

李明亮, 杨昉, 杨磊, 等. 2017. 气候变化与建闸影响下小流域入海径流量长周期变化特征: 以盐城海岸为例 [J]. 气候与环境研究, 22 (6): 671–682. Li Mingliang, Yang Yang, Yang Lei, et al. 2017. The long-period variation characteristics of water discharge with estuarine sluice and climate change in a small watershed: A case study in Yancheng coast [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (6): 671–682, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15249.

气候变化与建闸影响下小流域入海径流量长周期变化特征: 以盐城海岸为例

李明亮^{1,2} 杨昉³ 杨磊^{1,2} 龚绪龙^{1,2}

1 江苏省地质调查研究院, 南京 210018

2 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 南京 210018

3 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要 河流入海通量是河口海岸地区物质能量循环的重要组成部分, 也是地貌与环境演化的主要控制因素之一。以 1957~2012 年盐城海岸降雨量及主要建闸入海河流径流量等统计资料为基础, 采用 M-K 趋势检验、小波分析等多种方法, 研究了建闸活动影响下小流域入海径流量的长周期变化特征, 对气候变化及海平面上升背景下的河口海岸治理具有重要意义。结果表明, 受到降雨量减少及人类活动的影响, 近 60 年来入海径流量呈下降趋势, 减少速率为 $3 \times 10^6 \text{ m}^3 (10 \text{ a})^{-1}$, 径流量的季节性及年代际变化特征明显, 以 1965 年为界, 1965 年前后时期的径流量统计特征差异显著。尺度变化方面, 入海径流量具有多周期变化特征, 其第一主周期为 23.38 a, 径流量及降雨量在不同周期尺度下表现出明显的“丰—枯”及“湿—干”交替震荡特征。此外, ENSO 事件及河口建闸能够分别对入海径流量的年代际及季节性变化特征产生影响。未来需结合气候及下垫面变化特征开展入海径流量预测及相关影响评估。

关键词 径流量 小波分析 河口建闸 盐城海岸

文章编号 1006-9585 (2017) 06-0671-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15249

The Long-Period Variation Characteristics of Water Discharge with Estuarine Sluice and Climate Change in a Small Watershed: A Case Study in Yancheng Coast

LI Mingliang^{1,2}, YANG Yang³, YANG Lei^{1,2}, and GONG Xulong^{1,2}

1 *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018*

2 *Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210018*

3 *School of Geographic and Oceanic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023*

Abstract Discharge fluxes into the ocean are an important component of material and energy cycle in estuarine and coastal areas. They are also the primary controlling factor of morphological and environmental evolution. Based on statistical analysis of rainfall and runoff of tidal rivers with sluices at Yancheng coast from 1957 to 2012, the authors

收稿日期 2015-11-05; 网络预出版日期 2017-04-27

作者简介 李明亮, 男, 1988 年出生, 硕士研究生、工程师, 研究方向为河口海岸科学。E-mail: limingliang_vp@hotmail.com

通讯作者 杨昉, E-mail: yangy@nju.edu.cn

资助项目 中国地质调查局项目 1212011220005, 国家重大科学研究计划 2013CB956502, 中央高校基本科研业务费

Funded by Program of China Geological Survey (Grant 1212011220005), National Major Scientific Research Program (Grant 2013CB956502), Fundamental Research Funds for the Central Universities

studied features of multi-scale changes in runoff affected by tidal sluices using M-K trend test and wavelet analysis, etc. Results of the present study have great implications for estuarine and coastal management under the influence of climate change and sea level rise. It is found that runoff into the ocean decreases at a rate of $3 \times 10^6 \text{ m}^3 (10 \text{ a})^{-1}$, seasonal and decadal variability in runoff are obvious, and statistical characteristics of runoff differ greatly before and after 1965. Runoff variation displays a multi-scale feature, and the primary period is 23.38 a. Runoff and rainfall demonstrate alternating “high–low” and “wet–dry” conditions respectively at different scales. In addition, ENSO events and sluices at estuaries could affect the inter-annual, inter-decadal and seasonal variability of runoff. Runoff estimation and evaluation of runoff changes should be conducted in the future with consideration of climate and land surface changes.

Keywords Runoff, Wavelet analysis, Estuarine sluice construction, Yancheng coast

1 引言

河流入海通量是河口及近海生态系统重要的物质、能量供应者，也是影响河口地区地貌发育及海岸带可持续发展的重要因素，因而成为研究陆海相互作用的关键问题之一 (Syvitski et al., 2003; Yang et al., 2004, 2015)。近年来，随着全球气候变化及人类活动（如筑坝、建闸、引水分流等）的加剧，改变了河流入海通量原有的时空变化特征，对海岸地貌发育、生态环境演化产生了一系列的影响 (Li et al., 2007; Huang et al., 2015)。目前，在大型流域—海岸系统，如长江、黄河、珠江等就人类活动对入海通量的变化特征及海岸环境、地貌等的影响方面已经进行过较为充分的研究 (吴创收等, 2014; Shi et al., 2015; Zhao et al., 2015)。相比之下，中小型流域系统的重要性往往被忽视或低估，如雷坤等 (2007) 通过分析指出，海河建闸后 30 年间平均径流量仅为建闸前的 18.99%，从而引起水质恶化等诸多问题；Kim et al. (2006) 通过对 Keum 河口的研究发现，河口建闸能降低沉积物的通过效率，河口沉积速率是已有值的 1.9 倍，由此造成河口淤积、地貌变化等问题。实际上，全球中小河流运输的沉积物通量要大于大型河流 (Milliman et al., 1994)。亚洲地区人口密集，存在着大量的小型流域—海岸带系统，每年产生巨量的入海水沙通量，对海岸地貌、近海生态等产生重要影响 (高抒, 2006)。

此外，入海通量受到流域降雨量、下垫面特征及人类活动的综合影响，会表现出阶段性及多尺度的变化特征 (刘锋等, 2011; 余世鹏等, 2014)，这些特征对于未来气候环境变化预测、海岸陆架长周期地貌演化模拟及近海生态系统平衡等具有重要影响。因此，研究气候变化与建闸活动影响下的小型

流域系统入海通量的长周期变化特征对于海岸带资源环境及经济社会可持续发展具有重要意义。

2 研究区概况与数据分析

2.1 研究区概况

盐城市 (图 1) 位于中国东部，处于北亚热带向暖温带过渡区，地理位置 ($32^{\circ}34'N \sim 34^{\circ}28'N$, $119^{\circ}27'E \sim 120^{\circ}54'E$) 东临南黄海，南北分别与南通、连云港接壤，下辖 7 县 2 区，年均降水量在 1030 mm，降雨集中在汛期 6~9 月，年均气温为 $15.5^{\circ}C$ (叶正伟, 2014)。

盐城海岸入海河流众多，主要包括射阳河、新洋港河、黄沙港河、斗龙港河等，总流域面积达 $1.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，年均径流量 12.65~45.76 亿立方米，较大的河流为射阳河及新洋港河 (图 1b)，年均径流量分别为 45.76、26.13 亿立方米 (表 1)，入海河口分布在废黄河以南至辐射沙脊内缘区以北。为防止咸潮倒灌及满足沿河工农业用水需求，从 20 世纪 50 年代起陆续建立起挡潮闸，开始人工调控入海径流量。

表 1 盐城海岸主要入海河流统计表

Table 1 Statistics of main estuaries at Yancheng coast

河流名称	建闸时间	流域面积/ km ²	设计流量/ m ³ s ⁻¹	年均径流量/ 10 ⁸ m ³
射阳河	1956 年	4036	960	45.76
新洋港河	1957 年	2478	485	26.13

2.2 数据分析方法

本文选取建闸时间较早、年均径流量较大的射阳河与新洋港河 1957~2012 年共计 56 年逐月入海径流量数据，同时选取盐城射阳、东台两个气象站 1957~2012 年逐月降雨资料，径流量数据来源于盐城市水利局，降雨量数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (data.cma.cn [2017-07-18])。

采用 Mann-kendall 趋势检验分析方法（简称 M-K 趋势分析）分析降雨量及入海径流量的变化趋势，同时还能大体确定要素发生突变的位置信息（魏凤英, 2007; Panda et al., 2011）。另外，参考张宇等（2015）的方法，同时进行了降雨量及入海径流量的 M-K 突变检验及滑动检验。

降雨量、径流量演变过程具有多时间尺度特征，同时也包含了多层次的突变。小波分析具有多分辨率的特点，在海洋学及水文学分析中已经有较多的应用（Meyers et al., 1993）。小波分析在时域与频域上都能对信号进行多尺度细化分析，得到频率随时间变化及频率间的相互关系。本文选 Morlet 小波为基小波（Morlet et al., 1982），周期分析结果能真实反映时间序列各尺度周期性大小及其在时域中的分布。同时，采用 Torrence and Compo(1998) 提出的方法对小波分析结果进行显著性检验和红噪声检验。

3 结果与讨论

3.1 降雨与径流量趋势及影响因素

从年均降雨量及其线性拟合看（图 2a），年降雨量呈微弱下降趋势，减小速率为 $1 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ，M-K 趋势分析结果为 -0.03 ，表明总体上降雨量呈下降趋势，但没有通过 90% 信度水平的显著性检验。降雨量年际差异较大，降雨量存在几个极大值分别为 1409 mm、1143.7 mm、1691.2 mm、1369.1 mm 及 1269.8 mm，对应的年份分别为 1965 年、1974 年、1991 年、1998 年、2003 年，几个极小值分别为 853.3 mm、775.15 mm、487.1 mm、864.55 mm、703.7 mm、656.65 mm，对应年份分别为 1961 年、1966 年、1978 年、1988 年、1994 年、2004 年。降雨量的 5 a 滑动平均及累积距平结果表明（图 2a），

1957~2012 的降雨量时间序列可分为 3 个重复的“升—降”变化过程，其中 1957~1965 年、1969~1974 年、1982~1991 年表现呈上升趋势，其余时间段呈下降趋势。

入海径流量呈下降趋势（图 2b），减小速率为 $3 \times 10^6 \text{ m}^3 (10 \text{ a})^{-1}$ ，M-K 趋势分析结果为 -0.01 ，也表明径流量也呈下降趋势，同样没有通过 90% 信度水平的显著性检验。入海径流量的极值与降雨量有较好的对应关系，多年平均入海径流量为 $4.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，最大入海径流量为 $7.45 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，出现时间为 1965 年，最小值为 $1.07 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，出现在 1978 年，前者是后者 6.96 倍，表明年际径流量变异较大。根据径流量的 5 a 滑动平均结果，也可大体划分成 3 个主要的“升—降”过程，时间节点接近降雨量变化的节点。

降雨量与入海径流量的季节性变化显著，从降雨量的季节分布来看（表 2），夏季降雨量最多，平均占全年降雨量的 52.94%，冬季降雨所占比例最小，为 7.91%，春季与秋季占比相当，分别为 19.12% 与 20.03%。从降雨量的代际分布来看，各代际年均降雨量没有太大差别，最大值为 20 世纪 90 年代，达到 $1081.65 \text{ mm a}^{-1}$ ，最小为 20 世纪 70 年代，为 965.43 mm a^{-1} ，差距不明显。入海径流量的季节性变化特征与降雨量相比有所差异（表 2），表现在春季占比最低，为 13.30%，冬季次之，为 15.29%，夏季与秋季占比差距不大，分别为 38.53%、32.88%。从总体上看，径流量在各季节的分配相对降雨量而言比较均匀。在降雨量季节分配极不均匀的情况下，入海径流量的这种变化特征表明，人类活动（如河口建闸调蓄径流）在一定程度上使得径流量在年内的分配相对均匀。另外，入海径流量的年代际变化特征（表 2）明显，年代际均径流经历了先减小后增加的变化过程，最大值为 20 世纪 50 年代的 7.68

表 2 降雨量及入海径流量年代际及季节性变化统计

Table 2 Statistics of decadal and seasonal variations of rainfall and runoff

时间	平均降雨量/mm				平均	平均径流量/ 10^9 m^3				平均
	春	夏	秋	冬		春	夏	秋	冬	
1957~1959 年	203.68	481.77	246.47	65.55	997.47	0.79	2.77	2.92	1.20	7.68
20 世纪 60 年代	201.95	565.84	234.86	43.96	1046.60	0.91	2.93	2.39	0.93	7.16
20 世纪 70 年代	199.54	501.64	185.71	78.54	965.43	0.70	2.50	1.67	0.33	5.20
20 世纪 80 年代	178.74	547.14	230.48	74.79	1031.14	0.76	2.31	1.83	0.56	5.46
20 世纪 90 年代	231.03	552.71	195.04	102.88	1081.65	1.05	2.29	1.71	1.02	6.07
21 世纪 10 年代	157.92	547.58	175.38	103.25	984.12	0.84	2.52	2.20	1.48	7.04
2010~2012 年	180.57	550.03	148.53	91.08	970.22	1.05	2.29	2.34	1.45	7.13
平均	193.35	535.24	202.35	80.01	1010.94	0.87	2.52	2.15	1.00	6.53

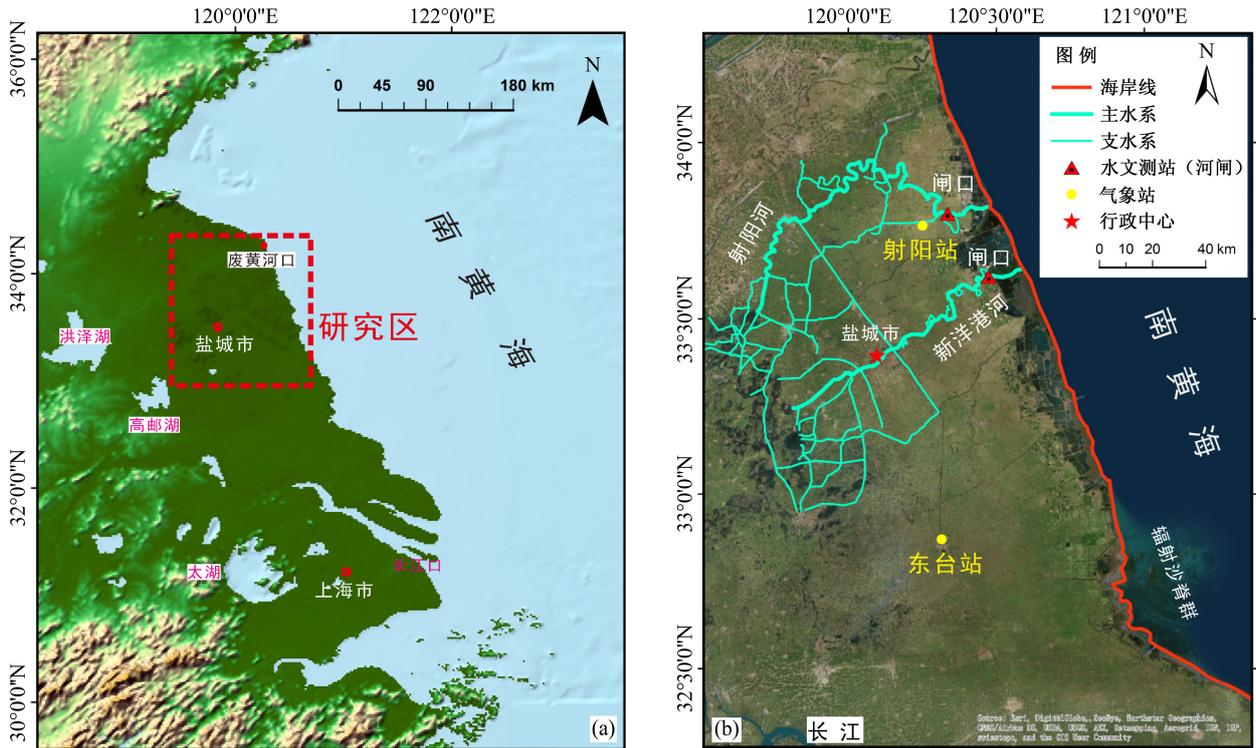


图 1 (a) 盐城市的位置及其 (b) 水系分布
Fig. 1 (a) Location of Yancheng City and its (b) drainage system

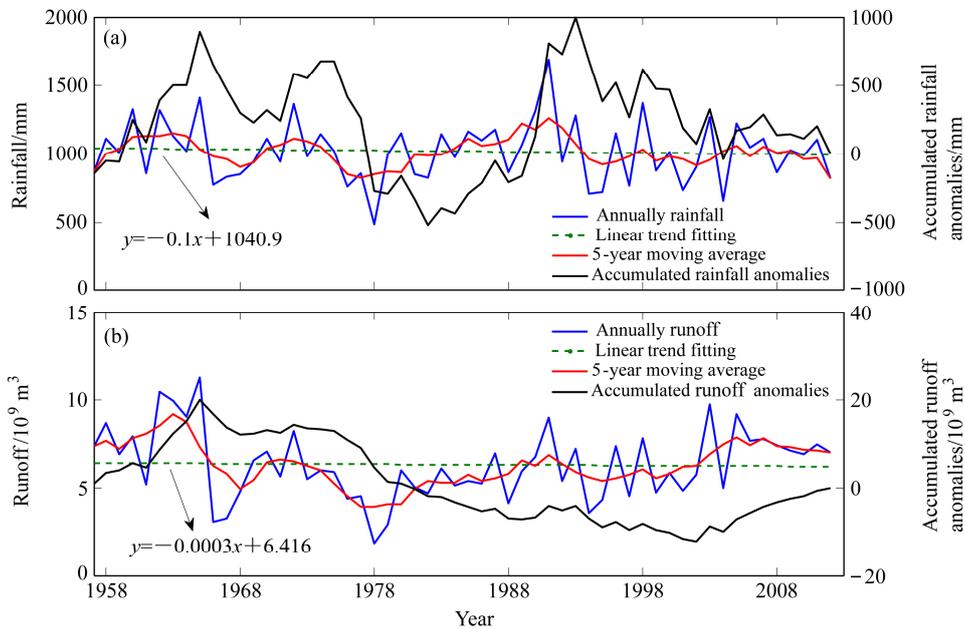


图 2 年均 (a) 降雨量、(b) 径流量及其 5 年滑动平均和累积距平
Fig. 2 Annual (a) rainfall, (b) runoff and their 5-year moving averages and accumulated anomalies

$\times 10^9 \text{ m}^3$, 最小值为 20 世纪 80 年代的 $5.20 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。
入海径流量受到流域降雨量与下垫面的综合影响, 多年 (1957~2012 年) 月平均降雨量及径流量数据 (图 3a) 表明, 降雨量与入海径流量在全年

(1~12 月) 具有较为一致的变化趋势, 相关系数达到 0.82。从半年分布规律来看, 在 1~6 月期间, 平均降雨量逐月增加, 而径流量在 1~6 月基本保持稳定, 二者线性相关系数为 0.75, 表明在上半年

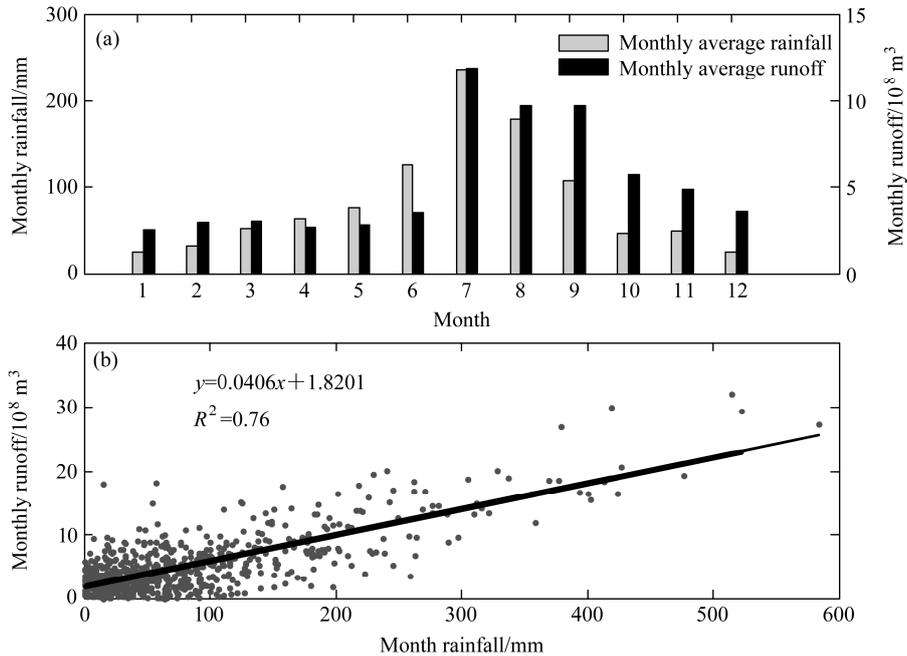


图3 1957~2012年平均的(a)月降雨量、径流量及其(b)相关分布
Fig. 3 (a) Monthly average rainfall and runoff, (b) their scatterplot of correlation averaged during 1957–2012

期间降雨量对入海径流量的影响不如全年显著。在7月~12月期间,平均降雨量呈递减趋势,此时径流量与降雨量具有相似的变化趋势,二者线性相关系数达0.94,表明下半年期间降雨量是影响径流量变化的决定性因素。将多年逐月降雨量、径流数据量做相关性分析(图3b),结果显示二者具有较好的相关性(线性相关系数 $R^2=0.76$),表明在长时间序列逐月变化的时间尺度上流域降雨量对入海径流量也有显著影响。同时,小波分析的结果也揭示了降雨量、径流量在时域频域较好的一致性,在周期变化方面也具有一致或接近的主周期分布,说明在不同周期尺度的分析中,降雨量是影响入海径流量的最主要因素。

3.2 突变特征分析

长时间序列的降雨量及径流量统计结果能够在一定程度上反映气候变化特征,利用M-K突变检验及滑动T检验的方法进行降雨量及径流量的突变分析(图4)。结果表明,对于降雨量序列而言,UF曲线的波动反映出降雨序列三个主要的“升—降”过程,虽然UF、UB存在多个交点(图4a),但由于二者均没有超出0.05显著性水平线,加之T检验曲线(图4b)也没有超出信度区间,不具有明显突变点,表明对于降雨量—时间序列而言不存在突变。入海径流的UF曲线在1965年之后虽然表现出下降趋势(图4c),但由于UF、UB统计曲线在

1965年处并没有交叉,故认为不属于径流量突变。虽然不存在径流量的突变,但1965年之前(1957~1965年)的平均径流量为 $85.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,在此之后(1966~2012年)平均径流量为 $58.9 \times 10^9 \text{ m}^3$,平均入海径流量变化显著。

累积统计曲线也能够一定程度上反映出变量的速率变化特征(图5)。从统计结果看,降雨量曲线波动较小,基本呈斜线型,表明长时期的降雨量总体稳定,变化不大,并不存在突变。另外,可将径流量变化分为两个主要时期:在1965年之前斜率较一致,为8.49;1966~2012年间的斜率波动不大,为5.82,相对之前减小了31.45%。总体上看,入海径流量的变化与降雨量的减少存在一定的关系,1965年之前的年均降雨量为 $1117.21 \text{ mm a}^{-1}$,之后平均为 998.67 mm a^{-1} ,减少了约11%。此外,人类在该地区河口的建闸行为改变了原有的河口沉积动力特征,造成建闸初期间下河道严重淤积(李明亮等,2013),断面过水能力下降,引起排水不畅甚至河道淤死等后果。加之人类在河口及上游的工农业活动加剧,对河流淡水的需求量增加,这些都是降雨量减少大背景下入海径流量在这两个时期发生变化的原因。

3.3 阶段性及周期性特征

小波的波谱能量代表了降雨量及径流量时间

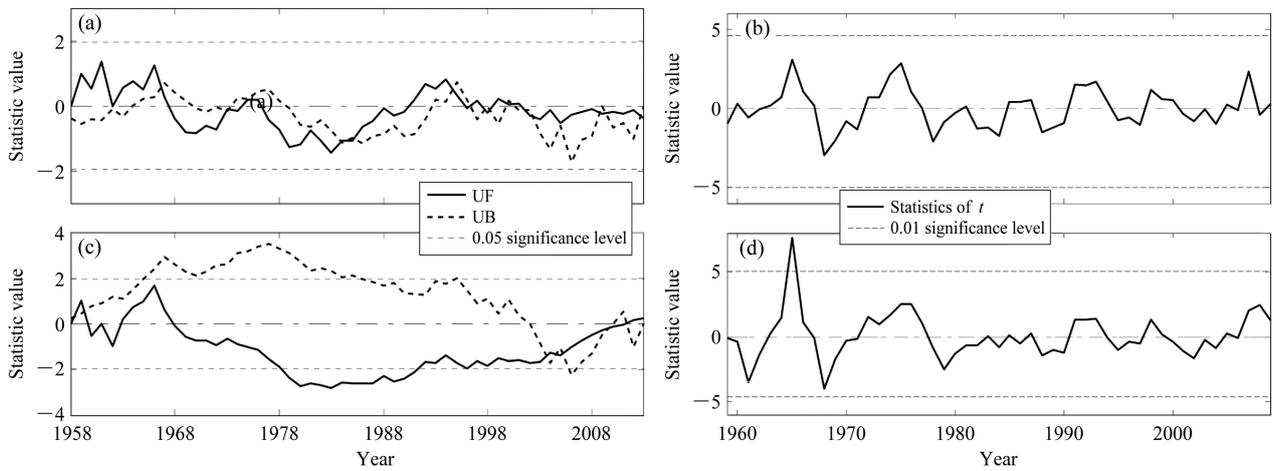


图4 (a) 降雨量、(c) 径流量的 M-K 检验; (b) 降雨量、(d) 径流量的 T 检验

Fig. 4 Forward (UF, solid line) and backward (UB, dashed line) statistic rank series of (a) rainfall and (c) runoff in the Mann-Kendall (M-K) test; t test of (b) rainfall and (d) runoff

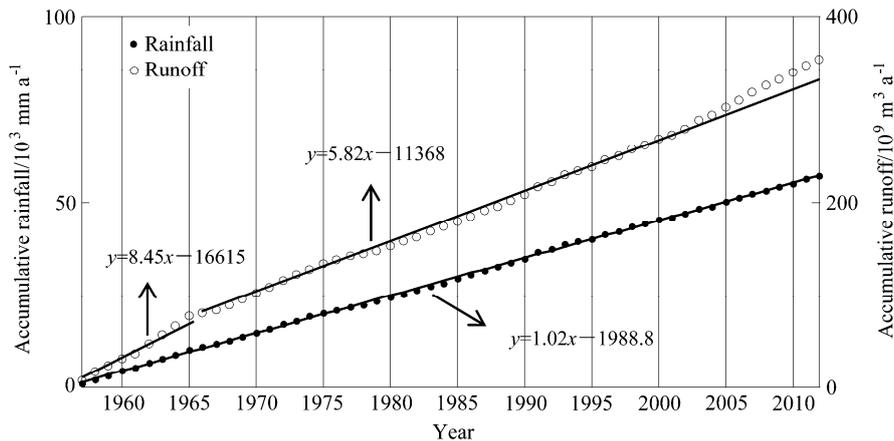


图5 降雨、径流累积统计曲线

Fig. 5 Accumulative statistical curves of rainfall and runoff

序列在各个时间尺度上的能量强弱, 能量越强表明该时间尺度振幅越大, 对于周期的影响越显著。小波实部则代表特定时间尺度信号在时间序列上的分布以及位相两方面的信息, 实部为正, 代表研究变量偏多, 实部为负表示研究变量偏少 (刘锋等, 2011)。小波方差则用来确定变量在时间序列中存在的主要周期。

降雨量的小波能量谱 (图 6a) 表明, 在 1958~1967 年、1971~1984 年、1990~2006 年这三个阶段 2~4 a 时间尺度上的能量较强, 且通过了 0.05 显著性水平的红噪声检验。小波系数实部 (图 6c) 表明, 在这三个阶段存在明显的正负相位交替, 即降雨量的干湿变化。另外, 在 1957~2005 年时间

尺度为 8~12 a 的能量较强 (图 6a), 同时存在 10 个比较明显的降雨“湿—干”交替变化过程。其中, 前两个过程 (1960~1970 年) 位于影响锥线外部, 有可能受到边界效应的影响, 1985~2000 年的数据通过了红噪声检验。在影响锥线外部, 时间尺度为 20~30 a 的能量也较强, 存在 5 个明显的“湿—干”交替过程 (图 6c)。入海径流量的小波分析结果表明, 在 2~4 a 时间尺度上, 入海径流量在 1960~1970 年、1992~2008 年期间具有较强的波谱能量 (图 6b), 均通过 0.05 显著性水平的红噪声检验, 在此期间存在着径流的“丰—枯”变化, 但不显著 (图 6d)。6~12 a 时间尺度上的能量较强, 在 1960~1985 年包含着非常明显的“丰—枯”变化过

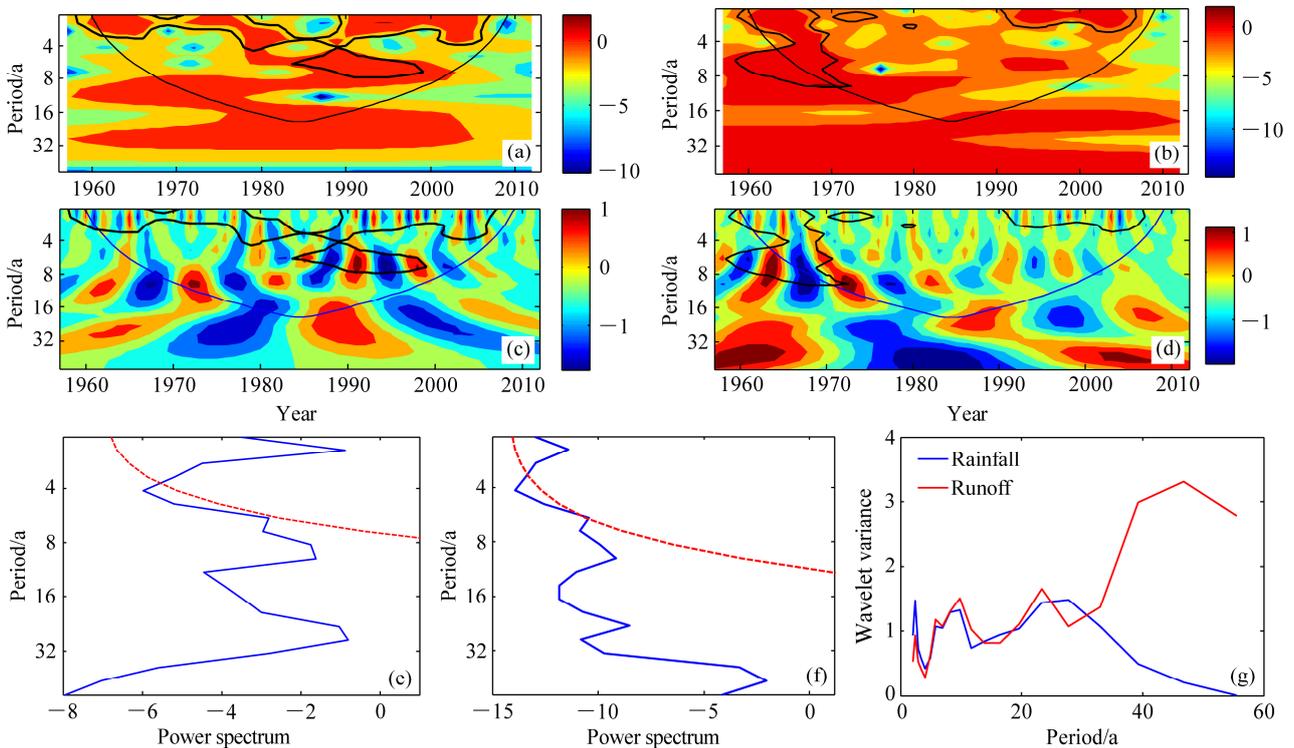


图6 (a) 降雨量、(b) 径流量波谱能量；(c) 降雨量、(d) 径流量小波变换实部的时间序列；(e) 降雨量、(f) 径流量能量谱曲线（蓝色实线）；(g) 降雨量、径流量小波方差。图 a-d 中细实线为 0.05 显著性水平的边界效应影响锥线，粗实线内为通过 0.05 显著性水平的红噪声谱检验；图 e、f 中红线为 0.05 显著性水平的红噪声谱检验线

Fig. 6 Power spectrum of (a) rainfall and (b) runoff; time series of real part of wavelet transform of (c) rainfall and (d) runoff; power spectrum curve of (e) rainfall and (f) runoff; (g) wavelet variances of rainfall and runoff. In Figs. a-d, the thin solid lines stand for the cone of influence due to the edging effect at 0.05 significance level, the areas enclosed by thick solid lines indicate data pass the red noise spectrum test at 0.05 significance level. Red lines Figs. e and f denote the red noise spectrum test line at 0.05 significance level

程（图 6d），后期的丰枯变化处于影响锥线内部，但变化不如前期明显，而在此期间的径流量的干湿交替则很显著（图 6c）。在影响锥线外部，径流同样时间尺度为 20~30 a 的“丰—枯”交替过程（图 6d），与降雨量的干湿交替有较好的对应关系。

结合能量谱曲线（图 6e、f）和小波方差图（图 6g），入海径流量存在四个主要变化周期，分别为 2.46 a、9.83 a、23.38 a、48 a，由于 48 a 非常接近时间序列（56 a）总长度，属于噪声数据，因此入海径流量变化的第一主周期为 23.38 a，第二主周期为 9.83 a，第三主周期为 2.46 a。同理可得到降雨量的主周期分布，其中第一主周期为 27.80 a，第二主周期为 9.83 a，第三主周期为 2.46 a。降雨量与径流量之间存在一致的第二、三主周期及非常接近的第一主周期。

通过提取各周期对应的小波变换系数（图 7）

发现，在 2.46 a 的周期尺度上（图 7a），降雨量与入海径流量在时域的分布具有很大的相似性，体现在正负相位频繁交替，振幅经历了“减小—增大—减小”的变化过程。相位与振幅的变化表明降雨的干湿变化与径流的丰枯变化在 1957~1978 年及 1991~2006 年期间变化比较剧烈，在 1979~1990 年及 2007~2012 年（图 7a）该周期尺度表现不明显，变化较为缓和。在 9.83 a 周期尺度上（图 7b），在 1990 年之前降雨量与径流量位相变化特征较为一致，之后径流的丰枯变化逐渐不明显，振幅接近于 0，降雨量振幅逐渐减小，周期性特征不显著，而在此期间（1991~2005 年）2.46 a 的周期特征非常明显（见图 7a、b 中虚线框）。在大于 20 a 的周期尺度上（图 7c），降雨量与径流量序列在 2000 年之后振幅均表现出一定的衰减特征。总的来看，周期尺度越小，位相的变化越复杂，但各尺度周期振幅均在 2005 年之后表现出衰减的特征。

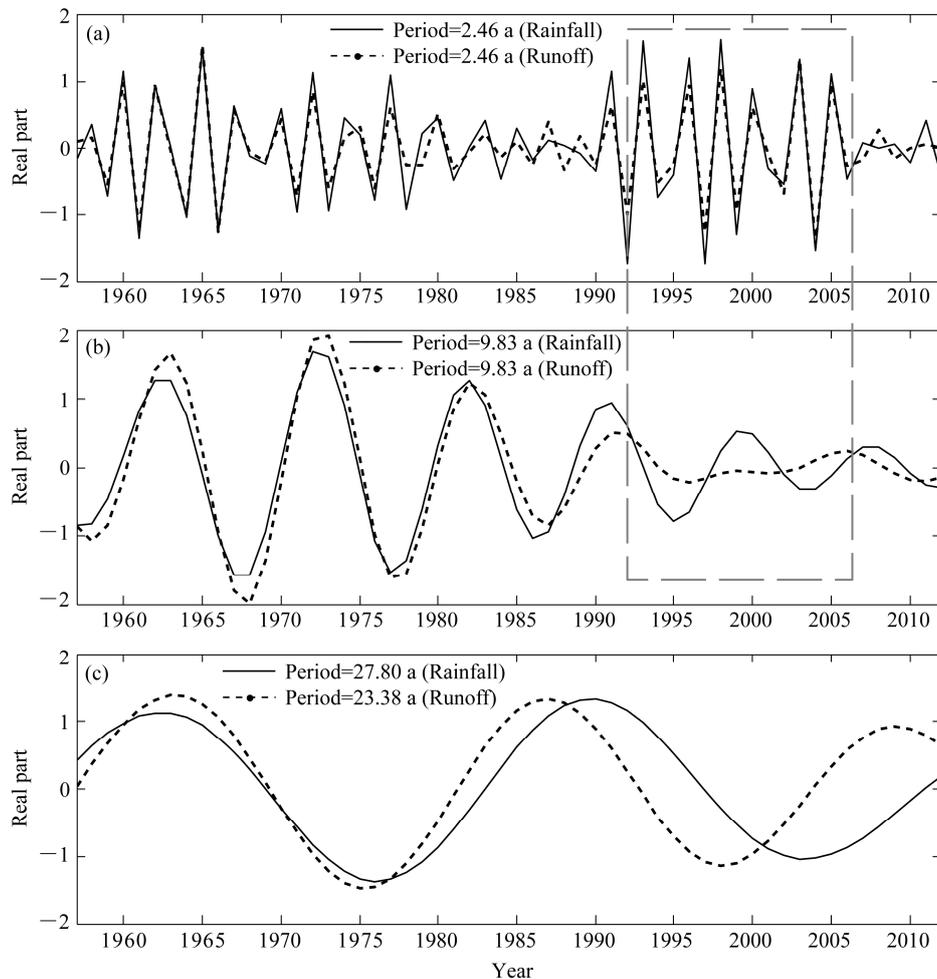


图7 不同周期情况下降雨量、径流量小波变换实部的变化过程：(a)降雨量、径流量周期为2.46 a；(b)降雨量、径流量周期为9.83 a；(c)降雨量、径流量周期分别为27.80 a与23.38 a。7a、b中虚线框表示降雨量、径流量的周期性差异显著

Fig. 7 Variations in the real parts of wavelet transform of rainfall and runoff at different periods: (a) The period is 2.46 a; (b) the period is 9.83 a; (c) periods are 27.80 a and 23.38 a for rainfall and runoff, respectively. In Figs. a and b, the dashed rectangle represents cyclical differences of rainfall and runoff are significant

3.4 气候变化与河口建闸对径流的影响

温度是气候变化的重要指标，据陈力等(2015)的分析，研究区温度在1954~2011年以 $0.24^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 的速率增加，升温幅度明显，且在1993年发生突变，但气温与降雨量之间没有明显线性或非线性相关关系，表明该区域气温对降雨量及入海径流量无直接显著影响。另外，厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)虽然起源于赤道太平洋地区，但影响了地球上大部分地区的气候变化(Chiodi and Harrison, 2015)，往往造成严重的干旱、洪涝及其他灾害等极端气象事件，常常被认为是年际气候变化的信号(Turner and Annamalai, 2012)。为研究ENSO对降雨量及入海径流量的影响，选取NOAA提供的

1957~2012年逐年多变量ENSO指数(Multivariate ENSO Index, 简称MEI)，该指数能较好地反映出ENSO发生与消亡过程(Wolter and Timlin, 1993, 1998)，MEI指数越大，表明ENSO发生的强度越大。

统计发现，在1957~2012年间，共发生8次较强的ENSO事件。在ENSO期间，往往对应较大的降雨量、径流量(图8a、c)，平均年降雨量达到1117.40 mm，径流量达到 $70.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，而在其他年份降雨量、径流量均值分别为990.51 mm、 $62.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，前者显著偏多。另外，通过拟合分析发现，在ENSO期间的MEI指数与年均降雨量、径流量均有较好的相关性，如1957~1993年ENSO

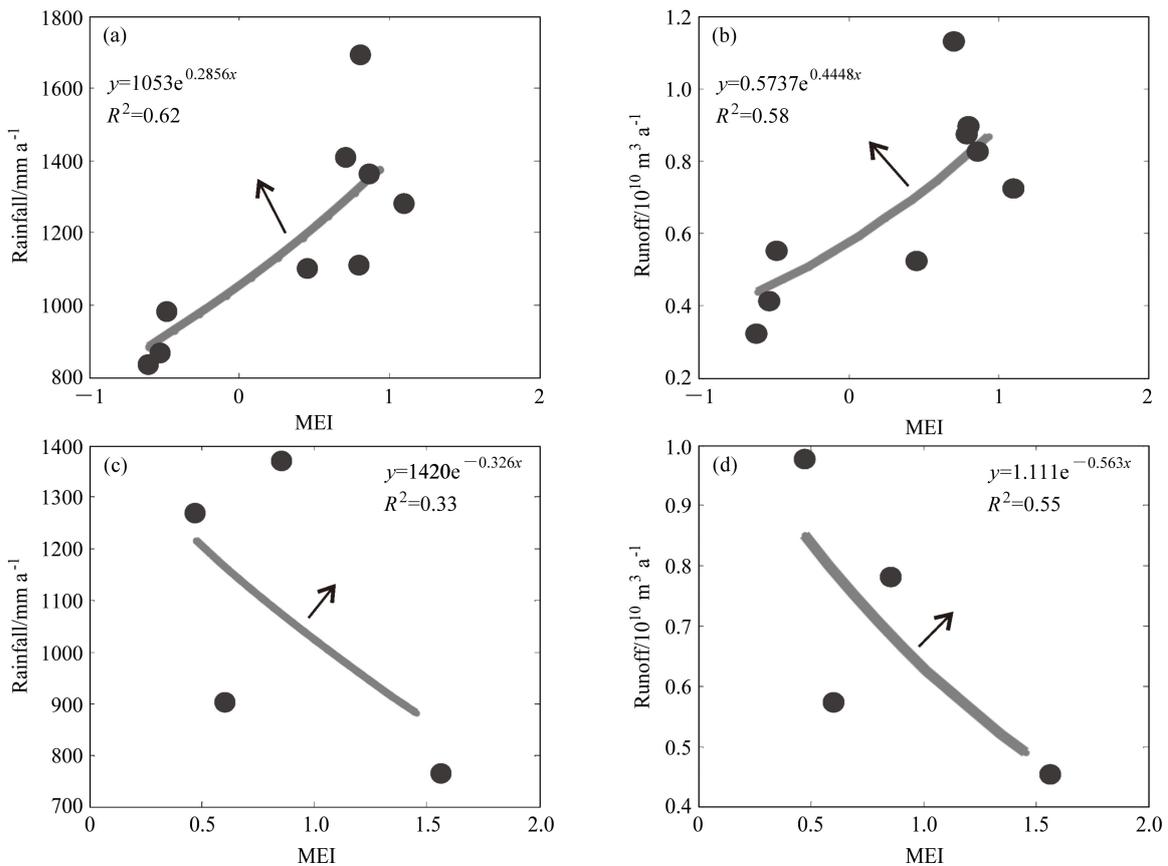


图 8 ENSO 期间 MEI 指数与 1957~1993 年年均 (a) 降雨量、(b) 径流量以及 1997~2012 年年均 (c) 降雨量、(d) 径流量拟合结果
Fig. 8 Fitting results of annual mean (a) rainfall and (b) runoff from 1957 to 1993, annual mean (c) rainfall and (d) runoff from 1997 to 2012 to MEI (Multivariate ENSO Index) during ENSO

期间二者的相关系数分别达到 0.62、0.58 (图 8a、b)，说明 ENSO 事件能够显著影响降雨量及径流量的年代际分布特征。但 ENSO 的不同阶段，降雨量及入海径流量变化特征不同。1957~1993 年 ENSO 期间，MEI 指数越大(发展阶段)，往往对应较大的降雨量及径流量，二者呈正相关(图 8a、b)；1997~2012 年 ENSO 期间，较小的 MEI 指数(衰减阶段)往往对应较大的降雨量、径流量(图 8c、d)，后者与已有的研究(黄荣辉和陈文, 2002)是一致的。另外据 Yin et al. (2009) 的研究，ENSO 具有 3~7 a 的周期变化，这与降雨量及径流量的 2~10 a 周期变化较为相似。总的来看，ENSO 事件通过影响降雨量使入海径流量显著增大，从而使其年代际分布更加不均匀，二者之间呈正相关关系。

在入海河口建闸，目的是为了防止咸潮上溯、蓄积淡水、防洪排涝等(徐雪松等, 2012)。盐城地处南黄海粉砂淤泥质海岸，水体悬沙浓度高(邢飞等, 2010)，河口建闸改变了原有的沉积动力格

局，潮波变形引起的不平衡输沙及咸淡水混合造成的层化效应等(李明亮等, 2013)使得闸下河道快速淤积，河道断面面积减小，排水通航能力下降。另外，由于沿河工农业等用水及河道排水冲淤的需求(龚瑜等, 2015)，河闸的管理模式也能够影响入海径流量的年内分配规律。

以新洋港河口为例(图 9)，在 1957 年建闸后，河道断面面积(断面面积数据引用自龚瑜等, 2015)在 5 年内从建闸初期的 1839 m² 迅速锐减到 1961 年的 746 m²，减少了约 60%，而在此期间的径流量经历了多次升降过程，二者之间呈负相关。另外有分析(付桂等, 2008)指出，由于沉积动力格局改变，建闸初期(海河，1~3 年)的淤积量能够占到多年淤积总量的一半以上，说明新洋港河建闸初期径流量变化与河道面积锐减没有直接相关关系。事实上，河道断面存在一个健康运行值，断面面积大于该值时单位径流量对河道的冲淤不构成影响，小于该值时河道断面与径流量之间存在相互作用过程，

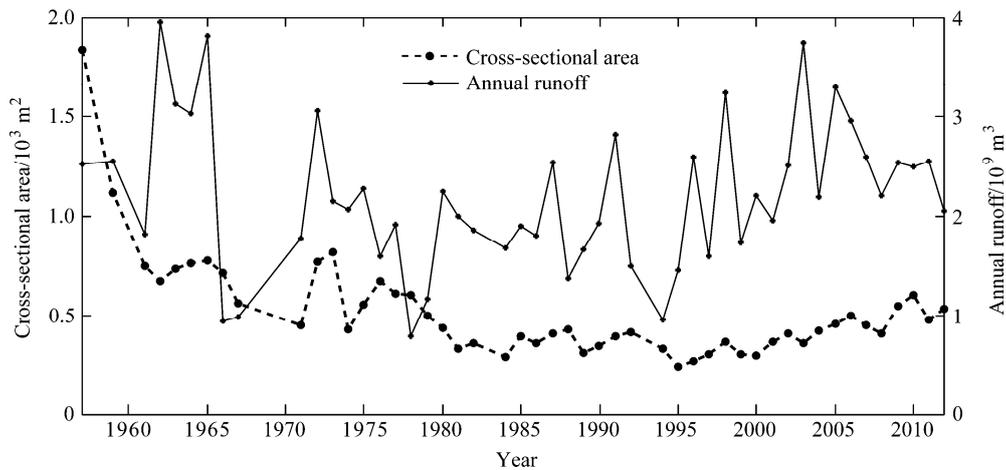


图9 新洋港河河道断面面积与年均径流量

Fig. 9 River channel cross-sectional area and annual runoff of Xinyanggang River

即径流冲淤扩大断面面积,较大的断面面积有利于径流入海,在新洋港建闸河口区该值为 664 m^2 (龚瑜等, 2015)。将实测断面小于该值的面积与径流量做相关分析,二者相关系数为 0.37,表明断面面积能在一定程度上影响径流量变化,但不显著。另外,考虑到上游工农业用水及河道排水冲淤的需要,河闸管理方往往选择在春季闭闸满足农业需求,冬季排水满足河道冲淤需要,表现为入海径流量的季节分配差异。

另外,研究区土地利用结构相对稳定(翟可等, 2009; 张晓祥等, 2013),利用类型以耕地为主,但城镇建设用地在 2004~2007 年期间变化较快,变化率在 15%以上,但比例较小(小于 10%)。由于海岸线向外推进,土地覆盖面积快速增加。但在滨海湿地地区,鱼塘及农田建设是土地利用/覆盖变化的主要形式,在 1975~2006 年期间面积分别增加 892%、165%,总面积超过 $1.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。从入海径流的变化规律来看,城建区扩大及鱼塘建设可能是影响入海径流量变化的因素之一,前者能够减少入海径流量,后者在一定程度上起到了调蓄作用,使入海径流量的季节性差异减弱。

总的来看,河口建闸对径流量的影响主要表现在两个方面:第一,建闸能使流域径流量的季节变化与降雨量的季节变化产生差异,表现在秋、冬季占比增加,春、夏占比减少,年内径流量相对均匀,原因与春季上游农业耕地灌溉用水及冬季河闸调蓄排水减淤有关。此外,流域大量的鱼塘对于淡水的调蓄作用也会造成入海径流季节性差异减弱。第

二,建闸造成闸外河道淤积,断面面积减小,小于健康运行值时,断面面积与径流量表现为正相关关系,但不显著。随着河道逐渐淤塞或截弯取直时,河道过水能力会大大下降,管理部门的周期性大型清淤工程又会显著增加过水能力,这可能是影响入海径流量代际变化的因素之一。

4 结论

通过对于盐城海岸降雨量及入海径流量的变化趋势、影响因素、突变特征及周期性特征分析,可以得出以下主要结论:

(1) 近 60 年来,盐城主要入海河流径流量呈下降趋势,径流减少速率为 $3 \times 10^6 \text{ m}^3 (10 \text{ a})^{-1}$,降雨量的减少及人类活动是造成径流变化的原因。另外,在不同时间尺度(月至年代际)的相关性分析中,降雨量与入海径流表现出较好的正相关关系,表明降雨量是影响入海径流量的最主要因素。

(2) 入海径流具有多尺度的变化特征,第一至第三主周期分别为 23.38 a、9.83 a、2.46 a,降雨量具有相似的周期变化特征。在不同的周期尺度下,入海径流表现出明显的“丰—枯”交替变化特征,对应降雨量的“湿—干”交替变化,同时二者的年代际震荡特征显著。

(3) ENSO 事件期间往往对应较大的降雨量及径流量,还能通过影响降雨量使入海径流的年代际分布更加不均匀,二者之间呈正相关关系。

(4) 河口建闸使入海径流量相对降雨量的季节

性分配更加均匀,同时会引起河道的淤积,从而影响河道过水能力。而该地区周期性的河道淤塞—清淤行为可能是引起入海径流量代际变化特征的因素之一。

未来应结合全球气候变化模式及区域下垫面变化特征开展不同周期尺度的入海径流量数值模拟预测及其对区域环境及地貌演化的影响评估。

参考文献 (References)

- 陈力, 吴绍洪, 郭灵辉. 2015. 1954~2011年盐城市气温和降水变化特征 [J]. 气象与环境科学, 38 (4): 33-37. Chen Li, Wu Shaohong, Guo Linghui. 2015. Variation characteristics of temperature and precipitation in Yancheng from 1954 to 2011 [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 38 (4): 33-37, doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2015.04.004.
- Chiodi A M, Harrison D E. 2015. Global seasonal precipitation anomalies robustly associated with El Niño and La Niña events—An OLR perspective [J]. J. Climate, 28 (15): 6133-6159, doi:10.1175/JCLI-D-14-00387.1.
- 付桂, 李九发, 朱钢, 等. 2008. 河口闸下淤积和清淤措施研究综述 [J]. 海洋湖沼通报, (S1): 223-231. Fu Gui, Li Jiufa, Zhu Gang, et al. 2008. Proceedings of desilting in river channels with sluice gates [J]. Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese), (S1): 223-231.
- 高抒. 2006. 亚洲地区的流域—海岸相互作用: APN 近期研究动态 [J]. 地球科学进展, 21 (7): 680-686. Gao Shu. 2006. Catchment-coast interactions of the Asian region: APN recent research topics [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 21 (7): 680-686.
- 龚瑜, 陆倩, 严飞, 等. 2015. 新洋港闸下港道适宜断面与平衡流量 [J]. 水利水电科技进展, 35 (4): 59-64. Gong Yu, Lu Qian, Yan Fei, et al. 2015. Study on appropriate section and balanced flow of channel downstream the Xinyanggang Sluice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources (in Chinese), 35 (4): 59-64, doi:10.3880/j.issn.10067647.2015.04.014.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 146-159. Huang Ronghui, Chen Wen. 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 7 (2): 146-159.
- Huang S, Krysanova V, Zhai J Q, et al. 2015. Impact of intensive irrigation activities on river discharge under agricultural scenarios in the semi-arid Aksu River basin, Northwest China [J]. Water Resources Management, 29 (3): 945-959, doi:10.1007/s11269-014-0853-2.
- Kim T I, Choi B H, Lee S W. 2006. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 68 (3-4): 515-528, doi:10.1016/j.ecss.2006.03.003.
- 雷坤, 孟伟, 郑丙辉, 等. 2007. 渤海湾西岸入海径流量和输沙量的变化及其环境效应 [J]. 环境科学学报, 27 (12): 2052-2059. Lei Kun, Meng Wei, Zheng Binghui, et al. 2007. Variations of water and sediment discharges to the eastern coast of Bohai Bay and the environmental impacts [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 27 (12): 2052-2059.
- 李明亮, 汪亚平, 朱国贤, 等. 2013. 中小型建闸河口的闸下水体悬沙输运过程: 以新洋港河口为例 [J]. 海洋通报, 32 (6): 657-667. Li Mingliang, Wang Yaping, Zhu Guoxian, et al. 2013. Suspended sediment in small and medium estuaries with the sluice gate: A case study of Xinyanggang Estuary China [J]. Marine Science Bulletin (in Chinese), 32 (6): 657-667, doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2013.06.008.
- Li M T, Xu K Q, Watanabe M, et al. 2007. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 71 (1-2): 3-12, doi:10.1016/j.ecss.2006.08.013.
- 刘锋, 陈沈良, 彭俊, 等. 2011. 近 60 年黄河入海水沙多尺度变化及其对河口的影响 [J]. 地理学报, 66 (3): 313-323. Liu Feng, Chen Shenliang, Peng Jun, et al. 2011. Multi-scale variability of flow discharge and sediment load of Yellow River to sea and its impacts on the estuary during the past 60 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 66 (3): 313-323.
- Meyers S D, Kelly B G, O'Brien J J. 1993. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves [J]. Mon. Wea. Rev., 121 (10): 2858-2866, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2858:AITWAI>2.0.CO;2.
- Milliman J D, Farnsworth K L, Albertin C S. 1994. Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies [J]. Journal of Sea Research, 41 (1-2): 97-107, doi:10.1016/S1385-1101(98)00040-9.
- Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. 1982. Wave propagation and sampling theory. Part I: Complex signal and scattering in multilayered media [J]. Geophysics, 47 (2): 203-221, doi:10.1190/1.1441328.
- Panda D K, Kumar A, Mohanty S. 2011. Recent trends in sediment load of the tropical (Peninsular) river basins of India [J]. Global and Planetary Change, 75 (3-4): 108-118, doi:10.1016/j.gloplacha.2010.10.012.
- Shi Y Z, Fan M Y, Zhang Y Y, et al. 2015. Characteristics identification of runoff and sediment flux based on wavelet analysis approach in lower Yellow River [J]. Applied Mechanics and Materials, 700: 506-510, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.700.506.
- Syvitski J P M, Peckham S D, Hilberman R, et al. 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: A planetary perspective [J]. Sedimentary Geology, 162 (1-2): 5-24, doi:10.1016/S0037-0738(03)00232-X.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (1): 61-78, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
- Turner A G, Annamalai H. 2012. Climate change and the South Asian summer monsoon [J]. Nature Climate Change, 2 (8): 587-595, doi:10.1038/nclimate1495.
- 魏风英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 62-72. Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 62-72.
- Wolter K, Timlin M S. 1993. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index [C]//Proceedings of the

- Conference on 17th Climate Diagnostics Workshop. Norman, OK: NOAA/NMC/CAC, 52–57.
- Wolter K, Timlin M S. 1998. Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank? [J] *Weather*, 53 (9): 315–324, doi:10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x.
- 吴创收, 杨世伦, 黄世昌, 等. 2014. 1954~2011 年间珠江入海水沙通量变化的多尺度分析 [J]. *地理学报*, 69 (3): 422–432. Wu Chuangshou, Yang Shilun, Huang Shichang, et al. 2014. Multi-scale variability of water discharge and sediment load in the Pearl River during 1954–2011 [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 69 (3): 422–432, doi:10.11821/dlxb201403013.
- 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 2010. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征 [J]. *海洋与湖沼*, 41 (3): 459–468. Xing Fei, Wang Yaping, Gao Jianhua, et al. 2010. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica (in Chinese)*, 41 (3): 459–468.
- 徐雪松, 窦希萍, 陈星, 等. 2012. 建闸河口闸下淤积问题研究综述 [J]. *水运工程*, (1): 116–121. Xu Xuesong, Dou Xiping, Chen Xing, et al. 2012. Overview of siltation downstream estuarine floodgates [J]. *Port and Waterway Engineering (in Chinese)*, (1): 116–121, doi:10.3969/j.issn.1002-4972.2012.01.024.
- Yang S L, Shi Z, Zhao H Y, et al. 2004. Research note: Effects of human activities on the Yangtze River suspended sediment flux into the estuary in the last century [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8 (6): 1210–1216, doi:10.5194/hess-8-1210-2004
- Yang S L, Xu K H, Milliman J D, et al. 2015. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes [J]. *Scientific Reports*, 5: 12581, doi:10.1038/srep12581.
- 叶正伟. 2014. 基于 SPI 的江苏沿海开发地区旱涝演变特征分析——以盐城市为例 [J]. *地理科学*, 34 (4): 479–487. Ye Zhengwei. 2014. Flood and drought change based SPI analysis in the developing coastal region of Jiangsu Province: A case study in Yancheng City [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 34 (4): 479–487.
- Yin Y X, Xu Y P, Chen Y. 2009. Relationship between flood/drought disasters and ENSO from 1857 to 2003 in the Taihu Lake basin, China [J]. *Quaternary International*, 208 (1–2): 93–101, doi:10.1016/j.quaint.2008.12.016.
- 余世鹏, 杨劲松, 刘广明, 等. 2014. 基于 HHT 的三峡水库蓄水后坝下游水情多尺度时频特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 23 (10): 1440–1448. Yu Shipeng, Yang Jinsong, Liu Guangming, et al. 2014. Multi-scale time–frequency characteristics analysis of river dynamics downstream the Three Georges Dam after its impoundment based on HHT [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 23 (10): 1440–1448, doi:10.11870/cjlyzyyhj201410015.
- 张晓祥, 徐盼, 戴煜暄, 等. 2013. 海岸带城市土地利用变化分析——以江苏盐城市为例 [J]. *热带地理*, 33 (3): 291–298. Zhang Xiaoxiang, Xu Pan, Dai Yuxuan, et al. 2013. Land use change analysis of coastal city: A case study of Yancheng [J]. *Tropical Geography (in Chinese)*, 33 (3): 291–298.
- 张宇, 钟平安, 万新宇, 等. 2015. 近 57 年江苏沿海降水量演变特征分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 13 (2): 198–205. Zhang Yu, Zhong Ping'an, Wan Xinyu, et al. 2015. Evolution characteristics of precipitation along the coastal area of Jiangsu Province in recent 57 years [J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology (in Chinese)*, 13 (2): 198–205, doi:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.02.002.
- Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, et al. 2015. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 536: 803–812, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.07.119.
- 翟可, 刘茂松, 徐驰, 等. 2009. 盐城滨海湿地的土地利用/覆盖变化 [J]. *生态学杂志*, 28 (6): 1081–1086. Zhai Ke, Liu Maosong, Xu Chi, et al. 2009. Land use cover change in Yancheng coastal wetland [J]. *Chinese Journal of Ecology (in Chinese)*, 28 (6): 1081–1086.