

近50年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化

郭 华¹, HU Qi², 张 奇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, 南京 210008;

2. School of Natural Resources, and Department of Earth and Atmospheric Sciences,
University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE68583-0987, 美国)

摘要:通过分析1957-2008年长江与鄱阳湖相互作用的基本特征及其与长江中游、鄱阳湖流域的径流量和气候变化的关系,并用2004-2006年三峡水库蓄水、放水量的数据,定量地计算和比较了三峡水库运行和区域气候变化对长江与鄱阳湖相互作用的影响程度,得出如下主要结论:1)从年际、年代际尺度上来看,鄱阳湖流域的气候变化和五河入湖流量是鄱阳湖水位和水量变化的主要因素,同时也在很大程度上决定了长江与鄱阳湖相互作用关系及其强弱变化。2)长江与鄱阳湖的相互作用强度是此消彼长的关系。从季节来看,鄱阳湖对长江的较强作用主要在4-6月,而长江对鄱阳湖的较强作用主要发生在7-9月。3)三峡水库运行并没有改变长江与鄱阳湖作用的基本特征,在多数季节三峡水库的影响不足以解释长江径流量变化的10%,但是水库在不同季节的蓄水或放水在一定程度上影响了江湖作用的季节变化和鄱阳湖流域的旱涝机率。4-6月的放水加强了长江作用,由于此时正值鄱阳湖流域的雨季,增强的长江作用在湿润气候的环境下可能增加初夏鄱阳湖流域发生洪涝的概率;7-9月的少量蓄水则减弱长江对鄱阳湖的作用,降低了湖区洪涝的概率;而10月份三峡水库的大量蓄水可能增加鄱阳湖流域的旱季干旱发生率。

关键词:长江;鄱阳湖;江湖作用;气候;三峡工程运行

长江与沿江湖泊的相互作用一直是人们关注的问题。研究江湖相互作用对于湖泊流域水循环、江湖洪旱灾害发生机制、控制入湖水和出湖水的水量 and 水质,以及湖泊水生态等都至关重要^[1-2]。但是由于涉及复杂的江湖动力学机制以及气候变化和人类活动等诸多影响因素,这方面的研究尚未深入开展。

在我国长江流域,鄱阳湖是重要通江湖泊之一,与长江进行着复杂的水文和水动力交互作用。认识长江与鄱阳湖相互作用及江湖关系的变化对保护鄱阳湖水资源和区域生态环境等具有重要理论价值。Hu等^[3]对长江与鄱阳湖相互作用的研究首次量化地描述了长江对鄱阳湖水量变化的影响。他们对于1960-2003年江湖作用的初步分析结果表明:鄱阳湖流域内五河水系的来水量是影响鄱阳湖水位以及造成洪水的主要原因,长江的顶托和倒灌作用是次要的;五河对鄱阳湖作用较强的时期是1970s和1990s,其中1990s是五河水系对鄱阳湖作用最强的时期,同时也是长江对鄱阳湖作用最弱的时期。造成这种江湖作用变化的主要原因是鄱阳湖流域及长江流域的春夏季降水的变化:例如1990s,由于华东主要雨带的分布

收稿日期:2010-11-23; 修订日期:2011-03-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX1-YW-08-01; KZCX2-YW-337); 中国科学院南京地理与湖泊研究所科学基金项目(NIGLAS2010XK02); 国家自然科学基金项目(40871026; 41001017); 美国农业部研究项目(NEB40-040) [Foundation: The Knowledge Innovation Projects of the Chinese Academy of Sciences, No. KZCX1-YW-08-01; No.KZCX2-YW-337; Science Foundation of Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, No.NIGLAS2010XK02; National Natural Science Foundation of China, No.40871026; No.41001017; US-DA Research Project, NEB40-040]

作者简介: 郭华 E-mail: hguo@niglas.ac.cn

通讯作者: 张奇 (1966-), 男, 研究员, 主要从事湖泊流域径流量和物质通量对气候变化和人类活动的响应机制研究。
E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

异常同时影响长江中上游和鄱阳湖流域,增大了鄱阳湖流域7-8月降雨量,使湖水位在前三个月高水位基础上进一步上涨^[3],加上此季节长江流量洪峰的到来,使鄱阳湖区发生严重洪涝灾害^[3-4]。

2003年之后三峡工程开始调度运行,它对长江年径流量的影响尚不明显^[4-5],但是增加了人为因素对长江流量季节变化的影响^[6-9],也因此影响江湖相互作用以及鄱阳湖水位、水量的季节变化。三峡水库运行后,前一年9-10月份蓄水,翌年5-6月上旬下泄,这种运行方式可能人为地加大5-6月长江流量,提前于5-6月造成江对湖的顶托作用,升高湖水位^[10];而9-10月的蓄水则减少了枯水期长江流量,增大了鄱阳湖向江的汇流,降低湖水位。Dai等^[11]研究了2006年三峡运行对长江流量的影响。结果表明,在2006年9月20日至10月27日长江大通站流量相对于2005年同期减少的54%中,有45%归因于2006年的干旱,9%归因于三峡运行。此外,输沙量的明显减少^[5-6, 12-14]也反映了三峡运行使长江径流量有所改变。三峡工程运行后的两年使长江输沙量减少了31%^[13]。由于输沙量与径流量呈正比关系^[5-6, 12-14],输沙量的减少指出三峡运行后长江径流量的减少。三峡工程运行后长江流量的变化势必造成长江与鄱阳湖相互作用的变化。

定量研究长江与鄱阳湖的水文相互作用和三峡运行的影响,以及由此造成的鄱阳湖水位、水资源的变化,对于鄱阳湖区域生态管理和经济发展具有重要意义。

在前期研究^[3]的基础上,本文首先分析了过去50多年(1957-2008年)长江与鄱阳湖径流量变化,进一步研究长江与鄱阳湖相互作用关系和变化,并通过分析2004-2006年长江与鄱阳湖相互作用变化的主要原因来区分气候变化和三峡运行各自对江湖作用的影响程度。

1 数据和方法

本文采用的水文数据是1957-2008年汉口、湖口(图1)及鄱阳湖五河水系出口站的日流量数据,以及用于计算三峡水库月放水和蓄水量的2004-2006年入库和出库日流量数据。以上水文数据来自长江水利委员会以及江西省水文局,并由他们进行了数据质量控制。降水量计算采用中国气象局国家气象信息中心气候资料室提供的1957-2008年日降水量数据,其中长江中游74个站点(图1)。该降水数据集由Feng等^[15]做了严格的数据质量控制。文中提到的“距平”是指相对于1957-2008年平均值的年变化量。相关性分析检验采用t-test方法。

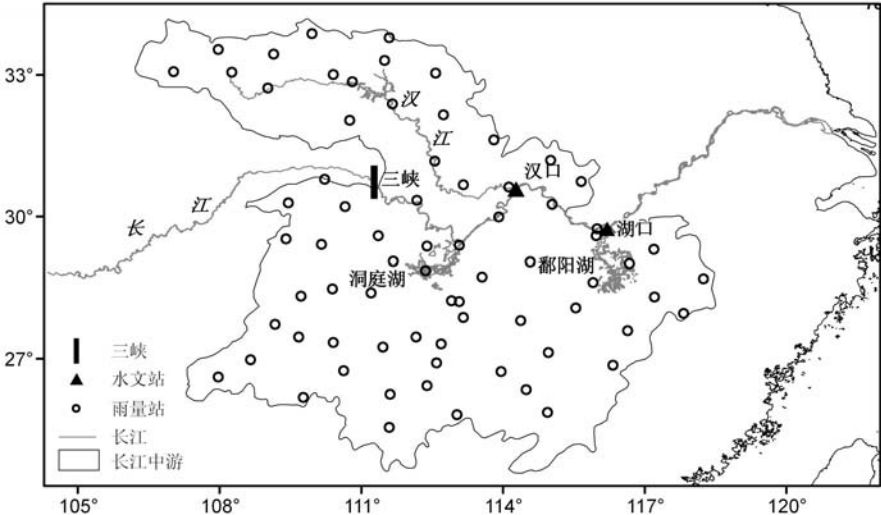


图1 长江中游雨量站及主要水文站分布图

Fig. 1 Geographical distribution of precipitation and hydrological stations in the middle Yangtze River Basin

长江对鄱阳湖的作用延用 Hu 等^[3]的方法来计算。同时根据 Hu 等^[3]的研究方法,我们用五河入湖总流量和湖口站流量定义了鄱阳湖对长江的作用,即当二者流量均大于 $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 时,鄱阳湖对长江产生较强的作用。该作用的物理意义在于五河水持续、大量地汇入鄱阳湖,注入长江,形成湖对江的强力作用。

根据以往的研究,4-6 月是鄱阳湖流域降水量最大以及五河(修水、赣江、抚河、信江和饶河)入湖总汇流量增速最大的季节^[16],7-9 月是长江中上游降水量较大且长江干流径流量最大的季节^[17],10 月到来年的 3 月为低水或枯水期。2003 年三峡水库蓄水运行后,水库在 10 月份的大量蓄水增加了枯水期长江和鄱阳湖的水量变化,因此我们分别研究 4-6 月、7-9 月和 10 月这三个时段的长江流量变化和长江与鄱阳湖相互作用的变化。并通过分析这些作用在三峡运行前后的变化来定量阐述三峡的影响。

研究三峡水库运行对长江和江湖作用的影响的一个理想的方法是滤除气候的影响。在实际计算中通常可用选择相似气候年份再平均的方法(composite analysis)。但由于三峡运行到现在仅有 7 年,而且近些年气候变化剧烈,很难找到降水相似的气候年份。气候差异较大的年份往往难以去除气候的影响,所以我们通过三峡蓄/放水量、长江中游相对于平水年的流量变化来分别计算气候变化和三峡工程运行的这 7 年里对长江流量和长江与鄱阳湖水文相互作用的影响程度。在研究三峡运行之后(2004-2008 年)三个季节时段(4-6 月、7-9 月和 10 月)长江中游流量变化及其与江湖作用变化的关系时,我们用百分位数(percentile)的方法确定三个季节时段的平水年,具体方法是:首先计算 1957-2002 年每年该季节平均径流量的百分位数,然后选出百分位数为第 50 ± 5 的年份,它们的平均径流量即为该季节的平水年的径流量。

2 长江与鄱阳湖相互作用特征及其变化

长江与鄱阳湖的相互作用表现在两个方面,一方面是长江对鄱阳湖的作用(以下简称长江作用),包括顶托和倒灌作用。较强的长江作用可使鄱阳湖水位升高;另一方面是鄱阳湖对长江的作用(以下简称鄱阳湖作用),当鄱阳湖向长江大流量地持续汇流,鄱阳湖作用增强,造成长江下游流量增加。

在 50 年的时间尺度里,长江作用的产生主要有两个原因:一是由于长江中上游降水量的增加,使长江流量增大,水位升高,对鄱阳湖产生顶托或倒灌作用;二是由于鄱阳湖流域五河水系上游来水减少,鄱阳湖干旱,湖水位降低,间接使长江水位升高,长江作用增强。

鄱阳湖作用的产生也有两个原因:一是鄱阳湖流域降水增加,五河水系流量增大,汇入鄱阳湖,使其水位升高,增加向长江的梯度力,从而产生较大流量汇入长江;二是长江中上游流量减少,长江中游干流水位下降,使鄱阳湖水位相对升高,产生较大流量汇入长江。

长江作用和鄱阳湖作用影响江一湖的水量交换强度。由于长江中上游流域和鄱阳湖流域有着不同的降水季节变化特征,长江作用和鄱阳湖作用随季节变化且相互影响,导致江、湖的水位和流量的季节变化和年变化。当两者都很强的时候,鄱阳湖的洪水概率增大;当两者都很弱的时候,鄱阳湖的干旱增强。这些江湖作用的季节变化在三峡水库的运行之后变得更加复杂。

2.1 长江与鄱阳湖作用的年际和年代际变化特征

从近 50 年(1957-2008 年)长江对鄱阳湖的作用强度来看,整体呈减弱趋势,但存在较为明显的年代际波动(图 2)。图 2a 中实心圆标注长江对鄱阳湖作用较强的年份,空心圆标注长江对鄱阳湖作用较弱的年份,由此图可知:长江对鄱阳湖作用有两个的较强时期:1950s 末至 1960s 末和 1980s 初至 1990s 初。这两个时期长江流量较大而鄱阳湖地区较为干旱,五河入湖流量较少(图 2b),相对增强了长江作用。图 2a 也指出长江对鄱阳湖作用较弱的两个时

期：1960s 末至 1970s 末和 1990s 初至 2000s 初。这两个时期长江流量较小，五河入湖流量较多（图 2b 中阴影部分），鄱阳湖对长江作用较强。这些结果指出长江与鄱阳湖的相互作用强度在年代际尺度上有一个此消彼长的关系，而这个关系与长江中上游和鄱阳湖流域的降水的年代际变化密切相关。此外，如图 2 所示，三峡水库初期运行后（2003-2008 年），江湖相互作用频率变化基本保持原有的变化规律，表示三峡水库运行对江湖作用的影响相对于气候的影响来说并不明显。

2.2 长江与鄱阳湖作用的
季节变化特征

从 1957-2008 年的长江作用和鄱阳湖作用的日累计次数季节特征来看（图 3），长江作用主要发生在 7-9 月，而鄱阳湖作用主要在 4-6 月。1957-2008 年 4-6 月鄱阳湖作用总频数共为 1117 次，而长江作用频数仅为 66 次。

与 4-6 月的频率形式相反，7-9 月长江作用总频数为 1030 次，而鄱阳湖作用的频数为 226 次。10 月-3 月的长江和鄱阳湖的作用都明显减弱，但是相对而言，10 月份的长江作用强于鄱阳湖作用，而 12-3 月的鄱阳湖作用强于长江作用。

以上江湖作用特征与该地区的年降水分布有密切关系，而年降水分布规律又与东亚夏季季风的迁移规律密切相关。根据夏季季风的季节进退规律^[18-19]，5-6 月季风锋面在长江以南，降水集中在长江以南，影响鄱阳湖流域，流域内五河入湖流量迅速增加，达到年最大值。此期间鄱阳湖向长江的汇流作用最大，增强鄱阳湖作用。7-8 月季风锋面移到长江以北，长江中上游降水量增大，汇流量增大，从而使长江作用增强。9 月之后季风锋面又返回到长江以南，但是强度明显减弱。

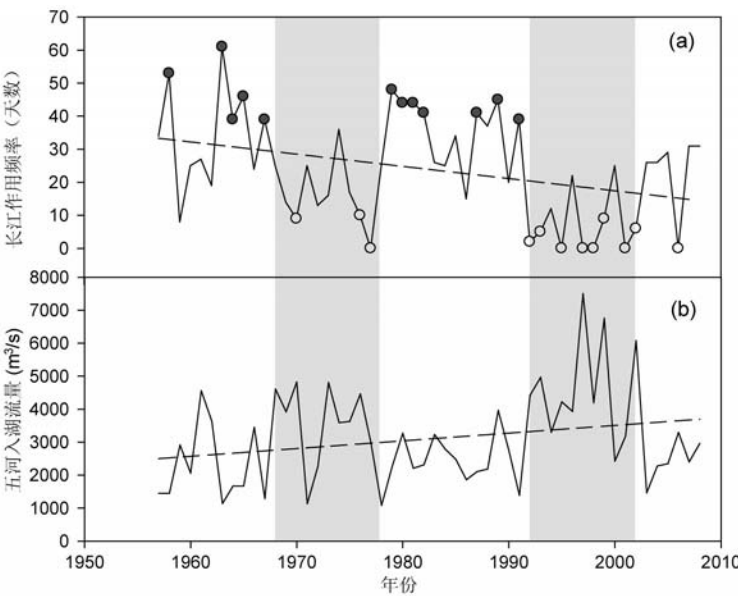


图 2 1957-2008 年每年长江对鄱阳湖作用较强的天数(a) 和五河入湖流量的年际变化(b)

Fig. 2 (a) Variation in the number of days of a year when the Yangtze River had strong effects on the Poyang Lake, and (b) variation in the total discharge from the Poyang Lake basin to the lake during 1957-2008

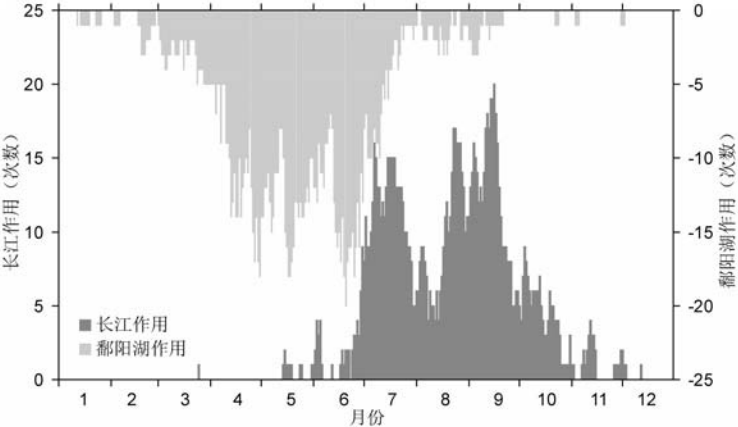


图 3 1957-2008 年长江与鄱阳湖作用的频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of the Yangtze River effect (dark shading) and the Poyang Lake effect (light shading) averaged for the period 1957-2008

3 长江与鄱阳湖的流量变化与江湖作用的关系

长江与鄱阳湖流量的变化主要受区域气候的影响^[3, 14, 16-17],而区域气候又是较大背景下气候变化的缩影。长江中游降水量与径流量的相关性较好,以长江作用较强的季节 7-9 月为例,二者的相关系数为 0.6,通过了 95%的置信度检验。长江中游降水量的变化在很大程度上影响着其径流量变化,预测长江中游降水对预测长江对鄱阳湖的作用有直接的意义。

图 4a-b 分别是长江作用较强和鄱阳湖作用较强的年份长江流域的降水距平分布,其目的是通过进一步比较长江中游和鄱阳湖流域的区域降水特征(与周边和其它区域的不同),来分析江湖作用发生变化时长江中游和鄱阳湖流域降水量的相对变化(图 4),以此来描述区域气候变化在影响江湖相互作用中的重要性。

在长江作用较强的两个时期,1950s 末至 1960s 末和 1980s 初至 1990s 初(图 2a),鄱阳湖流域 7-9 月降水量偏少(图 4a),五河入湖流量偏少(图 2b,图 5b)。同时期,长江中游降水偏多(图 4a 与文献[14]中的图 5b 的结果一致)。长江干流汉口站的同期平均流量高于 50 年平均流量(图 5a)。因此这两个时期的长江作用增强是鄱阳湖流域降水减少导致五河入湖流量减少,以及长江中游降水增加导致长江流量增大的综合结果。

在鄱阳湖作用较强的时期,1960s 末至 1970s 末和 1990s 初至 2000s 初,鄱阳湖流域 7-9 月的降水量高于 1957-2008 的平均(图 4b),五河入湖的汇流较大(图 2b,图 5b),导致鄱阳湖流域水位升高。而同期长江中游的降水偏少(图 4b),汉口站同期的平均流量低于 50 年平均流量(图 5a),长江对鄱阳湖作用较弱。此时期鄱阳湖对长江作用很强。

从上述长江中游与鄱阳湖流域的 50 年径流量变化特征与江湖作用的关系来看,江湖作

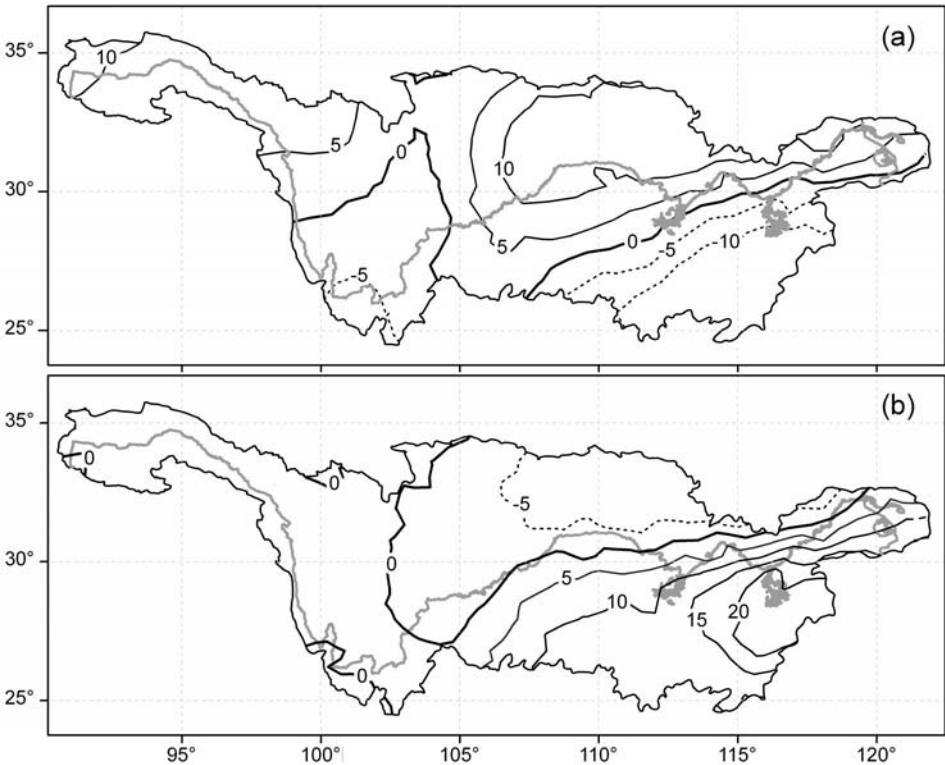


图 4 长江作用强的年份(a)和鄱阳湖作用强的年份(b)的 7-9 月降水量距平 (1957-2008 年降水量的百分比)
Fig. 4 Summer precipitation anomalies for (a) the years with strong Yangtze River effect, and (b) the years with strong Poyang Lake effect (percent of the 1957-2008 annual mean precipitation)

用强弱的变化是鄱阳湖流域流量和长江流量相对变化的反映,如此变化的主要原因是鄱阳湖流域降水量与长江中上游的相反的分布格局所造成。

分析长江中游流量、鄱阳湖流域汇流量变化及其与江湖作用的关系(图2),我们认为从年代际尺度上来看,鄱阳湖流域的五河入湖流量是鄱阳湖水位和水量变化的主要因素,同时也在很大程度上决定了长江与鄱阳湖相互作用关系及其强弱。

但是当鄱阳湖流域较干的时候,长江中游的流量变化对江湖作用的影响就变得比较重要。特别是2003年后,鄱阳湖流域连年干旱,三峡水库运行通过调节长江中下游季节流量,进而影响到长江与鄱阳湖的相互作用的强度和频率。

4 2003年后江湖作用的季节变化以及气候和三峡水库的影响

2003年三峡水库运行后,水库通过调节长江中下游季节流量直接影响江湖作用和鄱阳湖的水位,这些影响叠加在气候变化的影响上使得江湖作用更加复杂。这里,我们首先分析三峡水库运行后(2004-2008年)长江中下游流量和鄱阳湖水量收支相对于历史平水年的变化,之后进一步定量分析三峡水库和气候对这些总体变化的分别贡献。这些结果对理解三峡水库对江湖作用的影响和预测鄱阳湖区域的旱涝变化都有重要参考价值。

如表1所示,相对于1957-2008期间的平水年(1961、1963、1980、1985、1991和1994年),2004-2008年4-6月长江中游降水量减少了8.1%。虽然该季节是长江三峡的放水期,但汉口站流量仍然减少了7.3%,与此同时,长江作用频率减少了20%。

鄱阳湖流域2004-2008年4-6月的平均降水量与平水年同期的平均降水量非常接近,但是五河入湖径流量减少了4.8%。这与近年土地覆被变化以及湖区用水量的增加有关。比如,1950s-1970s,由于政治环境、基础设施建设以及农业发展的需求,鄱阳湖流域曾出现毁林种田现象,造成严重水土流失。1980s-1990s尽管森林覆盖率上升,但是植被单一,针叶林比例过高,植被的年龄结构年轻化,同时出于建设需要,大量砍伐林木的情况仍有发生^[20]。近年来由于成熟林面积的增大以及人们对水土流失问题的重视,下垫面条件得到改善,地表径流量有所减少^[21]。另外,鄱阳湖流域的人口密度的增加(由1970s年代的1千万到2000年的4千万),使用水量大幅度增加。上述因素的综合影响使在相同降水量的气候条件下五河入湖的流量减少。五河入湖径流量减少,很大程度上导致鄱阳湖作用频率的减少:相对于平水年减少了5.4%。

2004-2008年7-9月与平水年同期的长江中游平均降水量大致相同,但汉口流量减少了

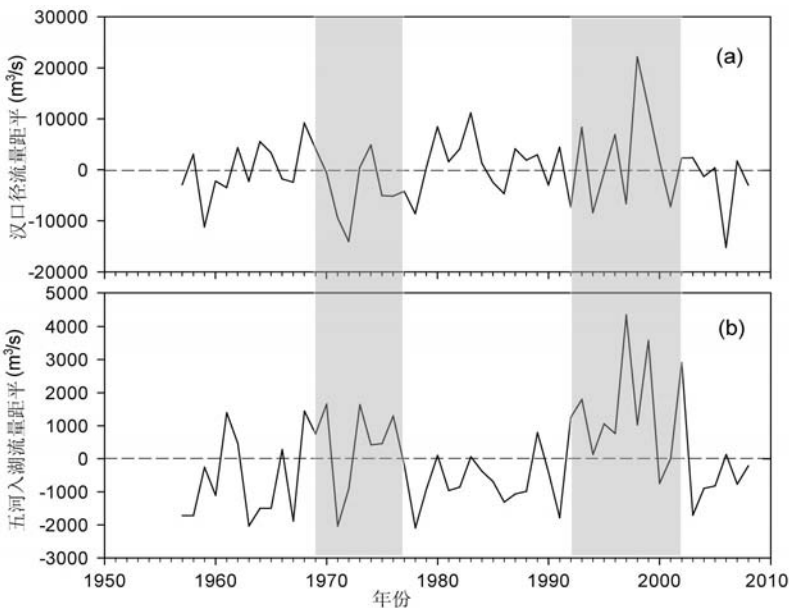


图5 1957-2008年长江汉口站(a)和鄱阳湖流域五河入湖(b)7-9月流量距平
Fig. 5 Variations of anomalies of July-September discharge of the Yangtze River at Hankou station (a), and inflow from the 5 sub-river basins to the Poyang Lake (b) during 1957-2008

10.8%,造成这种变化的重要原因之一是9月份三峡水库蓄水。但此变化对长江作用频率影响不大,因为7-9月虽然长江对鄱阳湖作用强度有所减弱,但频数总体并未减少。同期鄱阳湖流域降水量减少,五河入湖径流量减少了21%,使得鄱阳湖作用频率大幅度减少,变化率为-84%(表1)。

2004-2008年10月长江中游平均降水量减少,加之该季节三峡水库较大幅度的蓄水,汉口站径流量锐减,幅度在20%以上。长江作用频率也明显减弱,减少了90%(此百分比与小基数有关),比长江作用最弱的1990s的强度还要小。同时,鄱阳湖流域降水量和五河入湖流量也分别比平水年减少了14%和23%,但是鄱阳湖作用频率未有明显变化(表1)。在长江作用频率大幅度减少的情况下,鄱阳湖作用频率一般会有所增大,但是由于五河入湖流量也在减少,这种相互抵消作用使得鄱阳湖作用频率变化不大。

相对于4-6月和7-9月而言,10月份的降水量变化明显增大(长江中游和鄱阳湖流域降水量分别减少30%和14%),加上10月份的大幅度的水库蓄水,使得长江作用频率明显减少。

如前所述,长江作用集中发生在7-9月,鄱阳湖作用集中在4-6月。三峡工程运行之后,总的来说,4-6月以放水为主。三峡放水造成的中游长江流量的增加可导致4-6月长江作用增强,但我们的分析结果指出,2004-2008年4-6月长江和鄱阳湖作用的频率均略低于平水年同期的频率。7-9月三峡少量蓄水,减少长江流量,但2004-2008年7-9月长江作用与平水年的同期作用频率相同或略高(表1),鄱阳湖作用频率显著减少(-84%,见表1)。进入10月份后,三峡水库大量蓄水(为全年最大的蓄水月),长江作用频率减少幅度最大。2004-2008年10月份长江流量以及长江与鄱阳湖相互作用的变化与三峡水库蓄水影响相一致,而在4-6月则并未表现出三峡水库放水的影响。这些看似矛盾的结果实质上指出区域气候变化对江湖相互作用有着重要影响。在表1的结果中可得到这些定性的气候影响特征。比如,4-6月长江中游2004-2008年的平均降水量比平水年减少40 mm,造成长江流量减少。此时虽然三峡水库放水,但不足以平衡降水量减少的影响,造成长江流量减少,对鄱阳湖的作用减弱。

为进一步定量地认识气候变化的影响,我们对2004-2006三年的气候和三峡水库运行在不同季节对长江作用的影响分别进行分析(表2)。可以看到2004年4-6月长江径流变化率为-0.9%,其中气候影响为-1.2%,三峡水库放水使径流量增加,影响比率为0.3%。这些结果表明2004-2006年气候因素对长江径流和长江作用的变化起了主要影响,而三峡放水的影响是次要的。

进一步的分析得到,2005年4-6月长江径流量增加了5.5%,气候影响比率为4.9%,三峡放水影响比率为0.6%。2006年4-6月相对于2004-2005年长江径流量变化幅度较大:径流量

表 1 长江中游和鄱阳湖流域年内降水量、径流量和长江与鄱阳湖相互作用频率相对于平水年的变化

Tab. 1 Anomalies of precipitation in the middle Yangtze River and the Poyang Lake basin, discharge at Hankou station, and the inflow from the lake basin to the Poyang Lake, averaged over 2004–2008. The anomalies are relative to the average flow years (shown in the third column). The last two rows in each period show the Yangtze River forcing and the Poyang Lake forcing change averaged for 2004–2008 from that of the average flow years

季节	变量	平水年	2004-2008 年	变化率 (%)
4-6 月	长江中游降水量 (mm)	492	452	-8.1
	汉口站流量 (m³/s)	23595	21861	-7.3
	鄱阳湖流域降水量 (mm)	659	665	0.9
	五河流量总和 (m³/s)	6355	6050	-4.8
	长江作用频率 (次/年)	2.5	2	-20
	鄱阳湖作用频率 (次/年)	22.2	21	-5.4
7-9 月	长江中游降水量 (mm)	409	410	0.2
	汉口站流量 (m³/s)	38242	34112	-10.8
	鄱阳湖流域降水量 (mm)	371	354	-4.6
	五河流量总和 (m³/s)	3362	2655	-21
	长江作用频率 (次/年)	19.7	19.8	0.5
	鄱阳湖作用频率 (次/年)	5	0.8	-84
10 月	长江中游降水量 (mm)	77	54	-29.9
	汉口站流量 (m³/s)	25786	20364	-21
	鄱阳湖流域降水量 (mm)	44	38	-13.6
	五河流量总和 (m³/s)	1458	1129	-22.6
	长江作用频率 (次/年)	2	0.2	-90
	鄱阳湖作用频率 (次/年)	0	0	0

减少 7.7%,其中气候影响为-8.4%,而三峡放水使流量增加但影响较小,影响比率为 0.7%。

对于 7-9 月来说,三峡水库少量蓄水,特别是 2006 年为使蓄水位达到 156 m,9 月份提前蓄水,月平均蓄水量达到 1245 m³/s。2004-2005 年三峡对径流量的影响很小,主要是气候对长江中游径流量的影响。2006 年由于 9 月份的蓄水使径流量大约减少了 1.1%,由于气候干旱则使径流量减少约 40.4%。

10 月份三峡水库大量蓄水,对长江径流量的影响比重有明显增加。2004 年 10 月径流量减少了 10.3%,其中干旱气候的贡献率为-8.2%,三峡蓄水贡献率为-2.1%。2005 年径流量增加了 3.3%,气候影响比率为 4.6%,而三峡蓄水使流量减少,影响比率为-1.3%。2006 年 10 月是蓄水比较大的月份,月平均蓄水量为 2749 m³/s。长江径流量相比 2004 和 2005 年而言,有大幅度的减少,减少了 49.2%,其中气候影响占到-38.5%,而三峡蓄水影响也比 2004-2005 年增大很多,达到-10.7%。

综上所述,三峡水库初期调度运行对长江流量的影响较小,只有在 10 月份较强蓄水时的影响较大,特别是 2006 年 10 月对径流量变化的影响比率达到-10.7%。即使是这样都远比气候的影响小得多。所以,我们可以认为三峡水库的运行并没有改变长江与鄱阳湖作用的基本特征,即 7-9 月仍然是长江对鄱阳湖作用较强的季节,而 4-6 月是鄱阳湖对长江作用较强的季节。10 月份的大量蓄水对减少长江流量有较显著的影响,使得 10 月份长江对鄱阳湖的作用频率有明显减弱。

5 结论与讨论

通过分析 1957-2008 年长江与鄱阳湖相互作用的基本特征及其与长江、鄱阳湖流域的径流量变化的关系,并利用 2004-2006 年三峡水库放水、蓄水量的数据,定量地计算和比较了三峡水库运行(蓄水/放水)和区域气候变化分别对长江与鄱阳湖相互作用的影响程度,我们得出如下主要结论:

- (1) 长江与鄱阳湖的相互作用强度是此消彼长的关系。例如:1980s 是长江(对鄱阳湖的)作用最强的时期,也是鄱阳湖(对长江的)作用最弱的时期,而 1990s 是长江作用最弱的时期,也是鄱阳湖作用最强的时期。造成如此变化的主要原因是长江中上游与鄱阳湖流域降水量的相反的分布格局。通过长江中游流量、鄱阳湖流域汇流量变化及其与江湖作用的关系的分析,我们认为从年代际尺度上来看,鄱阳湖流域的五河入湖流量是鄱阳湖水位和水量变化的主要因素,同时也在很大程度上决定了长江与鄱阳湖相互作用关系及其强弱。
- (2) 从季节来看,长江作用主要发生在 7-9 月,而鄱阳湖作用集中在 4-6 月。这种相互作用的形式与东亚夏季季风的迁移规律吻合,与长江中游和鄱阳湖流域降水强度的此消彼长的特征相对应,说明该江湖作用的基本特征主要受气候的影响。
- (3) 三峡水库初期运行之后,气候变化和三峡水库调度同时影响径流量,进而影响长江与鄱阳湖相互作用频率。三峡放水和蓄水的量在年尺度上是平衡的,它是通过季节性的调节来影响主要由区域气候变化驱动的江湖作用的频率和强度。三峡水库运行对长江径流量的影响较小,并没有改变长江与鄱阳湖作用的基本特征,即 7-9 月仍然是长江作用较强的季节,而 4-6 月是鄱阳湖作用较强的季节。2004-2008 年 4-6 月和 7-9 月长江与鄱阳湖相互作用

表 2 2004,2005 和 2006 年气候和三峡运行对长江中游径流量的影响(相对于平水年)

Tab. 2 Climate and the Three Gorge Dam effects on the discharge variations of the middle reaches of the Yangtze River in 2004, 2005 and 2006

年	月	径流变化率 (%)	气候影响 (%)	三峡影响 (%)
2004	4-6	-0.9	-1.2	0.3
	7-9	-5.1	-5.0	-0.1
	10	-10.3	-8.2	-2.1
2005	4-6	5.5	4.9	0.6
	7-9	-0.7	-0.6	-0.1
	10	3.3	4.6	-1.3
2006	4-6	-7.7	-8.4	0.7
	7-9	-41.5	-40.4	-1.1
	10	-49.2	-38.5	-10.7

频率的变化主要是长江中上游或鄱阳湖流域降水量变化所引起的长江中游径流量或五河水系入湖径流量的变化。总的来说三峡水库的初期运行对长江中游径流量及长江与鄱阳湖相互作用变化的影响虽然并不明显,在多数季节三峡水库的影响不足以解释径流量变化的 10%,但是它在湿季和旱季对江湖作用的调节改变了洪水和干旱风险。如 2006 年 9 月较大幅度的水库蓄水使该年 7-9 月三峡水库的影响较 2004 和 2005 年有所提高。10 月份,由于三峡水库大量蓄水,长江流量的减少较为明显,使长江作用明显减弱。

三峡水库的初期运行对长江中游径流量及长江与鄱阳湖相互作用变化的影响虽然并不明显,但是在特殊年份,如 2006 年 9 月底至 10 月底气候干旱和三峡水库大量蓄水的共同作用严重加剧了干旱的程度^[11]。三峡 5、6 月份放水在春季较湿的特殊年份也有可能增加初夏的洪涝的机率。另外三峡水库运行对径流量的影响可能会放大地反映在输沙量的变化上,而输沙量的减少会加剧河岸侵蚀,并使长江三角洲逐渐退化,进而影响到三角洲海岸带生态系统^[5-6, 12-14]。

参考文献 (References)

- [1] Killworth P D, Carmack E C. A filling-box model of river-dominated lakes. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(2): 201-217.
- [2] Carmack E C, Gray C J, Pharo C H et al. Importance of lake-river interaction on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(4): 634-644.
- [3] Hu Q, Feng S, Guo H et al. Interactions of the Yangtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China. *Journal of Hydrology*, 2007, 347: 90-100.
- [4] Xiong L, Guo S. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station. *Hydrological Sciences Journal*, 2004, 49: 99-112.
- [5] Zhang Q, Chen G, Su B et al. Periodicity of sediment load and runoff in the Yangtze River Basin and possible impacts of climatic changes and human activities. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(2): 457-465.
- [6] Chen X, Zong Y, Zhang E et al. Human impacts on the Changjiang (Yangtze) River Basin, China, with special reference to the impacts on the dry season water discharges into the sea. *Geomorphology*, 2001, 41: 111-123.
- [7] Chen X, Zhang E, Xu J. Large and episodic decrease of water discharge from the Yangtze River to the sea during the dry season. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(1): 41-47.
- [8] Yang S L, Gao A, Hotz H M et al. Trends in annual discharge from the Yangtze River to the sea (1865-2004). *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 825-836.
- [9] Varis O, Vakkilainen P. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st century. *Geomorphology*, 2001, 41: 93-104.
- [10] Hu Xiyang, Zhu Hongfu. Three-Gorge Project and flood protection of important city in the Poyang Lake district. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Sciences Edition*, 1998, 22(4): 365-370. [胡细英, 朱宏富. 三峡工程与鄱阳湖区重要城市防洪. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 1998, 22(4): 365-370.]
- [11] Dai Z, Du J, Li J et al. Runoff characteristics of the Changjiang River during 2006: Effect of extreme drought and the impounding of the Three Gorges Dam. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L07406.
- [12] Yang S L, Zhang J, Zhu J et al. Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: F03006.
- [13] Yang S L, Zhang J, Xu X J. Influence of the Three Gorges Dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications, Yangtze River. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L10401.
- [14] Zhang Q, Jiang T, Gemmer M et al. Precipitation, temperature and runoff analysis from 1950 to 2002 in the Yangtze Basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(1): 66-80.
- [15] Feng S, Hu Q, Qian W. Quality control of daily meteorological data in China (1951-2000): A new dataset. *International Journal of Climatology*, 2004, 24: 853-870.
- [16] Guo Hua, Jiang Tong, Wang Guojie et al. Observed trends and jumps of climate change over Lake Poyang Basin, China: 1961-2003. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(5): 443-451. [郭华, 姜彤, 王国杰 等. 1961-2003 年间鄱阳湖流域气候变化趋势及突变分析. *湖泊科学*, 2006, 18(5): 443-451.]
- [17] Hu Q. Centennial variations and recent trends in summer rainfall and runoff in the Yangtze River Basin, China. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15 (suppl.): 97-104.
- [18] Qian W, Lee D. Seasonal march of Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 1371-1386.

- [19] Wang B, Lin Ho. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *Journal of Climate*, 2002, 15: 386-397.
- [20] Hu Xiyang. Ecological and environment changes in the Poyang Lake basin in the last century. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Sciences Edition*, 2001, 25(2): 175-179. [胡细英. 鄱阳湖流域近百年生态环境的演变. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 25(2): 175-179.]
- [21] Guo H, Hu Q, Jiang T. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2008, 355: 106-122.

Changes in Hydrological Interactions of the Yangtze River and the Poyang Lake in China during 1957–2008

GUO Hua¹, HU Qi², ZHANG Qi¹

(1. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, CAS, Nanjing 210008, China;*

2. *School of Natural Resources, and Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68583-0987, USA)*

Abstract: Interaction of the Yangtze River and the Poyang Lake strongly affects the Poyang Lake water resources and flood and drought potentials in the lake basin. This interaction and its variation are examined in this study for the period 1957-2008. In addition, changes in the relationship between the Yangtze River and Poyang Lake after the operation of the Three-Gorge Dam (TGD) are evaluated using the TGD operation data available for 2004-2006. Major findings are shown as follows. 1) At interannual to decadal timescales the variation in the Poyang Lake water level is primarily determined by fluctuations of the climate and the inflow from the five major tributaries in the lake basin. By influencing the lake level these fluctuations also affect the lake-river interaction. 2) At the seasonal timescale, the Poyang Lake has the largest outflow to the Yangtze River and exerts a strong pressure on the mainstream during April-June, when the lake receives annual peak inflow from its tributaries. The Yangtze River's blocking and/or reversed flow to the Poyang Lake are the strongest during July-September. 3) The operation of the TGD has changed little in terms of seasonal variations of these lake and river forcings. In most of the seasons, the influence of the TGD has resulted in less than 10% of the variation in the Yangtze River flow. However, by damming or releasing water, the TGD can result in seasonal changes in the Yangtze River flow and river-lake interactions. These subtle effects from the TGD operation are quantified and compared to the climate effect on the river-lake interactions. These comparisons show enhancement in some seasons while weakening in the other seasons of the climate effect on river-lake interactions and flood or drought potential in the lake basin by the TGD operation.

Key words: Yangtze River; Poyang Lake; river-lake interactions; climate; the Three-Gorge Dam