

长江口天文潮预报修正的一种方法

林 勋 励

(上海航道局)

摘 要

本文从统计学的角度,使用大通流量,江阴,天生,吴淞自1948年以来的水位资料,经周期图分离,过滤各类周期波和随机振动后进行分析,发现:

(1) 大通年平均流量有丰水期与少水期。

(2) 江阴与天生受迳流影响有高水位期和低水位期,吴淞还受其海域来水的影响,1972—1980年出现另一个较高的水位期。此外各站无长期增减的趋势。

最后建立月平均流量与各站月平均水位的相关关系,对各港口逐月,逐旬的潮汐预报进行修正。

一、引 言

在潮汐预报中使用的 Z_0 (年平均海面) 大多用 $Z_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ($n=8790$, X_i 为正点观测水位值), 或多年的 Z_0 平均。受迳流影响, 长江口徐六泾以上各港 Z_0 的年变化较大, 严重地影响天文潮推算精度, 有些年份误差可达 0.5 米以上, 离河口越远潮差越小径流的影响越大, 误差也越大, 这就不能满足航运, 防汛和农田排灌的需要。

为了解决这个问题, 本文根据江阴, 天生, 吴淞1948年以来的水位资料, 大通流量资料, 用统计学的方法算出各阶段的 Z_0 和标准样本差, 以提高天文潮的预报精度。最后求出大通月平均流量距平与江阴, 天生两港平均水位变化的相关公式, 以助于天文潮预报的逐月, 逐旬修正。

二、平均海面的长期变化趋势

为便于比较, 江阴、天生港水位资料基面, 均从原使用基面统一订正到城建吴淞基面 (黄海基面: 1.630米), 这些站的月平均半潮面比月平均海面都高出 3—4 厘米, 其差值视作常数, 故两种资料可交替使用。

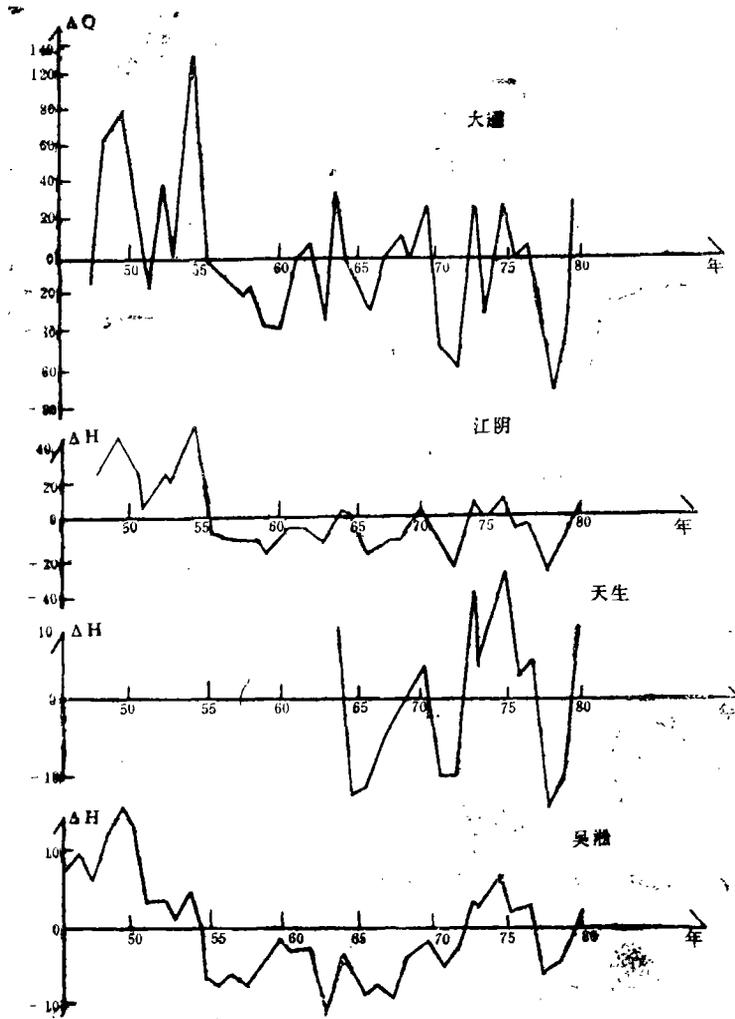


图1 年平均距平图

根据各站逐年平均水位求出多年年平均水位值， $\bar{X} = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^N \bar{X}_i$ ，(\bar{X}_i 为年平均值) 然后再按下式算出各年的年距平 $y_i, y_i = (\bar{X}_i - \bar{X})$ 点绘成图 1。距平曲线图可反映各站年变化的规律。它表明流量的年距平曲线和江阴、天生、吴淞的年平均海平面距平曲线都呈现出小振幅的周期变化和随机振动，而四条曲线的变化趋势都很一致。可先进行周期图分析，选取主要周期进行拟合，消除周期影响，接着再过滤随机振动 l_i 。分析各站多年平均海面的长期变化趋势，探明其究竟是连续上升的还是稳定在平均值附近，或是连续下降，本文使用加法模式：

$$\bar{H}_{(t)} = p_{(t)} + l_{(t)} + \sum_{i=1}^k f_{i(t)} \quad (1)$$

式中:

$\overline{H}_{(t)}$ 为逐年平均水位距平。

$p_{(t)}$ 为长期变化趋势项。

$l_{(t)}$ 为随机振动项。

$f_{(t)} = \sum_{i=1}^k f_{i(t)}$ 为周期项。

从 \overline{H}_t 中先应用周期图方法求出各站资料序列的谱展式和周期谱的细致结构, 用随机概率判别法检验周期显著性, 得出其物理性频率结构, 识别周期成份, 然后进行周期拟合消除周期影响, 再运用滤波器滤除随机振动得长期变化趋势 $p_{(t)}$, 将(1)式改写为:

$$p_{(t)} = \overline{H}_{(t)} - \sum_{i=1}^k f_{i(t)} - l_{(t)} \quad (2)$$

以富氏级数的谱频为基频, 用回归拟合算法将分量的周期数取为任意正值代入下式:

$$\overline{H}_t = \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos \frac{2\pi k(j-1)}{N} + b_k \sin \frac{2\pi k(j-1)}{N} \right] \quad (3)$$

式中的 a_k, b_k 称为富氏系数, K 为谱频分量在展开区间的波数。富氏系数有下列计算式:

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \overline{H}_j \cos \frac{2\pi k(j-1)}{N} \\ b_k &= \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \overline{H}_j \sin \frac{2\pi k(j-1)}{N} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} C_k &= (a_k^2 + b_k^2)^{\frac{1}{2}} \\ \phi_k &= \arctan \frac{a_k}{b_k} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中的 C_k 表示谐波的振幅, ϕ_k 表示初相位。

谐波分量的展开式:

$$H'_k = C_k \sin \left[\frac{2\pi N(t-1)}{N} + \phi_k \right] \quad (6)$$

式中的 k 为基本周期 m 内的谐波波数

$k=0, 1, 2, 3, \dots, m$ 。

将大通流量年距平, 江阴, 天生, 吴淞, 水位年距平的 C_k 与 T (T 为周期) 绘成图 2, 然后再用修斯特随机概率判别法进行检验。

判别公式如下:

$$C_k^2 = -4\sigma^2 \ln(1 - \frac{m}{N} / 1 - \alpha) = \frac{4\sigma^2 \ln \frac{m}{N}}{1 - \alpha}$$

当取不同的显著水平 α 值时, 由上式可得到满足这一显著水平的振幅 C_k 。取

$$\alpha = 0.05,$$

$$C_{0.05}^2 = \frac{4\alpha^2 \ln(20m)}{N}$$

$$\alpha = 0.01,$$

$$C_{0.01}^2 = \frac{4\alpha^2 \ln(100m)}{N}$$

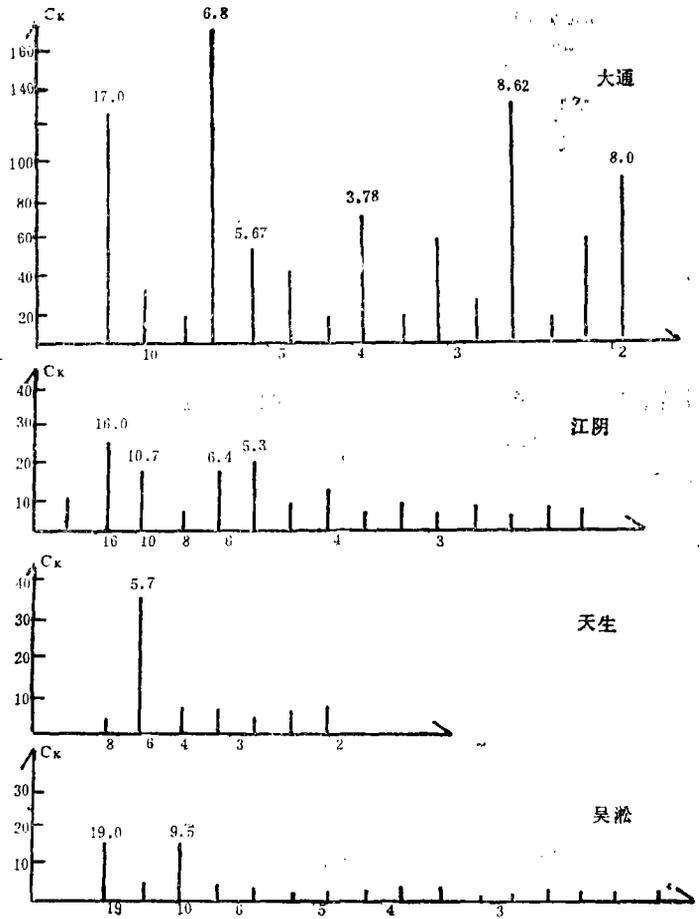


图 2 周期图

当某一周期的振幅 C_k^2 大于或等于 C_0^2 时，可以认为该周期在 α 的水平上是显著的。经过计算各站周期显著性指标（见表 1），以表 1 的数值对照图 2，可见大通，江阴，天生，吴淞四站的距平曲线均无显著性周期。它反映了在最近的三十余年内大通年平均流量的变化和长江口各站的年平均水位变化，主要是一些小振幅的波动，没有主要的周期变化趋势。不过在这一系列小振幅的波动中仍然可看出几个大功率的峰值，其中大通年平均流量大约有 6.8 年、2.6 年、17.0 年、2.0 年较为突出的周期，其次尚有 3.78 年、5.67 年 2 个周期。江阴平均水位较突出的周期有 16 年、5.3 年、10.7 年、6.4 年左右，天生年平均水位较突出的周期有 5.7 年、3.4 年、2.4 年和 6.3 年，其中 5.7 年周期的振幅最为突出，吴淞年平均水位较突出的周期

有：9.5年、19年左右。迳流对江阴年平均海面的影响还是显著的，大通5.7年、6.8年、3.7年的周期与江阴5.3年、6.4年、3.4年的周期与天生5.7年、3.4年对应得较好，而对吴淞年平均水位的影响就很不明显了。各谐波的振幅随着向河口靠近而锐减。选取一些振幅相对较大的周期(表2)代入公式(b)求出 H'_i 值，再将 \bar{H}_i 减去 H'_i 得 H_i 值， H_i 系消除周期波影响的值。嗣后再用滤波器滤除随机影响，即对各站的 H_i 作二次滑动平均，经过试验大通、江阴、天生取五点二次滑动，吴淞取三点二次滑动，最后得 P_i 值，点绘成图3。对图3进行分析得以下几点看法：

(一)1948年以来，大通年平均流量的变化可分为2个阶段，1948年至1955年为丰水期，这八年的平均迳流高于多年均值(29500米³/秒)3563米³/秒，1956年至1980年进入少水期，这廿五年的平均值低于多年平均值2212米³/秒，总的看来，迳流量无持续地上升或下降的趋势。

(二)迳流量的变化直接影响了江阴、天生等地的水位，从图3可见，江阴、天生、吴淞滤波后的年平均海面曲线与大通迳流量(滤波后)的变化基本一致，1955年以前为高水位期(正距平)；1956年至1980年为低水位期(负距平)。此外，各站的年平均海面亦均无随时间逐年增加或逐年减少的趋势，而只随着迳流作阶段性的变化。

三、阶段分析

客观地进行阶段分析，用 F 检验进行判别，严格确定阶段的分界线求出各阶段的 Z_0 ，可改进天文潮的推算精度。

F 检验公式如下：

$$F = \frac{Q - P}{R - Q} \cdot \frac{n - m}{m - 1} \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N X_{ij} \right)^2$$

$$Q = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N X_{ij}^2 \right)^2$$

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N X_{ij}^2$$

N 为样本数

m 为阶段数

表1 各站周期显著性指标表

项目	站名	大通	江阴	天生	吴淞
$C^2_{0.05}$		665.01	165.33	122.37	26.26
$C^2_{0.01}$		926.81	118.67	161.18	33.37

表2 各站主要谐波参数表

谐波	序号 参数	序号			
		1	2	3	4
大通	周期	6.8	2.62	3.78	5.67
	振幅	164.93	131.89	70.31	54.70
	位相	36°02'	190.0	184°02'	46°54'
江阴	周期	16.0	5.33	10.67	6.4
	振幅	23.081	22.951	18.74	18.9
	位相	4°5'	51°58'	231°0'	34°06'
天生	周期	5.67	3.40	2.429	4.25
	振幅	35.824	6.910	5.268	5.024
	位相	216°54'	188°58'	234°13'	88°27'
吴松	周期	9.50	19.00	3.80	2.53
	振幅	7.94	6.89	2.00	1.07
	位相	85°31'	64°3'	263°42'	74°17'

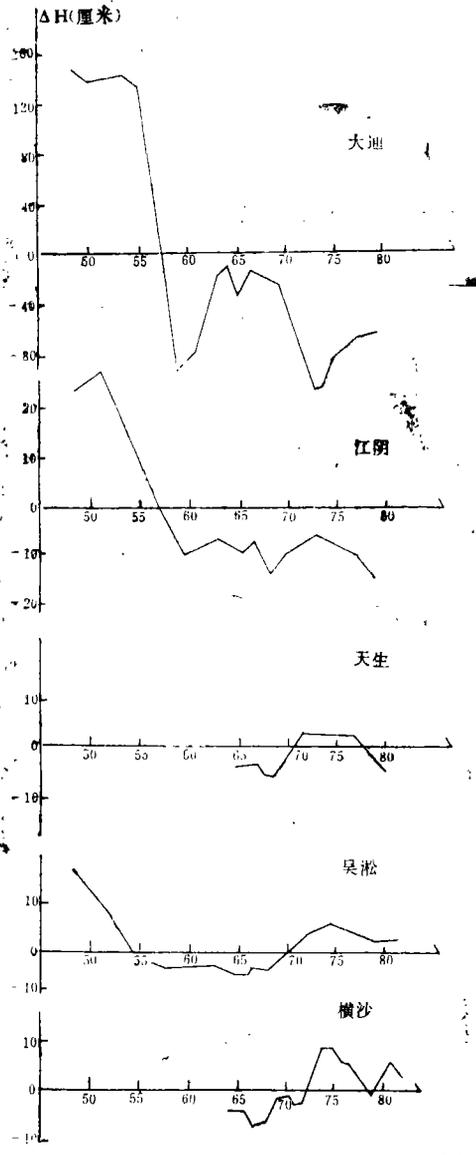


图3 年平均海面变化趋势图(Pt值)

表3 各站阶段检验表

站名 项目	大 通	江 阴	天 生	吴 淞
P	13.3636	5.12	0	4.674
Q	21430.86	6529.84	824	953
R	69844	11349	1627	1517
N	33	33	16	36
m	2	2	3	3
F	15.64	41.95	6.67	27.43
F _{0.05}	4.17	4.17	3.63	3.26
F _{0.01}	7.56	7.56	6.23	5.18

表4 各阶段水值均值

要素		大 通	江 松	天 生	吴 松
第 一 段	Z ₀	48—55 29500	48—55 2.99	65—72 262	45—54 208
	Z' ₀	33063	3.24	252	216
	S' _X	3410	1543	6.289	4.30
	S _X	4428	25.25	10.38	8.00
第 二 段	Z ₀	56—80 29500	56—80 2.99	73—77 2.63	55—72 2.08
	Z' ₀	27288	2.91	2.68	2.03
	S' _X	3265	11.02	6.40	2.56
	S _X	4428	25.25	6.40	4.83
第 三 段	Z ₀			78—80 2.62	73—82 2.08
	Z' ₀			2.54	2.10
	S' _X			10.03	2.70
	S _X			12.00	3.50

注：流量单位米³/秒 水位单位：厘米

将大通流量距平，江阴海面年距平分成二阶段，天生、吴淞年距平分成三个阶段后代入上式计算F值，然后再根据各站N，m值分别以α=0.05和α=0.01查表得0.05，F_{0.01}的值见表3。表3反映各站的F值均大于F_{0.01}，可见阶段的划分是合理的，

求出各站每个阶段的平均Z₀，S'_X(标准样本差)再与当前推算天文潮业务使用的Z₀进行比较，明显地发现S'_X比S_X值要小得多。

$$S_X = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{N}$$

此外多年的均值与阶段均值对各年的年平均值之差是随着向河口的年靠近而迅速减少，从表4可见吴淞站的差值最小，大致在3~8厘米之间，所以其 Z_0 使用2.08米是合适的，其余各站用阶段的平均 Z_0' 代替 Z_0 后天文潮的推算精度会有所提高。

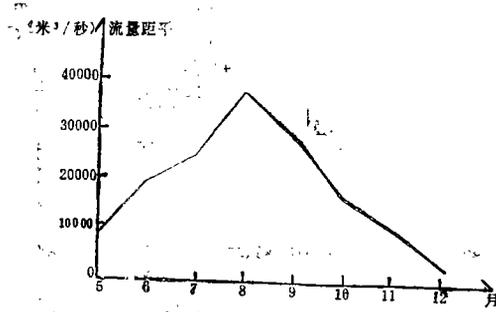


图4 1954年洪季大通流量月距平

19600米³/秒，以后逐月递增，到8月距平达到最大值37900米³/秒，9月以后逐月递减(图4)，由图4可见流量的变化较稳定，从而为修正天文潮预报创造了条件。

迳流量和平均海面的年变化虽然可以划分阶段，然而每个阶段中各年的变化仍然较大，尤其是江阴与天生，而且对于今后阶段的转换很难作出较为准确的预报，所以根据迳流量的实际变化进行逐月预报修正，在防汛、排灌上显得很有必要了。迳流量的变化是稳定渐变的，即使是特大洪峰南泄，也是逐渐增加逐渐减少的。例如1954年8月大通出现了百年一遇的特大洪峰，迳流量从5月下旬起就超过了多年该月的平均值，月距平达

四、天文潮预报修正

综上所述，江阴、天生两地的平均水位与迳流量关系十分密切，而迳流量的变化又比较稳定，这就可以根据平均水位修正期之前迳流量的月平均距平值来估计修正期中的迳流量可能出现的距平值，再用这估计值代入迳流量距平与江阴、天生两地的月平均水位距平回归方程，求出月平均水位的修正量。

$$\hat{y}_i = a + bx_i$$

式中：

\hat{y}_i 为江阴、天生的月平均水位修正量。

x_i 为大通流量月距平。

资料表明由于各月的水位高低不同，河床的过水断面不等，相同的大通流量距平，所对应的月平均水位的变化是不同的，故应逐月进行计算，求出每个月的回归方程，见表5。表中r为相关系数，N为样本数。从表5可见：(1)相关系数很高，无论F、 x^2 检验均能通过，这进一步说明迳流量对水位的关系是十分密切的。(2)回归方程标准差，汛期大、旱季小，江阴大、天生小。将已知的大通流量求平均与多年大通各月平均值(表6)相比较，得出平均流量距平值，然后根据距平值的变化估算预报时段的距平量，查系数表(表6)后代入式(7)求出江阴或天生的 \hat{y}_i ，作为月平均水位或月平均半潮面的修正量，当预报时做跨月或不足一个月时，则可用 S_x 值或预报时段的上、下月 \hat{y}_i 进行内插。如果用于逐潮水位的修正，则要注意高潮与低潮的修正量不同。

表 5 江阴、天生、回归方程系数表

地点	月份 顶 目	1	2	3	4	5	6
		江	a	-3.68	-4.2977	0.8569	0.023
阴	b	0.6726	0.695	0.4969	0.4804	0.2731	0.2981
	$S_x(\pm)$	7.009	9.027	6.870	12.5103	10.0379	7.549
	r	0.9366	0.838	0.9504	0.8776	0.9062	0.9850
天	a	0.9967	2.3004	3.5001	0.0604	-0.9911	2.2055
生	b	0.4234	0.4881	0.3473	0.2103	0.1953	0.2103
	$S_x(\pm)$	4.9862	5.136	7.702	5.236	6.5027	6.2725
	r	0.9538	0.9645	0.866	0.9239	0.9451	0.9508
地点	月份 顶 目	7	8	9	10	11	12
江	a	-3.0594	-8.6742	-2.1314	-8.653	-0.22	-0.0014
阴	b	0.2425	0.2737	0.300	0.332	0.431	0.577
	$S_x(\pm)$	9.1577	10.082	9.7283	10.33	8.014	0.5471
	r	0.9475	0.9322	0.9544	0.9429	0.9633	0.9609
天	a	2.3146	8.7374	6.3375	6.3857	-0.6039	4.4613
生	b	0.1976	0.2044	0.2442	0.234	0.2871	0.3408
	$S_x(\pm)$	7.753	6.7305	10.206	7.6029	6.2665	5.3089
	r	0.8903	0.8404	0.9132	0.9278	0.9181	0.9129

表 6 各站多年月平均值

地 点	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
大通米 ³ /秒	10400	11200	15400	23500	36800	41000	49800	46300	43000	35900	25400	15300
江阴米 ³ /秒	226	233	250	262	320	350	370	376	378	345	298	261
天生米 ³ /秒	202	203	217	243	276	289	312	306	300	284	258	215

注：基面：-1.63米(黄海基面)

应用举例：

1973年3月大通流量月平均19000米³/秒,距平为3606米³/秒,4月月平均31500米³/秒,距平为8000米³/秒,距平量增加4400米³/秒,如果考虑中、上游的降水量无明显的减少趋势,距平的递增不变,则五月份流量距平可预报12400米³/秒,代入式(7)得江阴的 $\hat{y}_1 = 41.70$ 厘米,(正距平 S_x 取正值,负距平 S_x 取负值),天生的 $\hat{y}_1 \approx 23.36 + 6.503 \approx 29.86$ 厘米,即可作天文潮月平均水位或月平均半潮面的修正值,分配到五月的上、中、下旬,以流量的增加趋势来确定各旬的修正值,上旬江阴32厘米,天生24厘米,中旬江阴38厘米,天生27厘米,下旬江阴42厘米,天生30厘米。

五、结 语

(1) 江阴、天生, 吴淞年平均海面的变化, 主要受逐流量变化的影响, 近三十年来, 平均水位年变化曲线, 呈现出一系列小振幅的周期波和随机振动, 无长期增减趋势。

(2) 江阴、天生的年平均海面可划分为2-3段, 分别求出各时段的 Z'_0 , 用于天文潮推算, 可提高精度。

(3) 对于逐月的平均水位预报, 可根据流量距平的变化, 估算预报时段的流量距平, 代入回归方程求出修正值, 以进行逐月、逐旬的天文潮的修正。

参 考 文 献

- [1] 黄忠怒, 波谱分析方法及其在水文气象中的应用, 气象出版社, 1983年。
- [2] 丁士晟, 多元分析方法及其应用, 吉林人民出版社, 1981年。
- [3] 沈焕庭, 平均海面研究的意义和计算方法, 海洋科学, 1982年, 第三期。
- [4] 蒋大宋, 张文修, 数值诊断的统计方法, 陕西科学技术出版社, 1981年。

AN ADJUSTING METHOD OF ASTRONOMICAL TIDE FORECAST IN THE CHANGJIANG ESTUARY

Lin Xunli

(Shanghai Waterway Bureau, Ministry of Communication)

Abstract

The data about the rate of flow at the Datong Station and the water level at the Jiangyin, Tiansheng and wusong Stations from 1948 till now are statistically treated through the period separation of periodogram and the filteration of various periodic waves and random fluctuations. The analyses of treated-data show that the annual mean rate of flow at the Datong Station has a rich water term and a poor one, and that the Jiangyin and Tiansheng Stations have a high water level term and a low one under the influence of runoff, and the wusong Station had another high water level in the period of 1972-1980 under the influence of additional flow influx from the East China Sea. However, there is neither long-term increase nor long-term decrease tendency on water lever in every station.

Finally, a relationship between monthly mean rate of flow and monthly mean water level is set up, and can be used for adjusting the daily and ten-day tide forecast in every station.