

鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系

戴 雪^{1,2}, 万荣荣¹, 杨桂山¹, 王晓龙¹

(1.中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;

2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在气候变化、人类活动导致流域水循环改变、极端水文事件频发的背景下,从江湖关系角度分析鄱阳湖水文节律变化规律,对于维护流域水安全具有重要意义。利用1951~2011年湖区4站及湖口站水文实测资料,采用统计分析及水文过程分析方法,对湖泊水文节律在2003~2011年与1980~2002年发生的显著变化及其与长江水量交换的关系进行研究。结果表明:2003~2011年,湖泊因涨、退水阶段水位均偏低,进而枯水阶段延长,同时丰水阶段缩短,湖泊水文节律整体呈现洪旱急转情势;近年来江湖水量交换的变化是造成湖泊水文节律变化的主要原因。

关键词:水文节律;江湖水量交换;湖泊水情;长江;鄱阳湖

中图分类号:P333.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2014)12-1488-09

水文节律,指湖泊水情周期性、有节律的变化。广义水文节律包括昼夜、月运、季节和年际节律。正常情况下,流域气候和下垫面等因素较稳定,湖泊多年平均水位趋于稳定数值,即湖泊正常年平均水位。所以湖泊年际节律以干扰因素驱动的突变性和适应干扰后的阶段稳定性为特点,无渐变趋向;而昼夜节律对生态系统影响微弱。因此,狭义水文节律特指月运节律与季节节律。John^[1]指出,关注湖泊年平均水位而非平均季节循环,阻碍了对湖泊季节循环本身长时间尺度变化的观察,因此,湖泊水情研究应该转变到水文节律的研究上。

湖泊水文节律是其生态系统物质、能量循环的反应,对生态系统各要素影响重大^[2]。水文节律控制湖泊水位的枯-涨-丰-退,导致周期性洲滩淹没和出露,进而形成显著地植被垂向分布带^[3],多样化的湿地类型,丰富的生物多样性^[4],并影响生态系统各组份的水资源利用^[5]。笔者近期开展的实验研究表明,不同水文节律对鄱阳湖洲滩湿地植物种群演变存在影响,湿地植被生物量与群落生物多样性对淹水节律与淹水历时等关键水情变化存在响应。

鄱阳湖是中国最大淡水湖,平均年内水位变幅11.01 m($p < 0.001$),呈高水湖相,低水河相景观^[6,7]。每年4月,湖泊水位开始抬升,大小湖汊融为一体;至6月进入丰水阶段,湖泊水位较高;10月开始稳定退水;12月进入枯水阶段,水退滩出,又形成彼此分隔的小湖,持续到翌年3月^[8]。即遵循枯(M12-1-2-3)-涨(M4-5)-丰(M6-7-8-9)-退(M10-11)的水文节律(图1)。近10 a来,鄱阳湖水文节律发生了显著变化^[9]:在枯水阶段,多年汛末低水位提前出现,且于12月至翌年3月持续出现超低水位;在退水阶段,湖体水量锐减,水位持续降低,2007年10月11日星子站平均水位13.07 m,比历史同期均值偏低1.78 m;11月9~16日平均水位9.53 m,比历史同期偏低3 m。

鄱阳湖是长江中游主要自然通江湖泊之一,承接上游五河及区间来水,经湖口汇入长江,与长江存在复杂水文、水动力交互(图2),其水文节律的变化受到长江中游江湖关系变化的影响倍受关注。

鄱阳湖水情研究工作早期侧重长历时变化规律研究,后来扩大到洪水遭遇规律研究^[7]。近10 a来湖泊枯水程度的加剧,使研究视角向枯水径流

收稿日期:2013-03-15; **修订日期:**2013-06-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB417006)、国家自然科学基金(41271500)资助。

作者简介:戴 雪(1988-),女,博士研究生,主要从事资源利用与生态环境效应研究。E-mail:daixue1224@163.com

通讯作者:万荣荣,博士,副研究员。E-mail:rrwan@126.com

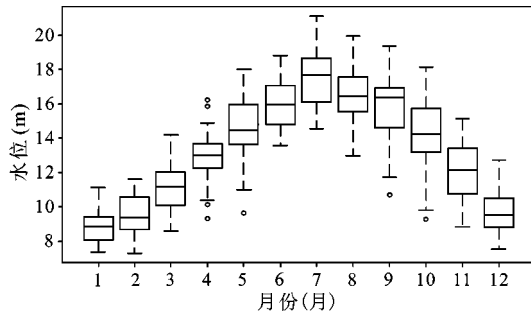


图1 鄱阳湖星子站1951~2011年月平均水位

Fig. 1 Monthly mean water level of Xingzi station in 1951-2011

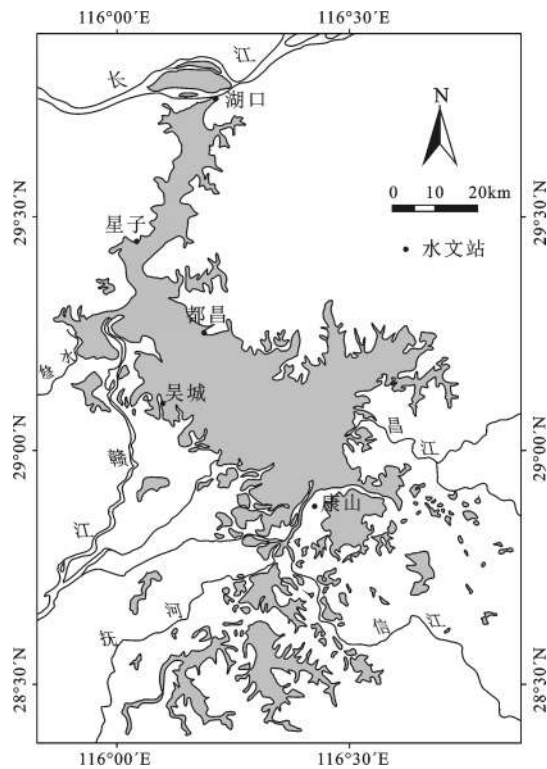


图2 鄱阳湖及水文站点位置

Fig. 2 Poyang Lake area and locations of the hydrological stations

演变特征转变^[10,11]。2003年三峡工程运行,通过改变江湖交互作用影响鄱阳湖水情,使之成为又一研究热点^[6]。但目前鄱阳湖水情研究很少涉及水文节律;又因涉及复杂的江湖动力机制,从江湖关系角度揭示水文节律变化原因的工作尚未深入开展。基于此,本文拟在分析近年来鄱阳湖水文节律变异特征的基础上,重点讨论江湖水量交换对此变化的影响。这对科学认识鄱阳湖水情以及恢复湖泊自然水文节律具有重要的现实意义。

1 数据与方法

本文研究鄱阳湖5个水文站(湖口、星子、都昌、康山、吴城)月平均水位与湖口月平均流量数据(来源于江西省水文局,并由其进行质量控制);时间序列覆盖1951~2011年,其中1954年与1963年数据缺失;除M-K检验中进行移动平均插补外,其他分析过程均采用实测水文资料,缺失年份不进入计算。

首先,采用灰色关联分析方法于鄱阳湖5个水文站中选出代表水文站;通过Mann-Kendall方法对代表水文站水情进行突变检验,提取湖泊水文节律的稳定阶段与突变阶段。然后,依据代表水文站两阶段水情的差异性分析,揭示近期湖泊水文节律对自然水文节律的偏离;通过水位—流量的水文过程分析,研究水文节律变化与江湖水量交换的关系。

1.1 鄱阳湖代表水文站选取

鄱阳湖自上游至下游分别有康山、吴城、都昌、星子、湖口5个关键水文站,其位置如图2。灰色关联分析方法^[12]通过比较各因素的关联曲线,得到因素间几何处理范畴的相关程度。鄱阳湖5站1951~2011年平均水位关联系数矩阵为:

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0.88 & 0.86 & 0.83 & 0.72 \\ 0.88 & 1 & 0.90 & 0.86 & 0.75 \\ 0.85 & 0.89 & 1 & 0.90 & 0.75 \\ 0.80 & 0.84 & 0.89 & 1 & 0.75 \\ 0.67 & 0.70 & 0.72 & 0.74 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $i, j=1, 2, 3, 4, 5$, 分别代表湖口、星子、都昌、康山、吴城5个水文站。湖口站位于江湖分汇河段,其水文情势在江湖作用层面代表鄱阳湖水情。其余4站位于鄱阳湖大湖面,不同程度的代表大湖面水情。而水文站对湖泊水情的良好代表性表现在,能同时解释江湖作用以及大湖面的鄱阳湖水情。由 γ_{ij} 可知,康山与吴城两站对其余3站的解释能力普遍较弱。都昌站能85%的代表湖口水情,89%的代表星子水情,但对与湖区关联普遍较弱的康山、吴城两站解释程度偏高。星子站能88%的代表湖口水情,90%的代表都昌水情,同时86%和75%的说明吴城、康山水情。因此,星子站能全面反映鄱阳湖在江湖作用层面以及大湖面的水情变化,为鄱阳湖代表水文站。

1.2 Mann-Kendall方法与研究时段划分

Mann-Kendall方法^[14]是识别水文时间序列趋

势性和突变性的有效方法,本文用其提取湖泊水情的稳定状态阶段及突变状态阶段。对于时间序列 X_n , 构造 $x_i > x_j (1 \leq j < i)$ 的样本累计数序列 d_k :

$$d_k = \sum_{i=1}^n \gamma_i (k=1, 2, 3, \dots, n), \quad \gamma_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (1)$$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{Var(d_k)}}, \quad k=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

其中,累计数 d_k 的均值和方差分别为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \quad Var(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

将时间序列 X_n 逆序排列,重复上述过程并将计算结果乘-1,得到序列 UB_k 。给定显著性水平 α , 若 $|UF_k| > U_\alpha$, 则序列存在显著趋势变化。若 $UF_k = UB_k$, 且 $|UF_k| < |U_\alpha|$, 则 k 点即为突变点。本文取显著性水平 $\alpha=0.05$, 则 $U_\alpha = \pm 1.96$ 。由 $M-K$ 检验知(图 3), 1980~2002 年 $UF < 1.96$, 且 $UF_k \neq UB_k$, 为湖泊水情稳定阶段。而 2003 年起, 多次有 $UF_k = UB_k$ 的情况, 为湖泊水情显著变化阶段。

因此, 本文将以稳定阶段(1980~2002)的湖泊状态对比变化阶段(2003~2011)的湖泊水情状态, 揭示近年来湖泊水文节律对自然水文节律的偏离。另以 1951~2011 年(实测水文资料掌握的最大程度)水文节律特征作为辅助参考。

1.3 差异分析与水文节律变化识别

研究 3 时段各月水位差异, 属于 12 组并行的单因素 3 水平实验设计, 其数学模型为: 将 i 月 ($i=1, 2, \dots, 12$) 在 j 时段 ($j=1, 2, 3$, 分别对应时段 2003~2011、1980~2002 与 1951~2011) 的平均水位序列 x_{ijn} 看作来自第 ij 个正态总体 $x_{ij} \sim N(\mu_{ij}, \sigma^2)$ 的样本观测值, 构建线性统计模型:

$$\begin{cases} x_{ijn} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijn}, i=1, 2, \dots, 12; j=1, 2, 3; n \text{ 为样本数} \\ \varepsilon_{ijn} \sim N(0, \sigma^2) \text{ 且相互独立} \end{cases}$$

其中, μ_{ij} 是第 i 月在 j 时段的总体均值, ε_{ijn} 是相应误差。另记 $\mu_i = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^3 n_j \mu_{ij}$, 表示 i 月 3 时段总均值;

$n_i = \sum_{j=1}^3 n_j$, 表示 i 月 3 时段总样本数。

验证 i 月平均水位在 3 时段差异的显著性, 应用单因素方差分析^[15], 通过计算 P 值的方法确定 ($p=P\{F(r-1, n-r) > F\}$)。给定显著性水平 α , 若 $P < \alpha$, 则 3 时段 i 月平均水位差异显著。为识别 3 时段任意两者差异是否显著, 可根据均值多重比较方法^[15], 同样计算 p 值 ($p_{ij} = P\{t(n-r) > |t_{ij}|\}$)。

1.4 水位-流量关系与江湖交互作用

由于断面上水位的变化, 本质上是流量的变化所致, 因此, 水位-流量具有密切关系, 即 $Q=f(H)$ 。如图 4, 稳定流时, 水位-流量呈单值关系, 即最低(高)水位对应最小(大)流量, 形成水位-流量关系直线。而在枯-涨-丰-退水文节律中, 水位-流量呈多值关系: 因涨水阶段流量大于稳定流时流量, 所以水位-流量曲线相对偏右; 相反, 退水阶段水位-流量曲线相对偏左; 形成逆时针绳套形曲线。图 4 实线为枯-涨-丰-退节律过程对应的水位-流量关系, 虚线为稳定流对应的水位-流量关系, A 为最大流量点, B 为最高水位点^[16]。

鄱阳湖水位-流量关系曲线在绳套形基础上存在叠加的波动, 因为其出湖流量除受湖泊水位影响外, 还受其与长江交互作用的影响^[6]。因此, 可通过水位-流量曲线的形态变化识别江湖水量交换变化, 进而揭示湖泊水文节律变化的原因。

2 鄱阳湖水文节律变化特征

2.1 稳定时段湖泊水文节律特征

如图 5, 1980~2002 年, 鄱阳湖各个月份、各个水文期的水位时间序列均呈平稳状态, 无趋势性

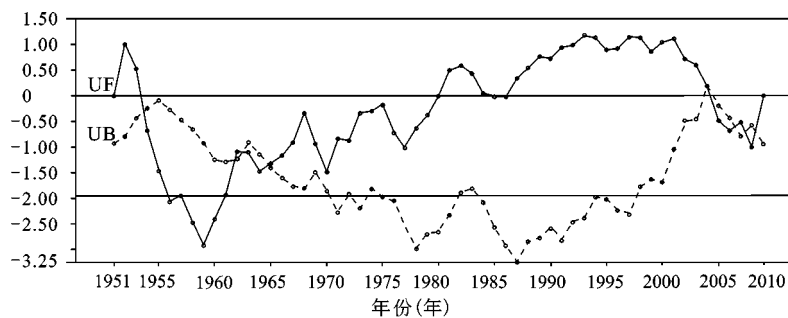


图 3 星子站 1951~2011 年平均水位 M-K 突变检验

Fig. 3 Analysis of catastrophe for annual mean water level of Xingzi Station in 1951-2011

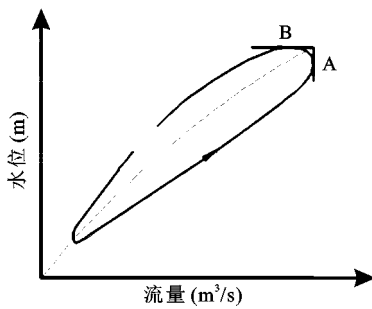


图4 水位-流量关系绳套曲线^[16]
Fig. 4 Stage-discharge relation loop curve^[16]

(通过单位根检验)。因此,此时段鄱阳湖水文节律较为稳定,保持了枯(M12-1-2-3)-涨(M4-5)-丰(M6-7-8-9)-退(M10-11)波动的多年平衡。

2.2 变化时段湖泊水文节律特征

鄱阳湖各月平均水位在2003~2011年与1980~2002年的差异显著程度见表1。12、4、10、11这4个月水位均在两时段存在显著差异($P < 0.01$)。其中,10月在2003~2011年与1951~2011年也存在显著差异($P < 0.01$)。由此可见,2003年以来,湖泊

水文节律在10月改变最为明显,其次为4月、11月与12月。丰水期的7月在两时段也存在一定程度的差异($P < 0.05$)。

如图6所示,2003年以来,鄱阳湖10月平均水位较1980~2002年下降2.45 m;4月平均水位较1980~2002年降低1.75 m。11月与12月平均水位较1980~2002年分别下降2.14 m和1.44 m。由此可见,近年鄱阳湖水文节律中变化显著的4个月份,其变化趋势均为下降趋势,且降幅从大到小依次为10月、11月、4月与12月。

退水阶段是湖泊由丰水状态向枯水状态转变的关键时期,其水位演变直接决定了湖泊的洪枯交替模式。2003~2011年,10月水位显著下降,表明鄱阳湖由稳定退水向迅速退水转变。2003~2011年,11月最低水位9.15 m,比1980~2002年的11.15 m大幅降低,并已接近稳定时段12月平均水位8.82 m。11月提前出现的低枯水位打乱了鄱阳湖原有水文节律,湖泊枯水阶段提前。

涨水阶段是湖泊由枯水状态向丰水状态转变的关键时期,其水位状况同样直接决定湖泊的洪

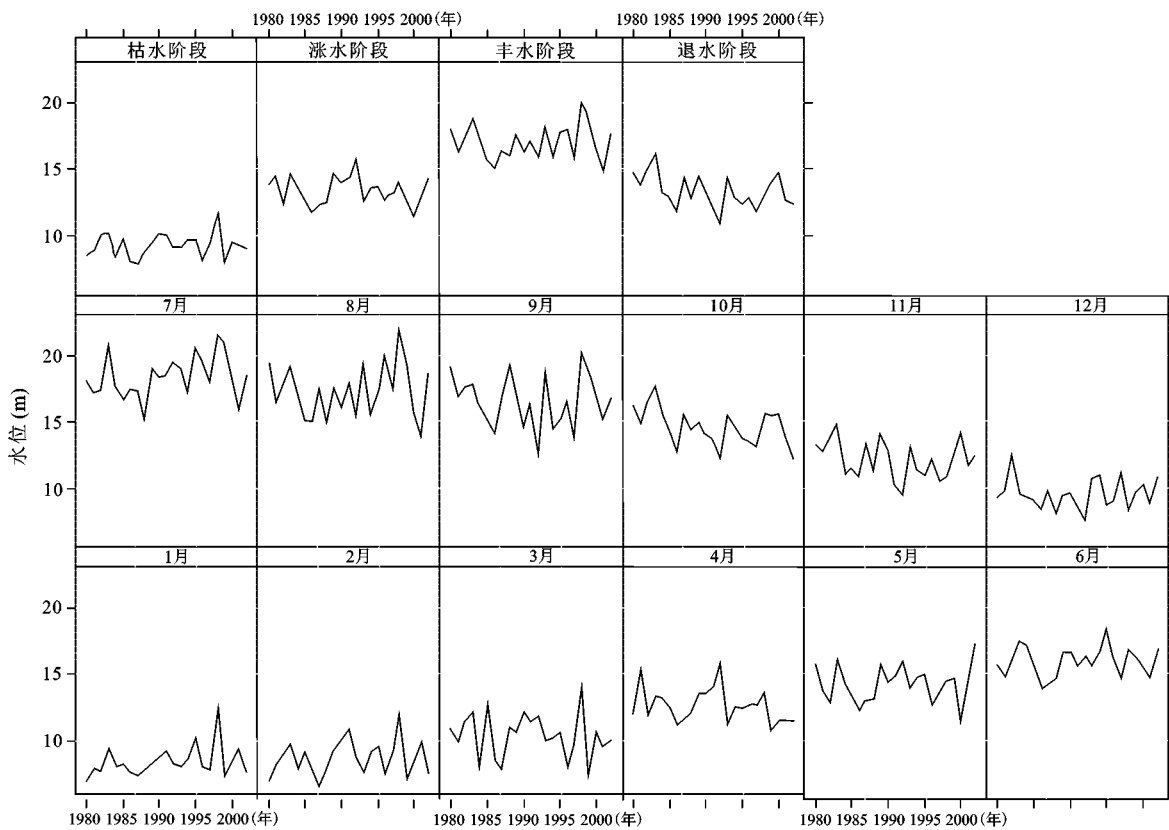


图5 1980~2002年星子站月平均水位

Fig. 5 Secular monthly mean water level of Xingzi Station in 1980-2002

表1 方差分析及均值多重比较P值
Table 1 P values of analysis of variance and T-test

水文期	月份	方差分析P	μ_1/μ_2	μ_1/μ_3	μ_2/μ_3
枯水期	12月	0.4699	0.0746*	0.0746*	0.0084***
	1月	0.9563	0.2586	0.3802	0.2456
	2月	0.7213	0.5123	0.5123	0.2611
	3月	0.8855	0.5455	0.5455	0.4238
涨水期	4月	0.1987	0.0976*	0.0131**	0.0017***
	5月	0.0832*	0.8061	0.1197	0.1691
	6月	0.4295	0.9973	0.9498	0.9498
丰水期	7月	0.7103	0.1648	0.1648	0.0385**
	8月	0.9850	0.3150	0.3904	0.2914
	9月	0.8223	0.5002	0.5002	0.3112
退水期	10月	0.0841*	0.2690	0.0067***	0.0027***
	11月	0.1319	0.2060	0.0120**	0.0035***

注：①***/**/*显著性水平分别为 $P<0.01, P<0.05, P<0.1$ ；② μ_1, μ_2 和 μ_3 分别为1951~2011、1980~2002和2003~2011月均水位。

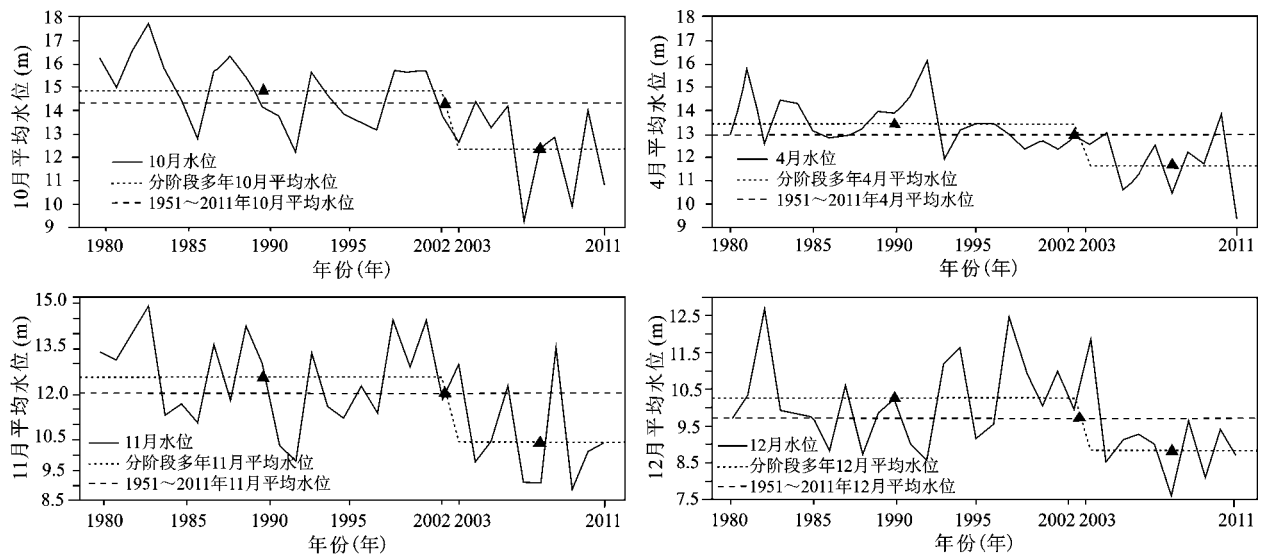


图6 不同时段10月、4月、11月、12月星子站月平均水位

Fig. 6 The monthly mean water level of Oct., Apr., Nov. and Dec. in different periods at Xingzi Station

枯交替模式。2003~2011年，4月平均水位比3月仅上涨0.98 m；而1980~2002年4月平均水位比3月上涨达1.96 m。由此可见，2003年以来，鄱阳湖涨水阶段初期水位回升缓慢，4月份仍保持枯水阶段特征。

2003~2011年枯水阶段，只有12月水位发生显著下降。即2003年以来，水文节律在枯水阶段的改变，仅显著表现于枯水阶段初期枯水程度的加剧。丰水阶段各月份水位变化均不显著，只有7月

水位在2003~2011年与1980~2002年存在差异($P<0.1$)，下降1.57 m。

综上所述，鄱阳湖2003年后水文节律发生显著改变：① 退水阶段初期退水迅速，后期出现低枯水位，导致湖泊提前进入枯水状态；② 涨水阶段初期不能实现稳定涨水，导致枯水状态拖尾；③ 枯水阶段初期湖泊干枯程度加剧；④ 整体看来，4月与11月的偏枯趋向，加之水位5月的集中回升与10月的迅速回落，使鄱阳湖水文节律呈现洪旱

急转情势。

2.3 两阶段典型年水文节律对比

为进一步识别湖泊水文节律的显著变化,将两时段典型年(1981年与2011年)水位过程线进行对比,并绘制1951~2011多年日平均水位过程线作为参考(图7a)。从过程形态上,2011年湖泊水位陡涨陡落:5月末6月初稳定涨水;9月开始退水,虽月末有波动性水位复涨,但10月迅速退水情势十分明显。1981年则缓涨缓落:4、5月阶梯式涨水,水位回升迅速;10月开始稳定退水,水位缓慢下降,11月退水过程仍较稳定。总之,2011年与1981年相比,水位过程线明显呈“尖瘦”型,与1951~2011多年日平均水位相比,“尖瘦”趋势更为明显。其物理意义为,鄱阳湖枯水延长,涨水集中,退水迅速,水文节律呈洪旱急转情势。

此外,2011年与1981年日平均水位差(图7b)不仅验证了2003年后各月水位的显著涨落,其整体偏负的趋势,也揭示了鄱阳湖水情整体偏枯的走向。

3 水文节律变化与江湖水量交换

江湖水量交换的变化是鄱阳湖水文节律变化的重要原因之一^[6,11]。因此,我们通过星子水位与湖口流量关系的变化揭示水文节律变化的原因。

3.1 江湖交互作用的水位—流量关系

由图8可见,2003~2011年与1980~2002年,鄱阳湖水位—流量关系曲线均呈逆时针绳套型。表明2003~2011年湖泊水文节律较1980~2002年虽有显著变化,但其枯—涨—丰—退的基本模式并未改变。两时段水位—流量关系曲线在逆时针绳套关

系上叠加的波动有明显差异,表明在江湖交互作用改变的情况下,湖泊水文节律发生显著变化。

3.1.1 退水阶段水文节律与江湖水量交换

2003~2011年10月(图8a),水位—流量曲线近似正线性变化($R^2>0.85$),其物理意义为,湖水经湖口下泄,持续顺利汇入长江。故10月湖泊水位由高位迅速下降,水位变幅增大(图9a)。而1980~2002年同期(图8b),水位—流量关系部分呈线性变化,部分存在波动,其物理意义为10月既有下泄过程,亦有壅水过程。故水位变化幅度较小(图9a)。定义水位弹性为湖口流量每改变1 000 m^3/s ,星子水位变化的幅度。则10月水位弹性在2003~2011年为0.97 m,1980~2002年仅为0.25 m。

2003~2011年11月(图8a),水位—流量关系出现明显转折,由水位缓变而流量大减的缓变不稳定流,变为水位—流量正线性变化的相对稳定流,其物理意义为湖泊由迅速退水变为稳定退水。而1980~2002年同期(图8b),则表现为整体水位—流量正线性变化,其物理意义为湖泊保持稳定退水。故11月湖泊水位在2003~2011年变幅较小,而在1980~2002年变幅较大(图9b)。11月水位弹性在2003~2011年为0.11 m,1980~2002年则为0.72 m。

由此可见,2003~2011年,湖泊退水集中于退水阶段初期,即10月,期间湖泊向长江大流量持续汇流,导致水位较1980~2002年同期显著下降;2003~2011年11月,湖泊处于大幅泄水后的偏枯期,湖泊水位已降至偏枯水平,湖泊汇入长江流量因而减少,11月水位较1980~2002年同期亦有显著下降。

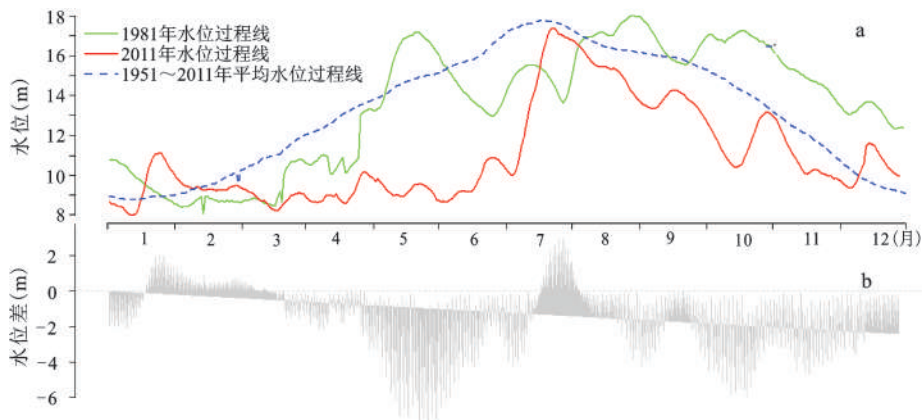


图7 1981年与2011年星子站水位过程对比

Fig. 7 The comparison of water level process between 1981 and 2011 at Xingzi Station

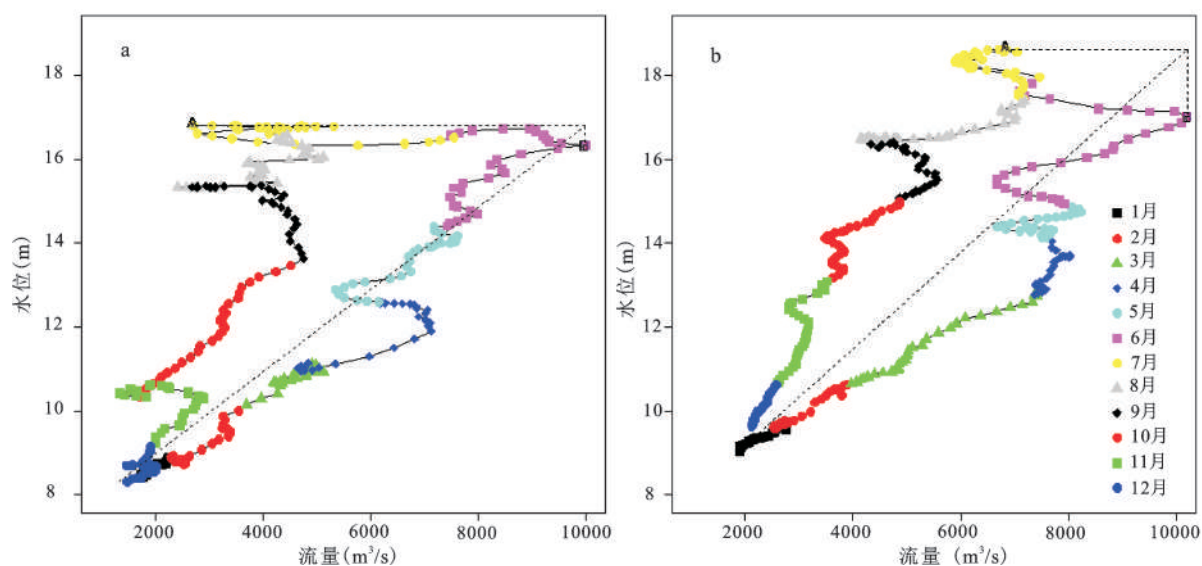


图8 2003~2011年(a)与1980~2002年(b)水位-流量关系对比

Fig. 8 The comparison of stage-discharge relation curve in 2003-2011 and 1980-2002

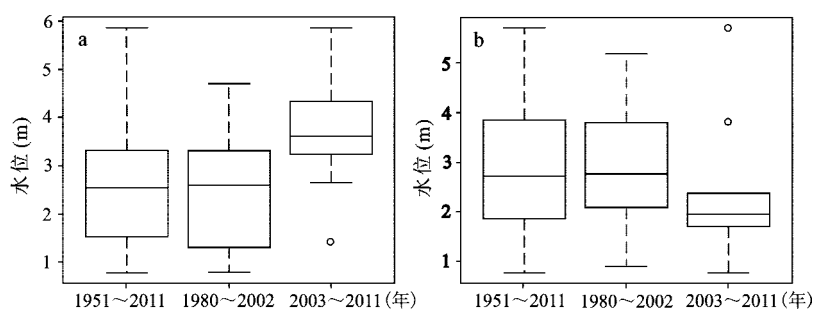


图9 10月(a)、11月(b)星子站月平均水位变化幅度

Fig. 9 Monthly water level amplitude of Oct. (a) and Nov.(b)

3.1.2 丰水阶段水文节律与江湖水量交换

2003~2011年6月下旬至9月上旬(图8a),水位-流量关系曲线近于水平,即水位始终较高,而流量变化极大,其物理意义为湖泊水位较长江干流仅略高甚至偏低,湖水下泄入江受阻,江湖长时间保持顶托-壅水甚至倒灌状态,使绳套曲线顶端拉平。而1980~2002年同期(图8b),水位-流量曲线近于水平的时段仅为6月下旬~6月末以及8月。而7月曲线存在明显转折变动。即湖泊丰水阶段前期、后期湖水下泄入江受阻;但部分时段湖水下泄顺利江湖作用状态为顶托、下泄交互出现。

3.1.3 水位-流量关系整体变化

稳定流的水位、流量近似形成水位-流量关系直线,实际水位-流量关系曲线对稳定流关系直线的偏移量,表征水文节律在江湖水交换量作用下的

改变程度。2003~2011年(图8a)涨水段水位-流量曲线相对于稳定流的右偏量较1980~2002年(图8b)同期右偏量减小,即相同水位情况下流量减少,尤其在3~5月。2003~2011年退水段水位-流量关系曲线相对于稳定流的左偏量也较1980~2002年减小,即相同水位情况下流量增大,尤其在10~11月。由此可见,2003年以来,在各月份水位-流量关系变化的共同作用下,鄱阳湖水位-流量逆时针绳套曲线整体呈现“顶端拉平,两翼收缩”趋势。该曲线形态的物理意义在于,鄱阳湖涨水段湖水顺利汇入长江而涨水缓慢,退水段湖水急速下泄入江而退水迅速,最终导致湖泊水文节律出现洪旱急转情势。

3.2 两时段湖口流量分配对比

湖口是鄱阳湖水汇入长江的唯一出口,从湖口流量的月、季分配比例可进一步验证江湖水量

表2 湖口流量月、季分配比例

Table 2 The annual discharge distribution for each month, season of Hukou Station

季节分配	月度分配	2003~2011		1980~2002		1951~2011	
		季	月	季	月	季	月
枯	12月		0.038		0.036		0.031
	1月	0.219	0.040	0.299	0.047	0.276	0.045
	2月		0.053		0.085		0.079
	3月		0.088		0.131		0.121
4月	0.115		0.125		0.143		
涨	5月	0.240	0.125	0.257	0.132	0.306	0.163
	6月		0.161		0.101		0.106
丰	7月	0.426	0.101	0.349	0.098	0.329	0.086
	8月		0.088		0.080		0.067
	9月		0.076		0.070		0.071
	10月		0.071		0.055		0.05
退	11月	0.115	0.044	0.095	0.040	0.089	0.035

交换对鄱阳湖水文节律变化的影响。

如表2所示,2003~2011年,湖口枯水、涨水阶段流量较1980~2002年同期均有下降;而丰水、退水阶段流量较1980~2002年均有上升。可见2003年以来,鄱阳湖退水阶段湖水下泄入江比例增大;而涨水阶段湖水下泄入江比例减少;枯水阶段湖水下泄入江比例亦有减少;丰水阶段下泄入江比例在此基础上有所增加。江湖水量交换的这种改变,促进了鄱阳湖水文节律向洪旱急转的情势发展。

4 结论

2003~2011年与1980~2002年相比,鄱阳湖水文节律发生显著改变,因涨、退水阶段水位均偏低,进而枯水阶段延长,同时促成丰水阶段的缩短。各水文期的变化综合表现为鄱阳湖水文节律洪旱急转的情势。

江湖水量交换对鄱阳湖水文节律的改变具有重要影响。2003~2011年退水阶段初期,湖水持续大量入江,湖泊水资源量锐减;以至退水后期,因湖体被拉空而汇入长江流量较常年减少;同时造成枯水阶段初期入江流量的减少;而涨水阶段,湖水亦顺利汇入长江而涨水缓慢,丰水阶段江湖水量交换则长时间因顶托作用而壅水甚至倒灌,湖水下泄入江受阻。由入江流量控制的水位过程,表明江湖水

量交换对鄱阳湖水文节律的改变具有重要作用。

参考文献:

- [1] Lenters J D. Long-term trends in the seasonal cycle of great lakes water levels[J]. Great Lakes Research, 2001, 27(3): 342-353.
- [2] Poff N L, Richter B D, Arthington A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biology, 2010, 55: 147-170.
- [3] 布东方, 胡金明, 周德民, 等. 不同水位梯度小叶章叶绿素含量试验研究[J]. 湿地科学, 2006, 4(3): 227-232.
- [4] 余莉, 何隆华, 张奇, 等. 三峡工程蓄水运行对鄱阳湖典型湿地植被的影响[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 134-144.
- [5] Thoms M C, Sheldon F. An ecosystem approach for determining environmental water allocations in Australian dryland river systems: the role of geomorphology[J]. Geomorphology, 2002, 47: 153-168.
- [6] 方春明, 曹文洪, 毛继新, 等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 175-181.
- [7] 郭华, Hu Q, 张奇, 等. 鄱阳湖流域水文变化特征成因及早涝规律[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 699-708.
- [8] Hu Q, Feng S, Guo H, et al. Interactions of the Yangtze River flow and hydrological processes of the Poyang Lake[J]. Journal of Hydrology, 2007, 347: 90-100.
- [9] 杨桂山. 长江水问题基本态势及其形成原因与防控策略[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(7): 821-830.
- [10] 戴志军, 李九发, 赵军凯. 特枯2006年长江中下游径流特征及江湖库径流调节过程[J]. 地理科学, 2010, 30(4): 577-581.

- [11] 孙 鹏,张 强,陈晓宏.鄱阳湖流域枯水径流演变特征、成因与影响[J].地理研究,2011,30(9):1702~1712.
- [12] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].上海:华中科技大学出版社,2005.
- [13] Gerstengarbe F W,Werner P C.Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime[J].Climate Research,1999,11:97-107.
- [14] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [15] 薛 毅,陈丽萍.统计建模与R软件[M].2006,北京:336~344.
- [16] 黄锡荃,李惠明,金伯欣.水文学[M].北京,1993:126~129.

Temporal Variation of Hydrological Rhythm in Poyang Lake and the Associated Water Exchange with the Changjiang River

DAI Xue^{1,2}, WAN Rong-rong¹, YANG Gui-shan¹, WANG Xiao-long¹

(1.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Watershed hydrological cycle has been changed along with the intensifying frequency of extreme water events due to the influence of climate change and human activities. Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, is a lake naturally connected with the Changjiang River. The complicated river-lake interactions impact the hydrological rhythm of lake, which will further influence water security associated with flood control, drinking water usage, water pollution and water ecology in the lake basin. In the case, it is of great importance for maintaining watershed water security to understand the characteristics of hydrological rhythm variation in terms of river-lake interactions. In this study, temporal variation of hydrological rhythm in Poyang Lake and the associated water exchange with the Changjiang River were analyzed based on the measured hydrological data of 4 gauge stations in Poyang Lake area along with other data from the Hukou station at the intersection between the Changjiang River and Poyang Lake in 1951-2011. The major findings are shown as follows: the span of dry season increased since water level remains low in November and April. Meanwhile, the span of flood season decreased in 2000s. The lower water level in rising season and retreating season make Poyang Lake rising later but falling earlier than they did in 1980-2002, thus shortening the conversion time of the lake from flood situation to dry situation. Further, the peak flow in the annual hydrograph has been shifted. The primary cause of hydrological rhythm variation is the water exchange between the main stream of the Changjiang River and Poyang Lake. In 2000s, changes in the water level of the Changjiang River altered the interaction between the river and Poyang Lake through the slope of water surface, disturbing the lake basin hydrological processes and resulted in disordering of hydrological rhythm in Poyang Lake. The increasing discharge from the lake to the river in retreating season lead to the lake enter dry season earlier. And the declining water level of Changjiang River in rising season lead to the addition of lake water continued to leak river, thus the lake rose slowly. For the reasons given above, the variation of water supplement of Poyang Lake on the Changjiang River mainstream in 2000s altered the hydrological rhythm in Poyang Lake. Results of this study improve our understanding of Poyang Lake hydrological rhythm consequences of river-lake relationship changes, and it provides knowledge for long-term planning for effectively restoring nature's innate rhythms for sustainability and productivity in the Poyang Lake Basin. In addition, the results will help further explore the coordinate and healthy river-lake relationships.

Key words: hydrological rhythm; river-lake water exchange; lake hydrologic regime; the Changjiang River; Poyang Lake