

淮河中游河道与洪泽湖水沙交换程度分析

段宇^{1,2}, 徐国宾²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通运输行业重点实验室, 天津 300456;

2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 淮河中游河道与洪泽湖的水沙交换程度影响着河湖之间的内在关系, 通过计算淮河与洪泽湖 1975–2015 年的水沙交换指数, 利用多种统计检验交叉互补的方法, 对河湖水量交换指数和泥沙交换指数进行了趋势变化、突变检验及周期性分析。结果表明: 受不同年代治淮工程的影响, 河湖水量交换指数整体而言呈不显著增大趋势, 造成洪泽湖库容呈不显著增大趋势; 入湖泥沙量大于出湖泥沙量, 湖盆泥沙的淤积量逐年呈不显著增大趋势。洪泽湖库容及湖盆淤积在研究时期内呈稳定的波动状态, 未发生较为显著的突变现象。淮河干流与洪泽湖的水沙交换程度存在多时间尺度的周期性特征, 均以 14a 为第一主周期, 河湖水沙交换程度处于相对稳定的状态。研究结果阐明了淮河中游河道与洪泽湖的水沙作用关系, 可为河湖治理提供理论参考。

关键词: 河湖水沙交换; 趋势分析; 突变检验; 周期统计; 淮河中游河道; 洪泽湖

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0117-08

Analysis of water and sediment exchange between the middle reaches of Huaihe River and the Hongze Lake

DUAN Yu^{1,2}, XU Guobin²

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering,

Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering

Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The water and sediment exchange status between the middle reaches of Huaihe River and the Hongze Lake affects the intrinsic relationship between the river and lake. Based on the calculation of the water and sediment exchange indexes between Huaihe River and the Hongze Lake from 1975 to 2015, a variety of statistical tests were carried out for the trend variation, abrupt change test and periodic statistics analysis of the indexes. The results show that, affected by the Huaihe River regulation projects built in different ages, the water exchange between the river and lake generally showed an insignificant increasing trend, resulting in an insignificant increasing trend of the reservoir capacity of the Hongze Lake as well. Sediment into the lake was more than that out of the lake, and sediment deposition in the lake basin increased insignificantly year by year. However, the reservoir capacity and basin deposition of the Hongze Lake fluctuated stably during the study period, and there were no obvious abrupt changes. The water and sediment exchange degree between the Huaihe River and Hongze Lake showed multi-time scale periodic characteristics, with 14a as the first principal period. The water and sediment exchange degree between the river and lake was in a relatively stable state. The research results clarified the water and sediment interactive relationship between the middle reaches of Huaihe River and the Hongze Lake, which could provide a theoretical guidance for river-lake governance.

Key words: water and sediment exchange between the river and lake; trend variation; abrupt change test; periodic statistics; the middle reaches of Huaihe River; the Hongze lake

收稿日期: 2022-01-16; 修回日期: 2022-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405602)

作者简介: 段宇(1990–), 男, 河北深泽人, 博士, 助理研究员, 主要从事河床演变及整治研究。

通讯作者: 徐国宾(1956–), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事河流动力学及河床演变研究。

1 研究背景

淮河作为我国自 1949 年以来第一条全面系统治理的大河,经过近 70 年的洪涝治理,在“蓄泄兼筹”的治淮方针下,淮河“上拦、中畅、下泄”的防洪体系逐步完善,但由于地形上受“两头翘、中间洼”的制约,作为中国最难治理的河流之一,水患仍未完全根除,尤其是中下游流域的“关门淹”问题仍然显著。

受全球气候变化以及流域人类活动的双重影响,世界范围内的重要江河湖泊水沙情势均发生了显著变化^[1-4],对于江河湖泊的治理同时也提出了新的要求,但流域的开发治理必须接受自然规律的约束和指导^[5],只有全面了解流域在自然作用下的水沙特性、发展演变规律,才能实现河流湖泊的有效治理。而河湖之间的内在关系,是困扰广大治淮工作者的难题,也是科学制定淮河流域洪涝灾害防治方案的关键问题之一。

众多科研工作者已经对淮河干流河道的水沙特性开展了大量的研究^[6-9],阐明了淮河干流河道水沙的年内分配、年际变化特征、可能突变年份及多时间尺度的周期性变换规律,而针对洪泽湖水沙分析及冲淤演变的研究^[10-11]相对较少,但已有研究得出了洪泽湖的冲淤时空分布规律和水沙特征变化规律。洪泽湖的入湖沙量主要受淮河干流的控制,且淮河干流的水沙占入湖水沙的 90% 以上^[10],河湖水沙交换规律直接影响着河湖冲淤演变规律,而已有研究^[12]中缺乏对河湖水沙交换规律特性的研究,有必要建立相应的判别指标,针对此问题进行详细的分析,进而阐明河湖的水沙作用关系。

本文以 1975—2015 年入、出洪泽湖径流量和输沙量资料为基础,建立淮河干流及洪泽湖水沙交换判别式,进而对河湖水沙交换规律进行系统阐述,为治淮工作提供科学决策。

2 研究区域概况

淮河流域是我国七大江河流域之一,其干流全长约 1 000 km。在历史上淮河是一条畅流入海的河流,后因“黄河夺淮”导致淮河改道入长江。淮河泄洪水道发生变迁的同时,受河道泥沙的淤积作用,地面抬高形成了洪泽湖,在湖水位的顶托作用下,淮河中游河道水位抬升,严重降低了淮河中游防洪除涝的能力。

淮河干流分为上游、中游、下游 3 段,总落差约为 200 m。其中淮河源头至洪河口为上游,长度为 360 km,占淮河干流总长的 36%,落差为 177 m,占

淮河干流总落差的 88.5%,河道比降为 0.5‰,上游河段落差大泄洪快;洪河口至洪泽湖出口的中渡为中游,长度为 490 km,占淮河干流总长的 49%,落差为 16 m,占淮河干流总落差的 8%,河道比降为 0.03‰,中游河段落差锐减泄洪不畅;中渡至三江营入江口为下游,长度为 150 km,占淮河干流总长的 15%,落差为 7 m,占淮河干流总落差的 3.5%,河道比降为 0.04‰。淮河干流分段长度及垂直落差示意图如图 1 所示。

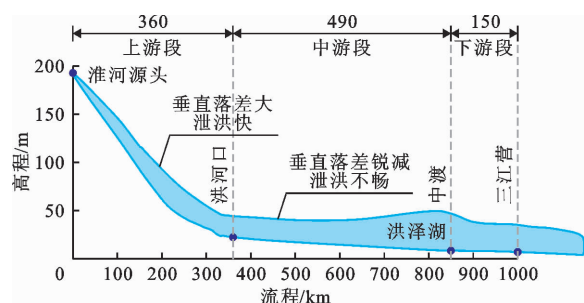


图 1 淮河干流分段长度及垂直落差示意图(标注单位:km)

洪泽湖地处淮河干流中下游结合部,属于河湖连通型湖泊,其汇水面积为 $15.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,在历史进程中是“黄河夺淮”和“蓄清刷黄济运”不断修筑洪泽湖大堤而形成的,入湖和出湖河道较多,其中入湖河道包括淮河、怀洪新河、徐洪河、濉河、老濉河、新汴河和池河。经洪泽湖调蓄后,出湖水流分别经入江水道、苏北灌溉总渠、入海水道、分淮入沂 4 路水道下泄。

淮河中游正阳关站至洪泽湖水系站点示意图如图 2 所示。

3 淮河及洪泽湖水沙交换指数

河流与湖泊之间通过径流与泥沙的物质交换,影响河流与湖泊关系的调整过程。洪泽湖作为连接淮河中游与下游的大型湖泊,河湖之间的水沙交换程度可以在一定程度上体现洪泽湖对淮河流域调蓄能力的强弱。通常情况下,河湖水沙交换的直观体现是水沙流动方向和交换水沙量的值。河湖水沙交换的表现形式分为地表交换和地下交换,考虑多种自然影响因素下以年为单位时间的洪泽湖水量和沙量平衡方程式如下。

洪泽湖年输水量平衡方程为:

$$\Delta V = V_{in} + V_{uin} + V_{rain} - V_{out} - V_{uout} - V_e \quad (1)$$

式中: ΔV 为洪泽湖年蓄水变化量, m^3 ; V_{in} 为由河流流入洪泽湖的水量, m^3 ; V_{uin} 为地下径流汇入洪泽湖的水量, m^3 ; V_{rain} 为洪泽湖区域的降水量, m^3 ; V_{out} 为河

流流出洪泽湖的水量, m^3 ; V_{uout} 为从地下流出洪泽湖的水量, m^3 ; V_e 为洪泽湖区域的蒸发水量, m^3 。

洪泽湖年输沙量平衡方程为:

$$\Delta W = W_{in} + W'_{in} - W_{out} \quad (2)$$

式中: ΔW 为洪泽湖湖盆冲淤变化量, kg ; W_{in} 为河流汇入洪泽湖的沙量, kg ; W'_{in} 为由洪泽湖周边地表汇入洪泽湖的沙量, kg ; W_{out} 为通过河流流出洪泽湖的沙量, kg 。

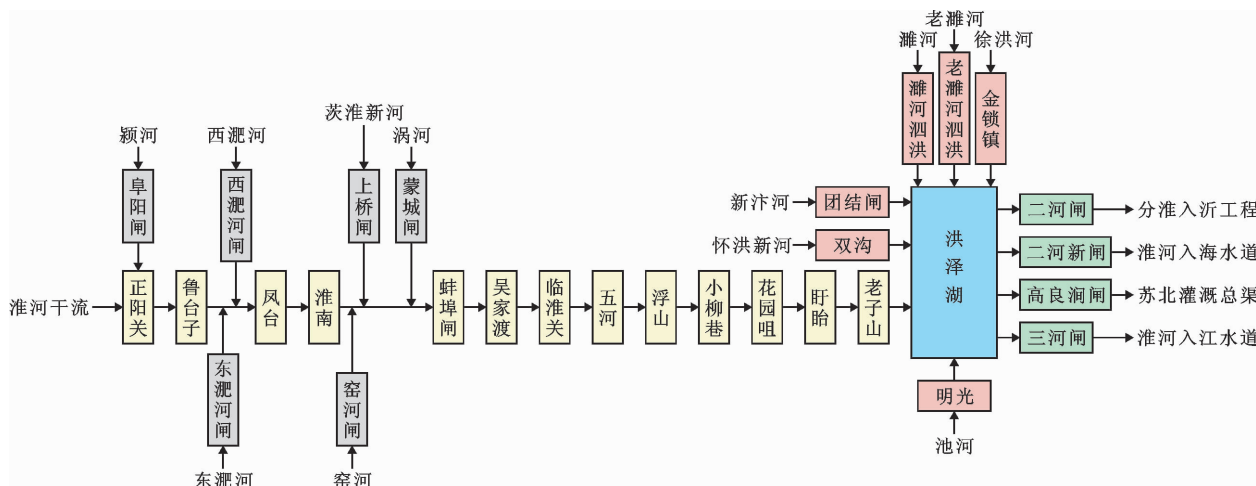


图2 淮河中游正阳关至洪泽湖流经站点及水系示意图

由于地下径流流动较为缓慢,正常情况下地下径流的流入和流出量通常处于稳定状态,即 $V_{uin} = V_{uout}$ 。降水量与蒸发量的差值可以作为洪泽湖的地表径流量,在一定程度上也影响着洪泽湖的蓄水量,但这里仅研究河湖水量交换程度,故此因素不在考虑范围内。 W'_{in} 可以认为是洪泽湖周边水土流失量,在研究时间序列范围内,洪泽湖周边水土保持较好,与河道流入的泥沙量相比数值较小,故此因素也不在考虑范围内。

基于上述自然影响因素,为了探明洪泽湖对淮河径流量调蓄能力的强弱变化以及湖盆的冲淤强度,利用入、出洪泽湖的总径流量和输沙量数据,建立河湖水量和泥沙交换指数来开展研究。

洪泽湖作为河湖连通型湖泊,当入湖水量(沙量)与出湖水量(沙量)长期稳定在同一水平时,可以认为河湖的水体交换量(泥沙交换量)处于相对平衡状态。因此,可以用单位时间内径流或泥沙流入湖泊的量与流出湖泊的量的比值来度量,即用水沙交换指数来表示河湖水沙交换的强度。故研究过程中采用入湖径流量与出湖径流量的比值作为水量交换指数 C_{water} ,入湖输沙量与出湖输沙量的比值作为泥沙交换指数 C_{sand} 。

$$C_{water} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (3)$$

$$C_{sand} = \frac{W_{in}}{W_{out}} \quad (4)$$

根据公式(3)和式(4),利用入、出洪泽湖的逐

年径流量和输沙量时间序列,分别计算 1975 - 2015 年洪泽湖水量交换指数 C_{water} 和泥沙交换指数 C_{sand} 。对于 C_{water} 值,当 $C_{water} = 1$ 时,说明河湖水量交换处于平衡状态;当 $C_{water} > 1$ 时,表示入湖水量大于出湖水量,洪泽湖处于蓄水状态,且值越大蓄水量越多;当 $C_{water} < 1$ 时,表示入湖水量小于出湖水量,洪泽湖处于泄水状态,且值越小泄水量越多。对于 C_{sand} 值,当 $C_{sand} = 1$ 时,说明河湖泥沙交换处于稳定状态,洪泽湖冲淤平衡;当 $C_{sand} > 1$ 时,表示入湖沙量大于出湖沙量,洪泽湖湖盆处于淤积状态,且值越大淤积越严重;当 $C_{sand} < 1$ 时,表示入湖沙量小于出湖沙量,洪泽湖湖盆处于冲刷状态,且值越大冲刷越严重。因此,将所得结果与平衡状态值 1 相比较,得到河湖水量与泥沙交换指数的变化,如图 3 所示。

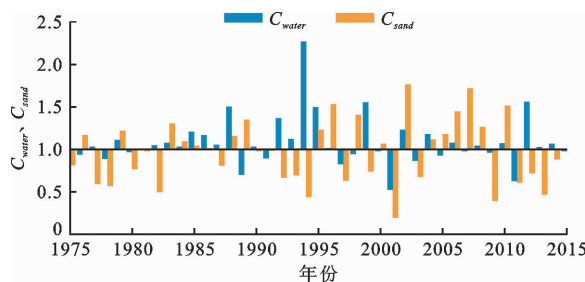


图3 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数变化

由图 3 中初步看出, C_{water} 和 C_{sand} 的值多数年份大于 1,少数年份的指数值小于 1。进而为了更全面地了解河湖水沙交换的变化规律,分别对 C_{water} 与 C_{sand} 时间序列开展趋势变化、突变检验及周期统计

等相关分析。

4 淮河及洪泽湖水沙交换程度分析

4.1 趋势变化

统计检验法可以给出时间序列趋势变化的显著

性水平。河流湖泊连续水文数据间通常有较大的波动,为研究水文现象的长系列变化趋势,可以采用多年滑动平均法^[13]和 M-K 趋势检验法^[14-15]对河湖水量与泥沙交换指数时间序列进行统计分析,如图 4、5 所示。

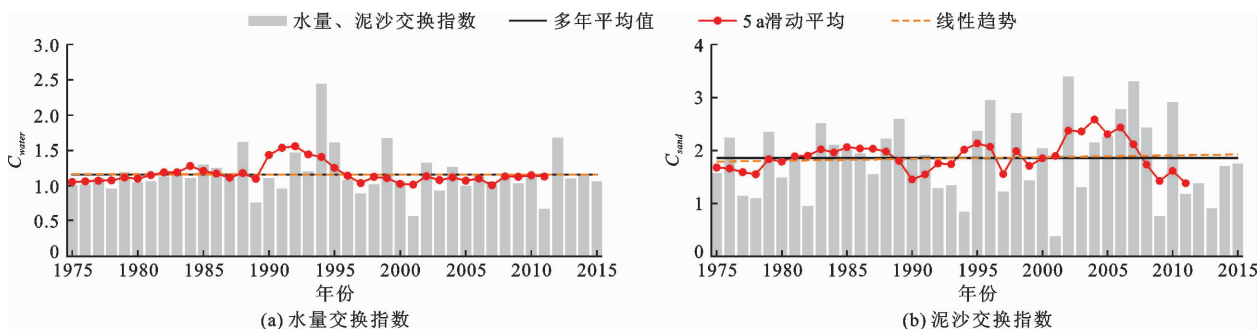


图4 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数滑动平均及线性趋势分析

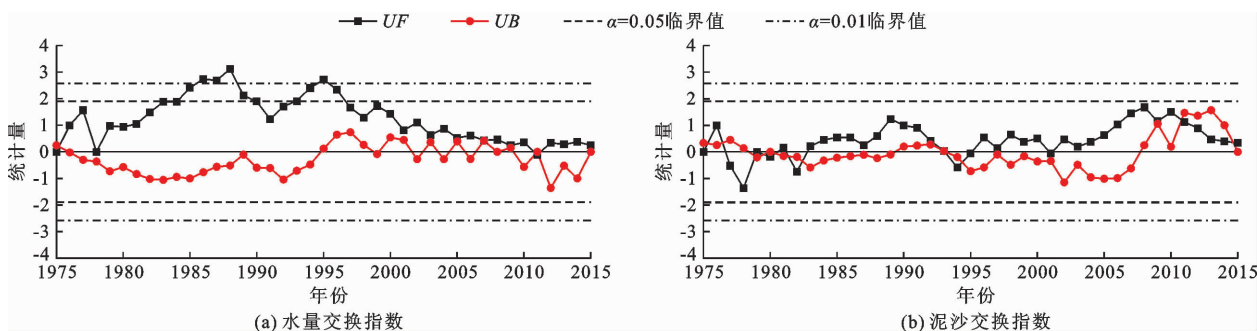


图5 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数 M - K 趋势分析

由图4中交换指数的滑动平均趋势分析结果可知, C_{water} 的5 a滑动平均变化曲线除在1989 - 1993年呈增大趋势外,其余年份均较为平稳,且线性趋势变化与多年平均值相持平。 C_{sand} 的5 a滑动平均变化曲线在1975 - 1989年基本呈平稳状态,在1989年后呈轻微波动状态,相应的线性趋势变化整体呈轻微增大趋势。

由图5中交换指数的 M-K 趋势分析结果可知, C_{water} 时间序列统计量 UF 值(UF 为 M-K 趋势检验过程中所定义的统计量)基本大于0,且在20世纪80年代中期至90年代中期,统计量 UF 部分值超过了 $\alpha = 0.05$ 临界值, C_{water} 时间序列在此时期呈显著增大的趋势,其余时期呈不显著增大趋势。 C_{sand} 时间序列统计量 UF 值基本大于0,但未超过 $\alpha = 0.05$ 临界值, C_{sand} 时间序列呈不显著增大趋势。整体而言, C_{water} 的趋势统计量 Z (Z 为 M-K 趋势统计量数值)为0.235 9, C_{sand} 的趋势统计量 Z 为0.325 7,其值大于0但未超过 $\alpha = 0.05$ 临界值,说明在研究时间范围内,洪泽湖库容呈不显著增大趋势,湖盆处于逐年淤积状态,且淤积呈不显著增大趋

势。研究结果与洪泽湖年均水位逐渐增大的分析结果相一致^[16],验证了上述研究结果的准确性。

4.2 突变检验

水文数据资料的变化除了具有整体的趋势性外,往往还伴随着剧烈的变化特征,即水文时间序列从一种稳定态或稳定持续的变化趋势突变到另一种稳定态或稳定持续的变化趋势^[17]。不同突变检验方法的灵敏度会有所不同,故分别采用时序累计值相关曲线法、M-K 突变检验法、滑动 t 检验法和 Pettitt 突变检验法对河湖水量与泥沙交换指数的时间序列进行突变点分析,如图6~8所示。

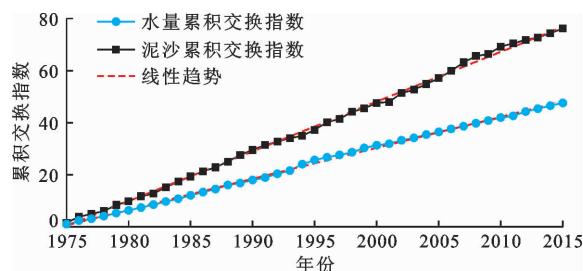


图6 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数时序累计值突变检验

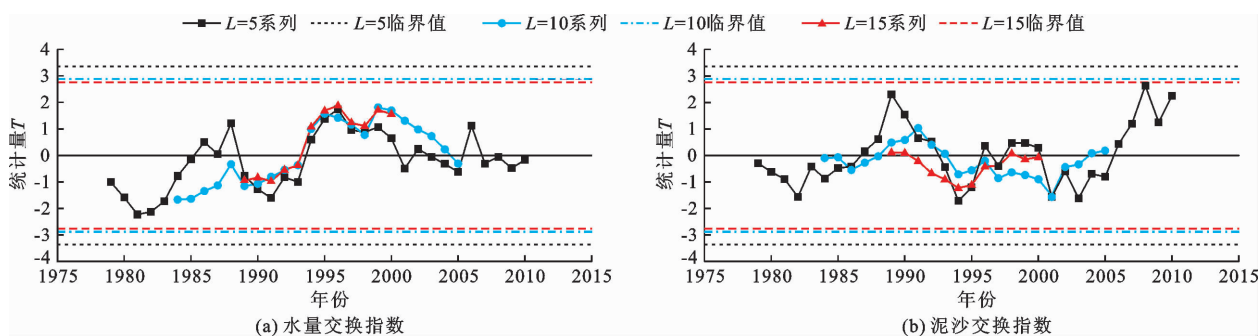
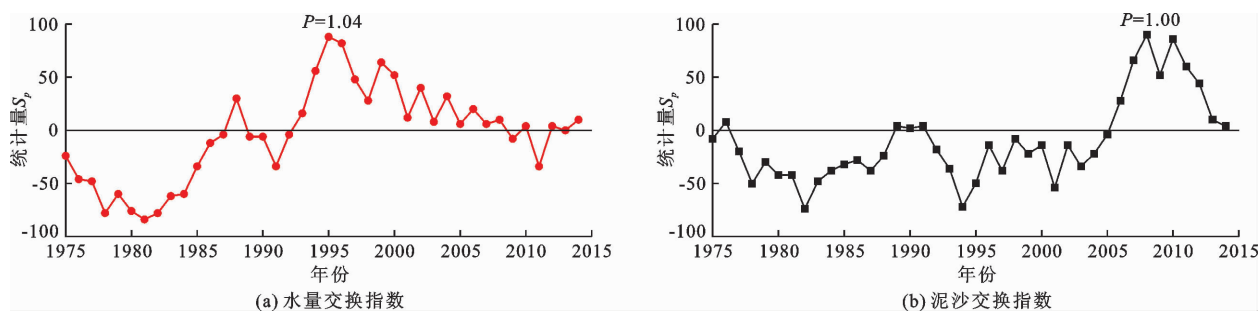
图7 1975—2015年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数滑动 t 突变检验

图8 1975—2015年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数 Pettitt 突变检验

由图6可知, C_{water} 和 C_{sand} 曲线的斜率没有出现显著变化,说明河湖水量与泥沙交换指数均没有显著突变点。根据图5中河湖水量/泥沙交换指数M-K趋势分析结果, C_{water} 和 C_{sand} 时间序列的UF和UB曲线交点均位于置信区间内,没有超过临界曲线,说明该时间序列不存在显著突变。图7中采用滑动 t 突变检验时,对子序列长度 L 选取5、10和15共3种工况,分析不同子序列长度水文时间序列的突变情况(其中统计量 T 为滑动 t 检验过程中所定义的统计量),可看到各工况 C_{water} 和 C_{sand} 的滑动 t 检验统计量均位于置信区间内,没有显著突变点。图8中采用Pettitt突变检验时(其中统计量 S_p 为Pettitt突变检验过程中所定义的统计量), C_{water} 在1995年的突变统计量 $P = 1.04 > 0.50$,突变不显著; C_{sand} 在1998年的突变统计量 $P = 1.00 > 0.50$,突变不显著,说明河湖水量与泥沙交换指数均没有发生显著突变。

综合以上方法的突变检验结果可知,河湖水量与泥沙交换不存在显著的突变点,表明淮河与洪泽湖的水沙交换程度处于相对稳定状态。

4.3 周期统计

水文时间序列的系统变化在时域中通常存在着多层次时间尺度结构和局部化的特征^[18-19]。对于水文现象的多时间尺度研究,就是对水文时间序列中存在的周期性或近似周期性变化规律进行识别。采用Morlet小波周期分析方法^[20]对河湖水量与泥沙交换指数的时间序列进行分析,进而得到1975—2015年 C_{water} 和 C_{sand} 时间序列的小波系数实部等值线、模方等值线、小波方差及小波系数实部变换图,如图9~12所示,图中 a 为时间尺度因子。

对图9~12中 C_{water} 和 C_{sand} 时间序列小波系数的实部、模方、方差进行分析,得到相应的时间尺度、周期数、显著性及趋势性,分别如表1、2所示。

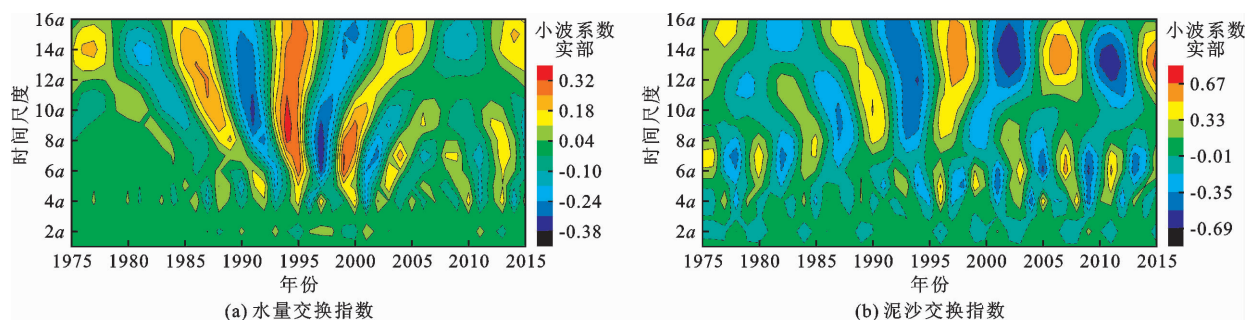


图9 1975—2015年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数小波系数实部等值线

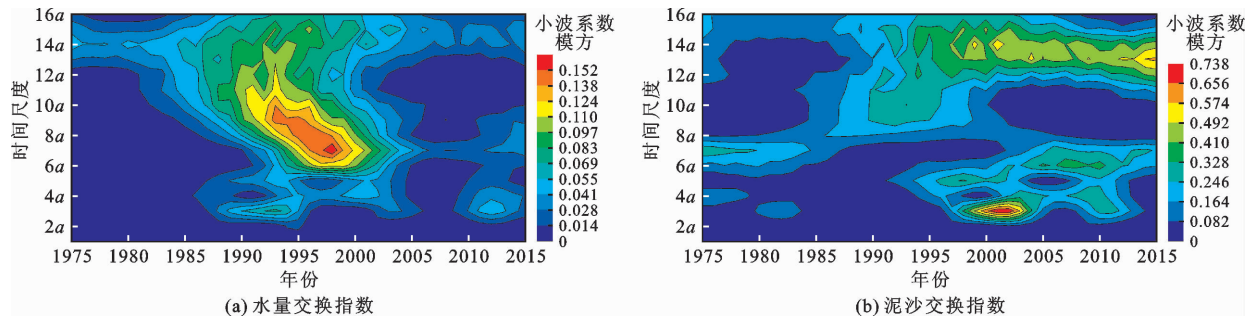


图 10 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数小波系数模方等值线

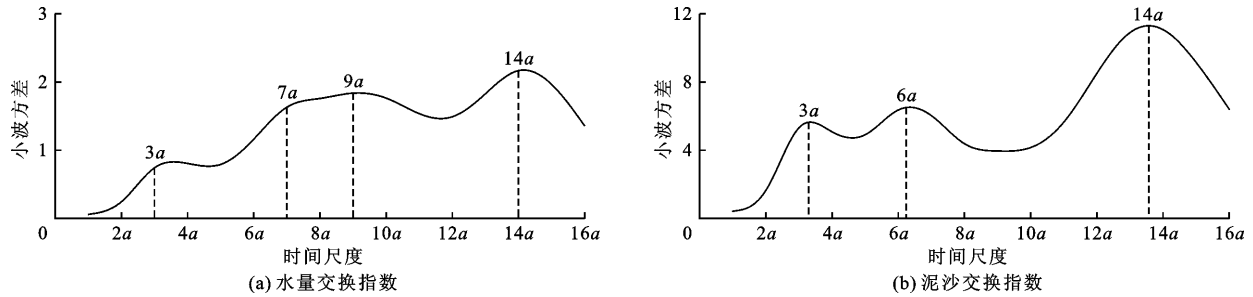


图 11 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量、泥沙交换指数小波系数小波方差

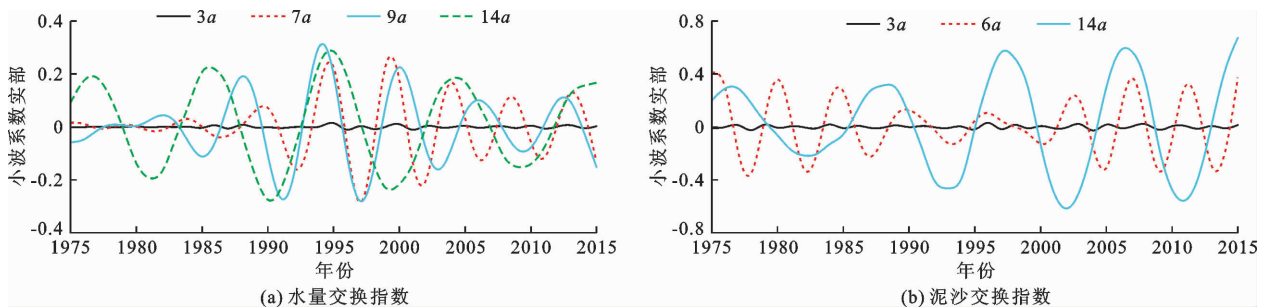


图 12 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量/泥沙交换指数主要时间尺度下小波系数实部过程线

表 1 1975 - 2015 年洪泽湖河湖水量交换指数时间序列小波分析

项目	要素	特征			
实部分析	时间尺度	(3 ~ 9) <i>a</i>		(10 ~ 15) <i>a</i>	
	尺度类型	小尺度		大尺度	
	丰枯交替震荡次数	不显著		7	
	显著性	不显著		显著	
模方分析	时间尺度	(3 ~ 15) <i>a</i>			
	震荡趋势性	能量先增强后减弱,在 1995 – 2000 年间达到最强			
	显著性	贯穿整个研究区间			
方差分析	时间尺度	3 <i>a</i>	7 <i>a</i>	9 <i>a</i>	14 <i>a</i>
	主周期数	第四	第三	第二	第一
	波动周期	不显著	7	6	4
	波动趋势性	不显著	先增强后减弱	先增强后减弱	先增强后减弱
	短期未来趋势	不显著	达到谷底, 继而逐渐增大	达到谷底, 继而逐渐增大	达到峰值, 继而逐渐减小

表 2 1975 – 2015 年洪泽湖河湖泥沙交换指数时间序列小波分析

项目	要素	特征		
实部分析	时间尺度	(3 ~ 5) <i>a</i>	(6 ~ 15) <i>a</i>	
	尺度类型	小尺度	大尺度	
	丰枯交替震荡次数	9	5	
	显著性	不显著	显著	
模方分析	时间尺度	(3 ~ 8) <i>a</i>	(11 ~ 15) <i>a</i>	
	震荡趋势性	1995 年后呈现震荡特性	1995 年后呈现震荡特性	
	显著性	1995 年后显著性增强	1995 年后显著性增强	
方差分析	时间尺度	3 <i>a</i>	6 <i>a</i>	14 <i>a</i>
	主周期数	第三	第二	第一
	波动周期	不显著	8	4
	波动趋势性	不显著	先减弱后增强	逐渐增强
	短期未来趋势	不显著	达到峰值， 继而逐渐减小	达到峰值， 继而逐渐减小

由表 1 可见,在实部分析中,存在着(3 ~ 9)*a* 和 (10 ~ 15)*a* 两类时间尺度的周期变化规律,在 (10 ~ 15)*a* 处震荡最为强烈,周期性显著且具有全域性;在模方分析中,年径流量在变化域中的波动能量曲面上有 1 个较强的能量聚集中心,波动影响的能量尺度范围为(3 ~ 15)*a*,波动能量在研究域中呈先增强后减弱的趋势,波动能量在时域上较为集中的影响范围是 1995 – 2000 年;方差分析中,存在着 3*a*、7*a*、9*a* 和 14*a* 4 个主周期,其中 14*a* 为第一主周期,在全域中丰枯变换次数为 4 次, C_{water} 呈现短期间达到峰值继而逐渐减小的变化趋势。

由表 2 可见,在实部分析中,存在着(3 ~ 5)*a* 和 (6 ~ 15)*a* 两类时间尺度的周期变化规律,在(6 ~ 15)*a* 处震荡最为强烈,周期性显著且具有全域性;在模方分析中,年径流量在变化域中的波动能量曲面上有 2 个较强的能量聚集中心,波动影响的能量尺度范围分别为(3 ~ 8)*a* 和(11 ~ 15)*a*,其中,(3 ~ 8)*a* 波动能量在研究域中呈先减弱后增强的趋势,波动能量在时域上强集中的影响范围为 2000 年前后,(11 ~ 15)*a* 波动能量在研究域中呈逐渐增强的趋势,波动能量在时域上强集中的影响范围贯穿于 1995 年以后;方差分析中,存在 3*a*、6*a* 和 14*a* 3 个主周期,其中 14*a* 为第一主周期,在全域中丰枯变换次数为 4 次, C_{sand} 呈现短期间达到峰值继而逐渐减小的变化趋势。

综上所述,河湖水量和泥沙交换指数的时间序列周期性较为接近,小尺度的周期变化显著性较差。能量震荡均在 1995 年附近出现拐点,河湖水量交换

指数的能量在 1995 年之前呈逐渐增强的趋势,而在 1995 年达到能量震荡的最强值后呈逐渐减弱的趋势;河湖泥沙交换指数的能量在 1995 年之前震荡特性不明显,而在 1995 年后,呈波动震荡的变化规律。水量交换指数不同尺度周期下预测结果不一致,而泥沙交换指数不同尺度周期预示着其值将达到峰值状态,进而再呈现逐渐减弱的趋势。

5 讨 论

径流量和输沙量是河流与湖泊最重要的两项水文特征值,也是影响河湖水沙交换的关键因素^[21-22],而近年来淮河流域受自然环境变化和人类活动的影响,河湖水沙交换特性也势必经历着显著的变化。对河湖水沙特性的研究通常集中在水沙时间序列所表现出来的趋势性、突变性及周期性等几个方面^[23-25],因此本文所采用的分析方法可以对淮河中游河道与洪泽湖的水沙交换程度进行科学阐述。

通过采用多种趋势检验法对河湖水量和泥沙交换指数时间序列进行分析,表明在研究时间范围内,洪泽湖的库容呈不显著增大趋势,且湖盆处于逐年淤积的状态,淤积量呈不显著增大趋势,胡军等^[16]的研究也表明洪泽湖自 1983 年后平均水位呈上升趋势。通过采用多种突变检验法开展河湖水量和泥沙交换指数时间序列的突变性分析,表明河湖水量与泥沙交换均不存在显著突变点,淮河与洪泽湖的水沙交换程度处于相对稳定状态,贲鹏等^[11]采用多种分析方法,研究了洪泽湖的冲淤时空分布规律和

水沙变化趋势,指出入湖径流量无显著变化特征,入湖输沙量呈显著减小趋势,泥沙主要淤积在入湖口处。河湖水量和泥沙交换指数时间序列的周期性分析表明,河湖水量交换与泥沙交换时间序列均存在显著性周期变化,具有多时间尺度的周期性特征,张辉等^[9]研究了淮河干流水沙的周期性变化规律,认为吴家渡水文站水沙时间序列存在多时间尺度周期性特征。本文研究结果与已有研究结果相近,同时进一步阐明了淮河中游河道与洪泽湖的水量和泥沙交换特性。

6 结 论

通过构建淮河中游河道与洪泽湖水沙交换指数计算式,并利用多种统计检验交叉互补的方法对淮河中游河道与洪泽湖 1975—2015 年的水量和泥沙交换指数时间序列进行了系统性分析,得到如下结论:

(1) 水量交换指数和泥沙交换指数时间序列均呈不显著增大趋势,说明洪泽湖库容呈不显著增大趋势,湖盆处于逐年淤积状态,淤积量呈不显著增大趋势。

(2) 河湖水量与泥沙交换指数时间序列均不存在显著的突变点,说明淮河干流与洪泽湖的水沙交换程度处于相对稳定状态。

(3) 河湖水量和泥沙交换指数时间序列均存在多时间尺度的周期性特征,周期性较为接近,小尺度的周期变化显著性较差,其中水量交换指数时间序列存在着 3a、7a、9a 和 14a 4 个主周期,泥沙交换指数时间序列存在着 3a、6a 和 14a 3 个主周期,且均以 14a 为第一主周期。水量交换指数不同尺度周期下预测结果不一致,而泥沙交换指数不同尺度周期预示着其值将达到峰值状态,进而再呈逐渐减弱的趋势。

参考文献:

- [1] 胡春宏,张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报,2018,49(9):1028-1039.
- [2] 刘洁,杨胜发,沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响[J]. 泥沙研究,2019,44(6):33-39.
- [3] PALUCIS M C, ULIZIO T P, FULLER B, et al. Flow resistance, sediment transport, and bedform development in a steep gravel-bedded river flume [J]. Geomorphology, 2018, 320(3): 111-126.
- [4] LANZONI S, FERDOUSI A, TAMBRONI N. River banks and channel axis curvature: Effects on the longitudinal dispersion in alluvial rivers [J]. Advances in Water Resources, 2018, 113: 55-72.
- [5] 汪富泉,李后强,艾南山,等. 水流、泥沙运动及河床演变中的分形与自组织[J]. 大自然探索,1999,18(3):55-61.
- [6] 潘扎荣,阮晓红,朱愿福,等. 近 50 年来淮河干流径流演变规律分析[J]. 水土保持学报,2013,27(1):51-55+59.
- [7] 孙鹏,孙玉燕,张强,等. 淮河流域径流过程变化时空特征及成因[J]. 湖泊科学,2018,30(2):497-508.
- [8] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J]. 水利学报,2012,43(5):571-579.
- [9] 张辉,虞邦义,倪晋,等. 近 66 a 来淮河干流水沙变化特征分析[J]. 长江科学院院报,2020,37(3):6-11.
- [10] 洪国喜,韩国民. 洪泽湖入湖、出湖水流泥沙特性分析[J]. 水利科技与经济,2007,13(4):240-241.
- [11] 贲鹏,虞邦义,张辉,等. 洪泽湖水沙变化趋势和冲淤时空分布及驱动因素[J]. 湖泊科学,2021,33(1):289-298.
- [12] 邓恒,徐国宾,段宇,等. 淮河与洪泽湖河湖关系研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):142-147.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版)[M]. 北京:气象出版社,1999.
- [14] MANN H B. Non-parametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [15] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [16] 胡军,梅海鹏,刘猛. 洪泽湖水位变化特征分析[J]. 治淮,2019(12):11-12.
- [17] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.
- [18] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [19] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 水文时间序列分析方法研究进展[J]. 地理科学进展,2013,32(1):20-30.
- [20] HERMIDA L, LOPEZ L, MERINO A, et al. Hailfall in southwest France: Relationship with precipitation, trends and wavelet analysis [J]. Atmospheric Research, 2015, 156: 174-188.
- [21] 谢鉴衡. 江河演变与治理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [22] 孙昭华,周炜兴,周坤,等. 江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系[J]. 水利学报,2021,52(5):521-534.
- [23] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学(第 2 版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [24] 郝婷婷,钟平安,魏蓬. 淮河流域近 50 年天然径流演变规律分析[J]. 水电能源科学,2011,29(9):4-7+27.
- [25] 杨燕华,张明进,王建军. 三峡蓄水后宜昌至武汉段新水沙特性研究[J]. 水道港口,2013,34(4):327-334.