

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.04.003

洞庭湖区与城陵矶水位关联性的临界特征分析

孙昭华, 李 奇, 严 鑫, 罗方冰

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 采用典型测站观测资料与水力学原理相结合, 分析不同情况下城陵矶水位与洞庭湖区水位关联性强弱转化的机理和临界条件以及三峡水库对其影响等问题。理论解析表明, 固定流量下, 湖区水位与城陵矶水位相关关系应为单调指数函数, 受到区间距离、湖槽形态等多因素影响, 据此提出和率定了各湖区水位的经验计算模式。利用经验计算模式对实测数据进行延展, 构建了各种可能出现的湖区来流和干流水位组合下的湖区水位特征曲线族, 发现湖区水位与城陵矶水位之间的关联强度存在无影响区、影响区和决定区等状态区间, 通过对临界条件的定义和计算, 实现了各状态区间的定量划分, 并提出了各状态区间内洞庭湖区水位的估算方法。通过对三峡水库蓄水后湖床冲淤和水文条件变化的影响分析, 论证了以上方法和认识在水库蓄水后的适用性。

关键词: 水位相关关系; 回水顶托; 洞庭湖; 长江

中图分类号: TV133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)04-0496-11

通江湖泊区水资源、水生态评估需涉及湖区与干流之间的水力联系, 但这种联系随流量涨落而变, 难以量化描述^[1-3]。国外有研究甚至认为^[4], 能否在物理图景认知的基础上, 建立湖区与干流水位、流量等因素之间简捷而可靠的定量关系, 是制约通江湖泊水文、水生态评估的关键之一。

洞庭湖是长江中游重要通江湖泊, 江湖汇流点城陵矶站的水位是反映江湖水情的重要指标^[5]。三峡水库建成前后, 城陵矶水位对洞庭湖区水位的影响规律都是江湖关系的研究热点^[2-3,6]。作为江湖水力联系的主要体现, 二者之间的水位关联性值得深入研究。尽管东、南、西不同湖区的水位在年内经受湖区来流和长江干流水位等多因素制约^[7-8], 在年际间则受到湖盆不断冲淤的影响^[9-11], 呈现出复杂的变化规律, 但许多研究认为城陵矶水位与洞庭湖区水位具有较强相关性, 在宏观分析中, 城陵矶水位常被用以表征整个湖区的水位特征。如袁敏等^[6]采用遥感影像分析洞庭湖区水面面积与城陵矶水位的相关性; 方春明和钟正琴^[10]采用城陵矶水位与洞庭湖湖容关系曲线, 计算湖容变化对洞庭湖和长江洪水位的影响; 李景保等^[12]采用城陵矶水位作为重要指标分析了三峡水库蓄水前后的洞庭湖区水情变化。然而也有研究认为, 东、南、西不同湖区与城陵矶之间水力联系存在差别, 湖区水位与城陵矶水位之间关系随外界条件而变。如孟熊等^[11]对 60 年来西洞庭湖南咀站水位的分析表明, 南咀站年最高洪水位在同一年代与来流相关性强, 而在不同年代之间则受湖床冲淤影响; 孙占东等^[2]、赖锡军等^[7]针对三峡水库蓄水的影响开展模拟计算表明, 东、南、西洞庭湖区水位与城陵矶水位变幅存在显著差异, 且这种差异随季节而变; 周慧等^[8]的模拟计算则表明, 即使对于深受长江干流顶托的东洞庭湖鹿角站, 其水位也仅是在洪水期与城陵矶水位保持基本同步。

以上两方面的现状说明, 尽管现有研究认识到不同情况下湖区水位与城陵矶水位的关联性应存在强弱变化, 但不同来流和城陵矶水位组合下这种关联性存在哪些变化状态, 各种状态发生转换的临界条件是什么, 不同情况下应如何估算各湖区水位, 过去还缺乏系统性的定量分析和归纳。由于这些方面认识的不足, 不同

收稿日期: 2016-12-09; 网络出版时间: 2017-06-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170626.1623.006.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2014ZX07104-005); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402303)

作者简介: 孙昭华(1976—), 男, 河南洛阳人, 副教授, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。

E-mail: Lnszh@126.com

水文条件下应如何评估湖区水位变化, 年内哪些时期或者哪些水文遭遇条件下可用城陵矶水位代替湖区水位, 均缺乏明确而量化的判断标准。此外, 三峡水库建成后, 洞庭湖区发生湖床冲淤和水文过程变化, 这些变化将如何影响东、南、西各湖区与城陵矶水位的关联性, 也是过去研究较少的问题。

城陵矶水位影响下的洞庭湖区水位变化, 属回水顶托问题。对该类问题, 以往的力学分析主要解决回水影响下的水流演进和水位流量关系确定^[13-14], 但对河湖内部与出口水位之间关联性的研究较少。本文将力学原理与洞庭湖观测资料相结合, 研究两方面问题: ① 分析湖区与干流水位关联性强弱转化的机理, 建立各因素之间量化关系; ② 明确外界条件影响下江湖水位关联状态的调整与转化特点, 分析不同时期以及不同水文组合情况下洞庭湖区水位对城陵矶水位的响应规律。

1 研究区域与数据资料

1.1 区域特征

地处荆江以南、四水尾间控制站以北的洞庭湖区承接松滋、太平、藕池三口分泄的长江干流水量以及湘、资、沅、澧四水来流, 该区域总面积虽有 19 195 km², 但其中湖泊面积仅 2 625 km², 且被分割成东、南、西三片相连水域(图 1)。

地质构造和泥沙淤积作用使洞庭湖区具有两大特点: ① 地势自西南向东北倾斜, 形成明显水力和湖床坡降, 据三峡水库蓄水前数据统计^[15], 东、南、西洞庭湖历年最高水位分别为 31.0~32.0 m、32.0~33.0 m、33.0~34.0 m, 而据遥感影像分析^[2], 东、南、西洞庭湖的草滩地界线对应水位分别为 23 m、27 m、29 m; ② “高水湖相、低水河相”, 枯水期的湖泊水体仅存在于狭窄湖槽中, 平水期湖槽和部分洲滩淹没, 洪水期洲滩被全部淹没, 水位沿着大堤上涨。

1.2 数据资料与水文特征

洞庭湖入流由长江三口分流和湘、资、沅、澧四水入流控制站所监测, 站点见图 1。选取鹿角、杨柳潭、南咀分别作为东、南、西洞庭湖水代表站点, 三站距湖区出口分别约 40 km、90 km 和 150 km。采用七里山流量代表湖区出流, 莲花塘水位代表江湖交汇点水位, 以下简称城陵矶流量和水位。洞庭湖区间入流比重较大, 但缺乏观测, 本文以每年入、出湖总水量之差为准, 对来流过程进行倍比放大, 以此近似补偿区间流量。为反映三峡水库蓄水前、后各阶段, 选取了 1992—2002 年、2003—2007 年及 2008—2014 年 3 个时期分别代表水库蓄水前、初期运行期和试验性蓄水运行期(杨柳潭站缺 2008 年后数据)。文中各站水位均已统一为黄海高程。

对各时段水文资料统计表明, 2003 年前、后的入湖总径流中, 四水来流比例分别为 65.1%、64.7%, 三口比例分别为 21.5%、21.1%, 区间比例分别为 13.4%、14.2%。三峡水库蓄水前后, 三口、四水的时段平均入湖流量过程和城陵矶水位过程年内总体特征基本未变, 仅个别月份有所调整。

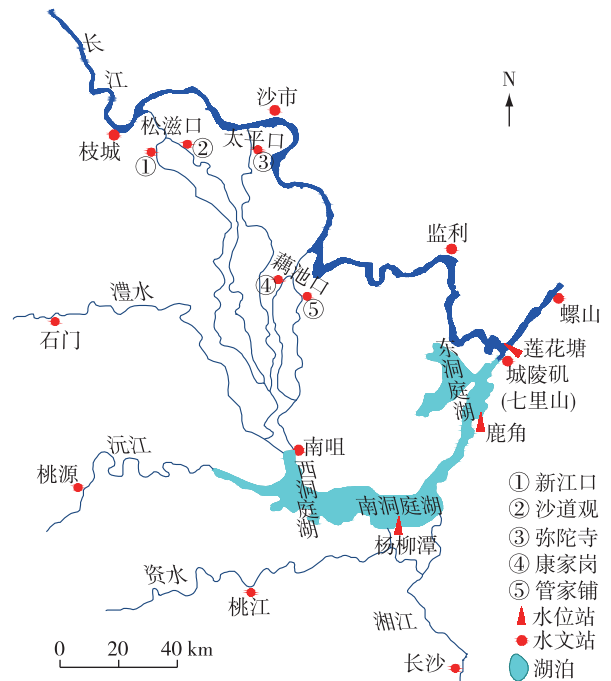


图 1 研究区域及水文站点分布
Fig. 1 Sketch of the study area and the distribution of hydrological stations

2 洞庭湖区水位与城陵矶水位的相关关系

采用日均资料, 点绘了相应日期的湖区三站水位与城陵矶水位相关关系(简称鹿一城、杨一城、南一城等关系)以及各站至城陵矶水位落差与城陵矶水位相关关系, 如图2所示。

由图2(a)、图2(c)、图2(e)可见, 湖区三站水位随城陵矶水位而变化, 虽然点群呈条带状杂乱分布, 但可看出两者之间总体正相关, 并且存在非常规则的下包络线。比较鹿一城、杨一城、南一城关系图可见, 南一城、杨一城两图较为类似: 城陵矶水位低于26 m时, 下包络线较趋平缓, 而城陵矶水位较高时, 下包络线斜率逐渐趋近于1, 其中以杨一城关系尤为明显; 鹿一城关系图中, 下包络线整体接近 $y=x$ 的直线, 仅在城陵矶水位低于18 m时, 点群才略有偏离。不同时期之间比较可见, 2003年后湖区水位变幅减小, 点群条带变窄, 但下包络线基本无变化。

由图2(b)、图2(d)、图2(f)可见, 三站都呈现出城陵矶水位越高, 落差越小的总体规律。三站之间差别体现在: 鹿一城水位差变幅较小, 最大不足3 m, 点群下包络线接近于0 m; 南一城、杨一城落差与城陵矶水位关系较为类似, 枯期落差远大于汛期, 但杨一城水位差下包络线在汛期仍可趋近于0 m。同样可看出, 不同年代之间水位落差的下包络线比较稳定。

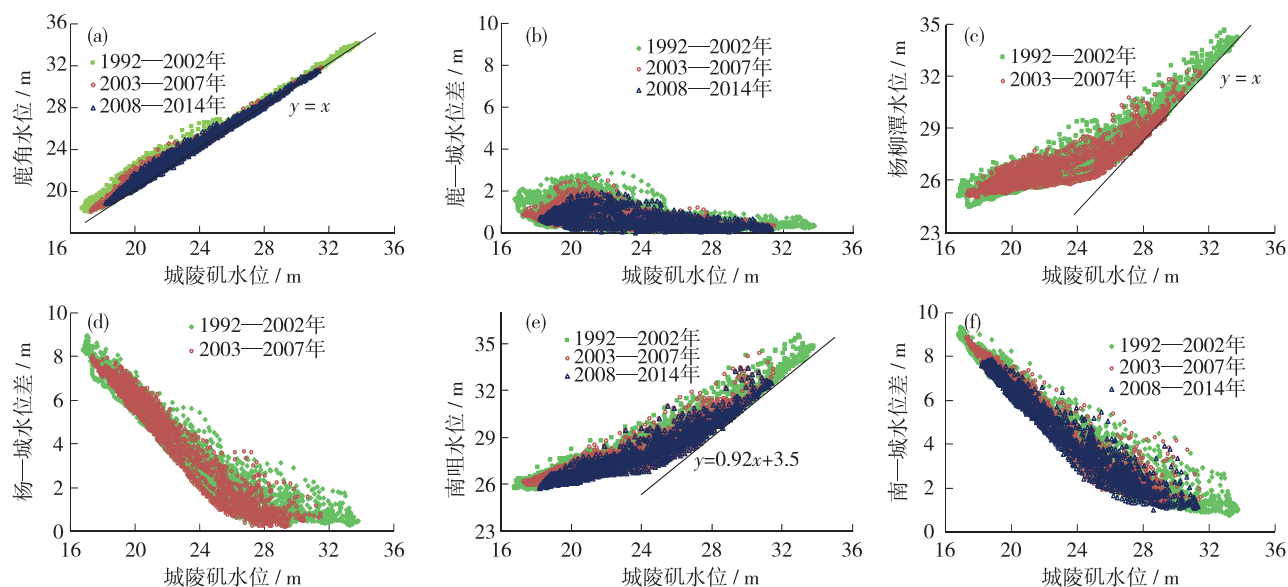


图2 湖区各代表站水位与城陵矶水位关系

Fig. 2 Relations between water levels at hydrological stations in Dongting Lake and Chenglingji station

3 水位关联性变化机理及状态划分

经历长期冲积过程, 洞庭湖床与宽浅型河道具有类似性。湖区水位变动主要由城陵矶水位、湖区来流量两方面因素变化引起, 依据河道水力学原理, 可对两方面因素的影响机理进行剖析。

3.1 出口水位对湖区水位的影响机理

忽略惯性项后, 水流运动方程为

$$\frac{\partial h}{\partial x} = i_b - \frac{n^2 Q^2}{A^2 h^3} \quad (1)$$

式中: x 为距离; Q 、 A 和 h 分别为流量、断面面积和平均水深; i_b 为河床比降; n 为糙率。河宽 B 与水深 h

之间存在河相关系 $B^{1/\gamma}/h = \xi$, 其中 ξ 近似常数; $\gamma \geq 1$, 参照一般河道经验可近似取为 2, 则过水断面面积 $A = \xi^2 h^3$ 。基于摄动分析的思想, 假设由于河道出口的水位发生小扰动 h'_0 , x 处产生水位增量为 h' , 根据式(1)应有

$$\frac{\partial(h+h')}{\partial x} = i_b - \frac{n^2 Q^2}{\xi^4} (h+h')^{-\frac{22}{3}} \quad (2)$$

将式(2)展开, 忽略高阶小量, 再与式(1)相减可得

$$\frac{\partial h'}{\partial x} = \frac{22n^2 Q^2}{3\xi^4 h^{\frac{25}{3}}} h' \quad (3)$$

式(3)整理后进行积分, 在积分过程中考虑到 $x=0$ 时 $h' = h'_0$, 得

$$h' = h'_0 \exp\left(-\frac{22n^2 Q^2}{3\xi^4 h^{\frac{25}{3}}} x\right) \quad (4)$$

式中: \bar{h} 为 $0 \sim x$ 之间河段平均水深, 负号表示正方向指向上游。

现实中, 洞庭湖湖床形态沿程不均匀, 可根据沿程变化情况将其概化为若干区间, 区间进、出口断面编号分别为 i 和 $i-1$, 区间长度为 Δx_i , 区间内河相系数近似为 ξ_i 。定床条件下, 断面水深变幅和水位变幅具有等价性, 由式(4)可得出每个区间进、出口水位变幅的关系为

$$\Delta Z_i = \Delta Z_{i-1} \exp\left(-\frac{22n^2 Q^2}{3\xi_i^4 \bar{h}_i^{\frac{25}{3}}} \Delta x_i\right) \quad (5)$$

式中: ΔZ_i 为 i 断面水位变幅。利用式(5)从出口断面自下而上进行递推, 可得河段内第 i 断面水位变幅与出口水位变幅之间关系为

$$\Delta Z_i = \Delta Z_0 \exp\left(-\frac{22n^2 Q^2}{3} \sum_{j=1}^i \frac{\Delta x_j}{\xi_j^4 \bar{h}_j^{\frac{25}{3}}}\right) \quad (6)$$

对于 $0 \sim i$ 断面之间的长距离 x_i , 假设存在一个概化水深 \bar{h}_{0-i} 和河相系数 $\bar{\xi}$ 使 $\sum_{j=1}^i \frac{\Delta x_j}{\xi_j^4 \bar{h}_j^{\frac{25}{3}}} = \frac{x_i}{\bar{\xi}^4 \bar{h}_{0-i}^{\frac{25}{3}}}$, 则式

(6)转化为

$$\Delta Z_i = \Delta Z_0 \exp\left(-\frac{22n^2 Q^2 x_i}{3\bar{\xi}^4 \bar{h}_{0-i}^{\frac{25}{3}}}\right) \quad (7)$$

由式(7)可见, 当河道出口发生水位变化 ΔZ_0 时, 引起水位变幅沿程呈指数衰减, 除了河道形态、阻力等因素之外, 影响衰减快慢的主要是流量和河段平均水深: 流量越大, 衰减越快; 水深越大, 衰减越慢。由于水深的幂指数远大于流量, 因而水位扰动沿程衰减对水深(水位)因素更为敏感。

对于 $0, i$ 两个断面位置的水位相关曲线, 曲线上各点切线斜率即为 $\Delta Z_i / \Delta Z_0$, 由式(7)可见: 当两点距离很近, 或出口水位很高导致沿程形成大水深时, 式中指数函数趋近于 1, 从而使曲线斜率趋于 1, 这从机理上揭示了城陵矶水位对湖区水位的影响关系。由式(7)还可看出, 在固定流量下, 上下游的水位相关曲线是由城陵矶水位决定的单调性指数函数。

3.2 不同流量级下城陵矶与湖区水位关系特征曲线

对任意河段区间, 水流运动方程(1)的差分形式为

$$\frac{Z_i - Z_{i-1}}{\Delta x_i} = -\frac{n^2 Q^2}{\xi_i^4 \bar{h}_i^{\frac{22}{3}}} \quad (8)$$

式中: Z_i 为 i 断面水位。对各区间分别列出式(8)并累加得

$$\Delta Z_{0-i} = -n^2 Q^2 \sum_{j=1}^i \frac{\Delta x_j}{\xi_j^4 \bar{h}_j^{\frac{22}{3}}} \quad (9)$$

式中： ΔZ_{0-i} 为 0 与 i 断面之间水位差。对于长距离 $x_i = \sum_{j=1}^i \Delta x_j$ ，仿照式(7)定义河段平均的概化水深 \bar{h}'_{0-i} 和河相系数 $\bar{\xi}'$ ，再考虑用进出口流量、水位的加权表示河段内概化平均流量和平均水深，则式(9)可转化为

$$\Delta Z_{0-i} = - \frac{n^2 [\alpha Q_0 + (1-\alpha) Q_i]^2 x_i}{\bar{\xi}'^4 [\beta h_0 + (1-\beta) h_i]^{22/3}} = - \frac{n^2 [\alpha Q_0 + (1-\alpha) Q_i]^2 x_i}{\bar{\xi}'^4 [\beta (Z_0 - Z_{b0}) + (1-\beta) (Z_i - Z_{bi})]^{22/3}} \quad (10)$$

式中： α 、 β 为待定权重因子； Z_i 、 Z_{bi} 分别为 i 断面处水位、河床高程，式(10)可化为

$$\bar{Z} = \left[\frac{n^2 \bar{Q}^2 x_i}{\bar{\xi}'^4 \Delta Z_{0-i}} \right]^{3/22} + \bar{Z}_b = K \left[\frac{\bar{Q}^2}{Z_i - Z_0} \right]^b + C \quad (11)$$

式中： $\bar{Z} = \beta Z_0 + (1-\beta) Z_i$ 、 $\bar{Z}_b = \beta Z_{b0} + (1-\beta) Z_{bi}$ 分别为 0~ i 断面之间概化平均水位、概化平均河床高程； $\bar{Q} = \alpha Q_0 + (1-\alpha) Q_i$ 为河段内概化平均流量； K 、 C 、 b 为与河道形态、糙率、距离等有关的待定参数。依据式(11)，便可根据流量、出口水位 Z_0 确定 i 断面处水位 Z_i 。

式(11)中含有较多参数，可依据以下步骤逐步确定：首先，在 α 、 β 和 b 取值范围内，对 α 和 β 以 0.1 为步长，对 b 以 0.01 为步长，假设若干套 α 、 β 和 b 的取值；其次，对于每套 α 、 β 和 b 的值，借助 0 和 i 断面的实测流量、水位资料拟合 $\bar{Z} \sim \left[\frac{\bar{Q}^2}{Z_i - Z_0} \right]^b$ 之间线性关系，得到式(11)中 K 、 C 值以及相应的拟合误差；最后，根据实测资料与拟合曲线之间的误差，筛选出拟合效果最好的一套参数，即为最终的参数值。以上计算过程中， α 、 β 的范围均为 0~1 之间。指数 b 理论值应在 0.14 附近，但考虑到洞庭湖湖床形态与一般河道可能存在差异，河相系数 $B^{1/\gamma}/h$ 中的 γ 不一定为 2，而且式(9)中糙率、断面形态参数也可能与水位有关，因此，对 b 也考虑 0~1 的变幅。

式(11)给出了一种考虑回水顶托作用的水位估算便捷方法，将其应用于洞庭湖区，利用流量跨度较大的 1997—1998 年日均入、出湖流量和各站水位实测资料，确定出式(13)的参数见表 1，其中 Z_0 为城陵矶水位， ΔZ 为各站至城陵矶水位落差。由率定出的指数可见，湖区的河相系数与一般河道存在差别，这种差别说明洞庭湖区河相关系的特殊性在参数中已得到了反映。由于 α 值接近 1，以下分析中近似以城陵矶流量代替湖区流量。

表 1 湖区流量与城陵矶水位共同影响下的各站水位计算关系式

Table 1 Functions to estimate water level in Dongting Lake with discharge and water level of Chenglingji

站点	α	β	计算关系式	拟合决定系数 R^2
鹿角	0.8	0.4	$Z_0 + 0.4\Delta Z = 0.172 \left(\frac{\bar{Q}^2}{\Delta Z} \right)^{0.22} + 13.69$	0.982
杨柳潭	0.8	0.8	$Z_0 + 0.8\Delta Z = 0.03 \left(\frac{\bar{Q}^2}{\Delta Z} \right)^{0.28} + 22.77$	0.978
南咀	0.8	0.8	$Z_0 + 0.8\Delta Z = 0.007 \left(\frac{\bar{Q}^2}{\Delta Z} \right)^{0.36} + 23.82$	0.963

对表 1 中各式固定流量级，则转化为城陵矶水位与湖区水位之间的单值非线性隐函数，可通过数值方法求解。以杨柳潭站为例，计算了各级流量下的杨—城水位关系曲线见图 3(a)中虚线，可见关系曲线在城陵矶低水位时显示了非单调性，出现“同一流量下，城陵矶水位下降而湖区水位上升”的不合物理意义曲线段，这与式(7)中理论推导相矛盾，其原因可能在于湖区“高水湖相、低水河相”，式(11)中率定的经验参数在城陵矶低水位期误差较大。根据式(7)，城陵矶水位较低时水位相关曲线斜率将趋于 0，对不合理段进行修正后见图 3(b)中实线。将得到的各级流量下杨—城水位相关曲线与各级流量实测点群相比较，分别如

图 3(b)、图 3(c)所示, 可见 2003 年前后的实测点群分布与修正后曲线符合较好, 水位相关曲线在 2003 年前后无明显变化。

图 3 中曲线族涵盖了所有可能出现的来流与城陵矶水位组合, 在实测资料基础上通过对组合范围的延展使得不同条件下的湖区水位变化特征得以充分凸显: 城陵矶水位较低时, 杨柳潭水位完全由流量决定, 与城陵矶水位无关; 城陵矶水位较高时, 水位相关曲线逐渐向斜率为 1 的直线聚集, 城陵矶水位成为决定杨柳潭水位的主要因素。以上两种状态之间为过渡区域。

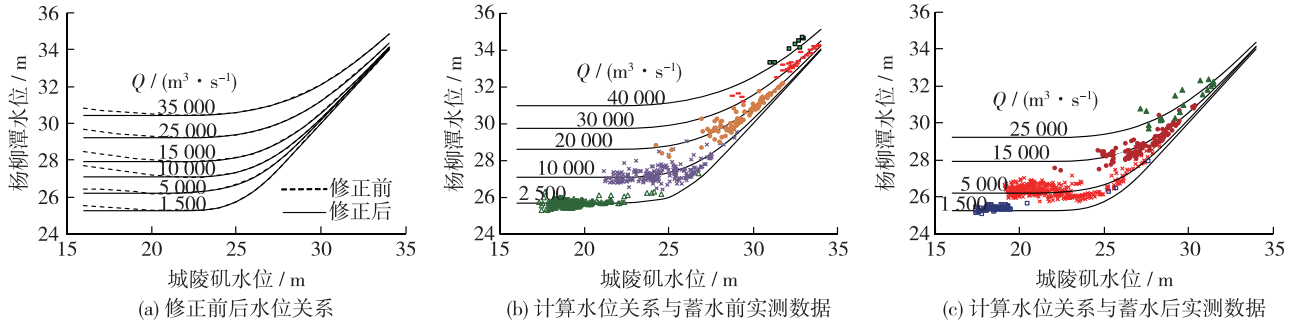


图 3 不同城陵矶水位与流量组合下的杨柳潭水位特征曲线族

Fig. 3 Relations curves between water levels at Yangliutan and Chenglingji station under different discharge

3.3 不同水文组合下城陵矶与湖区水位关联状态划分

仿照图 3 确定了鹿一城、南一城水位关系曲线族, 并与实测点群比较如图 4、图 5 所示, 容易看出图 3 (a) 以及图 4、图 5 中的关系曲线均符合式(7)所描述的几何特征。三者的区别主要体现在: 鹿一城水位相关曲线上, 两种直线状态的转换最快, 而南一城水位相关曲线上的状态转换最平缓。

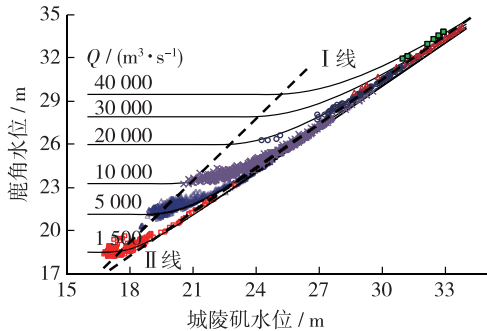


图 4 鹿角与城陵矶水位关系

Fig. 4 Relation between water levels at Lujiao and Chenglingji

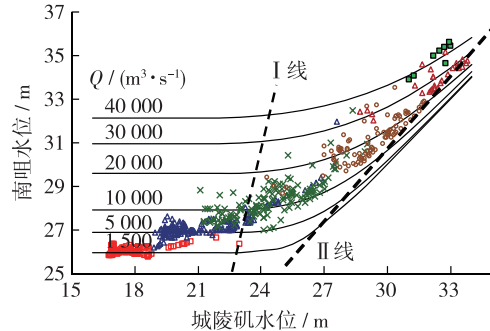


图 5 南咀与城陵矶水位关系

Fig. 5 Relation between water levels at Nanzui and Chenglingji

考虑到同流量下水位波动等因素, 定义水位关系特征曲线斜率达到 0.1 和 0.9 的位置为趋近水平和 $y=x$ 两种直线状态的临界点, 这些临界点的连线将湖区水位与城陵矶水位相关程度分了 3 个区(图 4、图 5), 将其命名为为无影响区、影响区和决定区, 各区之间分别为分区线 I 和分区线 II, 其形态见图 6。

图 6 中的分区线亦可由式(7)所导出。根据分区线的定义, 线上各点应满足

$$\frac{22n^2 Q^2 x}{3\bar{\xi}^4 \bar{h}^3} = - \ln \frac{\Delta Z_i}{\Delta Z_0} = N \tag{12}$$

式中: $\bar{\xi}$ 、 \bar{h} 分别为各站与城陵矶之间平均河相系数、水深; N 为常数, 相应于斜率 0.1 和 0.9, N 分别为 2.3 和 0.1。由式(12)可得

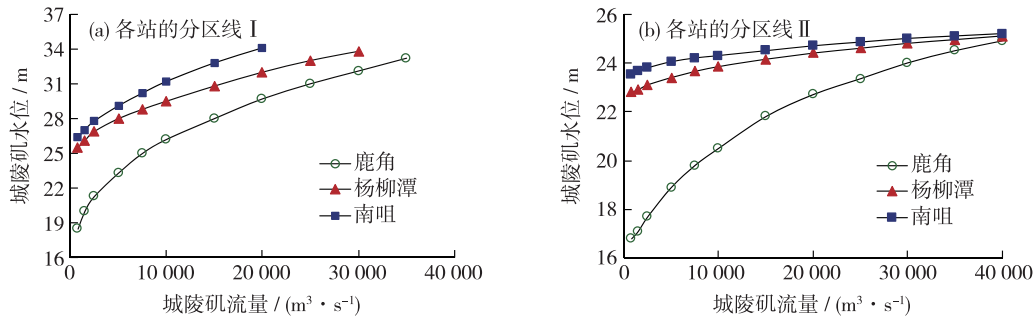


图 6 各站与城陵矶水位相关程度分区线

Fig. 6 Critical curves of water levels relations at different hydrological stations

$$Z_0 = \bar{Z}_b + \bar{h} = \bar{Z}_b + \left[\frac{22n^2 x}{3\xi^4 R} \right]^{\frac{3}{25}} Q^{\frac{6}{25}} \quad (13)$$

式中： Z_0 为城陵矶水位； \bar{Z}_b 与区间河床高程有关。由式(13)可见 Z_0 与 Q 坐标系内的分区线应为指数小于 1 的幂函数，具有以下特点：越靠近尾间则 \bar{Z}_b 越大，分区线在坐标平面内位置越高；若区间内形态参数 $\bar{\xi}$ 较大，则曲线陡度减缓。可见，除了 3 个湖区湖床高程差别之外，东、南洞庭湖之间湘江洪道的特殊形态是导致图 6 中曲线差异的重要原因，该位置变形将明显影响南、西洞庭湖水位。

图 6 中的分区线 I、II，构成了湖区水位与城陵矶水位关联性强弱转化的临界条件，对于来流和城陵矶水位的各种可能组合，都可以依据这些临界条件对湖区水位主要影响因素进行判断。

4 湖区冲淤和水文条件对水位关联性的影响

影响图 2 点群分散特征的主要是湖区地形冲淤以及来流量与城陵矶水位遭遇组合等，它们将影响湖区与城陵矶水位关联程度的年际、年内变化。

4.1 湖区冲淤的影响

洞庭湖自 1950 年以来呈淤积态势^[11]，但统计显示^[9]，三峡水库蓄水前(1995—2003 年)，包括东、南、西洞庭湖在内整个湖区平均淤积总厚度仅为 3.7 cm；三峡水库蓄水后(2003—2011 年)，洞庭湖湖区总体由淤转冲，平均冲刷深度约为 10.9 cm，冲刷幅度最大的东洞庭湖平均冲深 19 cm。由此可见，自 20 世纪 90 年代中期以来洞庭湖区地形冲淤平均厚度仅在 0.1 m 左右的数量级，相比于城陵矶水位汛枯期之间超过 15 m 的变幅，冲淤引起湖区平均水深变化几乎可忽略。统计城陵矶与湖区三站 1995 年以来历年最低水位如图 7 所示，尽管水文条件变化和河床冲淤导致长江干流枯水位缓慢抬升，按图中趋势线估算近 20 年城陵矶枯水位抬升大于 0.8 m，但除了与城陵矶站水力联系紧密的鹿角站之外，更易受湖床形态影响的南咀、杨柳潭两站水位变幅不明显。说明 20 世纪 90 年代中期以来洞庭湖冲淤未对城陵矶与湖区水力联系产生明显影响。事实上，图 2 中下包络线以及图 3—图 5 中各曲线在 2003 年前、后各时期均较为稳定。

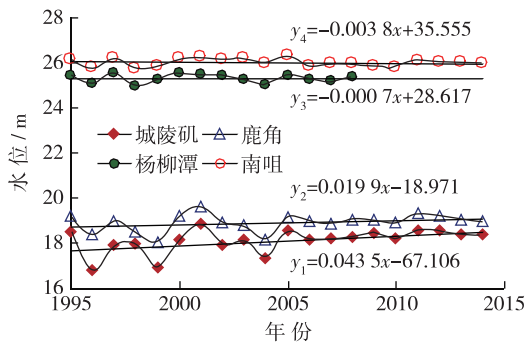


图 7 各站历年最低水位变化趋势

Fig. 7 Lowest water levels at different stations

位抬升大于 0.8 m，但除了与城陵矶站水力联系紧密的鹿角站之外，更易受湖床形态影响的南咀、杨柳潭两站水位变幅不明显。说明 20 世纪 90 年代中期以来洞庭湖冲淤未对城陵矶与湖区水力联系产生明显影响。事实上，图 2 中下包络线以及图 3—图 5 中各曲线在 2003 年前、后各时期均较为稳定。

三峡水库蓄水以来，洞庭湖区的冲刷以东洞庭湖幅度最大，而西、南洞庭湖则相对稳定^[9]，根据这种发展态势由式(7)可以预见：若冲刷导致的水深增大达数米的量级，将可使湖区水位与城陵矶水位的关联性进一步增强，尤其是东、南洞庭湖之间的湖床冲深更易导致这种变化。

4.2 不同时期城陵矶水位与湖区来流组合变化及影响

基于 1992—2002 年实测资料, 图 8 中给出了城陵矶流量、水位点群分布以及水位相关分区线。由图 8 可见: 对于鹿角站, 点群基本位于分区线 I 以上, 城陵矶水位较高时点群进入分区线 II 以上的决定区, 反映了城陵矶水位对鹿角水位较强的影响; 对于杨柳潭站, 城陵矶水位较低且来流偏枯时, 点群位于无影响区, 但城陵矶水位高于 24 m 时, 点群位于影响区, 甚至少数点据处于分区线 II 附近; 对于南咀站, 以城陵矶水位 24 m 左右为界, 点群仅位于无影响区和影响区。以上规律与图 2 中鹿一城、杨一城曲线在城陵矶高水位期存在 $y=x$ 的下包络线, 而南一城水位差永远不为 0 的现象吻合。

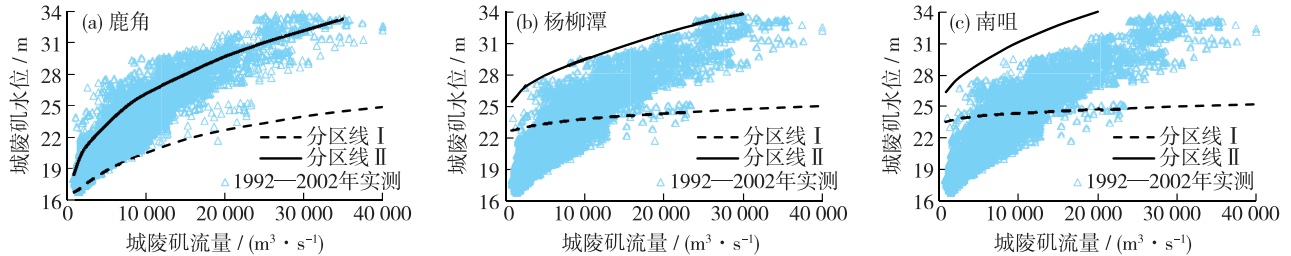


图 8 城陵矶水位与流量点群(1992—2002 年)

Fig. 8 Relation between discharge and water level at Chenglingji(1992—2002)

在图 8 基础上, 仍然基于 1992—2002 年资料, 考虑城陵矶流量与水位遭遇组合的出现时机, 计算了年内不同时段内点群位于 3 个区域的几率。由表 2 可见, 鹿角站水位几乎全年受到城陵矶水位影响, 其中 7—11 月受影响最大, 该时段约有一半天数的水位完全由城陵矶水位决定; 杨柳潭和南咀站水位在各月份内受城陵矶水位影响的天数比例较为类似, 其中 12—3 月水位几乎与城陵矶水位无关, 4—6 月以及 9—11 月有 40%~55% 的天数内水位与城陵矶水位无关, 杨柳潭水位受城陵矶水位影响程度大于南咀。

2003 年后, 城陵矶流量、水位遭遇的变化可能会影响城陵矶与湖区水位关联性。以 0.5 m 和 2 500 m³/s 分别作为水位、流量的分级间隔, 图 9 中统计比较了 2003—2007 年、2008—2014 年两段时期相比于 1992—2002 年的各级城陵矶流量—水位遭遇概率变化情况, 图中的正负数值是指水位流量遭遇概率相比于 1992—2002 年的增加或减少值。由图 9 可见: 2003 年后两段时期内, 同一城陵矶水位下湖区来流偏小的几率增加。与鹿角、杨柳潭两站分区线对比表明, 来流变化使得中枯水期湖区水位与城陵矶水位的关联性略有增强, 但未引起各分区之间格局的根本性调整。这正是图 2 中南一城关系下包络线以及鹿一城、杨一城关系低水期下包络线在 2003 年前、后能保持基本稳定的原因。

4.3 不同情况下湖区水位的估算方法

年内不同时期或者不同来流、城陵矶水位组合条件下, 湖区水位应如何估算, 是实践中非常关心的问题。前人曾根据资料统计经验给出了一些简易判断标准, 如文献[2]中提出城陵矶水位降至 24 m 以下时, 南咀水位与城陵矶水位关联性变差; 城陵矶水位降至 25 m 以下, 杨柳潭水位与城陵矶水位关联性变差; 鹿角

表 2 年内不同时期各站受城陵矶水位影响天数比例(1992—2002 年) %

Table 2 Percentage of days in a year when water level in lake affected by water level of Chenglingji

站点	月份	无影响区	影响区	决定区
鹿角	12—3	5.2	94.8	0
	4—6	0.8	95.3	3.9
	7—8	0	44.4	55.6
	9—11	0	57.0	43.0
	全年	1.9	77.0	21.1
杨柳潭	12—3	99.3	0.7	0
	4—6	46.1	53.9	0
	7—8	0.4	97.2	2.3
	9—11	39.5	60.3	0.2
	全年	54.3	45.2	0.4
南咀	12—3	99.6	0.4	0
	4—6	55.4	44.6	0
	7—8	1.6	98.4	0
	9—11	49.9	50.1	0
	全年	59.6	40.4	0

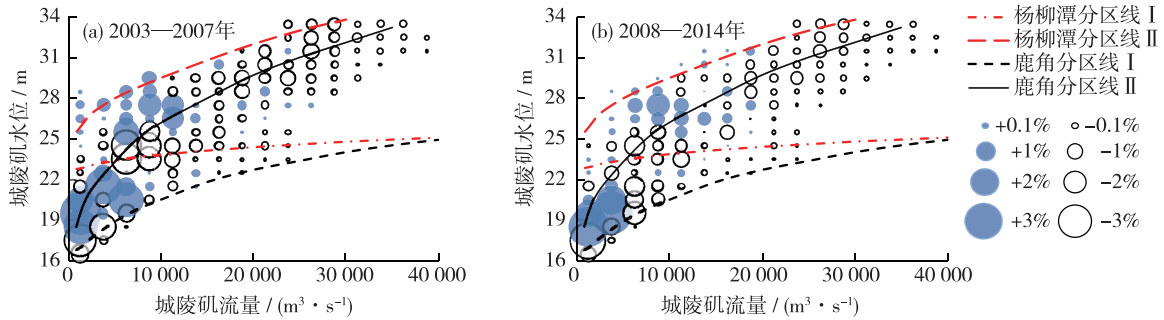


图9 2003年后各种城陵矶流量与水位组合的出现概率变化情况

Fig. 9 Changes of combined probability of all ranges of discharge and water level at Chenglingji after 2003

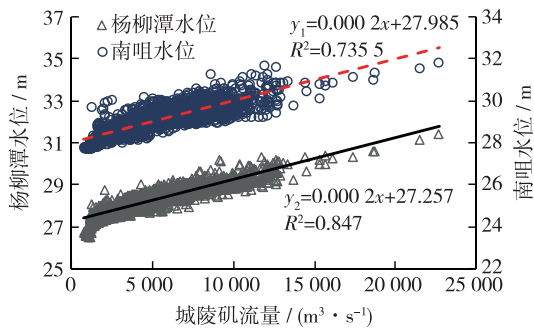


图10 城陵矶流量与杨柳潭、南咀水位关系

Fig. 10 Relations between discharge at Chenglingji and water levels at Yangliutan and Nanzui

对处于南、西洞庭湖的杨柳潭、南咀两站，枯水期两站与城陵矶水位的关联性将变差，水位主要由流量决定，由图6(a)可见，发生这种状态转化的临界城陵矶水位约为24 m。基于1992—2002年数据，图10中给出了城陵矶水位低于24 m时城陵矶流量与杨柳潭、南咀水位之间相关关系，可见这种相关性非常明显，这与文献[2]的认识较类似。显然，在城陵矶低水位时期，据图10中的相关关系估算南、西洞庭湖水位是更合理的途径。

5 结 论

(1) 提出了根据来流和城陵矶水位计算洞庭湖区水位的半经验模式，能够基于实测资料延展确定出各种可能来流和城陵矶水位组合条件下的湖区水位变化规律，为具有指数函数特征的曲线族。

(2) 各种湖区来流与城陵矶水位组合下，湖区水位与城陵矶水位关联性呈现出无影响区、影响区和决定区等状态区间，各状态区间的分区线，是判定不同情况下湖区水位与城陵矶水位关联性强弱的量化依据。

(3) 年内不同时期洞庭湖来流量与城陵矶水位级的遭遇概率不同，湖区水位应采取不同的估算模式。

(4) 三峡水库蓄水后，湖床冲淤尚未对湖区与干流水位关联性产生明显影响，水文条件变化使中枯水期的江湖水位关联性略有增强，但并未引起关联性分区格局的根本调整。

本文主要是对江湖水力联系的量化分析，三峡水库运行前后水文条件等变化引起的城陵矶和湖区水位具体变幅，则是另一个问题，但本文为相关的变化评估研究提供了基础。

水位在22 m以下表现出与城陵矶水位变化的差异。文献[10]认为城陵矶水位在28 m以上时，湖区各站水位近似可用城陵矶水位代替。

由图8及表2可见：即使对于距城陵矶较近的鹿角站，也仅在7—11月长江干流水位较高时期，该站水位可由城陵矶水位近似代替，而长江水位较低的12—3月及四水来流较大的4—6月，由图4估算鹿角水位更为合理；对于杨柳潭站，仅在城陵矶水位高于26 m且湖区来流偏枯的少数情况下，该站水位可由城陵矶水位估算；对于南咀站，年内任何时期，该站水位与城陵矶水位之间都不存在直接换算关系。因此，对于杨柳潭、南咀两站，应考虑来流的影响，采用表1中各关系式或图3、图5中关系曲线来估算水位。

参考文献:

- [1] GUO H, HU Q, ZHANG Q. et al. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003—2008 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416: 19-27.
- [2] 孙占东, 黄群, 姜加虎, 等. 洞庭湖近年干旱与三峡蓄水影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 251-256. (SUN Z D, HUANG Q, JIANG J H, et al. Recent hydrological drought in Dongting Lake and its association with the operation of Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(2): 251-256. (in Chinese))
- [3] 杨波, 廖丹霞, 李京, 等. 东洞庭湖湿地生态系统健康状态与水位关系研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(8): 1145-1151. (YANG B, LIAO D X, LI J, et al. Relationship between water level and wetland ecosystem health state in east Dongting Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(8): 1145-1151. (in Chinese))
- [4] KUMMU M, TES S, YIN S, et al. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake: floodplain system[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28: 1722-1733.
- [5] 丛振涛, 肖鹏, 章诞武, 等. 三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(3): 23-28. (CONG Z T, XIAO P, ZHANG D W, et al. Water stage at Chenglingji before and after the Three Gorges Project[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(3): 23-28. (in Chinese))
- [6] 袁敏, 李忠武, 谢更新, 等. 三峡工程调节作用对洞庭湖水面积(2000—2010年)的影响[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 37-45. (YUAN M, LI Z W, XIE G X, et al. Effects of the Three Gorges Project on the water surface area of Dongting Lake, 2000—2010 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 37-45. (in Chinese))
- [7] 赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 178-184. (LAI X J, JIANG J H, HUANG Q. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Dongting Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 178-184. (in Chinese))
- [8] 周慧, 毛德华, 刘培亮. 三峡运行对东洞庭湖水位影响分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2014(4): 180-186. (ZHOU H, MAO D H, LIU P L. The investigation on water level of east Dongting Lake affected by Three Gorges Reservoir [J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2014(4): 180-186. (in Chinese))
- [9] 朱玲玲, 陈剑池, 袁晶. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 348-357. (ZHU L L, CHEN J C, YUAN J. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 348-357. (in Chinese))
- [10] 方春明, 钟正琴. 洞庭湖容积减小对洞庭湖和长江洪水位的影响[J]. *水利学报*, 2001, 32(11): 70-74. (FANG C M, ZHONG Z Q. The influence of capacity decrease on flood stages in Dongting Lake and in Yangtze River [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, 32(11): 70-74. (in Chinese))
- [11] 孟熊, 廖小红, 黎昔春. 洞庭湖水位变化特性及影响研究[J]. *人民长江*, 2014, 45(13): 17-21. (MENG X, LIAO X H, LI X C. Study on characteristics of water level variation in Dongting Lake and its influences [J]. *Yangtze River*, 2014, 45(13): 17-21. (in Chinese))
- [12] 李景保, 张照庆, 欧朝敏, 等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1251-1260. (LI J B, ZHANG Z Q, OU C M, et al. Responses of water regimes in Dongting Lake area under different dispatching modes during the running period of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1251-1260. (in Chinese))
- [13] SCHMIDT A R, YEN B C. Theoretical development of stage-discharge ratings for subcritical open-channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(9): 1245-1256.
- [14] MUNIER S, LITRICO X, BELAUD G, et al. Distributed approximation of open-channel flow routing accounting for backwater effects [J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31: 1590-1602.
- [15] 来红州, 莫多闻. 构造沉降和泥沙淤积对洞庭湖区防洪的影响[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 574-580. (LAI H Z, MO D W. The influences of the tectonic subsidence and the siltation on the situation of preventing flood disasters in the Dongting Lake area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 574-580. (in Chinese))

Analysis of the critical relationship between the water levels of Dongting Lake and Chenglingji station *

SUN Zhaohua, LI Qi, YAN Xin, LUO Fangbing

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The relationship between the water levels in Dongting Lake and Chenglingji station was investigated using long-term hydrology data record and the hydraulics theory. The mechanisms of the changing water level relationship between the two regions were discussed, and the critical condition in the changing process was analyzed. Furthermore, the impact of the Three Georges Project on the water level linkage was examined. Theoretical analysis showed that the relationship between the water levels in Dongting Lake and Chenglingji station agreed with the monotonic exponential function under fixed discharge. Considering distance and morphology of the lake bed, an empirical model was established to estimate the water level in Dongting Lake. Based on the empirical model, the water level variations of the Dongting Lake was estimated all throughout the ranges of inflow discharges and water level stages at the lake outlet by extrapolation from the observed data. Based on these calculations, rating curves of the water level relationships between Dongting Lake and Chenglingji station were established with lake inflow as parameters. Therefore, it was found that the combination of inflow discharge and water level at Chenglingji station can be divided into three types, as follows: no-effect zone, influencing zone, and determining zone in the coordinate plane. Based on the definition of critical condition, the threshold lines between the three zones were quantitatively determined. The water level estimation methods in different parts of the lake under the conditions of the three zones were proposed separately. Finally, the impact of the Three Georges Project on the critical condition and threshold lines were evaluated along with the observed data. The hydraulic linkage between Dongting Lake and Chenglingji station slightly changed after dam impoundment.

Key words: correlation between water levels; backwater effect; Dongting Lake; Yangtze River

* The study is financially supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China (No.2014ZX07104-005) and the National Key R&D Program of China (No.2016 YFC0402303).