

近 55 年来黄河下游泥沙通量的时空变化分析*

郭立鹏^{1,2}, 师长兴¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用近 55 a 黄河下游输沙率数据, 分析泥沙通量在下游的时空变化, 得出在不同的时间尺度下各河段泥沙通量的变化速度, 孙口以上和艾山-洛口段变化较大。通过非参数 Mann-Kendall 检验等方法, 发现下游年、汛期、非汛期以及多数月泥沙通量显著性减小, 其它月份部分站点也有减小趋势。利用有序聚类法得出各站年泥沙通量序列的一级跳跃发生在 1979~1986 年间, 二级跳跃分别发生在 1968 年、1996 年、1999 年。利用小波变换的方法, 得出年泥沙通量序列具有 2~4 a 的周期, 部分时段有 8~12 a 周期, 部分河段有 17~21 a 的周期。泥沙通量序列的趋势、跳跃和周期变化与降雨、水土保持、水库拦蓄等因素有关。

关键词: 黄河下游; 泥沙通量; 时空变化

中图分类号: P332.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)04-0005-06

Temporal-spatial Changes of the Sediment Flux in the Lower Yellow River during the Past 55 Years

GUO Lipeng^{1,2}, SHI Changxing¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on records of sediment discharge during the period of 1950~2005, the temporal-spatial changes of sediment flux through the lower Yellow River has been studied on temporal scales of year, season, and month. Non-parameter Mann-Kendall test, order clustering and wavelet transform methods were used to analyze the sediment flux series' structure. The sediment flux shows a higher gradient in the reaches upstream Sunkou and Aishan-Luokou. The yearly, flood and non-flood seasonal sediment flux series indicate a rapid decreasing trend in most of months. The yearly sediment flux series experienced the first-level jumps from 1979 to 1986 and the second-level jumps in 1968, 1996 and 1999, which have periodicities of 2~4 a, 8~12 a, and 17~21 a. Further analyses suggest that the tendency, jumps, and periodicities of the sediment flux have been closely related with changes in precipitation, soil and water conservation practices on the Loess Plateau which is the principal sediment source of the Yellow River, and dams on the main stream.

Key words: the lower Yellow River, sediment flux, temporal-spatial change

泥沙通量是地球科学领域国际研究的前沿课题, 已经发表许多研究成果^[1~9]。黄河的多年平均输沙量在世界各大河流中居首位, 在国际泥沙通量研究中占有重要地位。已有研究成果揭示了黄河入

海泥沙通量呈减小趋势^[2], 并具有阶段性、季节性和自相关性^[3], 影响因素也复杂多样^[4,5]。泥沙通量在下游变化复杂, 丰枯段/年交替出现, 年际变化大、年内分配不均^[6]。

* 收稿日期: 2007-04-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40471017)资助

作者简介: 郭立鹏(1982-), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 主要研究方向为河流地貌。

黄河下游洪水威胁以及近年的断流缺水是国家投巨资治理的重点,而这些问题与黄河携带的大量泥沙,特别是泥沙在下游的淤积有密切的关系^[10]。泥沙通量研究是揭示泥沙输移规律的一个很好的工具,但对黄河下游泥沙通量研究仍显不足。过去对泥沙通量变化趋势的分析也仅停留在年季尺度上^[7],没有考虑多年来各月泥沙通量的变化,对于年季尺度的泥沙通量变化也缺乏较深入的分析。本文详细分析泥沙通量在下游的变化规律,同时也分析在不同的时间尺度下各站泥沙通量随时间的变化趋势,并分析年泥沙通量的跳跃及周期性变化。

1 资料及方法

以花园口至利津作为黄河下游研究区,以黄河下游各水文站所测悬移质输沙量来表示泥沙通量。数据范围为 1950~2005 年,1950 年部分站点缺测。年泥沙通量用水文年输沙量,即上一年 11 月到当年 10 月,非汛期为上一年 11 月到当年 6 月,汛期为 7~10 月。

研究泥沙通量在黄河下游的空间变化,主要使用多年平均年、汛期、非汛期、月数据,分析不同时间尺度下泥沙通量在各河段的变化趋势及变化速度。

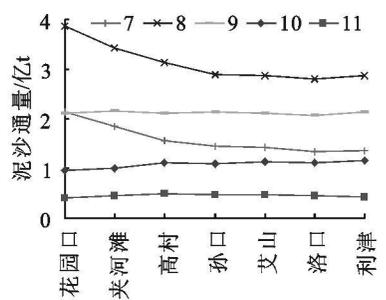
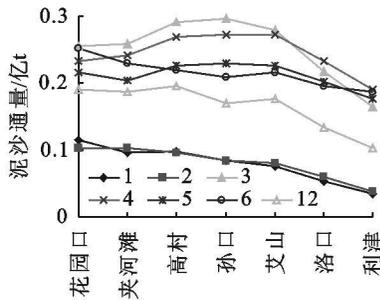
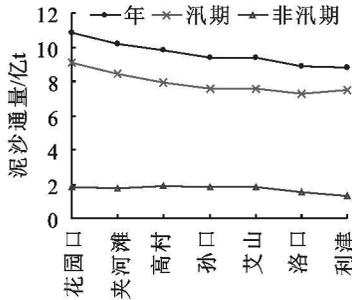


图 1 黄河下游多年平均泥沙通量变化

由黄河下游各站年平均值得出,花园口-孙口泥沙通量是持续减小的,而且减小幅度较大(表 1);孙口与艾山的泥沙通量基本相等,艾山-洛口泥沙通量继续减小,洛口-利津泥沙通量变化不大。汛期泥沙通量的变化与全年类似,但洛口-利津段增

研究泥沙通量随时间的变化,选用非参数 Mann-Kendall 法检验各时间尺度泥沙通量序列的趋势性,并用一元线性回归分析验证年序列的变化趋势。非参数 Mann-Kendall 检验法广泛应用于气候、水文要素时间序列的趋势检验^[9,11,12],适用范围广、人为性少、定量化程度高,计算过程可以参考文献^[13]。当自然条件发生改变或有人为影响时,泥沙通量序列可能会从原来的平稳状态变化到另一个状态,即跳跃变化。当跳跃变化点不明显时就需要用统计的方法推算。利用有序聚类方法找突变点,本质上是求最优分割点,使同类之间的离差平方和最小,而类与类之间的离差平方和相对较大^[14]。对于分割点,再用秩和检验法检验其显著性。

水文序列的周期变化主要是受到气候条件的影响而形成的,当周期不明显时也要用其它方法进行提取。小波分析方法具有时频局部化功能,有利于分析序列多时间尺度的周期变化^[15],而且小波分析还可以显示出发生变化的时间位置^[16]。

2 泥沙通量的空间变化规律

取黄河下游各水文站的输沙率资料,统计得出多年平均的各月、汛期、非汛期、年泥沙通量(图 1)。

加,艾山-洛口段的减小速度约为全年的一半。非汛期的泥沙通量约为年均值的 1/5,变化幅度较小。花园口-夹河滩、高村-艾山段泥沙通量变化不大,夹河滩-高村段泥沙通量增长幅度较大,艾山-利津段泥沙通量减小幅度较大。

表 1 不同时间尺度下泥沙通量的变化速度

万 t / km

河段	年	汛期	非汛期	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
花-夹	-65.43	-61.89	-3.54	-1.79	0.00	0.39	0.79	-1.12	-2.03	-28.42	-42.76	4.55	4.74	4.09	-0.25
夹-高	-50.52	-71.40	20.88	0.25	-0.92	4.49	3.68	2.93	-1.52	-38.00	-38.94	-7.70	13.25	5.39	1.08
高-孙	-35.44	-28.17	-7.27	-1.14	-1.07	0.33	0.35	0.26	-0.80	-9.05	-19.71	1.72	-1.12	-1.80	-2.06
孙-艾	-1.90	-2.47	0.57	-1.35	-0.51	-2.62	0.03	-0.46	0.92	-4.44	-4.03	-1.71	7.71	1.14	1.11
艾-洛	-51.39	-25.37	-26.01	-2.21	-2.07	-6.01	-3.86	-2.39	-1.86	-8.97	-8.44	-5.41	-2.56	-3.14	-4.17
洛-利	-1.31	11.87	-13.19	-1.16	-1.28	-3.18	-2.50	-1.45	-0.54	1.65	4.13	3.57	2.52	-1.37	-1.82

注:负值表示减小,正值为增加;花-夹表示花园口-夹河滩段,其它类似。

非汛期各月泥沙通量很小(小于 0.5 亿 t),变化幅度也较小(小于 6.1 万 t / km)。汛期 7,8 月泥沙

通量陡增,变化幅度较大,花园口-高村段减小幅度最大,洛口-利津段变化最小(递增)。9 月份各站泥沙通量在 2.1 亿 t 左右,只有夹河滩-高村段变化幅度相对较大(递减)。10 月份各站泥沙通量降到 1 亿 t 左右,只有夹河滩-高村、孙口-艾山段变化较大(递增)。

黄河下游没有大的支流汇入,根据泥沙通量的变化,去除引沙量即可得到各河段的淤积量。花园口-孙口段的淤积量较大,主要发生在汛期(以 7~8 月为主);孙口-艾山段冲淤变化较小,艾山-洛口段的淤积量也较大,并且汛期与非汛期的淤积量相近;洛口-利津段年泥沙通量变化较小,但汛期发生少量冲刷,非汛期发生淤积。

以上分析结果与一些学者的结论有所差别^[17-18],主要是洛口-利津段,本文分析结果为年均冲淤变化不大、汛期冲刷,而申冠卿等依据断面测量资料得出该段在下游的抬升值最大^[17]。出现差异的原因主要是:(1)计算时间段不相同,分析相近时段的学者得出了与本文相近的结论^[19];(2)计算

方法不同,断面法与输沙率法本身都有误差,所得的结果可能差别很大^[20]。

3 泥沙通量随时间的变化规律

水文时间序列包括确定成分和随机成分^[14],这些成分的变化与外界的影响是紧密联系的。通过成分分析和可能影响因素分析,即可较准确地找出影响因素及影响程度,为泥沙通量变化的驱动机制研究奠定基础。本文针对确定成分中的趋势、跳跃和周期成分进行分析。

3.1 泥沙通量变化的趋势分析

趋势是序列长期向上或向下缓慢地变动。由黄河下游年泥沙通量变化图(图 2)可以得出,年泥沙通量序列在整体上有下降趋势。为了更清楚地分析泥沙通量的变化,以多年来各汛期、非汛期、月等不同时间尺度的泥沙通量组成多个序列,详细分析各序列的变化趋势,从而可更准确地得出泥沙通量的变化状态,为详细的泥沙通量预测提供前提。

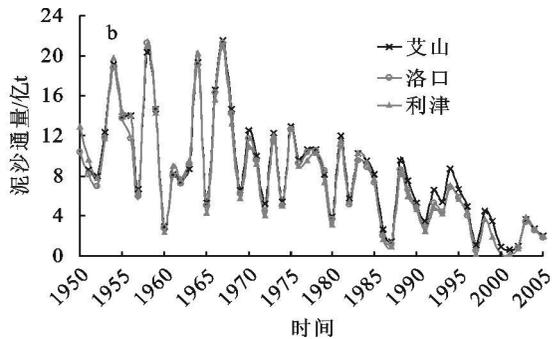
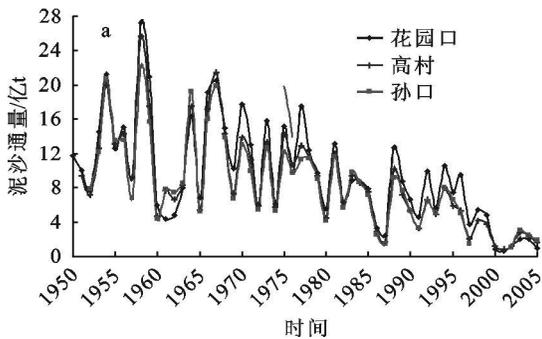


图 2 黄河下游泥沙通量变化

利用非参数 Mann-Kendall 法分别对各时间尺度泥沙通量序列进行趋势检验,经计算得出 Z 值(表 2)。Z 值代表趋势的大小和方向,正值表示上

升,负值表示下降。Z 的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时分别表示通过了信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

表 2 各时间尺度泥沙通量序列 Mann-Kendall 检验 Z 值表

水文站	年	汛期	非汛期	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
花园口	-4.83	-2.42	-4.11	-1.48	-0.68	-2.05	-3.84	-4.64	-2.90	-2.08	-1.19	-1.82	-2.80	-4.72	-2.90
高村	-6.11	-3.33	-3.28	-0.44	-0.21	-0.59	-2.99	-3.37	-2.95	-2.99	-2.05	-2.41	-3.05	-4.11	-1.88
孙口	-8.36	-3.28	-2.97	0.25	-1.02	-0.70	-2.46	-2.97	-3.14	-2.95	-2.37	-2.41	-3.12	-3.79	-1.17
艾山	-5.72	-3.22	-2.88	0.25	-0.64	-0.81	-2.80	-3.07	-3.18	-2.82	-2.22	-2.14	-2.95	-3.37	-0.93
洛口	-7.32	-3.20	-3.67	-0.21	-1.50	-2.23	-3.67	-3.35	-3.51	-3.12	-2.39	-2.41	-3.07	-3.84	-1.42
利津	-5.71	-3.60	-3.90	0.21	-0.68	-2.71	-3.96	-3.75	-3.40	-3.07	-2.44	-2.35	-2.92	-3.56	-2.22

由趋势分析得出,黄河下游各站年、汛期、非汛期,4~6 月、10~11 月泥沙通量的下降趋势非常显著。7、9 月各站下降趋势显著或非常显著,8 月花园口无变化趋势,高村下降趋势显著,其它各站下降趋

势非常显著。12 月下游两端下降趋势非常显著,越到中间显著性越差。1、2 月多数站点无明显趋势;3 月只有下游两端下降趋势显著。

对年泥沙通量序列(1951~2005 年)进行一元

线性回归分析, 得出回归分析特征值(表 3), x 取值 0~ 54。各站均通过置信度为 99% 的 F 检验, 具有显著的线性下降趋势, 与 Mann-Kendall 检验法所得结果相同。由回归分析结果得出, 年泥沙通量下降速度为 0. 208~ 0. 231 亿 t/a, 从 20 世纪 50 年代初的 15 亿 t/a 左右下降到现在的 1~ 4 亿 t/a。高村下降速度最快, 花园口和利津略低。由下降趋势的差异可推知, 淤积在花园口- 高村、艾山- 利津段有增长趋势, 在高村- 艾山段有下降趋势。

表 3 年泥沙通量序列回归分析特征值

特征值	花园口	高村	孙口	艾山	洛口	利津
截距	15. 70	14. 93	14. 07	13. 98	13. 57	13. 96
斜率	- 0. 227	- 0. 231	- 0. 208	- 0. 209	- 0. 211	- 0. 227
R^2	0. 37	0. 45	0. 32	0. 42	0. 31	0. 45
F 值	30. 72	42. 40	20. 24	38. 15	19. 71	44. 16

世界上近一半河流的泥沙通量也是显著性减小的, 减小的原因有水库拦蓄、水土保持措施等^[8]。黄河中下游有三门峡、小浪底等多座水库, 水库的拦蓄使进入下游的泥沙量大大减小。三门峡水库从 1960 年 5 月到 1964 年 10 月淤积 44. 42 亿 m^3 , 到 2000 年 10 月达到 70. 16 亿 m^3 。小浪底自 1997 年 10 月到 2005 年 11 月共淤积 18. 241 亿 m^3 。黄河

表 4 年泥沙通量序列跳跃变化点及秩和检验结果表

水文站	花园口	高村	孙口	艾山	洛口	利津
一级分割点	1981 / - 4. 47	1979 / - 4. 96	1979 / - 3. 71	1985 / - 4. 95	1979 / - 3. 81	1985 / - 5. 23
二级分割点 1	1959 / 1. 34	1959 // 165	1959 // 150	1968 / - 1. 72	1968 / - 1. 27	1968 / - 2. 36
二级分割点 2	1999 // 21	1996 // 54	1985 // 76	1996 // 57	1985 // 79	1996 // 58

注:“/”后为 U 值,“//”后为 W 值, 前为分割点所在年份, 分割点所在年份属前一时段。

花园口、高村、艾山、利津的第二个二级分割点在置信水平 0. 01 下显著。利津的第一个二级分割点只能在水平 0. 05 下显著, 跳跃成分存在但不显著。其余时段可以认为没有发生跳跃。 $W > P$, 大向上跳跃, $W < P$ 小, 为向下跳跃; $U > 0$ 说明向上跳跃, 反之则向下。

花园口、高村、孙口、洛口的一级分割发生在 1980 年前后, 艾山和利津的一级分割点则位于 1985 年; 花园口的显著二级分割点位于 1999 年, 高村、艾山、利津的显著二级分割点位于 1996 年; 利津另一个分割点位于 1968 年。在这些分割点处, 序列都是向下跳跃的。每一次跳跃, 泥沙通量的变化幅度和均值都会大幅度减小。一级跳跃后, 泥沙通量的变化幅度从 18 亿 t 左右下降到 10 亿 t 左右, 均值下降了 4 亿 t 左右。

泥沙通量序列的跳跃变化主要受到中游产沙和三门峡水库不同运用方式的影响。由于水利、水土

中游的水土保持措施也是入黄泥沙量减小的一个重要原因, 1970~ 1996 年河口镇到龙门区间及泾河流域年均减沙 2. 238 亿 $t^{[21]}$ 。另外, 泥沙的输移离不开水流, 近 50 a 来黄河流域年、汛期径流量呈显著性下降趋势^[22], 这必然导致泥沙通量的减小。

3. 2 年泥沙通量变化的跳跃分析

跳跃是序列受到外界条件的阶段性影响而发生的改变, 而且改变后的状态将持续一定的时间。利用有序聚类的最优二分法, 计算出年泥沙通量序列的跳跃变化点(分割点), 结果如表 4 所示。为确保分割点的存在, 采用秩和检验的方法进行检验^[14], 统计值 W 为分割后小样本各数值的秩之和, 秩是未分割前各数值从小到大排列的序号。当小样本容量 n_1 小于 10 时, 据 W 值查秩和检验 P 值表确定显著性和跳跃方向。当 n_1 不小于 10 时, 据 U 值确定显著性。

$$U = \frac{W - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2}{\sqrt{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)/12}}$$

式中: n_2 ——大样本容量, 结果如表 4。 U 临界值 $U_{0.05/2} = 1. 963$, $U_{0.01/2} = 2. 58$, $|U|$ 大于临界值时, 表示在相应置信水平下显著。各站一级分割点和花

保持措施的开展以及降雨条件的变化, 20 世纪 70 和 80 年代黄河中游产沙大量减少, 其中 20 世纪 70 年代年均减少 4. 505 6 亿 t/a, 80 年代年均减少量更达到 9. 845 2 亿 $t/a^{[23]}$, 与 1950~ 1969 年年均入黄沙量 16. 912 亿 t/a 相比, 分别减少了 26. 6% 和 58. 2%。干流控制站龙门站 1980 年、1982~ 1987 年输沙量很低, 较大支流的控制站河津、伏头的输沙量在 1978~ 1987 年也比其它年份较小, 华县站变化不大。因此, 中游来沙减少是造成下游多数站点在 1980 年左右发生跳跃的主要原因。

三门峡水库在 1960~ 1964 年蓄水拦沙运用, 导致下游泥沙通量大幅度减小。由于持续时间较短, 在长时间序列中所占的比重较小, 因此该时段只能是一个突变点, 没有构成阶段性的跳跃变化。三门峡水库在 1965~ 1973 年滞洪排沙运用, 但库区淤积仍有增加(增加约 12. 08 亿 m^3)。1974 年开始蓄清排浑运用, 排入下游的泥沙占中游来沙的比重较大,

下游泥沙通量变化与中游来沙变化相似。小浪底工程在 1997 年截流后,也发生了一定量的泥沙淤积,使下游泥沙通量又有一个较明显的减小。

下游各站泥沙通量序列发生跳跃的时间点不尽相同,主要是由于泥沙在下游各河段输移过程中发生冲淤调整。

3.3 年泥沙通量变化的周期分析

黄河下游年泥沙通量序列在下降过程中具有一定的波动性(图 2),而且波动幅度逐渐变小。从 1969~1976 年有一个明显的 3 a 左右的周期,其它年份周期不明显。使用小波变换的方法提取周期,选用 Morlet 复值小波,用对称延伸法延展资料序列,消除边界影响。

小波变换是把原始信号转化到时间-频率平面

上(图 3),等值线的数值越大表明小波系数实部值越大。小波系数实部为正时,表示泥沙通量增多,反之则减小。同一时间尺度下,等值线灰度值的变化就代表了在该尺度下泥沙通量的增减。

分析小波变换图,得出花园口有 17 和 2~4 a 的周期,在 1950~1978 年有 8 a 左右的周期;高村有 2~4 a 的周期,在 1951~1977 年有 8 a 左右的周期;孙口有 20~21 a 和 8~10 a 的周期,在 1952~1972 年有 2~4 a 的周期,在 1984~1997 年有 4~5 a 的周期;艾山在 1976~2005 年有 12 年左右的周期;洛口在 1950~1975 年有 9 年和 2~4 a 的周期;利津在 1950~1972 年有 7~8 a 和 3~4 a 的周期,在 1965~2005 年有 10~12 a 的周期。

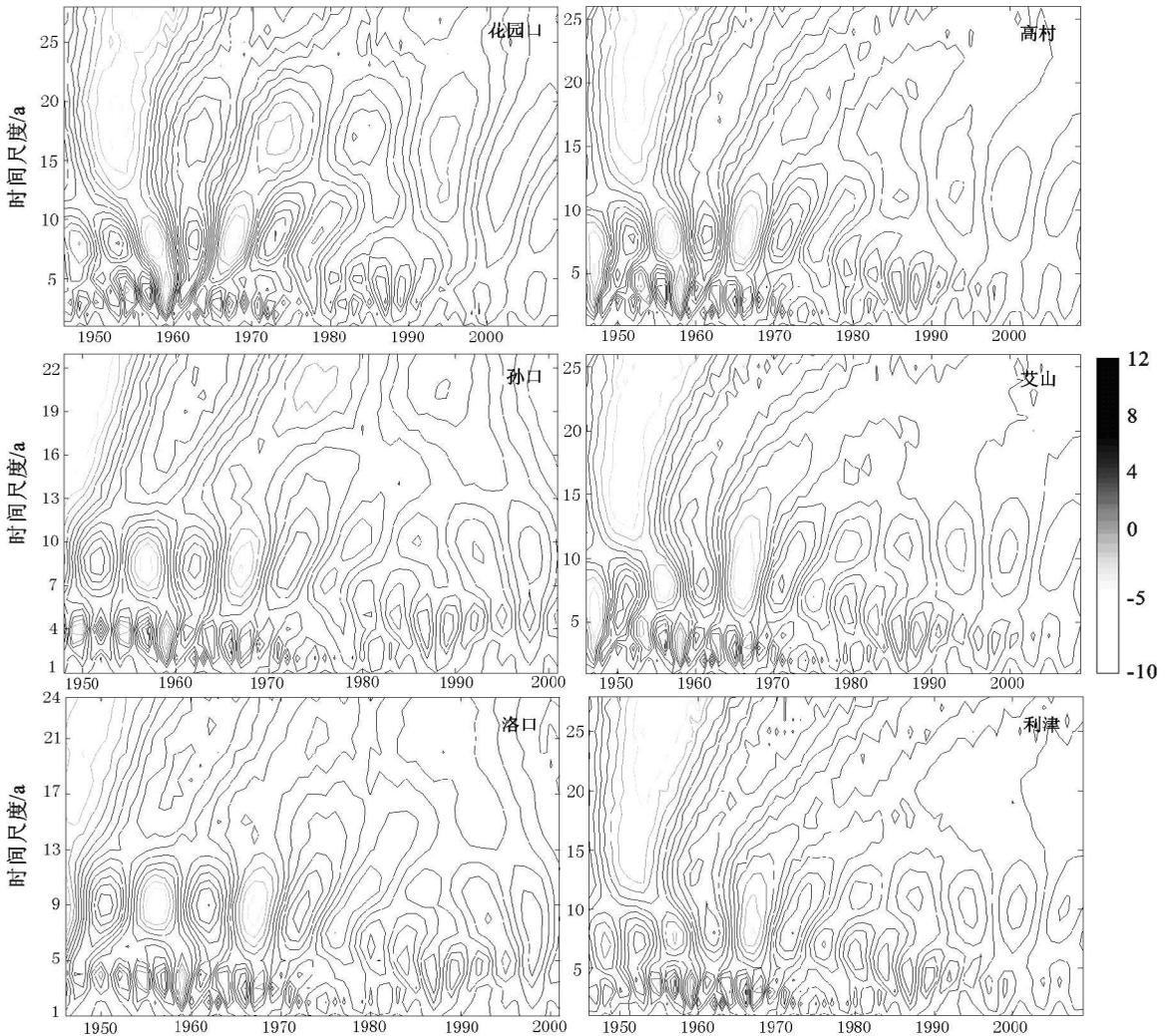


图 3 黄河下游年泥沙通量序列小波变换

黄河流域的主要产沙区在黄土高原地区,而在该地区降雨是影响土壤侵蚀的最重要因素之一^[24]。近 55 a 黄河流域月降水变化,具有较明显的 3 a、11 a 和 22 a 左右的周期^[25],与黄河下游年泥沙通量序

列的周期变化较一致。降雨的变化在很大程度上决定了下游泥沙通量的周期性变化。水库拦蓄、水土保持措施不能对泥沙通量的变化形成周期性的影响,但却在一定的时间段破坏了泥沙通量的周期性

变化。1970 年黄河中游水土保持措施开始生效,而在 1972~1978 年黄河下游多数站的周期发生变化。

4 结 论

通过对黄河下游泥沙通量的沿程变化分析,得出泥沙通量在下游的分布规律。年、汛期、7~8 月泥沙通量的变化主要发生在孙口以上及艾山-洛口段,减小幅度较大。非汛期泥沙通量的变化主要发生在夹河滩-高村段(递增)及艾山以下(递减)。其余各月份泥沙通量变化较小。用泥沙通量的变化去除引沙量,即得到下游各段的冲淤变化。花园口-孙口段淤积量较大,主要发生在 7~8 月;孙口-艾山段冲淤变化较小;艾山-洛口段淤积量也较大,且在汛期与非汛期相近;洛口-利津段年冲淤变化较小,汛期冲刷,非汛期淤积。

通过趋势分析,发现下游年、汛期、非汛期以及 4~7 月、9~11 月泥沙通量序列显著性减小,其它月份部分站点的泥沙通量序列也有显著性减小的趋势。这是受到水库拦沙、水土保持措施和径流量减小的影响。利用有序聚类和秩和检验的方法,得出年泥沙通量序列的跳跃变化点。各站的一级跳跃发生在 1979~1985 年,二级显著性跳跃主要发生在 1996~1997 年间,还有站点的二级跳跃发生在 1999 年和 1968 年。每一次跳跃,泥沙通量都发生明显的阶段性减小,而且其波动幅度也显著减小。跳跃变化与中游降雨条件和水利水保措施以及干流水库拦沙作用有很大关系。

使用小波分析的方法,得出黄河下游年泥沙通量序列具有 2~4 a 短尺度周期,部分时段有 8~12 a 中尺度周期,花园口-孙口段还有 17~21 a 大尺度周期。多数站点的中小尺度周期在 1972~1978 年发生变化。黄河下游泥沙通量的周期变化主要受到流域降雨、中游水土保持措施等因素的影响。

参考文献:

- [1] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 30: 365-373.
- [2] 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.
- [3] 刘勇胜, 陈沈良, 李九发. 黄河入海水沙通量变化规律[J]. *海洋通报*, 2005, 24(6): 1-8.
- [4] 许炯心. 不同来源水沙对黄河入海泥沙通量的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 536-545.
- [5] 许炯心. 黄河下游泥沙输移特征对入海泥沙通量的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6): 663-670.
- [6] 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, 1993. 77-159.
- [7] 刘勇胜, 陈沈良, 陈小英, 等. 黄河中下游泥沙通量变化规律[J]. *地理. 与地理信息科学*, 2006, 22(4): 48-52.
- [8] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 111-126.
- [9] 应铭, 李九发, 万新宁, 等. 长江大通站输沙量时间序列分析研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 83-87.
- [10] Zhang D D, Shi C X. Sedimentary causes and management of two principal environmental problems in the lower Yellow River[J]. *Environmental Management*, 2001, 28(6): 749-760.
- [11] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(5): 589-594.
- [12] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. *地理研究*, 2006, 25(1): 27-34.
- [13] Khaled H, Hamed A, Ramachandra Rao. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204: 182-196.
- [14] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988, 68-110.
- [15] 王文圣, 丁晶, 衡彤, 等. 水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J]. *工程勘察*, 2003, (1): 32-35.
- [16] 孙然好, 潘保田, 牛最荣, 等. 河西走廊近 50 年来地表水资源时间序列的小波分析[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(4): 455-459.
- [17] 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.
- [18] 王会让, 许德志, 梁志勇. 水沙变化对渭河下游河道淤积和纵剖面的影响[J]. *泥沙研究*, 2004, (6): 27-30.
- [19] 刘继祥, 郜国明, 曾芹, 等. 黄河下游河道冲淤特性研究[J]. *人民黄河*, 2000, 22(8): 11-12.
- [20] 申冠卿, 姜乃迁, 张原锋, 等. 黄河下游断面法与沙量法冲淤计算成果比较及输沙率资料修正[J]. *泥沙研究*, 2006(1): 32-37.
- [21] 冉大川, 刘斌, 王宏. 水土保持措施对黄河减水减沙作用的分析[J]. *中国水土保持*, 2002, (10): 35-37.
- [22] 李春晖, 杨志峰. 黄河流域分区天然径流量趋势性与持续性特征[J]. *水文*, 2005, 25(1): 13-17.
- [23] 孟庆枚. 黄土高原水土保持[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 484-508.
- [24] 王占礼, 邵明安, 常庆瑞. 黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J]. *西北农业大学学报*, 1998, 26(4): 101-105.
- [25] 朱厚华, 秦大庸, 周祖昊, 等. 黄河流域降水演变规律研究[J]. *人民黄河*, 2005, 27(11): 17-21.