduction; Yellow River

黄河是世界上大江大河中含沙量最高的河流, 1985年以前三门峡水文站多年平均含沙量为 38 kg/m³,

比国外含沙量最高的科罗拉多河还高 27%^[1]。同时,黄河径流量、输沙量年际变化大,水沙系列震荡

周期明显。例如,在人类活动对流域下垫面干扰相对较弱的1919—1959年,1933年黄河中游陕县水文站的输沙量达到39.1亿t,而1928年输沙量只有4.88亿t^[2];1923—1931年平均输沙量为10.58亿t,而1932—1940年达到18.82亿t。20世纪80年代中期以来黄河水沙发生新的变化,径流泥沙持续减少,如2014年输沙量减至不到1亿t,约为多年平均输沙量16亿t的1/22,不到1933年的1/50。

黄河水沙变化直接关系到治黄方略的确定、流域水沙资源的配置与管理,以及重大水利工程的布局,是一项基础性、战略性问题,也是我国水科学研究领域的重大问题。自20世纪80年代中期以来,黄河水沙发生显著变化,引起各界学者及流域管理者的高度关注。几十年来,通过国家、水利部及其他部委的各类科学研究计划资助,开展了以水利部黄河水沙变化研究基金两期专项为代表的一系列研究工作^[3-4],重点对1996年以前黄河流域水利水土保持措施减水减沙量进行评估,明晰各项措施对水沙变化的贡献率,预测未来水沙变化趋势等^[5-9],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Miao等^[10]根据黄河流域15个水文站的水沙实测资料分析了1950—2000年间的水沙变化原因,认为1980—1990年的水量突变源自人类活动的取水,而泥沙突变则与水库建设的干扰有关。Wang等^[11]利用黄河干流4个水文站的水沙实测资料及流域降雨资料,采用数理统计法对比分析了1950—2005年降雨、人类活动对黄河花园口泥沙量减少的贡献率。Miao等^[12]通过重建1960—2008年天然水沙量时间序列分析了1970—2008年黄河上游气候变化和人类活动对径流量、泥沙量减少的贡献率。姚文艺等^[13]综合利用多种分析方法揭示了黄河1997—2006年水沙变化成因,预测了未来30~50年黄河水沙变化趋势。这些研究成果在不同程度上为黄河治理、开发与管理提供了科学依据。不过,目前的研究时间尺度多限于20世纪80年代中期以来的某一较短时段,缺乏从较长时间尺度去认识水沙变化的特点与趋势,这样往往难以回答近几十年来水沙变化到底是趋势性的还是阶段性的这一重要科学问题,难以完全满足治黄战略决策的需求。笔者拟根据黄河干流主要水文站水沙观测资料,基于已有大量相关研究成果,分析1919—2012年近百年尺度水沙系列的变化特征及趋势,并剖析了20世纪80年代中期以来尤其是近10多年来黄河水沙剧变的特点。

1 研究区域、数据及方法

1.1 研究区域

黄河径流主要来源于上游,而泥沙则主要来自于中游头道拐—潼关区间,因此取黄河潼关以上为重点研究区域(图1)。头道拐以上区域为黄河上游,其中唐乃亥以上为黄河河源地区,是三江源的重要组成部分,唐乃亥—兰州区间建有龙羊峡、刘家峡等大型水库,兰州以下至头道拐区间有宁夏、内蒙古两大灌区,基本上属于耗水区,因此,兰州断面集中反映了上游地区的产流状况。虽然兰州以上流域面积只有22.25万km²,占黄河流域面积79.49万km²的28.0%,为潼关以上流域面积72.41万km²的30.7%,但是1919—2012年平均径流量占潼关断面的84%,故以此作为分析上游水沙变化特征的代表断面。



图1 研究区域示意图

黄河中游头道拐—潼关流域面积26.6万km²,其产沙量占全河的90%以上,其中头道拐—龙门产沙量约占58%,是黄河泥沙来源最为集中的地区。该区间有25条一级主要入黄支流,包括龙门以上的皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河等,以及龙门以下的泾河、北洛河、渭河和汾河。头道拐—潼关不仅是黄河泥沙的主要来源区,也是黄河下游河道主要淤积物粗泥沙(粒径大于0.05mm)的主要来源区,其产粗泥沙量占全河粗泥沙量的94.6%。

黄河上中游干流潼关以上布设有黄河沿、唐乃亥、兰州、头道拐、龙门等20处国家基本水文站,其中9处为重要控制站,7处为参证站,4处为一般站。考虑到对径流、泥沙主要来源区产水产沙状况及大型水利工程调控水沙效应的表现作用,选择兰州、头道拐、龙门和潼关4个水文站作为分析站。兰州水文站以上为黄河径流主要来源区,且位于刘家峡水库下游100km处,可较好地反映水库调控水沙的作用;头道拐水文站位于黄河上游最末断面,可反映由上游进入中游的水沙状况;头道拐以下至龙门是黄河多沙粗沙区,通过龙门水文站水沙测验资料可了解黄河泥沙主要来源区产沙变化状况;潼关水文站

位于三门峡水库入库控制断面,控制黄河流量的90%以上、泥沙量的近100%,是集中反映黄河水沙变化的重要水文站。

1.2 数据资料

采用黄河干流主要控制水文站1919—2012年实测径流量、输沙量,其中1998年前取自《1919—1951年及1991—1998年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计》^[14],1998年以后来自黄河水利委员会兰州、头道拐、潼关、龙门等水文站历年观测资料。黄河设立最早的水文站是陕县站,于1919年开始观测,而其他水文站大多建于1953、1954年。根据黄河治理开发的需要,黄河水利委员会分别于1952、1959年会同有关单位对干流其他主要控制站的实测水沙系列进行了插补延长,其后于1992年又对黄河历年水文基础资料进行了审查评价,本次所使用的资料是审查成果。对年月流量资料的插补,除河津、兰村两站采用雨量资料外,其余多数站以陕县、兰州两站资料为基本依据,采用上下游水文站统计相关法,其中相邻站有实测资料的,尽量利用相邻站的实测值。输沙量缺测资料的插补,尽量采用本站水量与沙量的相关关系,如本站水量和沙量关系实在不好,则采用上下游水文站沙量相关法。

1.3 分析方法

1.3.1 MWP法

MWP(Mann-Whitney-Pettitt)法是Pettitt于1979年提出的一种根据时间序列找出突变点,并检定该点前后时段资料之累积分布函数是否有显著差异的非参数统计检验方法,属于无母数统计(nonparametric statistics)理论中的一种方法^[15],其不受限于资料母群体的分布,可应用于各种概率分布数据的分析,故又可称为与分布无关的统计方法。

假设 T 为序列长度,序列中最可能的变化点为 t 时刻,将该序列分成前后两部分,即 x_1, \dots, x_t 和 x_{t+1}, \dots, x_T ,定义检验指标:

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1 \leq t \leq T) \quad (1)$$

其中

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & (x_i - x_j > 0) \\ 0 & (x_i - x_j = 0) \\ -1 & (x_i - x_j < 0) \end{cases}$$

可由 $|U_t|$ 的最大值确定可能发生的突变点位置。MWP检定序列时,依据顺序统计量的理论,进而引用K-S两样本检定,检定两样本累积分布函数最大差值的累积概率,即为该序列中由 $|U_t|$ 的最大值找到的可能发生突变点位置的累积概率 P :

$$P(K_T \leq \alpha) = 1 - \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (2)$$

其中 $K_T = \max_{1 \leq i \leq T} |U_i|$

式中: α 为置信度,当累积概率 P 越接近1,则存在突变点的趋势越明显。当 $P > P_\alpha$ 时,表示存在突变点的趋势明显。

1.3.2 双累积曲线法

双累积曲线(double mass curve, DMC)法由美国学者Merriam^[16]于1937年提出,该法在直角坐标系中绘制同期内一个变量的时段累积值与另一个变量相应时段累积值的关系曲线,根据累积关系曲线分析两个变量之间响应关系的变化趋势,并判断其变化时间和变化量。双累积曲线法的理论基础是自变量的累积值与因变量的累积值成正比,在直角坐标上可以表示为一条直线,其斜率为两要素对应点的比例常数。如果双累积曲线的斜率发生突变,则意味着其对应的累积值的比例可能根本就不是常数,或者两个变量之间的比例常数发生了改变,此时斜率突变点所对应的年份就是两个变量的关系出现突变的时间。

2 百年尺度水沙变化趋势分析

2.1 不同时段水沙变化特点

1919—2012年黄河潼关以上年径流量、年输沙量除年际间有一定的变化外,还具有明显的时段变化特征。依据实测年径流量、年输沙量的变化(图2),并考虑20世纪60年代以前黄河流域受人类活动影响较小,以及自1986年始黄河上游龙羊峡水库、刘家峡水库联合运用等因素,将年径流量、年输

表1 黄河潼关以上主要断面不同时段径流量、输沙量

时段	兰州		头道拐		龙门		潼关	
	径流量/亿 m ³	输沙量/亿 t						
1919—1932年	259.1	0.75	208.8	1.0	273.7	8.3	342.4	12.3
1933—1959年	336.0	1.30	271.7	1.6	352.2	11.8	469.6	17.8
1960—1986年	339.5	0.69	252.2	1.4	307.1	8.5	402.3	12.1
1987—1999年	265.7	0.51	163.0	0.4	204.7	5.3	261.4	8.1
2000—2012年	281.1	0.21	162.1	0.4	182.8	1.6	229.0	2.8
1919—2012年	308.2	0.78	226.5	1.1	283.7	8.0	369.3	11.9

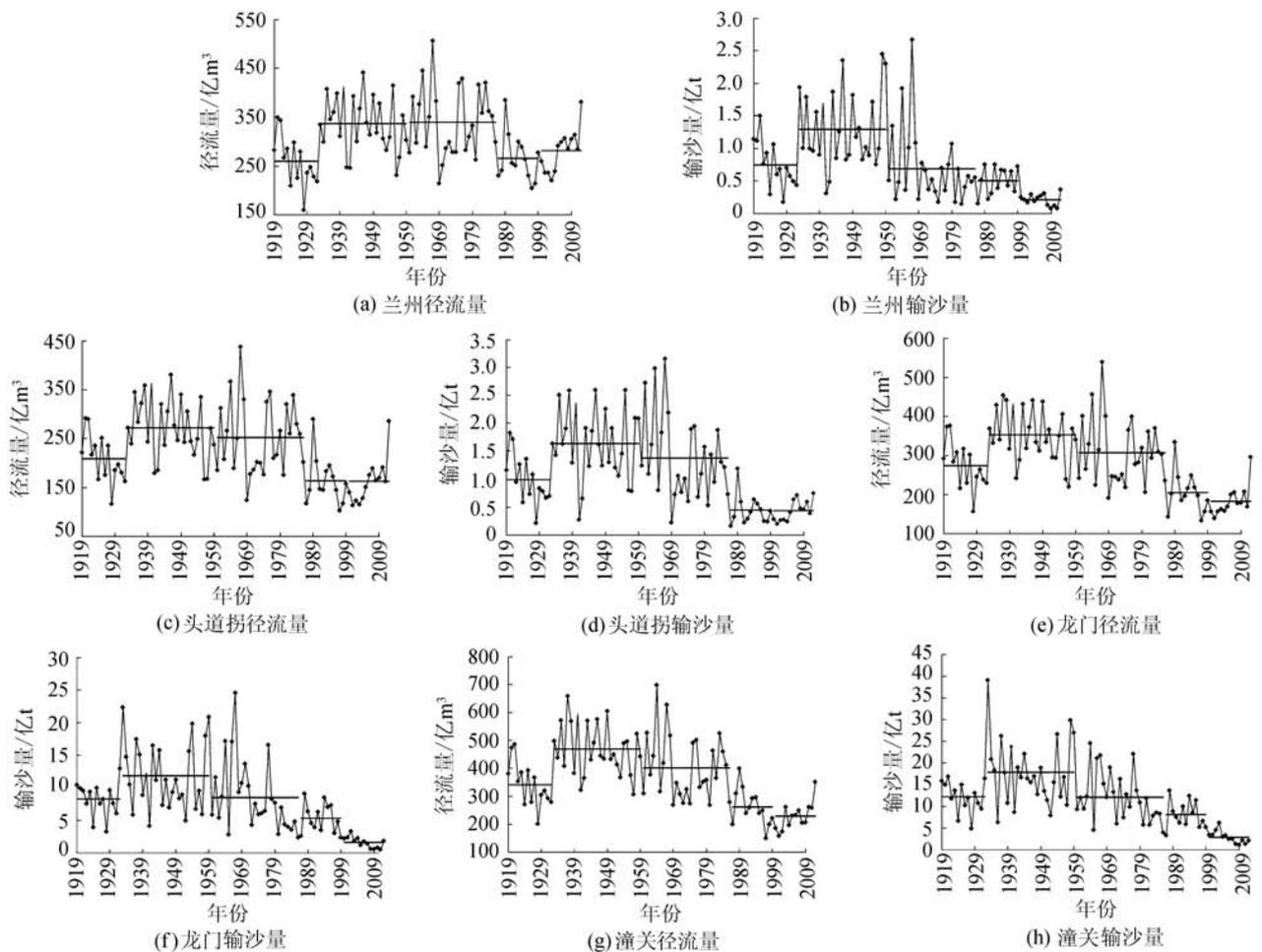


图2 潼关以上主要断面年径流量、年输沙量变化过程

沙量过程划分为5个时段,即1919—1932年、1933—1959年、1960—1986年、1987—1999年、2000—2012年。

1919—2012年兰州、头道拐、龙门和潼关的年均径流量分别为308.2亿 m^3 、226.5亿 m^3 、283.7亿 m^3 、369.3亿 m^3 ,输沙量分别为0.78亿t、1.1亿t、8.0亿t、11.9亿t(表1)。

1919—1932年是典型的枯水枯沙年,4个断面最枯年份的径流量水平基本上与近30年来的相当,如潼关1928年径流量约为200亿 m^3 ,与1987年、1998年、2004年、2008年和2009年的相当,但后一时段的年均径流量、输沙量仍低于前者,如径流量较前者低6.2%~28.8%,输沙量低52.0%~58.6%,就是说近30a的径流泥沙系列是百年尺度中最枯的年份;1933—1959年为丰水丰沙系列,其径流量、输沙量都较1919—1932年明显增加,径流量增加29.7%~37.2%,输沙量增加较多,为42.2%~73.3%。自1960年以后,年径流量、年输沙量均趋于减少,对于径流量来说,与1933—1959年相比,1960—1986年除兰州径流量稍增1.0%外,其他断面的径流量减少7.2%~14.3%,1987—1999年减

少20.9%~44.3%,2000—2012年减少16.3%~51.2%;对于输沙量来说,与1933—1959年相比,相应时段分别减少12.5%~47.1%、54.5%~75.0%和75.0%~86.4%。综合分析表明,①自20世纪80年代中期以来,无论是径流量还是输沙量均明显减少,其中以2000年以来减幅最大;②与1933—1959年相比,1987—1999年和2000—2012年两个时段径流量减幅增加并不明显,最多不足7个百分点,而对于输沙量减幅来说,除头道拐外其他断面的减幅均明显增加,如兰州、龙门和潼关2000—2012年减幅比1987—1999年的大23.1、31.3、29.8个百分点。另外,自1960年以后,各断面对应时段的径流量、输沙量在减少的同时,径流量减幅明显小于输沙量减幅,除兰州外的径流量减幅为4.0%~51.2%,输沙量的减幅则达到12.5%~86.4%,后者减幅是前者的2~3倍。

应当注意的是,与其他断面相比,兰州断面2000年以来年径流量较前一时段反增5.7%,而年输沙量较前一时段则是减少的,且减幅达58.8%。

黄河水沙系列的丰枯变化是气候等自然因素与人类活动因素共同作用的结果。在20世纪60年代

以前,人类活动较弱,水沙系列丰枯主要受制于气候因素,降雨为主导因子,而之后则受制于人类活动、气候因素的共同影响,不过每一时段的主导因子是不同的。例如,根据董安祥等^[17-19]的分析,最近370年黄河流域存在7个干旱期,其中之一就是20世纪10年代后期至20年代,1922—1932年属于异常干旱期,其中1927年的降水量较1961—1990年平均值的距平百分数为-42.1%,因此该时段成为黄河时段最长且最枯的枯水段之一^[20]。20世纪30—40年代黄河流域进入湿润期,降雨量丰沛,1933年陕县站出现特大水大沙年,最大洪峰流量22000 m³/s,实测年输沙量39.1亿t。20世纪50—60年代也是降水丰沛期^[21],因此,1933—1959年成为黄河近百年以来的丰水期。自20世纪60年代黄河上游刘家峡、龙羊峡等大型水库先后建成运用和多项水利水土保持措施逐步实施,且70年代黄河流域又进入了显著干旱期,这一时期水沙变化受到人类活动和降雨减少的双重作用,降雨对径流量减少的贡献率基本上占6~7成、人类活动占3~4成,两者对输沙量减少的贡献率分别占2~7成和3~8成^[13]。2000年以来,尽管黄河流域降雨量较前期明显偏丰,但由于退耕还林还草等封禁治理成效显著,径流泥沙较前一时段仍进一步减少,根据分析,2000—2012年人类活动对泥沙减少的贡献率占到近80%,人类活动对减沙起到了主导作用。

2.2 百年尺度水沙突变临界年份检验

所谓黄河水沙突变或变异,不仅指径流量、输沙量有了明显减少,与此同时水沙关系也发生了明显变化。

MWP法检验表明(图3),在99%信度水平下,兰州输沙量统计检验指标 U_t 在1968年出现低谷点并超出临界水平线,头道拐输沙量 U_t 分别在1968年和1986年出现低谷点并超出临界水平线,龙门、潼关输沙量 U_t 均在1978年出现低谷点并超出临界水平线。径流量系列MWP法检验表明,在99%信度水平下,兰州径流量 U_t 在1986年出现低谷点并超出临界水平线,头道拐、龙门和潼关径流量 U_t 均有两个低谷点并超出临界水平线,分别是1968年和1986年。

径流量-输沙量双累计曲线进一步表明(图4),上游河段在20世纪60年代末以前、中游河段在20世纪70年代末以前,径流量和输沙量基本上呈同步变化趋势,两者有着较强的线性相关关系,各时段的斜率无明显变化,但其后输沙量减幅均大于径流量减幅,曲线斜率变小,即单位径流量的输沙量明显减少,兰州、头道拐的突变点是1968、1986年,龙门、潼

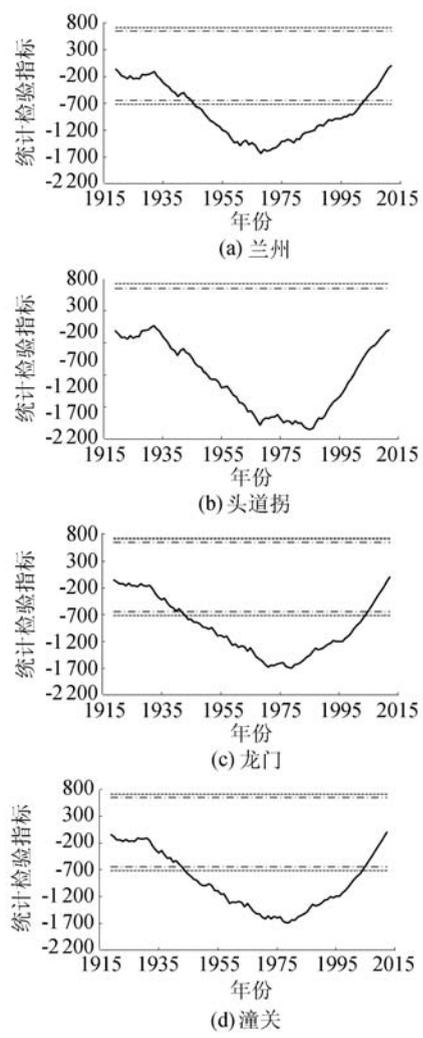


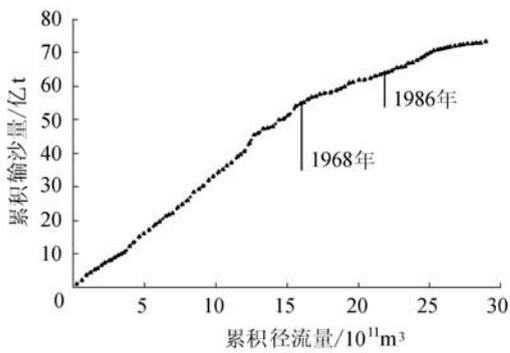
图3 潼关以上主要断面输沙量趋势变化临界检验

关均有两个相同的显著变点,分别为1978年和1986年,突变临界年份与MWP法检验结果基本一致。另外,自2000年以来,曲线斜率相对更小,说明单位径流量的输沙量又有进一步减少。

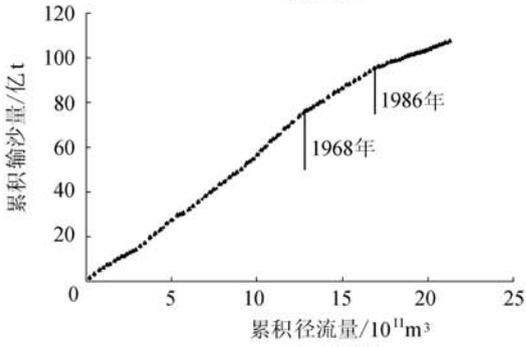
综上所述,从百年尺度看,虽然1919—1932年为显著的枯水枯沙年,不过其水沙关系并未发生突变。虽说1986年以来尤其自2000年以来黄河年径流量、年输沙量大幅减少,但1968、1978年以前上游、中游的水沙关系就已分别发生变化,只不过是到1986年或2000年黄河水沙关系再次发生突变。另外,黄河上中游水沙关系突变的年份并不一致,上游河段的兰州、头道拐的水沙关系突变点为1968、1986年,而中游河段的龙门、潼关的突变点为1978、1986年,上中游水沙关系突变的重合点是1986年,这说明黄河上中游水沙变化的机制是不同的,反映了黄河水沙变化规律的复杂性。

2.3 百年尺度水沙变化趋势分析

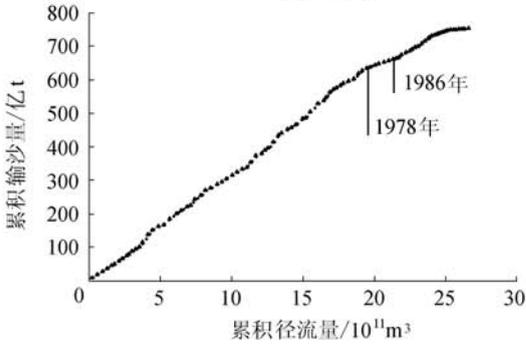
为定量分析水沙变化趋势,将百年尺度水沙序列划分为 n 个丰枯变化时段,定义水沙变化趋势度为



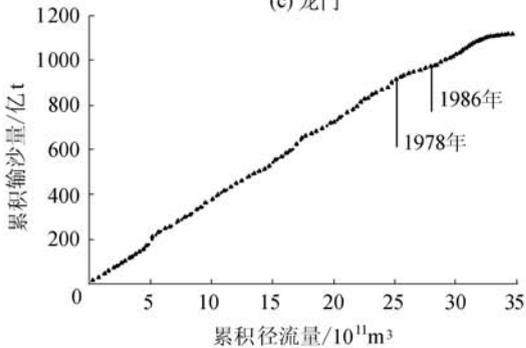
(a) 兰州



(b) 头道拐



(c) 龙门



(d) 潼关

图4 径流量输沙量双累积曲线

$$\lambda = \sum_i^n \left(\frac{\bar{x}_i}{\bar{X}} - 1 \right) \quad (3)$$

式中： λ 为水沙变化趋势度； i 为时段序号； n 为时段数； \bar{x}_i 为第 i 时段径流量或输沙量的均值； \bar{X} 为径流量或输沙量长系列均值。当 $\lambda \rightarrow 0$ 时，径流泥沙系列在不同时段的增减幅度基本平衡，在分析时间尺度内没有明显的趋势性变化；当 $\lambda > 0$ 时，系列在各时段的正向波动明显，在分析时间尺度内处于趋势

性增大状态，趋势度越大表明增大的趋势越明显；当 $\lambda < 0$ 时，在分析时间尺度内系列处于趋势性减小状态，趋势度越小说明减小趋势越明显。

根据 1919—2012 年实测径流量、输沙量系列和表 1 划分的时段，由式(3)计算的潼关以上 4 个代表断面的径流量、输沙量系列变化趋势度见表 2。

表2 潼关以上主要断面径流量、输沙量系列变化趋势度

兰州		头道拐		龙门		潼关	
径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量
-0.1933	-0.4400	-0.3298	-0.5455	-0.3454	-0.5625	-0.3839	-0.5378

分析表 2 可以得出 4 点初步认识：① 4 个断面的年径流量、年输沙量系列的趋势度均小于零，说明在百年尺度内，潼关以上的年径流量、年输沙量均处于减少的态势；② 年径流量、年输沙量趋势度不同，即水、沙的减少幅度不一样，各断面年输沙量的减少幅度均大于年径流量的减幅；③ 在 4 个断面中，以黄河上游兰州断面径流量的趋势度的绝对值最小，其他 3 个断面的基本相同，约为兰州的 1.7~2.0 倍；④ 在 4 个断面中，输沙量的趋势度的绝对值也是上游兰州断面最小，其他断面均处于同一个水平，约为兰州断面的 1.2 倍。

综上分析，在百年尺度内，黄河输沙量的趋势度的绝对值明显大于径流量趋势度的绝对值，且黄河泥沙主要来源区也是泥沙减少趋势最为明显的地区；虽然自 1986 年以来径流量主要减于上游地区(表 2)，但就兰州断面年径流量变化趋势而言，其减少的趋势度的绝对值并不是最大。

3 近 30 年水沙系列变化特点

根据干流 4 个水文站的逐年累计径流量、输沙量变化过程分析(图 2)，自 1986 年以来，各站来水来沙量明显减少，同时在年内分配、水沙变化空间分布及来水来沙动力条件变化等方面具有显著的特点。

a. 来水来沙量显著减少。自 20 世纪 60 年代以后，人类活动逐步加强，在自然和人为因素的双重作用下，黄河水沙呈明显减少态势。20 世纪 80 年代中期以来的 30 年间，随着龙羊峡、刘家峡水库联合运用，以及黄土高原地区水土流失治理和水利建设，尤其是 1999 年以来实施退耕还林还草工程、2003 年以来实施“淤地坝亮点工程”，径流量、输沙量大幅减少。与 1919—1959 年相比，1987—2012 年潼关、龙门、头道拐、兰州水文站实测年均径流量分别减少 42.3%、40.2%、34.6%、11.4%；实测年均输沙量分别减少 66.0%、67.5%、68.5%、67.7%。

自 2000 年以来，潼关、龙门、头道拐和兰州断面

表4 黄河主要断面不同时段径流量、输沙量

断面	时段	径流量/亿 m ³			输沙量/亿 t		
		汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
潼关	1919—1959年	259.0	167.1	426.1	13.40	2.52	15.92
	1960—1986年	230.3	172.4	402.8	10.13	1.95	12.08
	1987—2012年	112.9	133.0	245.9	4.10	1.31	5.42
龙门	1919—1959年	196.7	128.7	325.4	9.35	1.25	10.60
	1960—1986年	173.1	134.2	307.3	7.50	0.99	8.48
	1987—2012年	81.3	113.4	194.8	2.82	0.63	3.44
头道拐	1919—1959年	155.9	94.8	250.7	1.17	0.25	1.42
	1960—1986年	147.1	108.3	255.3	1.12	0.29	1.40
	1987—2012年	64.6	99.3	164.0	0.25	0.19	0.45
兰州	1919—1959年	187.4	123.1	310.4	0.91	0.20	1.10
	1960—1986年	190.5	152.8	343.3	0.59	0.11	0.70
	1987—2012年	115.5	159.5	275.1	0.28	0.08	0.36

表3 黄河主要断面1987年以来径流量、输沙量

站名	时段	径流量/亿 m ³			输沙量/亿 t		
		汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
潼关	1919—1986年	247.6	169.2	416.8	12.10	2.29	14.40
	1987—1999年	119.4	141.2	260.6	6.12	1.95	8.07
	2000—2012年	106.4	124.8	231.2	2.09	0.68	2.76
龙门	1919—1986年	187.3	130.9	318.2	8.62	1.15	9.76
	1987—1999年	86.8	118.6	205.4	4.38	0.93	5.31
	2000—2012年	75.9	108.2	184.1	1.25	0.32	1.57
头道拐	1919—1986年	152.4	100.2	252.5	1.15	0.27	1.41
	1987—1999年	64.6	99.8	164.4	0.28	0.17	0.45
	2000—2012年	64.6	98.8	163.5	0.23	0.22	0.44
兰州	1919—1986年	188.6	134.9	323.5	0.78	0.16	0.94
	1987—1999年	111.4	156.4	267.7	0.40	0.11	0.51
	2000—2012年	119.6	162.7	282.4	0.16	0.04	0.21

30年来黄河来水来沙量变化有3个突出特点:

①年径流量减幅明显小于年输沙量减幅,如与1919—1986年相比,4个代表断面1987—2012年的输沙量减幅为66.0%~68.3%,而径流量的减幅为11.4%~42.3%;②从上游至中游径流量减幅沿程不断增大,相对来说,中游的输沙量减幅大于上游的;③与1919—1986年相比,近30年来径流量、输沙量均主要减于汛期,如汛期输沙量减幅为69.2%~78.7%,非汛期为21.3%~30.8%,由于2000年以来其年内分配关系有所调整,除头道拐断面以外,其他断面的汛期输沙量减幅与非汛期的基本持平,说明近10多年来输沙量减幅在年尺度分布上基本是均匀的,但径流量仍主要减于汛期。

应当说明的是,由于黄河流域产水产沙规律的复杂性,并不能排除未来仍会出现大水大沙年的可能性^[13]。

b. 水沙变化程度在空间上分布不均。由于黄河水、沙异源,加之上下游地区人类活动干扰程度不同,因此无论是径流量还是输沙量,沿程减幅并非均匀。

与1919—1959年相比,1987—2012年潼关断面年输沙量减少10.50亿t,其中头道拐至龙门区间减少了6.19亿t,占59.0%;龙门至潼关区间减少了3.34亿t,占31.8%;头道拐以上减少了1.0亿t,仅占9.2%,说明输沙量主要减于泥沙主要来源区。但就输沙量的相对变化幅度看,兰州、头道拐、潼关、龙门分别为67.3%、68.3%、67.6%和66.0%,沿程各断面的减幅差别不是太明显(表4)。

与1919—1959年实测径流量相比,1987—2012年头道拐至龙门区间、龙门至潼关区间径流量减小主要集中在头道拐以上的径流主要来源区。与1919—1959年相比,1987年以来潼关断面年径流量减小180.2亿m³,其中头道拐以上为86.8亿m³,占48.2%;头道拐—龙门区间为43.9亿m³,占24.3%;龙门—潼关区间为49.5亿m³,占27.5%。

c. 水沙年内分配发生显著变化。黄河径流年内分配比例变化主要表现于两方面,一是有利于输沙的大流量天数及相应水量减小,二是汛期径流量占全年径流量的比例减小,年内各月径流量分配趋于均匀。

潼关断面1919—1959年汛期径流量占全年径流量的60.8%,1987—2012年下降为45.9%,龙门、头道拐、兰州断面具有相似的变化特点,分别由60.4%、62.2%、60.4%下降到41.8%、39.4%和42.0%,汛期与非汛期的分配比例发生倒置(图5)。

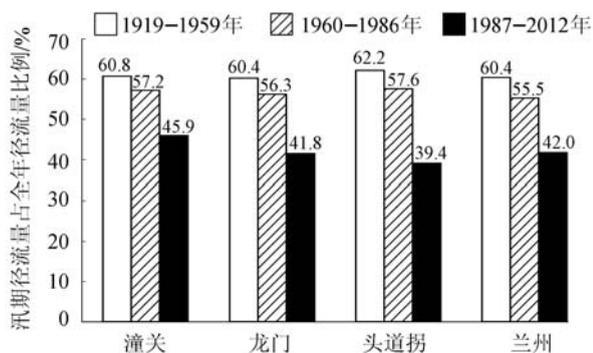


图5 主要断面汛期径流量占全年径流量比例

与1919—1959年实测平均值相比,1987—2012年潼关断面年内日均流量大于2000 m³/s的天数占汛期天数的比例(以下简称占汛比)由62.2%减小为10.5%;大于2000 m³/s的径流量占汛比由75.8%减小为27.7%;大于2000 m³/s的输沙量占汛比由87.2%减小为46.8%。2000—2012年潼关断面年内日均流量大于2000 m³/s的天数占汛比进

一步减至 8.8%，大于 2000 m³/s 的径流量、输沙量占汛比进一步减小为 24.6% 和 31.2%。龙门、头道拐、兰州水文站具有相似的变化特点(图 6)，与 1919—1959 年相比，1987—2012 年 3 个断面年内日均流量大于 2000 m³/s 的天数占汛比分别由 30.2%、22.6%、29.5% 下降到 4.6%、2.8% 和 2.0%；与 1960—1986 年相比，大于 2000 m³/s 的输沙量占汛比分别由 65.5%、53.7%、63.4% 下降到 34.1%、12.2% 和 8.9%。

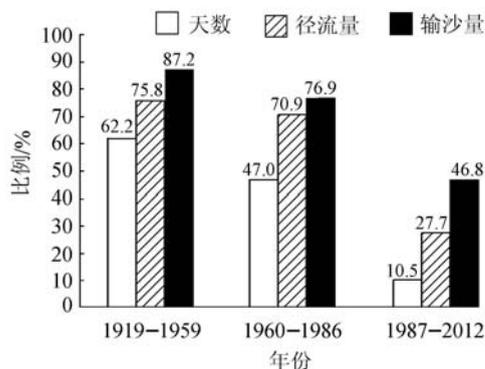


图 6 潼关 2000 m³/s 以上流量出现天数及相应径流量、输沙量占汛比

d. 来沙系数具有阶段性调整特点。来沙系数指某一断面的含沙量与相应流量的比值，反映了水沙搭配关系及水流动力条件，来沙系数越大，说明在同样流量下的含沙量越高，河床淤积的可能性就越大，反之则越小。表 5 分别统计了 4 个断面 1919—2012 年不同时期的来沙系数，其变化具有明显的阶段性调整特点，以 1919—1959 年为基准，后 3 个时期的来沙系数经历了减小→增大→减小的变化过程，说明 3 个时期各断面单位流量的输沙能力均发生了调整，且具同步性。综上所述，来沙系数变化受

人类活动因素影响较大，例如，1960—1986 年因龙羊峡、刘家峡的大型水库先后运用拦沙，以及较大规模水土保持措施实施，来沙系数较 1960 年以前(天然条件下)明显降低；1999 年以来由于退耕还林还草工程的实施，流域产沙减少，进入黄河干流的泥沙量剧减，来沙系数随之大幅度降低。

从各断面不同时期的来沙系数对比看，黄河中游潼关、龙门来沙系数以 1987—1999 年最大，而上游的兰州、头道拐来沙系数以 1919—1959 年最大。另外，汛期来沙系数的变化过程与均年来沙系数变化过程并非一致，在 1999 年以前的 3 个时段，4 个断面的来沙系数基本上不断增加，到 2000 年以后才有所降低。非汛期的来沙系数变化无明显规律，尤其是在头道拐以上河段，由于受大型水库调控、河道冲淤调整等因素影响，变化较复杂。

不同时期的来沙系数在空间分布上呈现出沿程不断增大的特征，其增加幅度最大的河段是黄河泥沙来源最为集中的头道拐—龙门区间，增幅达 181%~637%；龙门—潼关区间增幅较小，最大只有 70% 多，且在 20 世纪 60 年代前和 1987—1999 年两时段还稍减。这种分布特征是黄河水沙异源的规律所决定的。

4 结 语

根据 1919—2012 年黄河潼关以上主要水文站实测径流量、输沙量资料，通过非线性统计方法，研究了百年尺度黄河水沙系列变化特征与趋势，分析了近 30 年黄河水沙变化特点，得到以下初步认识：

a. 黄河水沙突变或变异的内涵应包括水沙量明显减少和水沙关系发生明显变化两方面。在研究

表 5 主要断面不同时期平均来沙系数

站名	时段	平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)			平均含沙量/(kg·m ⁻³)			平均来沙系数/(kg·s·m ⁻⁶)		
		汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
潼 关	1919—1959 年	2457.12	759.90	1351.15	51.7	15.1	37.4	0.0210	0.0199	0.0277
	1960—1986 年	2184.84	821.14	1277.27	44.0	11.3	30.0	0.0201	0.0138	0.0235
	1987—1999 年	1132.74	672.53	826.36	51.3	13.8	31.0	0.0453	0.0205	0.0375
	2000—2012 年	1009.41	594.42	733.13	19.6	5.4	12.0	0.0194	0.0091	0.0164
龙 门	1919—1959 年	1866.08	613.00	1031.84	47.5	9.7	32.6	0.0255	0.0158	0.0316
	1960—1986 年	1642.19	639.19	974.44	43.3	7.3	27.6	0.0264	0.0114	0.0283
	1987—1999 年	823.47	564.89	651.32	50.5	7.8	25.9	0.0613	0.0138	0.0398
	2000—2012 年	720.06	515.36	583.78	16.5	3.0	8.5	0.0229	0.0058	0.0146
头道拐	1919—1959 年	1479.01	451.53	794.96	1.4	7.5	2.6	0.0001	0.0166	0.0071
	1960—1986 年	1395.53	515.83	809.55	7.6	2.6	5.5	0.0054	0.0050	0.0068
	1987—1999 年	612.86	475.35	521.31	4.3	1.7	2.8	0.0070	0.0036	0.0054
	2000—2012 年	612.86	470.58	518.46	3.5	2.2	2.7	0.0057	0.0047	0.0052
兰 州	1919—1959 年	1777.85	586.32	984.27	1.1	4.8	1.6	0.0027	0.0027	0.0036
	1960—1986 年	1807.26	727.79	1088.60	3.1	0.7	2.0	0.0017	0.0010	0.0018
	1987—1999 年	1056.85	744.93	848.87	3.6	0.7	1.9	0.0034	0.0009	0.0027
	2000—2012 年	1134.64	774.94	895.48	1.4	0.3	0.7	0.0012	0.0004	0.0008

时间尺度内,黄河年径流量、年输沙量自 20 世纪 80 年代中期以来不断减小,上中游水沙关系分别在 20 世纪 60 年代末、70 年代末已发生变化,如黄河上游兰州断面 1968 年、中游龙门和潼关断面 1978 年的水沙关系就发生了变化,1986 年属于二次突变。

b. 从百年尺度看,在 1960 年以前,黄河水沙变化主要制约于气候等自然因素,径流量随降雨丰歉而相应出现丰枯变化;自 20 世纪 60 年代末以来,气候等自然因素和人类活动因素成为水沙变化的双重制约因子,在双重因子驱动下,与 20 世纪 60 年代以前不同的是,尽管不同时段降雨有丰歉变化,但径流量、输沙量都是持续减少的,如 2000 年以来兰州以上、头道拐至龙门、龙门至潼关区间的降雨量在 1987—1999 年都是增加的,而径流量、输沙量却都大幅减少。近年来尤其是 2000 年以来人类活动对水沙变化起到了主导作用。

c. 从近百年水沙系列变化看,年径流量、年输沙量总体呈减少趋势。以水沙变化趋势度为判别指标,年输沙量减少的趋势度明显大于年径流量的;中游龙门、潼关的年径流量、年输沙量减少的趋势度均明显大于上游兰州、头道拐。

d. 30 年来黄河水沙变化的突出特点表现于来水来沙量不断显著减少,2000—2012 年成为近百年来水沙系列最枯的时段;水沙变化程度在空间上分布不均,泥沙主要减于中游,而径流主要减于上游;水沙年内分配趋于均匀,甚至汛期来水来沙量低于非汛期;来沙系数自 20 世纪 80 年代中期以后明显降低,在沿程分布上具有从上至下增大的特点。应强调的是,由于黄河流域产水产沙规律复杂,尽管近 30 年来黄河水沙剧减,但不能排除未来出现大水大沙年的可能性。

黄河已经成为人类活动强烈干扰的河流,流域下垫面变化非常大,致使水沙变化机制相当复杂,本文的分析仍是初步的,有很多规律需要进一步探索,如未来若干时段内黄河水沙变化趋势,水沙变化的可逆性,以及黄河水沙变化对流域环境演变的响应规律等,都有待深入研究。

参考文献:

[1] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学[M]. 北京:水利出版社,1981:7-8.
[2] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州:黄河水利出版社,1996:35-55.
[3] 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.
[4] 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.

[5] 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究[M]. 济南:山东科学技术出版社,1994.
[6] 徐建华,牛玉国. 水利水保工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2000.
[7] 张胜利,李倬,赵文林,等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
[8] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等. 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.
[9] 唐克丽,熊贵枢,梁季阳,等. 北京:黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993.
[10] MIAO Chiyuan, NI Jinren, BORTHWICK A G L. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River Basin, China [J]. Progress in Physical Geography, 2010,34(4):541-561.
[11] WANG Houjie, YANG Zuosheng, YOSHIKI S, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): impacts of climate change and human activities [J]. Global and Planetary Change, 2007,57:331-354.
[12] MIAO Chiyuan, NI Jinren, BORTHWICK A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River [J]. Global and Planetary Change, 2011, 76:196-205.
[13] 姚文艺,徐建华,冉大川. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.
[14] 水利部黄河水利委员会. 1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计 [R]. 郑州:水利部黄河水利委员会,2001.
[15] PETTIT A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Applied Statistics, 1979,28(2):126-135.
[16] MERRIAM C F. A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley [M]. [S. l.]: Trans Amer Geophys Union,1937:471-476.
[17] 董安祥,柳媛普,李晓萍,等. 黄河流域 1922—1932 年特大旱灾的特点及其影响 [J]. 干旱气象, 2010, 28(3):270-278. (DONG Anxiang, LIU Yuanpu, LI Xiaoping, et al. Characteristics and influence of the extreme drought event lasting eleven years (1922—1932) in the Yellow River Valley [J]. Journal of Arid Meteorology, 2010,28(3):270-278. (in Chinese))
[18] 刘建成. 研究发现黄河 4 次大决口和气候变化有关 [N]. 黄河报,2014-10-30(3).
[19] 张行勇. 揭示黄土高原降雨准 50 年周期 [N]. 中国科学报,2014-10-09(4).
[20] 史辅成. 对近期黄河水沙变化的认识 [N]. 黄河报, 2012-06-21 (3).
[21] 水利电力部黄河水利委员会. 黄河流域防汛资料汇编 [R]. 郑州:水利电力部黄河水利委员会,1984.

(收稿日期:2015-06-30 编辑:郑孝宇)