

太湖流域平望水位和米市渡潮位过程预报研究*

王建群 董增川

(河海大学水资源环境学院, 南京 210098)

提 要 通过对太湖流域平望水位和米市渡潮位过程及其影响因子的研究, 提出了潮位过程的平均潮位、潮差、潮位过程平移、潮位过程分解与重建等概念, 并用简单实用的统计相关方法建立了平望水位和米市渡潮位过程预报模型; 用 1996-1999 年汛期(5 月 1 日-9 月 30 日)的水文观测资料对所建立的模型进行了率定, 率定结果表明, 所建立的模型具有一定的预报精度、对太湖流域洪水预报调度具有重要的参考作用。

关键词 水位 潮位过程 洪水预报 太湖流域

分类号 P331

太湖流域位于长江三角洲, 北临长江, 南抵杭州湾, 西接天目山、宜溧山区, 东濒东海, 地跨江浙皖沪三省一市, 流域总面积 36895km²。太湖位于流域中部, 在正常水位下, 其水面面积约为 2340km²。流域中丘陵山地与湖泊水网面积各占 1/6, 其余 2/3 为平原洼地。太湖流域属温带湿润地区, 多年平均降雨约 1100mm。在无雨日, 太湖水位一般以 2-3cm/d 速率下降; 当流域有显著降雨时, 水位涨率在 1-10cm/d, 较大暴雨时也可达 20-30cm/d。由于太湖地区地形平坦, 下游受潮汐顶托影响, 使得太湖排水不畅, 汛期水位常保持在 3.3m 以上, 对周围和地势低洼平坦的下游地区构成严重的洪水威胁^[1]。

在太湖流域防洪调度中, 太浦河工程的调度运行方式尤其重要。决定太浦河工程运行方式的控制水位有太湖水位、平望水位和米市渡潮位过程等。因此, 平望水位和米市渡潮位过程的预报对太湖流域的防洪调度有着重要的意义。但是, 太湖流域多属平原河网地区, 河道纵横交错, 湖泊池塘星罗棋布, 还要受到众多泵闸控制和潮汐影响, 用产汇流理论和水动力学方法来预报平望水位和米市渡潮位过程等异常复杂^[2]。本文探讨用简单实用的统计相关方法建立平望水位和米市渡潮位过程预报模型。

1 平望水位预报

平望水文站位于太浦闸下 13km 的太浦河与京杭运河交汇处。平望水位是太浦河泄洪的重要控制水位, 平望水位的预报对太湖流域防洪起着重要作用。平望水位受到当地暴雨、太浦河泄水量、南排泄水量、下游米市渡潮位顶托等多种因素影响, 采用混合线性回归方法建立平望水位统计相关预报模型。平望水位预报的要求是, 在现状工程条件下, 根据太湖流域报汛雨量和水位及预见期预测雨量, 尽可能准确地预报次日和数日 8:00 的平望水位。

* 2003-01-16 收稿; 2003-04-10 收修改稿。王建群, 男, 1960 年生, 副教授, 博士。Email: jqwang@vip.sina.com

水位.

1.1 预报因子

选择平望前期水位涨差、米市渡前期平均潮位（取前期两高两低特征潮位算术平均值），嘉兴前期水位（南排泄量的影响体现在嘉兴水位上），杭嘉湖区和阳澄淀泖区前期及预见期面平均降雨量、预见期太浦闸泄量（可控因子）作为预报因子，平望水位作为预报对象。

设平望水位时间序列为 Z_t ，对平望水位作一阶差分记为 $X_{1,t}$ ，即 $X_{1,t}=Z_t - Z_{t-1}$ ，单位为 m；米市渡平均潮位时间序列记为 $X_{2,t}$ ，嘉兴水位时间序列记为 $X_{3,t}$ ，水位单位为 m；杭嘉湖区和阳澄淀泖区降雨时间序列记为 $X_{4,t}$ 、 $X_{5,t}$ ，雨量单位为 mm；太浦闸泄量记为 $Q_{6,t}$ ，单位为 m^3/s 。对太浦闸泄量 $Q_{6,t}$ 做规范化处理后记为

$$x_{6,t} = (0.8Q_{6,t} + 0.1Q_{\max} - 0.9Q_{\min}) / (Q_{\max} - Q_{\min})$$

这里 Q_{\max} 、 Q_{\min} 为太浦闸泄量的上限和下限估计值。

1.2 预报模型

平望水位预报模型为

$$x_{it} = b_0 + b_{11}x_{1,t-1} + b_{21}x_{2,t-1} + b_{31}x_{3,t-1} + b_{41}x_{4,t} + b_{42}x_{4,t-1} + b_{51}x_{5,t} + b_{52}x_{5,t-1} + b_{61}x_{6,t} \quad (1)$$

其中，模型参数 b_0, b_{ij} 按平望水位是否处于上涨阶段两种情形取值。

平望水位计算步骤：将当日 8:00 以前的平望水位涨差、米市渡平均潮位（取两高两低特征潮位算术平均值）、嘉兴水位、杭嘉湖区和阳澄淀泖区报汛雨量，次日杭嘉湖区和阳澄淀泖区预测降雨、太浦闸计划泄量（作规范化处理）作为式（1）的输入，计算得次日 8:00 平望水位涨差预报值 $X_{1,t}$ ，再加上当日 8:00 平望水位 Z_{t-1} 得次日 8:00 平望水位预报值 Z_t 。

1.3 预报模型率定

选用 1996-1999 年汛期（5 月 1 日-9 月 30 日）的水文观测资料作为率定模型的资料，用最小二乘法率定模型。预报模型率定误差统计见表 1。预报模型的拟合效果见图 1。

表 1 平望水位预报模型率定误差统计

Tab.1 The calibrated results of the forecasting model of Pingwang water level				
统计内容	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年
资料长度(d)	151	151	151	151
误差 ≤ 5 cm (d)	128	140	142	129
误差 ≤ 5 cm 比例 (%)	85	92	94	85
均方误差(m)	0.049	0.030	0.038	0.042

2 米市渡潮位预报

米市渡潮位站地处太浦河排泄通道黄浦江的上游，米市渡潮位过程的预报对太浦河防洪工程运用起着重要作用。米市渡潮位过程预报的要求是，在现状工程条件下，根据太湖流域报汛雨量、水位资料、潮位资料及预见期预测雨量，尽可能准确地预报次日 8:00 和数日 8:00 的米市渡潮位过程。米市渡潮位过程受到当地暴雨、大浦河泄水量、南排泄水量、下游潮水位顶托等多种因素影响，其预报方案较为复杂。

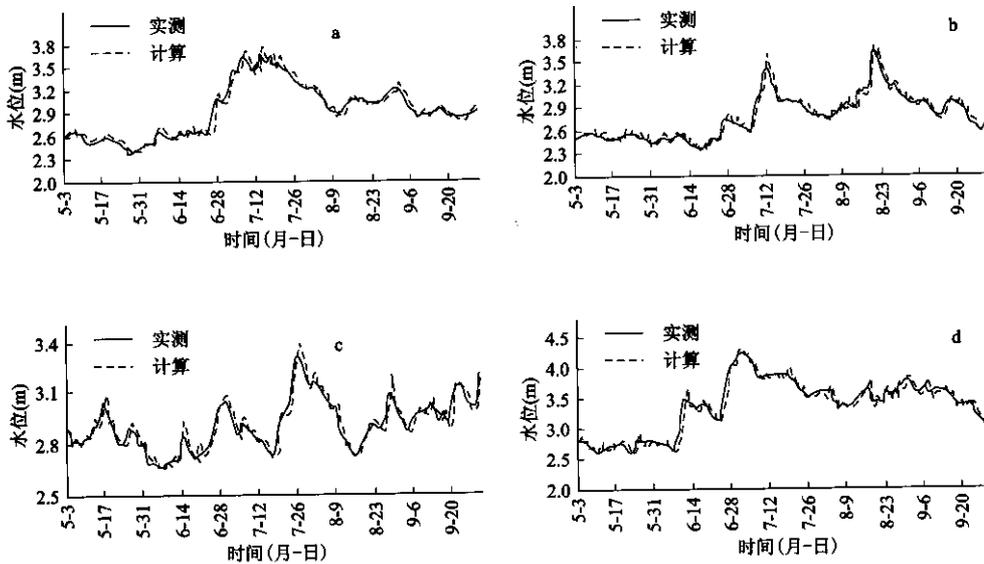


图 1 平望水位预报模型率定 (a:1996 年;b: 1997 年;c:1998 年;d:1999 年)

Fig.1 The Calibrating results of the Pingwang water level forecasting model

(a: Case 1996;b: Case 1997; c:Case 1998; d:Case 1999)

2.1 预报方法分析

对于规则的潮位过程，可采用调和分析的方法来提取潮位过程信息，将潮位过程信息总结为调和常数，然后再用实测潮位过程资料率定出调和常数，就可得到天文潮位过程的预报方程。但对于米市渡潮位过程，由于其影响因素复杂、潮位过程不规则，调和分析预报方法不可行。本文采用简单实用的近似方法预报米市渡潮位过程，具体思路是：a) 将米市渡潮位过程分解为平均潮位、潮差、潮位过程线；b) 采用统计相关方法预报米市渡平均潮位、潮差；c) 借用前一天的米市渡潮位过程线作为预见期潮位过程线的近似；d) 将预报获得的米市渡平均潮位、潮差及潮位过程线进行反演重建，得米市渡潮位过程。

2.2 潮位过程的重建

2.2.1 连续 n 日两高两低特征潮位 设时间序列 t_1, t_2, \dots, t_n 为连续 n 日 8:00 时刻，其中 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ ，第 i 日 t_i 以前连续的两高两低特征潮位为 $Z(t_{i,j})$, $j=1, 2, 3, 4$ ，其中 $t_{i,1} < t_{i,2} < t_{i,3} < t_{i,4} < t_i$ 。则有

$$\{ Z(t_{i,j}), i=1, \dots, n, j=1, 2, 3, 4 \} \tag{2}$$

之间可能有重迭现象。例如，第 i-1 日 8 时以前连续的两高两低特征潮位与第 i 日 8:00 以前连续的两高两低特征潮位之间，有可能出现 $t_{i-1,4} = t_{i,1}$ 且 $Z(t_{i-1,4}) = Z(t_{i,1})$ ，这是由于连续完整的两高两低特征潮位过程周期大于 24h 的缘故。第 1 日至第 n 日连续 n 日两高两低特征潮位序列可由 (2) 式重排消除重迭得到。

2.2.2 给定日完整周期潮位过程 第 1 日至第 n 日连续 n 日消除重迭后两高两低特征潮位序列设为：

$$\{ Z(\tau_k), k=1, \dots, m \} \tag{3}$$

其中， $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_m$ 。

设 $\tau_j < t_i < \tau_{j+1}$, 则第 i 日完整周期潮位过程定义为 τ_{j-4} 时刻至 τ_j 时刻之间的潮位过程.

2.2.3 潮位过程插值 设时间序列 t_1, t_2, \dots, t_n 为连续 n 日 8:00 时刻, t_0 为第 1 日 8:00 前 24:00 时刻, 第 1 日至第 n 日连续 n 日消除重迭后两低特征潮位序列为 (3), 则 t_0 至 t_n 时刻之间潮位过程线可用光滑不等距 3 次多项式插值函数表示为^[3]:

$$S(\tau) = a + b(\tau - \tau_{k-1}) + c(\tau - \tau_{k-1})^2 + d(\tau - \tau_{k-1})^3 \quad \tau \in [\tau_{k-1}, \tau_k] \quad (4)$$

其中 $a = Z(\tau_{k-1})$, $b = 0$, $c = 3(Z(\tau_k) - Z(\tau_{k-1})) / (\tau_k - \tau_{k-1})^2$, $d = -2(Z(\tau_k) - Z(\tau_{k-1})) / (\tau_k - \tau_{k-1})^3$.

2.2.4 平均潮位和潮差 对于一个给定日 8:00 以前具有两高两低特征潮位的完整周期潮位过程 $Z(t)$, 设两高两低特征潮位为 $Z(t_i)$, $i=1, 2, 3, 4$. 其中最低潮位 Z_{\min} 和最高潮位 Z_{\max} 为 $Z_{\min} = \min\{Z(t_i), i=1, 2, 3, 4.\}$, $Z_{\max} = \max\{Z(t_i), i=1, 2, 3, 4.\}$

则平均潮位 Ezt 和潮差 Dzt 定义为 $Ezt = (Z(t_1) + Z(t_2) + Z(t_3) + Z(t_4)) / 4$, $Dzt = Z_{\max} - Z_{\min}$.

2.2.5 潮位过程线平移 给定第 i 日 8:00 以前具有两高两低特征潮位的完整周期潮位过程 $Z(t)$, 设两高两低特征潮位为 $Z(t_j)$, $j=1, 2, 3, 4$. 其中 $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$, t_0 为前一周期极值潮位时刻, t_0 至 t_4 为一完整的周期. 设

$$u_j = t_j - t_0, \quad \tau_j = t_4 + u_j, \quad j=1, 2, 3, 4, \quad S(\tau_j) = Z(t_j)$$

则称潮位过程线 $S(t)$ 为潮位过程线 $Z(t)$ 向前平移一周期, 或简称 $Z(t)$ 的平移. 可用前期潮位过程线的平移作为预见期潮位过程线的近似.

2.2.6 潮位过程重建 已知平均潮位 Ezt 、潮差 Dzt 及潮位过程线 $Z_0(t)$, 可重建潮位过程, 具体方法是: a) 求出 $Z_0(t)$ 的平均潮位 Ezt_0 、潮差 Dzt_0 ; b) 重建潮位过程为

$$Z(t) = (Z_0(t) - Ezt_0) \cdot (Dzt / Dzt_0) + Ezt_0$$

显然, 这样重建的潮位过程 $Z(t)$, 其平均潮位为 Ezt 、潮差为 Dzt 、潮位过程线为 $Z_0(t)$.

2.3 平均潮位预报模型

2.3.1 预报因子 选择米市渡前期平均潮位涨差、预见期平望水位 (可以预报, 预报方法见前) 和前期平望水位 (杭嘉湖区和阳澄淀泖区前期及预见期面平均降雨量的影响体现在前期及预见期平望水位上)、前期嘉兴水位 (南排泄量体现在嘉兴水位上)、预见期太浦闸泄量 (可控因子) 作为预报因子, 米市渡平均潮位作为预报对象.

设米市渡平均潮位时间序列为 Z_t , 对 Z_t 作一阶差分记为 $X_{1,t}$, 即 $X_{1,t} = Z_t - Z_{t-1}$, 单位为 m ; 平望水位时间序列记为 $X_{2,t}$, 嘉兴水位时间序列记为 $X_{3,t}$, 水位单位为 m ; 太浦闸泄量记为 $Q_{4,t}$, 单位为 m^3/s . 对太浦闸泄量 $Q_{4,t}$ 做规范化处理后记为

$$X_{4,t} = (0.8 Q_{4,t} + 0.1 Q_{\max} - 0.9 Q_{\min}) / (Q_{\max} - Q_{\min}),$$

这里 Q_{\max}, Q_{\min} 为太浦闸泄量的上限和下限估计值.

2.3.2 预报模型 米市渡平均潮位预报模型为

$$x_{1,t} = b_0 + b_{11}x_{1,t-1} + b_{12}x_{1,t-2} + b_{21}x_{2,t} + b_{22}x_{2,t-1} + b_{31}x_{3,t-1} + b_{61}x_{6,t} \quad (5)$$

米市渡平均潮位预报计算步骤: 将前期 $t-1$ 、 $t-2$ 日米市渡平均潮位涨差 $X_{1,t-1}$ 、 $X_{1,t-2}$, 预见期和前期平望水位 $X_{2,t}$ 、 $X_{2,t-1}$ 、前期嘉兴水位 $X_{3,t-1}$ 、规范化太浦闸计划泄量 $X_{6,t}$, 作为 (5) 的输入, 计算得预见期即次日 8:00 平均潮位涨差预报值 $X_{1,t}$, 再加上当日 8:00 前完整周期潮位过程平均潮位 Z_{t-1} 得次日 8:00 前完整周期潮位过程平均潮位预报值 Z_t .

2.3.3 预报模型率定 选用 1996-1999 年汛期 (5 月 1 日-9 月 30 日) 的水文观测资料作为率定模型的资料, 用最小二乘法率定模型. 预报模型率定误差统计见表 2.

2.4 潮差预报模型

米市渡潮差预报方法与米市渡平均潮位预报方法相同。

2.4.1 预报因子 选择米市渡前期潮差涨差、预见期和前期平望水位、前期嘉兴水位、预见期太浦闸泄量作为预报因子，米市渡潮差作为预报对象。

设米市渡潮差时间序列为 Z_t ，对 Z_t 作一阶差分记为 $X_{1,t}$ ，即 $X_{1,t}=Z_t - Z_{t-1}$ ，单位为 m；

平望水位时间序列记为 $X_{2,t}$ ，嘉兴水位时间序列记为 $X_{3,t}$ ，水位单位为 m；太浦闸泄量记为 $Q_{4,t}$ ，单位为 m^3/s 。对太浦闸泄量 $Q_{4,t}$ 做规范化处理后记为

$$X_{4,t} = (0.8 Q_{4,t} + 0.1 Q_{max} - 0.9 Q_{min}) / (Q_{max} - Q_{min})$$

这里 Q_{max}, Q_{min} 为太浦闸泄量的上限和下限估计值。

2.4.2 预报模型 米市渡潮差预报模型为

$$x_{1,t} = b_0 + b_{11}x_{1,t-1} + b_{12}x_{1,t-2} + b_{21}x_{2,t} + b_{22}x_{2,t-1} + b_{31}x_{3,t-1} + b_{61}x_{6,t} \quad (6)$$

米市渡潮差预报计算步骤：将前期 t-1、t-2 日米市渡潮差涨差 $X_{1,t-1}, X_{1,t-2}$ ，预见期和前期平望水位 $X_{2,t}, X_{2,t-1}$ 、前期嘉兴水位 $X_{3,t-1}$ 、规范化太浦闸计划泄量 $X_{6,t}$ ，作为 (6) 的输入，计算得预见期即次日 8:00 米市渡潮差涨差预报值 $X_{1,t}$ ，再加上当日 8:00 前的完整周期潮位过程潮差 Z_{t-1} 得次日 8:00 前的完整周期潮位过程潮差预报值 Z_t 。

2.4.3 预报模型率定 选用 1996-1999 年汛期（5 月 1 日-9 月 30 日）的水文观测资料作为率定模型的资料，用最小二乘法率定模型。预报模型率定误差统计见表 3。

2.5 潮位过程预报模型率定

米市渡潮位过程的预报步骤：a) 用式 (1) 预报出平望水位；b) 将预报出的平望水位代入 (5)、(6) 并预报出米市渡平均潮位和潮差；c) 用前期潮位过程线的平移作为预见期潮位过程线，和预报出的平均潮位、潮差一起重建潮位

过程，并进行光滑不等距 3 次插值，即可得米市渡潮位过程的预报。

选用 1996-1999 年汛期（5 月 1 日-9 月 30 日）的水文观测资料作为率定模型的资料，用最小二乘法率定模型。对实测和预报的极值潮位资料进行潮位过程光滑不等距 3 次插值，然后统计整点潮位预报误差，统计结果见表 4。预报模型的拟合效果见图 2。

表 2 米市渡平均潮位预报模型率定误差统计

Tab.2 The calibrating results of the forecasting model of the average of Mishidu tide level

统计内容	1996年	1997年	1998年	1999年
资料长度(d)	151	151	151	151
误差≤5cm (d)	121	108	124	99
误差≤5cm 比例 (%)	80	72	82	71
误差≤10cm (d)	148	134	144	132
误差≤10cm 比例 (%)	98	89	95	87
均方误差(m)	0.042	0.057	0.062	0.067

表 3 米市渡潮差预报模型率定误差统计

Tab.3 The calibrating results of the forecasting model of the range of Mishidu tide level

统计内容	1996年	1997年	1998年	1999年
资料长度(d)	151	151	151	151
误差≤10cm (d)	101	98	124	96
误差≤10cm 比例 (%)	67	65	82	64
误差≤20cm (d)	137	134	133	132
误差≤20cm 比例 (%)	91	89	89	87
均方误差(m)	0.11	0.12	0.10	0.12

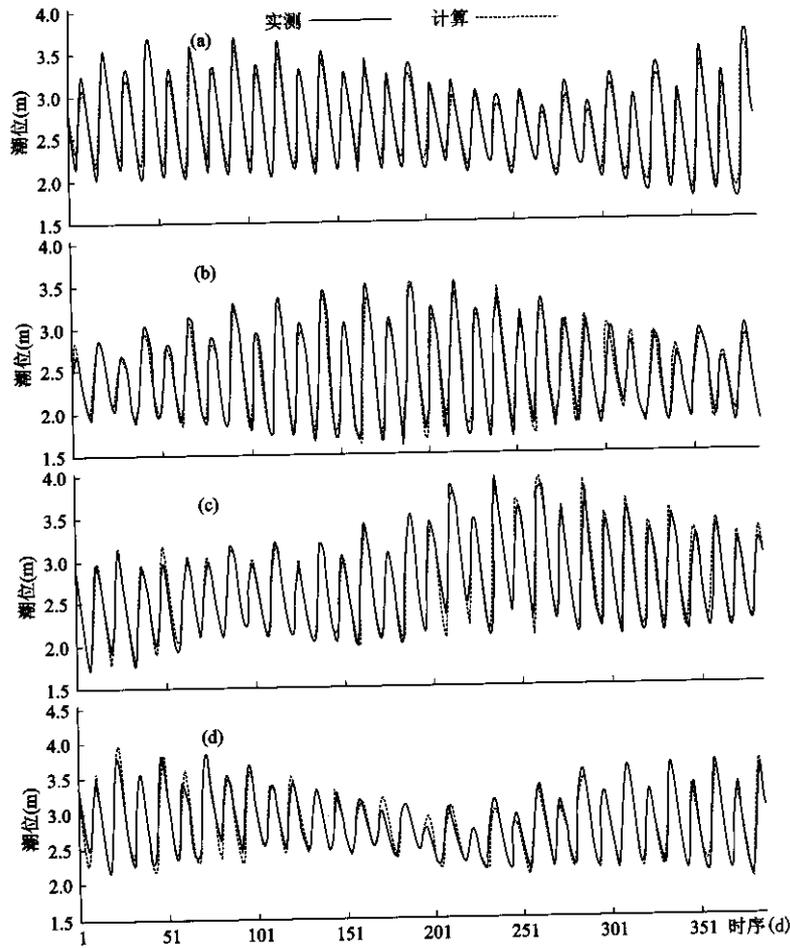


图2 米市渡潮位过程预报模型率定 (a:1996-07-15至1996-07-31; b: 1997-07-15至1997-07-31;
c: 1998-07-15至1998-07-31; d: 1999-07-15至1999-07-31)

Fig.2 The calibrating results of the forecasting model of the hydrograph of Mishidu tide level
(a: Case 1996-07-15—1996-07-31; b: Case 1997-07-15—1997-07-31;
c: Case 1998-07-15—1998-07-31; d: Case 1999-07-15—1999-07-31)

对于米市渡潮位过程, 由于其影响因素复杂、潮位过程不规则, 其预报难度较大. 由表4知, 米市渡潮位过程预报误差 $\leq 20\text{cm}$ 比例在90%以上、均方误差为0.13 m左右, 能够满足洪水调度的要求.

3 结语

本文提出了潮位过程的平均潮位、潮差、潮位过程平移、潮位过程分解与重建等概念, 分析了太湖流域平望水位和米市渡潮位过程的影响因子, 用简单实用的统计相关方法建立了平望水位和米市渡潮位过程预报模型. 用所建立的平望水位和米市渡潮位过程统计相关预报模型作一日预报, 方法简单易行, 且具有一定的精度; 作3日内的递推预报, 对太湖

流域的防洪调度也具有一定的参考价值。所建立的平望水位和米市渡潮位过程统计相关预报模型已在“太湖流域洪水预报与调度系统”项目中得到了应用。由于平望水位和米市渡潮位过程的各种影响因素众多,在实时预报中应根据经验和实际情况作适当修正,以取得更好的预报效果。

表 4 米市渡潮位过程预报模型率定误差统计

Tab.4 The calibrating result of the forecasting model of the hydrograph of Mishidu tide level

统计内容	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年
资料长度(h)	3624	3624	3624	3624
误差 \leq 10cm (h)	2858	2363	2765	2469
误差 \leq 10cm 比例 (%)	79	71	76	68
误差 \leq 20cm (h)	3534	3334	3453	3268
误差 \leq 20cm 比例 (%)	98	92	95	90
均方差(m)	0.12	0.13	0.12	0.14

致 谢 本文作为“太湖流域洪水预报与调度系统”研究项目的一部分,得到了太湖流域管理局防汛办的支持和帮助,在此深表谢意!

参 考 文 献

- 1 黄宣伟. 太湖流域规划与综合治理. 北京: 中国水利水电出版社, 2000:1-33
- 2 林荷娟, 吴浩云. 加拿大河网水动力学模型在望虞河的应用. 湖泊科学, 1997, 9(2): 87-92
- 3 徐士良编. FORTRAN 常用算法程序集. 北京: 清华大学出版社, 1992: 148-149

On the Forecasting of Pingwang Water Level and Mishidu Tide Level Hydrograph in Taihu Basin

WANG Jianqun & DONG Zengchuan

(College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract

By studying on Pingwang water level and Mishidu tide level Hydrograph in Taihu Basin and their impacting factors, the concepts, ranges, moving and the decomposition as well as the reconstruction of the averaged tide level hydrograph are put forward. With the method of the statistics correlation, the forecasting models of the Pingwang water level and Mishidu tide level hydrograph are developed. Using the measuring data in flood season from 1996 to 1999, the forecasting model are calibrated, and the results of the calibrating are satisfactory. The methods proposed in this paper are useful to the flood forecasting and controlling in Taihu basin.

Keywords: Water level; tide level; flood forecasting; Taihu Basin