长江南京潮水位站近百年高潮位变化特征及成因分析

朱庆云,王文辉,谢海文,严锋,陆庆皓,张维东,郭玉法

(江苏省水文水资源勘测局南京分局,江苏南京 210008)

摘要:为研究南京站多年来年最高潮位的变化特征,根据水文变异综合诊断方法,分析检验了长江南京站近百年高潮潮位变化的整体趋势;利用dbN系列小波变换分析了年高潮潮位变化的局部趋势;利用复数Morlet小波分析了年最高潮位的周期变化规律。分析结果表明,南京站年最高潮位序列总体上无明显趋势变化,局部变化趋势明显;年最高潮位存在5a、11a、42a和63a时间尺度四个主要变化周期。分析结果为认识南京站年最高潮位变化、做好水安全工作以及水资源的开发利用提供相关依据。
 关键词:年最高潮位;综合诊断方法;距平;dbN小波;Motlet小波;趋势变化;周期变化
 中图分类号:P338
 文献标识码:A
 文章编号:1000-0852(2016)01-0092-05

1 引言

长江下游南京段自西南向东北流贯南京市境,河 段南岸全长 98km,北岸全长 88km^[1]。南京市本地水资 源不够丰富,年平均水资源总量只有 28×10⁸m³,远远不 能满足需水要求,必须依靠客水资源满足社会经济发 展和生活的需水要求。长江是南京市的主要客水资源, 占全市过境水量的 99%以上,年均达 9016×10⁸m³。

但是,长江过境水量年际变化较大,水位变化直接 影响到工农业用水、生活用水、航运等诸多方面,因此 长江水位变化受到各方关注。

李国芳等(1999)选用了南京潮水位站 1912~1996 年(其中 1938~1946年缺测)共 76年实测最高潮位数 据,对该序列采用 15a 滑动平均,计算并分析了潮位变 化趋势,指出前期水位虽然有波动,但是基本平稳,大 约从 20 世纪 70 年代开始南京站最高潮位持续上升^[2]。

马倩(2003)选用了该站 1912~2002年(其中 1938~1946年缺测)实测最高潮位数据,并将该时间序 列分为 1950年前、1950~1990年以及 1990年后三个 时间段,通过统计历年高潮位出现频次以及最高潮位 均值,分析了南京站潮位变化趋势,指出该站在这三 个时段中潮位均值均明显抬高,年最高潮位抬高趋势 明显^[3]。 魏建苏等(2008)根据该站 1954~2003 年最高潮 位数据,利用线性相关分析法分析指出,该站 1954~ 2003 年最高潮位有持续升高趋势^[4]。

综上所述,这些分析使用的方法不同,分别为滑 动平均法、频次及均值分析法、线性相关法;分析结论 也有所不同,即分别为三个时段均呈现上升趋势、20 世纪70年代开始呈现持续上升趋势、1954~2003年最 高潮位有持续升高趋势。

本文在前文基础上补充了 2003~2014 年的最新 数据,同时考虑到分析水文时间序列的方法有多种, 但是存在单一方法不可靠,多种方法分析结果不一致 的问题^[6]。本文根据水文变异综合诊断方法^[5],对长江 南京站近百年高潮潮位变化的整体趋势进行了分析 检验;利用 dbN 系列小波对局部趋势进行了分析。利 用复数 Morlet 小波对年最高潮位距平序列进行小波 变化,根据小波变换结果,分析了年最高潮位的周期 变化规律^[6-12]。

2 资料与分析方法

2.1 资料

南京潮水位站是一个百年老站,于 1912 年 1 月 由南京海关设立。1937 年 11 月停测,1947 年 5 月恢 复观测。1949 年 5 月由长江航务局接管。1952 年 5 月

收稿日期:2015-02-03

作者简介:朱庆云(1964-),男,江苏淮安人,高级工程师,主要从事水文站网及水文分析计算工作。E-mail:zqy100200@aliyun.com

1 日由长江水利委员会下游工程局与航务局合作观 测,1961 年 6 月交江苏省水利厅管理。南京潮水位站 是长江下游的一个重要的国家基本水位站,担负着长 江南京段的水情监测工作,为该地区的防汛、抗旱、海 事、航运、供水等众多部门提供水情数据。因此,研究南 京站潮水位的变化规律具有实际应用价值。

本文选用了该站 1912~2014 年 (其中 1938~1946 年缺测)共 94 年的实测年最高潮位数据,资料观测 及整编符合行业标准要求,数据准确可靠,满足分析 需求。

2.2 综合诊断方法分析整体变化趋势

2.2.1 详细诊断

水文时间序列中的趋势成分,是指该序列统计参数随时间的增长而增加或减少的现象。随时间增长而 增加的趋势将造成序列长期向上的缓慢变动;随时间 增长而减小的趋势将造成序列长期向下的缓慢变动。

趋势成分按其在序列中出现的位置可以分为整体 趋势和局部趋势。本文利用3种方法对南京站高潮位 序列的局部趋势和整体趋势成分进行识别检验:线性 趋势相关系数检验法、斯皮尔曼(Spearman)秩次相关 检验法和肯德尔(Kendall)秩次相关检验法。

2.2.2 综合诊断

综合诊断的概念最早是由美国国家安全工业协会 (NSIA)于 20 世纪 80 年代提出:通过考虑和综合全部 有关的诊断要素,使系统诊断能力达到最佳的结构化 设计和管理过程^[6]。对于趋势综合而言,将趋势详细诊 断中各个方法得到的结果进行评分并综合,可以得 到趋势变异最终的结果。对于单一方法而言,若判断 得趋势成分显著,则其显著性记为 1,反之,记为-1。 将所有方法的显著性求和,得到趋势变异的综合显 著性,若该值大于 1,则认为趋势显著,反之,则认为 不显著^[5]。

2.3 小波变换法分析局部变化趋势及变化周期

小波分析是一种时、频多分辨率分析方法,具有时 频局部化功能,可以对函数和信号系列进行多尺度细 化分析^[8]。

对于给定的小波函数 $\psi(t)$,时间序列 $f(k\Delta t)$ 的离 散小波变换系数 $W_t(a,b)$ 为:

$$W_{f}(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^{N} f(k\Delta t) \overline{\psi}(\frac{k\Delta t - b}{a})$$

式中:*a* 为尺度因子,反映小波的周期长度;*b* 为时间因子,反映时间上的平移。

选择适当的小波函数,利用快速算法对水文序列 进行小波分解,得到各种尺度下的尺度序列,再对各 尺度进行单支重构,得到不同尺度下的低频序列,从 而对水文序列的趋势进行判断。本文利用 db3 小波分 析序列的变化趋势。

dbN 小波是世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,简写为 dbN,*N* 是小波的 阶数。小波 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 中的支撑区为 2*N*-1, $\psi(t)$ 的消失矩为 *N*。

令
$$p(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k$$
,其中 C_k^{N-1+k} 为二项式的系数,

则有

$$|m_0(\omega)|^2 = (\cos^2 \frac{\omega}{2}) p(\sin^2 \frac{\omega}{2})$$
$$\vec{x} \neq m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k C^{-jk\omega}$$

将时间域上的关于 *a* 的所有小波变换系数的平 方进行积分,即为小波方差 $Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 db$ 。 小波方差随尺度 *a* 的变化过程称为小波方差图,通过 小波方差图,可以确定一个水文序列中存在的主要时 间尺度,即主周期。为了反映序列的真实周期性质,本 文对序列的距平值进行小波分解,进行周期分析,选 用复 Morlet 小波,形式为: $\psi(t) = e^{ict}e^{-t^2t}$ 。

3 分析结果

3.1 年最高潮位序列整体趋势

分别利用线性趋势相关系数(Pearson)检验法、斯 皮尔曼(Spearman) 秩次相关检验法和肯德尔 (Kendall)秩次相关检验法,利用 SPSS 软件分析了序 列的整体趋势。为简捷故,本文对 SPSS 的输出结果进 行了编辑整理,分析结果详见表 1。

3.2 年最高潮位序列局部趋势

根据实验,选择 db3 小波为母小波,采用 Mallat 快速算法对水文序列进行小波分解与单支重构到第 五层。图1分别为第三层和第四层的单支重构图。

在 a3 (8a) 尺度下,1947~1958 年呈下降趋势, 1958~1974 年呈上升趋势,1974~1982 年呈下降趋势, 1982~1998 年呈上升趋势,1998~2006 呈下降趋势, 2006~2014 年在呈现小幅上升后继续下降。

在 a4 (16a) 尺度下,1947~1966 年呈下降趋势, 1966~1998 年呈现上升趋势,1998~2014 年呈下降

表1 趋势变化分析结果

Table1 Analysis results of trend variation	
--	--

		检验方法										
趋势位置	时间段	线性趋势相关系数 (Pearson)检验法			肯德尔(Kendall) 秩次相关检验法			斯皮尔曼(Spearman) 秩次相关检验法			综合 得分	明显 趋势
		相关 系数	检验 P 值	得分	相关 系数	检验 P 值	得分	相关 系数	检验 P 值	得分		
整体趋势	1912~1937 1947~2014	0.156 0.159	0.445 0.196	-1 -1	0.192 0.127	0.171 0.126	-1 -1	0.210 0.169	0.304 0.169	-1 -1	-3 -3	无 无





图 1 序列小波分解的第三层和第四层单支重构图

Fig.1 Single signal reconstruction for the third and fourth layers of wavelet decomposition of the annual maximum high tide level anomaly series

趋势。

3.3 年最高潮位序列距平值的小波特征

Morlet 复数小波变换的模和实部是两个重要的变量。模的大小表示特征时间尺度信号的强弱,实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和相位两方面的信息。

图 2 (a) 为年最高潮位距平序列复数小波 Morlet 变换模平方的时频变化。图中可以看出不同时段各时 间尺度的强弱分布,其中 4~5a 时间尺度变化较强,主 要发生在 20 世纪 70 年代初到 80 年代中期以及 20 世 纪末和 21 世纪初;而 11a、42a 和 63a 时间尺度,在几 乎整个时间段内都有较强变化。

图 2(b)为年最高潮位距平序列复数小波 Morlet 变换实部的时频变化。图中清晰地显示出年最高潮 位不同时间尺度下的变化情况。其中 3~5a、9~13a、 37~43a和 57~63a时间尺度上的强弱交替变化非常明显。 3.4 年最高潮位序列距平值的小波方差图

图 3 为最高潮位序列距平值的小波方差图。从图 中可以看出,年最高潮位存在 5a、11a、42a 和 63a 时间 尺度四个主要周期。

图 4 为依据小波方差结果绘制的四个主要周期 的小波系数实部图,分别对应 5a、11a、42a 和 63a 四个 时间尺度主要周期。在 5a 特征时间尺度上,年最高潮 位变化的平均周期为 3a 左右;在 11a 特征时间尺度 上,年最高潮位变化的平均周期为 7a 左右;在 42a 特 征时间尺度上,年最高潮位变化的平均周期为 26a 左 右;在 63a 特征时间尺度上,年最高潮位变化的平均 周期为 40a 左右。

3.5 不同时间尺度下年最高潮位未来趋势

时间尺度不同,年最高潮位所处的偏高或偏低阶段不同。在大时间尺度下的偏低阶段包含更多小尺度下的偏高、偏低阶段,同样大时间尺度下的偏高阶段包含更多小尺度下下的偏高、偏低阶段。因此,这里所说的未来趋势与时间尺度密切相关,离开时间尺度来说趋势是没有科学意义的。

图 4 反映了四个主要周期的小波系数实部,图中 清晰地显示了年最高潮位时间尺度变化、突变点分布 及其正负位相变化情况。不同时间尺度下,其变化周







anomaly series

期、突变点的位置以及位相的结构不同,因此,不同的 时间尺度,其变化的未来趋势也是不同的。

在 5a 特征时间尺度上,未来 2~3a 内,年最高潮位 将处于偏低阶段,之后进入偏高阶段。

在 11a 特征时间尺度上,未来 3~4a 内,年最高潮 位将处于偏低阶段,之后进入偏高阶段。

在 42a 特征时间尺度上,未来 5~6a 内,年最高潮 位将处于偏低阶段,之后进入偏高阶段。

在 63a 特征时间尺度上,未来 10a 内,年最高潮位 将处于偏低时段,之后进入偏高阶段。

4 成因分析

长江水位变化有自然因素和人为因素的影响。上游地区自然生态环境的恶化,山林植被的破坏,水土流 失的加剧,城市建设规模的扩大,人口剧增和围湖造田 等,使原有的调蓄面积减少。1954年大水后,各地兴 建排灌工程、筑圩建坝,上游地区和圩垸地区盲目提高 排涝标准,不考虑下游或外河的防洪压力,使汛期的长 江下游水位进一步抬高,而且这种水位升高的趋势在 20世纪80年代后更为明显。



图 4 四个主要周期的小波系数图 Fig.4 The wavelet coefficients of the four main periods

近十几年来,由于副热带高压位置偏北偏西,致 使我国的降雨带一直向北推进。三峡大坝 2003 年开 始试蓄水以来,下游地区江湖水位变化明显。而近几 年的最高潮位则出现波动变化。

南京站年最高潮位主要与上游来水量有关,其年 际周期变化规律反映了上游来水量的丰枯变化。

5 结论

(1)1912~1937 年时间段,1947~2014 年时间段,长江南京站高潮位整体上无明显变化趋势。

(2)在 a3(8a)尺度下,1947~1958 年呈下降趋势,
1958~1974 年呈上升趋势,1974~1982 年呈下降趋势,
1982~1998 年呈上升趋势,1998~2006 年呈下降趋势,
2006~2014 年在呈现小幅上升后继续下降。

在 a4 (16a) 尺度下,1947~1966 年呈下降趋势,

1966~1998 年呈现上升趋势,1998~2014 年呈下降 趋势。

(3)南京站高潮位存在 5a、11a、42a 和 63a 四个时 间尺度主要周期,其对应的平均变化周期分别为 3a、 7a、26a 和 40a。

(4)南京站高潮位在 5a、11a、42a 和 63a 四个时间
 尺度下,分别在未来 2~3a、3~4a、5~6a 和 10a 内处于偏低阶段,之后进入偏高阶段。

参考文献:

- 何华春, 王颖, 李书恒. 长江南京段历史洪水位追溯 [J]. 地理学报, 2004,59(6):938-974.(HE Huachun, WANG Ying, LI Shuheng. Tracing flood water level along Nanjing cliff bank of the Yangtze river[J]. Acta Geographica Sinica, 2004,59(6):938-974. (in Chinese))
- [2] 李国芳,黄振平,章志强. 长江防洪堤南京段设计洪水位风险分析[J]. 河海大学学报, 1999,27(2):22-27. (LI Guofang, HUANG Zhenping, ZHANG Zhiqiang. Risk analysis of design flood stage of Nanjing section of Yangtze river flood-protecting embankment [J]. Journal of Hohai University. 1999,27(2):22-27. (in Chinese))
- [3] 马倩. 我省沿江高潮位趋势分析 [J]. 江苏水利, 2003,3:32-35. (MA Qian. Trend analysis of high tide level along Changjiang river in Jiangsu province [J]. Jiangsu Water Resources. 2003,3:32-35. (in Chinese)
- [4] 魏建苏,朱伟军,吕军,等. 长江南京和镇江年最高水位变化规律[J]. 自然灾害学报, 2008,17(3):6-9. (WEI Jiansu, ZHU Wei jun, LU Jun, et al. Change regularity of annual maximum water level of Yangtze river at Nanjing and Zhenjiang [J]. Journal of Natural Disasters. 2008,17(3):6-9. (in Chinese))
- [5] 谢平,陈广才,李德,等.水文变异综合诊断方法及其应用研究[J].水 电能源科学,2005,23(2):11-14. (XIE Ping, CHEN Guangcai, LI De, et al. Comprehensive diagnosis method of hydrologic time series change-point analysis [J]. Water Resources and Power, 2005,23(2):11-14. (in Chinese))

- [6] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学(第二版)[M]. 北京:中国水利水 电出版社, 2008. (WANG Wensheng, DING Jing, JIN Juliang. Stochastic Hydrology [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [7] 张文彤,邝春伟. SPSS 统计分析基础教程(第二版)[M]. 北京:高等 教育出版社, 2011. (ZHANG Wentong, KUANG Chunwei. Foundation Course of SPSS Statistical Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [8] 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. (WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Hydrology
 Wavelet Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013,32(9):1413-1422. (SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: status and prospects [J]. Progress in Geography, 2013,32(9):1413-1422. (in Chinese))
- [10] 桑燕芳,王栋.水文序列小波分析中小波函数选择方法[J].水利学报, 2008,39(3):295-300. (SANG Yanfang, WANG Dong. Wavelets selection method in hydrologic series wavelet analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(3):295-300. (in Chinese))
- [11] 王文圣,李跃清,解苗苗,等. 长江上游主要河流年径流序列变化特 征分析[J].四川大学学报(工程科学版), 2008,40(3):70-75. (WANG Wensheng, LI Yueqing, XIE Miaomiao, et al. Analysis of annual runoff characteristics of main rivers in the upper reaches of Yangtze river [J]. Journal of Sichan University (Engineering Science Edition), 2008,40(3):70-75. (in Chinese))
- [12] 王文圣,丁晶,向红莲.水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(6):14-17. (WANG Wensheng, DING Jing, XIANG Hongliang. Multiple time scales analysis of hydrological time series with wavelet transform [J]. Journal of Sichan University (Engineering Science Edition), 2002,34(6):14-17. (in Chinese))

Variation Characteristics of Annual Maximum High Tide Level at Nanjing Station of Yangtze River

ZHU Qingyun, WANG Wenhui, XIE Haiwen, YAN Feng, LU Qinghao, ZHANG Weidong, GUO Yufa

(Nanjing Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

Abstract: To study the variation characteristics of the annual maximum high tide level at the Nanjing Station, the comprehensive diagnosis method was used to analyze the variation tendency of the annual maximum high tide level, dbN series wavelet and Complex Morlet wavelet were employed to carry out wavelet analysis for the anomaly series. The results show that there is no significant variation tendency for the general series of the annual maximum high tide level at the Nanjing Station, but significant local tendency was found; four main variation periods for time scale of 5, 11, 40 and 63 years were found with Wavelet analysis. The analysis may be helpful to some extent for realization of the changing pattern of the tide level at the Nanjing Station, local water security and reasonable development of water resources.

Key words: annual maximum high tide level; comprehensive diagnosis method; anomaly series; dbN series wavelet; Morlet wavelet; tendency variation; period variation