

The Influence of Typical Lake Current on the Outflow of Poyang Lake

Qianlin Ouyang¹, Wuwei Si¹, Peng Xie¹, Zhongwen Yu²

¹Poyang Lake Hydrology Bureau of Jiangxi, Jiujiang Jiangxi

²Hydrology Bureau of Jiangxi, Nanchang Jiangxi

Email: 422562357@qq.com

Received: Sep. 18th, 2019; accepted: Nov. 12th, 2019; published: Nov. 19th, 2019

Abstract

Poyang Lake is the largest freshwater lake in China, and its water situation is affected by both lake inflow flood and Yangtze river flood. In this paper, the measured discharge of Xingzi station is used to represent the outflow of Poyang Lake, and the influence of typical lake current on outflow is discussed. The conclusions are as follows: 1) Under different lake current patterns, the main factors affecting the change of lake flow or the contribution degree of each factor is different. 2) In gravity flow, the main factor affecting the change of the discharge of Poyang Lake is the inflow. When the fall between the water level of Xingzi Station and that of Hukou Station is greater than or equal to 0.10 m, the lake discharge can be calculated by the inflow and the water level of Xingzi Station. 3) Under the condition of the water jacking of the Yangtze River, the main factors affecting the change of the discharge of Poyang Lake varies with the different water levels of the Yangtze River. When the discharge of Jiujiang station is less than 50,000 m³/s or more than 60,000 m³/s, there is a good correlation between the discharge difference between Datong Station and Jiujiang Station and the inflow into the lake. 4) In the case of the backflow of the Yangtze River on Poyang Lake, the main factors affecting the outgoing flow of Poyang Lake are the amount of water coming from the Yangtze River and the level of Poyang Lake. There is a good relationship between the discharge accumulations of Jiujiang station and the lake discharge accumulations.

Keywords

Poyang Lake, Lake Discharge, Lake Current, Influencing Fact

典型湖流对鄱阳湖出湖实测流量影响研究

欧阳千林¹, 司武卫¹, 谢 鹏¹, 喻中文²

¹江西省鄱阳湖水文局, 江西 九江

²江西省水文局, 江西 南昌

Email: 422562357@qq.com

作者简介: 欧阳千林(1987-), 男, 江西九江人, 大学本科, 主要从事水文监测及流域水文研究。

收稿日期：2019年9月18日；录用日期：2019年11月12日；发布日期：2019年11月19日

摘要

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊，水情情势受入湖洪水和长江洪水共同影响，具有独特水文特征。本文以星子断面实测流量成果代表鄱阳湖出湖流量，探讨各典型湖流对出湖流量影响。得到结论如下：1) 不同湖流形态下，影响出湖流量主要因素或各因素贡献度不同；2) 重力流下，影响鄱阳湖出湖流量变化的主要因素是五河来水量，且出湖流量大小能够利用湖区水位高低来反映，且当星子水位与湖口水位落差大于等于0.10 m时，可通过入湖流量及星子水位来计算出湖流量；3) 顶托流下，影响鄱阳湖出湖流量变化主要因素受长江水量级别不同而发生变化，当九江流量小于50,000 m³/s或大于60,000 m³/s时，出湖流量与大通站与九江站流量差值、入湖流量存在较好相关关系；4) 倒灌流下，影响鄱阳湖出湖流量主因是长江来水量大小和鄱阳湖水位多少，倒灌期间九江流量变化累积效应能够很好的反映出湖流量累积效应的变化。

关键词

鄱阳湖，出湖流量，湖流，影响因素

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊，上承赣江、抚河、信江、饶河、修水等五河来水，经湖盆调蓄后，于湖口注入长江。鄱阳湖又是一个季节性、吞吐性湖泊，具有独特水文特征[1]，且根据流势、流向和江湖水文关系可将吞吐流分为重力型、顶托型和倒灌型3种湖流类型[2] [3]，而分型主因又是长江与鄱阳湖相互作用。当长江水量较小且水位较鄱阳湖低时，长江对鄱阳湖出湖流量影响较小，此时出湖流量大小与水面比降和过水断面形状关系较为密切，故表现为重力型湖流；但在江西五河汛末，长江进入主汛期期间，五河来水量减少，长江水量急剧上升，长江对鄱阳湖出湖流量影响逐渐增大，根据长江对鄱阳湖作用程度又分为顶托型和倒灌型两种流态[4]。

长江与鄱阳湖的关系复杂多变，在年内、年际上均有着规律性变化。在年内上，专家认为[5] [6] [7]认为江西“五河”的来水量是影响鄱阳湖水位和水量变化主要因素，且江湖相互作用强度呈此消彼长的关系；在年际上，三峡水库的运行对枯水期江湖关系产生较大影响[8] [9] [10]，长江对鄱阳湖出流影响有所弱化，鄱阳湖出湖流量更加通畅，重力型湖流天数显著增多，顶托型和倒灌型湖流天数显著减小。

在影响因素较为单一的河道中，往往利用水位流量关系来反映河道内流量实时变化过程[11] [12]。而对于水情条件极其复杂的鄱阳湖，出湖流量的大小，特别是在顶托期和倒灌期，难以用水位的变化实时来反映流量的变化。如游海林[13]等利用最小二乘法尝试建立湖口水位流量关系，拟合精度较差，达不到获取准确出湖流量的精度要求；若利用整编技术来拟合出湖流量，往往需要高密度监测频次才能够达到精度要求。为准确、快速获取鄱阳湖出湖流量过程，需根据鄱阳湖水情特点，分别阐述重力流、顶托流、倒灌流对鄱阳湖出湖流量影响，同时为尽量减少定线产生的误差影响，应采用实测成果进行分析。

为更好的利用实测成果进行分析，鄱阳湖水文局根据《水利部鄱阳湖水资源水生态环境研究开放基金

(ZXKT201706)》项目需求,于2015~2018年在星子基本断面开展流量测验工作,同步收集江西省水文局关于五河水情整编成果资料,探讨典型湖流对鄱阳湖出湖实测流量影响,尝试建立出湖流量演算模型,为湖泊流量监测、水位流量关系、水资源量计算、水量平衡分析提供一定的技术支持。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域与数据获取

本文研究区域为“五河”控制站(外洲、李家渡、梅港、虎山、渡峰坑、虬津、万家埠)以下,湖口断面以上约2.5万 km^2 区域(见图1)。

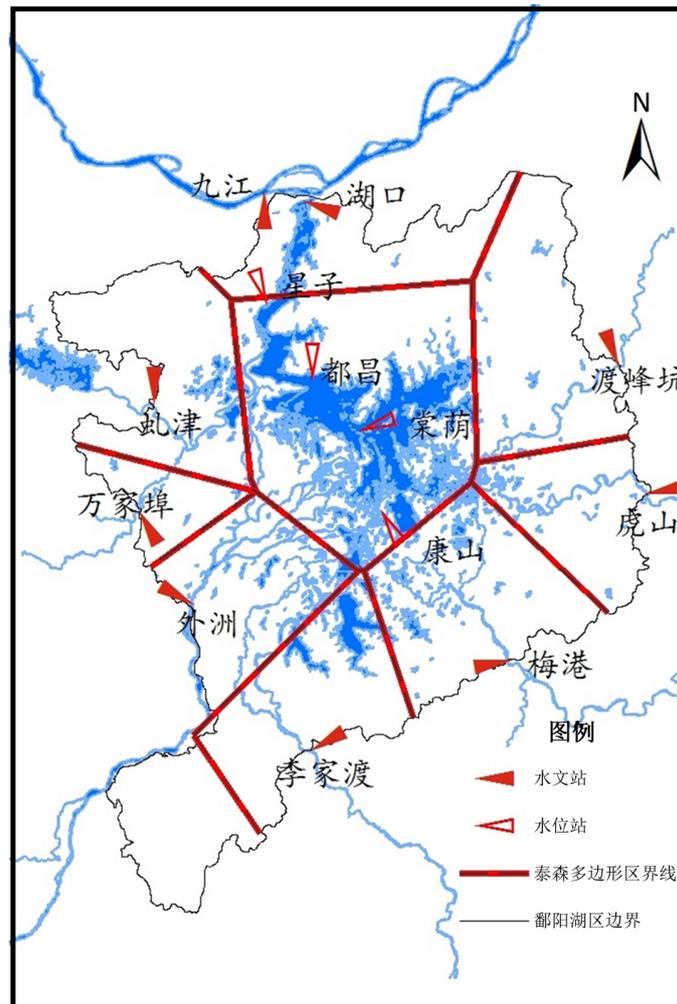


Figure 1. Distribution of research areas and stations

图1. 研究区域及研究站点分布图

星子断面与湖口断面之间无支流汇入或汇出,两者流量关系较好(图2)。但受测点布设及测次多少影响,湖口站整编流量与星子实测流量存在一定的误差,为尽量减少定线产生误差影响,获取准确出湖流量,自2015至2018年,鄱阳湖水文局利用走航式ADCP收集星子水文断面实测流量(以下简称出湖流量),共获取193次单次测验成果。五河控制站来水量、长江来水量、湖区降雨、蒸发来源于长江委水文局、江西省水文局整编刊印成果。

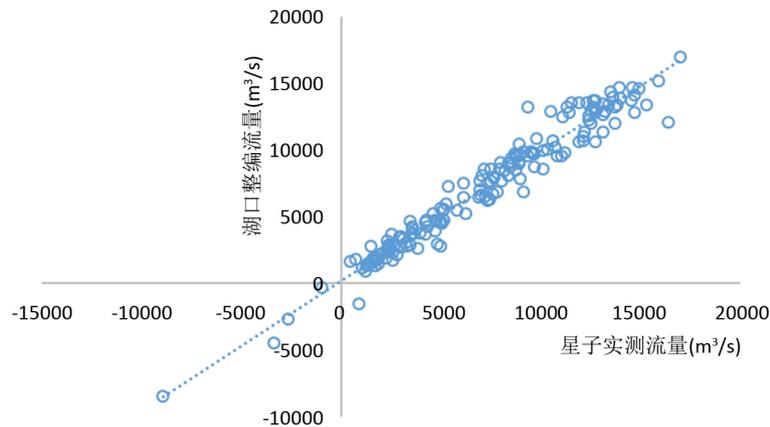


Figure 2. Correlation diagram of measured discharge at Xingzi station and compilation discharge at Hukou station
 图 2. 星子实测流量与湖口整编流量相关关系

2.2. 流态区分与研究方法

1) 流态区分

已有研究中，一般以湖口与星子站落差、流速大小作为判别湖口发生倒灌的条件[14]。据有关分析，湖口发生倒灌时，星子与湖口落差分布较为散乱，幅度过大(-0.20~0.30 m)，且湖口水流流向与水位差出现反向时，其影响因素可能不止一种[10] [15]。第二次鄱阳湖科学考察组从水文学角度提出鄱阳湖倒灌发生条件，认为单位时间内九江流量增加量若大于初始时刻湖口流量时，将发生倒灌。满足此条件一般位于长江主汛期(7~9月)，流量增长较快，而此时鄱阳湖受江西主汛期影响，底水一般较高，这与倒灌发生机理较为一致，能够较好计算出倒灌期。

在重力流和倒灌流之间有一过渡流 - 顶托流，此流态一般较难界定。顶托作用主要来自于长江干流影响，但表现在流量随水位的上升而减小。从流速角度分析，星子断面水位流速分布呈现马鞍形分布特征[16]，顶托流流速分布一般位于 0.0~0.2 m/s 之间，重力流流速分布一般大于 0.2 m/s；从长江水情变化来看，汉口流量超过 18,000 m³/s 时，长江水流对鄱阳湖存在较为明显的顶托作用[4]。综合前人分析成果，可获取流态区分条件。

$$\begin{cases} \text{重力流, } v > 0.2 \text{ m/s 且 } \Delta Q_{九} - Q_{湖}^0 \leq 0 \\ \text{顶托流, } 0 < v \leq 0.2 \text{ m/s 且 } \Delta Q_{九} - Q_{湖}^0 \leq 0 \\ \text{倒灌流, } v < 0 \text{ m/s 且 } \Delta Q_{九} - Q_{湖}^0 > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： v 为断面平均流速； $\Delta Q_{九}$ 为单位时间内九江流量的增加量，单位时间取 1 天； $Q_{湖}^0$ 为初始时刻湖口流量。

2) 研究方法

鄱阳湖总入流包括“五河”来水和区间产流，但平原河流受特殊地理条件限制，计算洪量十分困难。为获取较为准确的入流，基于总入流概念[17]进行入湖洪水量计算。

$$Q_{入} = \sum_{i=1}^7 Q_i + Q_{区间水面} + Q_{区间陆面} \quad (2)$$

式中： $Q_{入}$ 为总入流， Q_i 为考虑传播时间的五河控制站流量， $Q_{区间水面}$ 为湖区水面产水量， $Q_{区间陆面}$ 为湖区陆面产水量。

各入湖河流传播时间利用各控制站实测平均流速，综合考虑断面形状系数和各控制站至星子断面距离，计算出不同流量级下各入湖河流传播时间。根据计算，传播时间随流量变化呈幂函数分布，为简便计，分别根据传播时间为 1 d、2 d、5 d 进行流量级划分，见表 1。

Table 1. The flow levels of different propagation time of each lake-entering river (unit: m³/s)
表 1. 各入湖河流不同传播时间流量级划分(单位: m³/s)

河流	控制站	传播时间			河流	控制站	传播时间		
		1 d	2 d	5 d			1 d	2 d	5 d
赣江	外洲	>10,000	4000~10,000	<4000	信江	梅港	>4000	1000~4000	<1000
抚河	李家渡	>2000	500~2000	<500	修水	万家埠	>900	200~900	<200
饶河	虎山	>1000	200~1000	<200		虬津	>600	200~600	<200
	渡峰坑	>1500	400~1500	<400					

利用星子水位查算水位 - 面积曲线[14]得到湖区水面面积, 选取代表性较好的外洲、李家渡、万家埠、虬津、梅港、渡峰坑、虎山、紫云山、都昌和湖口等 10 站日降雨量作为湖区日面雨量计算站, 并利用泰森多边形法获取逐日湖区面雨量值; 选取星子、棠荫、康山等 3 站日蒸发量作为湖区日蒸发计算站, 并利用鄱阳湖大水体蒸发试验结果[18], 将 E601 型蒸发值折算为大水体蒸发值。

为获取较为准确区间产流时间分配, 根据文献[19]和文献[20]论证成果进行计算, 认为日平均雨量超过 80 mm 的产流系数按 0.65 计, 40~80 mm 的产流系数取 0.6, 20~40 mm 的取 0.5, 10~20 mm 的取 0.4, 10 mm 的以下视为损耗, 推算陆面径流的分配系数采用单位线法, 第一天占 7.0%, 第二天占 50.0%, 第三天占 32.0%, 第四天占 9.0%, 第五天占 2.0%。

“五河”和区间径流量进入湖泊后, 一般会受到鄱阳湖调蓄作用, 根据水量平衡方程可得到考虑调蓄作用入湖流量 $Q_{\lambda\text{调}} = Q_{\lambda} - V(Z) \frac{\partial Z}{\partial V}$, 式中 $Q_{\lambda\text{调}}$ 考虑调蓄作用时入湖流量, Q_{λ} 为计算入湖流量, $\frac{\partial Z}{\partial V}$ 为随水位变化的鄱阳湖库容变化量, 通过查算星子水位 - 容积曲线[14]获取。

3. 分析与结果

3.1. 重力流对鄱阳湖出湖流量影响

一般而言, 在重力流下, 鄱阳湖不受或较少受到长江影响, 此时影响鄱阳湖出湖流量主要为湖区入流及湖盆调蓄作用。考虑调蓄作用($Q_{\lambda\text{调}}$)和不考虑调蓄作用(Q_{λ})分别绘制入出湖流量相关关系, 见图 3。从图中可以看出, 1) 入出湖水量点群依旧较为散乱, 特别是在流量较大情况下, 点群分布最为离散; 2) 在入出湖流量较大情况下, 湖盆调蓄作用明显, 考虑湖盆调蓄入出湖流量关系较未考虑湖盆调蓄入出湖流量关系点群集中, 且更加接近于 45 度直线; 3) 入出湖流量较小情况下, 湖盆调蓄作用对入出湖流量变化影响较小, 特别是当入湖流量小于 3000 m³/s 时, 考虑湖盆调蓄反而加剧点群散乱程度; 4) 入出湖流量小于 10,000 m³/s 时, 入、出湖流量接近 45 度直线分布, 入、出湖流量大于 10,000 m³/s 时, 同样入湖条件下出湖流量偏小, 只是考虑调蓄作用时, 偏小程度减轻, 见图 3。

从曼宁公式 $Q = CA\sqrt{RJ}$ 来看, 当糙率、断面形状较稳定情况下, 水面比降发生变化时, 流量随之发生变化, 故引进落差进行分类, 分别分析不同落差情况下入、出湖流量关系, 见图 4。从图中可以看出, 1) 考虑落差能在一定程度上区分入出湖流量不同变化规律; 2) 星子湖口水位落差大于等于 0.10 m 时, 入、出湖水量关系较为密切, 且考虑湖盆调蓄不能有效改善入、出湖流量关系; 3) 当星子湖口水位落差小于 0.10 m 时, 湖盆调蓄作用较为明显影响着入、出湖流量关系。

为进一步找寻重力流下影响入、出流量关系因素, 引进星子水位, 并构建多元回归模型:

$$\begin{cases} LNQ_{\text{出}} = K_1 LNZ_{\text{星}} + K_2 LNQ_{\lambda} + K_3 \Delta Z_{\text{星-湖}} \geq 0.10 \text{ m} \\ LNQ_{\text{出}} = K_1 LNZ_{\text{星}} + K_2 LNQ_{\lambda\text{调}} + K_3 \Delta Z_{\text{星-湖}} < 0.10 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

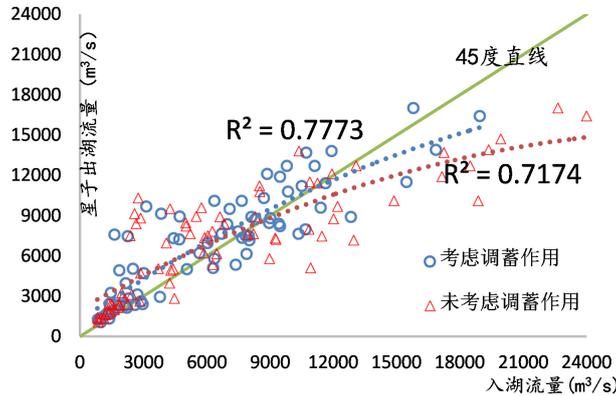


Figure 3. The relationship between inflow and outflow during the gravity flow period

图 3. 重力流入湖流量与出湖流量相关关系图

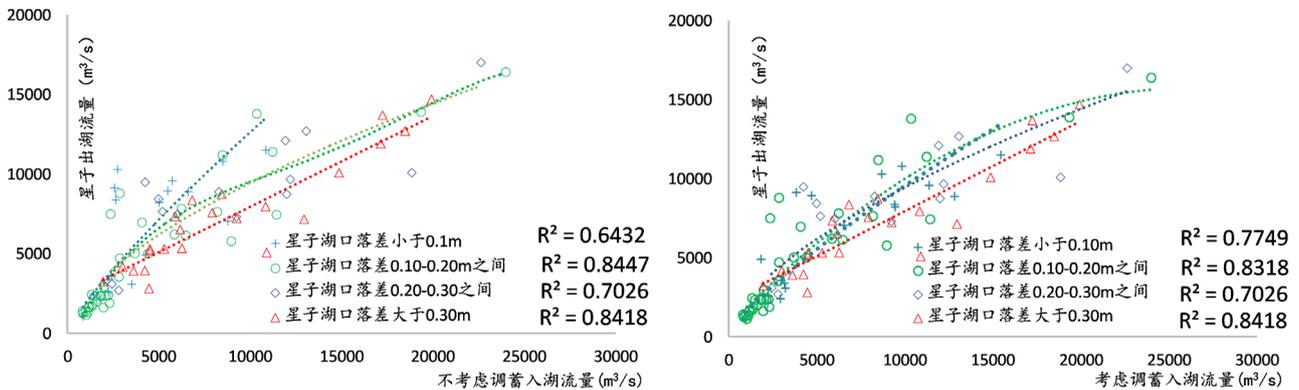


Figure 4. The relationship between inflow and outflow under different drop conditions

图 4. 不同落差情况下鄱阳湖入出湖水量相关关系

式中： $Q_{出}$ 为实测出湖流量； $Z_{星}$ 为星子站水位； $Q_{入}$ 为未考虑调蓄作用入湖流量； $Q_{入调}$ 为考虑调蓄作用入湖流量； $\Delta Z_{星-湖}$ 为星子站与湖口站水位落差； K_1 、 K_2 、 K_3 为多元回归系数。计算得系数见表 2，图 5。

统筹考虑落差和水位变化情况下，重力流下入湖流量与出湖流量关系较为密切，复合相关系数均达到 0.94。以 2015~2017 年作为多元回归模型参数计算的率定期，2018 年作为验证期，并绘制拟合流量($Q_{拟出}$)与实测流量($Q_{出}$)相关图。从图中可知：1) 拟合流量值与实测流量值仍存在一定的误差，特别是流量较大情况下，出现整体偏移现象；2) 拟合流量值与实测流量值相关关系符合二次多项式函数关系；3) 以二次曲线作为拟合流量与实测流量关系线形，并进行检验，计算得知线型在显著性水平 $\alpha = 0.10$ 时，均能通过符号、适线和偏离数值检验。

若将验证期入湖流量和出湖流量也点绘至图 4 中，可以发现：1) 当 $\Delta Z_{星-湖} \geq 0.10\text{m}$ 时，验证期点群能够附着于曲线上，且误差较小，表明此条件下可通过模型计算出湖流量；2) 当 $\Delta Z_{星-湖} < 0.10\text{m}$ ，验证期点群出现整体性偏移，计算出湖流量较实测流量偏大，表明此条件下尚不能直接采用模型计算出湖流量，必须有一定实测资料对曲线进行修正方可进行出湖流量计算。

Table 2. Results of multivariate regression coefficient calculation

表 2. 多元回归系数计算成果

项目	k_1	k_2	k_3	复合相关系数 R^2
$\Delta Z_{星-湖} \geq 0.10\text{m}$	1.993	0.250	1.428	0.9396
$\Delta Z_{星-湖} < 0.10\text{m}$	2.158	0.062	2.444	0.9448

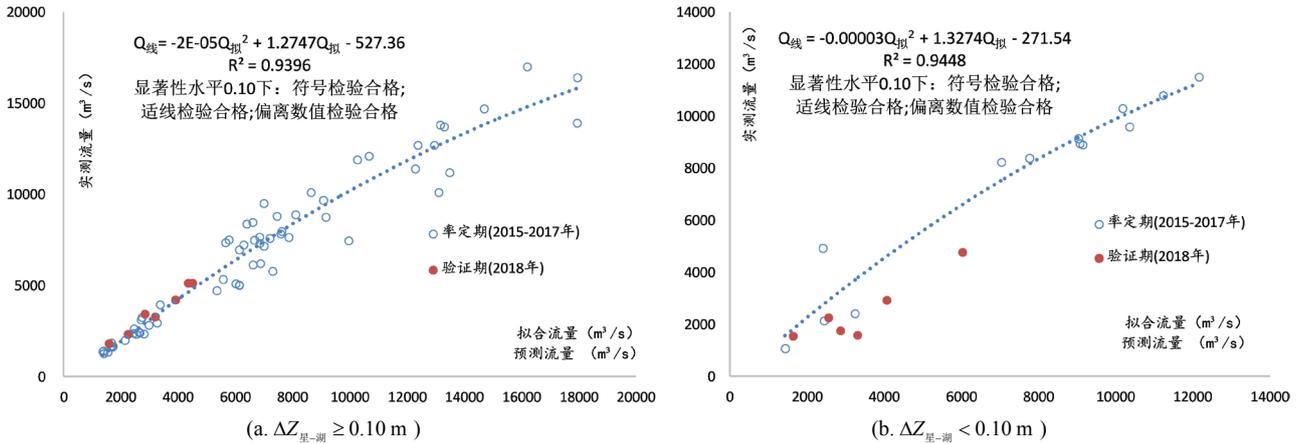


Figure 5. The correlation between flow fitting value and measured value
图 5. 出湖流量拟合值与实测值相关关系

3.2. 顶托流对鄱阳湖出湖实测流量影响

所谓顶托流是指长江干流流量很大时，鄱阳湖水不能自由流出而滞蓄在湖盆中的现象。顶托期间，出流量的影响因素涉及到长江来水量(九江流量 $Q_{九}$ ，大通流量与九江流量差值 $\Delta Q_{大-九}$)、入湖水量 $Q_{入}$ 、水位(星子水位 $Z_{星}$)、落差(九江站与湖口站落差 $\Delta Z_{九-湖}$ ，星子站与湖口站水位落差 $\Delta Z_{星-湖}$)等，各因素综合影响着顶托期出湖流量。为对各因子影响程度进行排序，选用灰色关联法[21]和逐步回归分别对各变量进行排序，同时为消除各变量量纲不同一现象，对各变量进行标准化处理。综合考虑灰色关联系数和逐步回归成果，得各变量影响程度排序为大通与九江流量差 $\Delta Q_{大-九}$ 、九江流量 $Q_{九}$ 、星子与湖口水位落差 $\Delta Z_{星-湖}$ 、入湖水量 $Q_{入}$ 、星子水位 $Z_{星}$ 、九江与湖口水位落差 $\Delta Z_{九-湖}$ 。根据排序成果，拟合出湖流量与 $\Delta Q_{大-九}$ 、 $Q_{入}$ 之间关系。同时，考虑长江水量量级大小，以九江站流量进行分类，分别进行多元回归分析，见图 6。

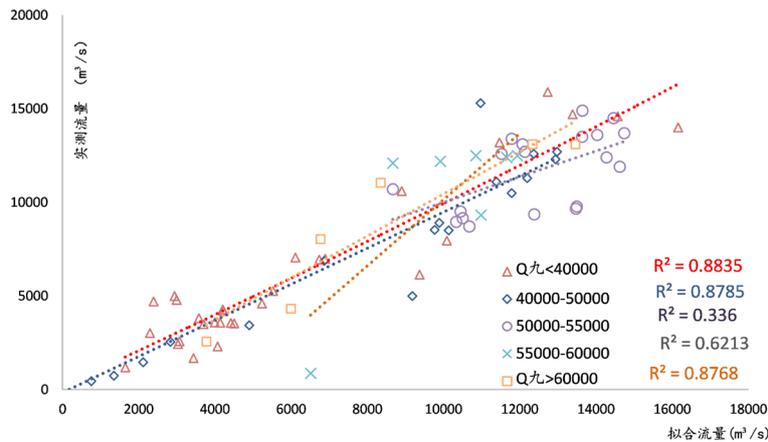


Figure 6. Compound relationship between $Q_{outflow}$ and $\Delta Q_{datong to jiujiang}$, Q_{inflow}
图 6. 顶托期出湖流量与 $\Delta Q_{大-九}$ 、 $Q_{入}$ 复合关系图

从图 6 中可以看出，当九江流量小于 50,000 m^3/s 时，鄱阳湖出湖流量与 $\Delta Q_{大-九}$ 、 $Q_{入}$ 多元回归值有着较好的相关关系，相关系数 R^2 均达到 0.88，当九江流量大于 60,000 m^3/s 时，鄱阳湖出湖流量与 $\Delta Q_{大-九}$ 、 $Q_{入}$ 多元回归值相关系数 R^2 也达到 0.88，具有较好相关关系，而在九江流量介于 50,000~60,000 m^3/s 之间时，出湖流量与 $\Delta Q_{大-九}$ 、 $Q_{入}$ 关系较差，点群较为散乱。根据灰色关联，在九江流量介于 50,000~60,000 m^3/s 之间时，相关系数

也仅能达到 0.60，表明此段时间正处于江湖关系交互最频繁、最复杂时期，只能通过加密监测来解决出湖流量问题。

3.3. 倒灌流对鄱阳湖出湖实测流量影响

在顶托情况下，若长江干流流量继续增大，干流水位高于鄱阳湖水位时，江水会流进鄱阳湖内，此时为倒灌期。据统计，2015~2018 年四年间共发生倒灌 19 天，其中 2016 年 5 天、2017 年 14 天，较上世纪倒灌频次减少，主要是因为长江洪水期三峡水库调蓄作用，减少洪水期长江水量[10]。从 1956~2018 年历史监测成果分析，长江倒灌至湖口最大倒灌流量为 13,600 m³/s (1997 年 7 月 10 日)，断面平均流速为-0.21 m/s，最大影响范围能够达到老爷庙区域[16]。虽然影响鄱阳湖倒灌主要因素是长江干流来水量大所造成，但没有明显的界定，是否倒灌、倒灌流量的大小需同时看长江干流流量大小和鄱阳湖水位的高低。胡振鹏等[9]研究得出，星子水位越高，产生倒灌长江所需流量越大，此时倒灌水量一般不大；反之，星子水位低时，若长江来水量大，则倒灌时间长，且倒灌量大，如 1991 年 7 月 3 日，星子水位仅为 15.55 m (吴淞基面，下同)，但汉口流量达到 50,300 m³/s，连续倒灌 17 天，倒灌量达到 107.41 亿 m³。

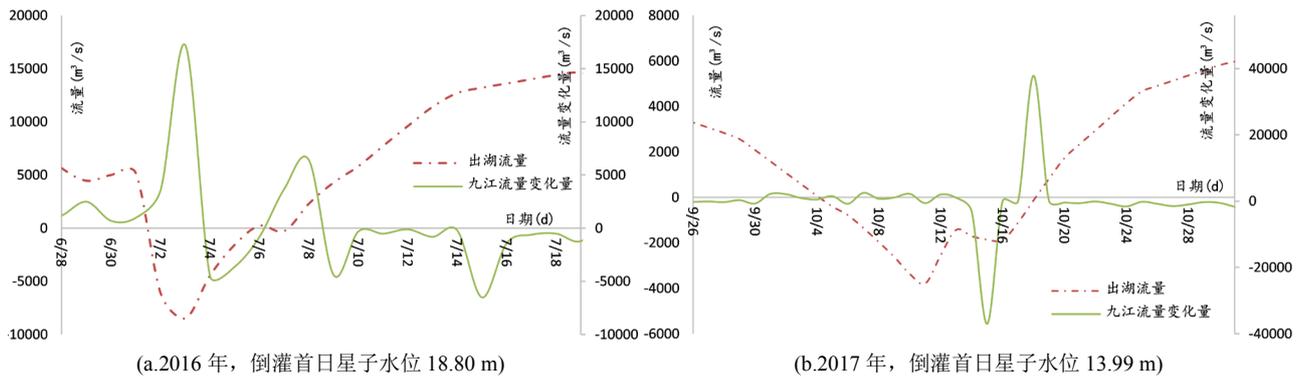


Figure 7. During flowing backward period, The Poyang Lake flow and the flow change of Jiujiang
图 7. 倒灌期出湖流量与九江流量变化量过程线图

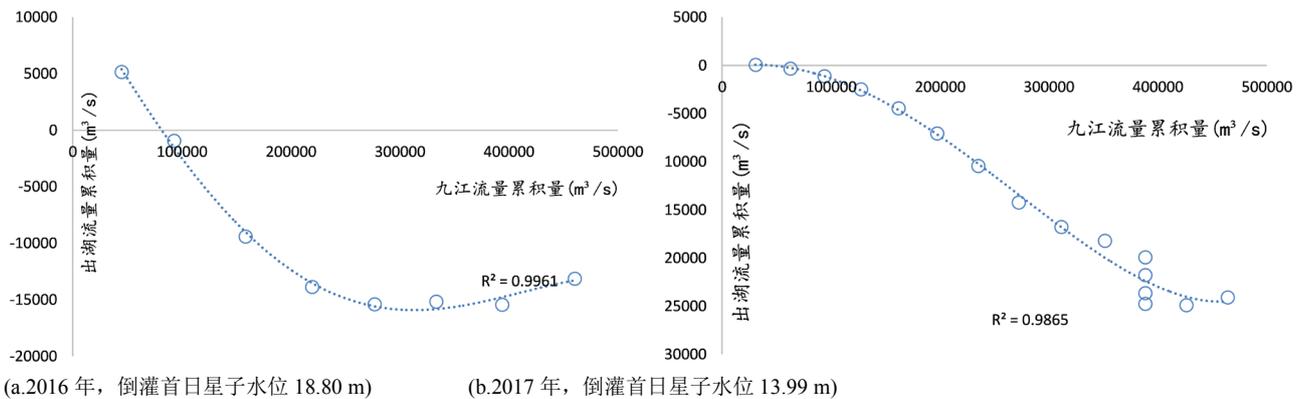


Figure 8. During flowing backward period, The relationship between the flow accumulation of Poyang Lake and the flow accumulation of Jiujiang
图 8. 倒灌期出湖流量累积量与九江流量累积量相关关系图

出湖流量变化与九江日流量变化有着较为密切的关系，图 7 代表两种典型水情条件。其一是当湖区水位较高时，九江流量迅速增加，出湖流量能迅速响应，流量减小，发生倒灌，若九江流量增加量急剧减小，倒灌现象有所减弱，并随着九江流量的减小而逐渐消失。一般而言，此种条件下倒灌期不长，但倒灌流量大。其二是

当湖区水位较低,且五河来水量变化不大,九江流量在较长时间内稳步增长,此时出湖流量随着九江流量的增加而减少,从而产生倒灌现象,而当九江流量发生急剧变化时,出湖流量也会产生一定的响应;而随着九江流量稳步减少,倒灌现象也逐渐消失。一般来说,此种条件下倒灌期较长,但倒灌流量较小。

倒灌期出湖流量和九江流量变化量虽然存在一定的响应关系,但点群依旧较为散乱。若以倒灌前一日至倒灌结束后一日作为分析时间范围,绘制出湖流量累积量与九江流量累积量相关关系图(图 8)。从图中可以看出,1) 两者关系较为密切,相关系数均达到 0.98 以上,且基本呈三次多项式曲线型分布,表明九江流量变化累积效应能够很好的反映出湖流量累积效应的变化;2) 若水情条件的不一致,出湖流量累积量与九江流量累积量曲线分布差异较大,表明曲线使用范围较窄;3) 若需准确获取倒灌期出湖流量,只能通过实际测量来实现,且应根据不同水情条件实时调整监测频次,特别是在顶托期间,长江水情变化剧烈时更应通过实测来控制出湖流量变化;4) 根据 2003 年以后倒灌天数估计,每年倒灌天数平均为 8 天,若每天监测 1 次,监测任务和成本尚增加不多,但意义较为重大,能够更加准确反映湖区出湖流量,从而提供解决鄱阳湖流域水量平衡演算提供更加准确的数据支撑。

4. 讨论

当长江对鄱阳湖影响程度较小时,鄱阳湖发生重力流,出湖流量更加通畅。从分析成果来看,重力流影响出湖流量主要是入湖水量,这也与其他学者关于五河来水量是鄱阳湖出湖流量主因较为一致。在重力流时,鄱阳湖可视为漫滩型河道,落差能够反映江湖水情条件,同一入湖流量条件下,落差较大情况下出湖流量也应较大。但考虑风浪影响,落差又不能成为主要因素。当出湖流量较为通畅时,水位高低是流量大小的主要表现形式,故若综合考虑鄱阳湖水位变化,能够对出湖流量进行反演。

当长江对鄱阳湖影响程度较大时,鄱阳湖发生顶托流和倒灌流,此时出湖流量随长江影响程度的加大而减小,主要因子从五河来水量变化影响转变为长江干流影响。方春明等[22]认为,在顶托情况下,九江流量每增加 1 个流量,其顶托作用使出湖流量相应减少 1 个流量;胡振鹏等[9]认为汉口流量超过 18,000 m³/s 时,汉口流量大小决定顶托作用的大小。顶托期间,长江来水流量不同量级情况下,其对鄱阳湖出湖流量影响程度发生变化;本文认为鄱阳湖出湖流量与大通与九江流量差值、入湖流量之间存在一定的反演关系,九江流量小于 50,000 m³/s 时,入湖流量仍然起着较为重要作用;九江流量大于 60,000 m³/s 时,入湖流量影响被极度削弱,此时长江干流来水起主要作用,但九江流量在 50,000 m³/s 至 60,000 m³/s 之间时,入湖水量和长江干流来水作用排序难以有效明确,只能通过实测来获取出湖流量;倒灌期间,影响倒灌流量主因是长江来水量大小和鄱阳湖水位多少,当长江对鄱阳湖发生顶托时,若继续加大长江水量,将会发生倒灌,倒灌期间九江流量变化累积效应能够很好的反映出湖流量累积效应的变化。

5. 结论与展望

本文以星子站实测流量代表鄱阳湖出湖流量,利用数理统计等方法,分析各典型湖流对鄱阳湖出湖流量的影响,得出以下结论。

- 1) 重力流下,影响鄱阳湖出湖流量变化的主要因素是五河来水量,且出湖流量大小能够利用湖区水位高低来反映;
- 2) 顶托流下,影响鄱阳湖出湖流量变化主要因素受长江水量级别不同而发生变化,且五河来水量的大小也发挥一定的作用;
- 3) 倒灌流下,影响鄱阳湖出湖流量主因是长江来水量大小和鄱阳湖水位多少,倒灌期间九江流量变化累积效应能够很好的反映出湖流量累积效应的变化。

较之以往只注重于顶托和倒灌期江湖关系交互,本文更加注重和强调不同水文条件下出湖流量主要因子变

化规律,并提出不同流态下如何利用主要因子去反演出湖流量变化,取得一定成果。但也存在不足,需要后期继续努力,主要表现在:1)尚难以实现精确反演,必须具有一定实测数据加以控制,原因在于出湖流量除受复杂江湖关系之外,还应受到测验精度、洪水演算等影响。一是平原河网水系十分复杂,水动力变化影响因素众多,如何获取准确湖区产流尚是难题[14];二是五河洪水传播时间问题,不同降雨分布和洪水大小情况下,各级河流传播至星子断面时间不同,本文仅从三层流量级进行传播时间的概化,尚不精细;三是流量整编的影响,五河控制站在受到鄱阳湖顶托及水工建筑物影响时,由于测次难以达到控制线型要求,不可避免降低了定线精度,从而影响日流量的推求[14];四是单次测验精度存在误差,因各站使用的测验仪器、测验方法的不同,导致流量测验成果也会产生一定的误差。2)尚未根据不同水情条件,给出倒灌期九江流量累积量与出湖流量累积量一簇曲线,这有待于后续继续研究。

基金项目

水利部鄱阳湖水资源水生态环境研究开放基金项目(鄱阳湖星子站水位流量关系监测研究, ZXKT201706)。

参考文献

- [1] 孙晓山, 谭国良, 陈福春, 等. 江西河湖大典[M]. 武汉: 长江出版社, 2010.
SUN Xiaoshan, TAN Guoliang, CHEN Fuchun, et al. Encyclopedia of rivers and lakes in Jiangxi. Wuhan: Changjiang Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 程时长, 卢兵. 鄱阳湖湖流特征[J]. 江西水利科技, 2003(2): 105-108.
CHEN Shichang, LU Bin. Analysis of the characteristics of water current in Poyang Lake. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2003(2): 105-108. (in Chinese)
- [3] 喻中文, 司武卫, 关兴中. 鄱阳湖湖流监测与分析[J]. 水利水电快报, 2014, 35(11): 20-23.
YU Zhongwen, SI Wuwei and GUANG Xinzong. Monitoring and analysis of Poyang Lake current. Express Water Resources & Hydropower Information, 2014, 35(11): 20-23. (in Chinese)
- [4] 鄱阳湖研究编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
Editorial Board of Poyang Lake Research. Study on Poyang Lake. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1987. (in Chinese)
- [5] 欧阳千林, 刘卫林. 近 50 年鄱阳湖水位变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1545-1550.
OUYANG Qianlin, LIU Weilin. Variation characteristics of water level in Poyang Lake over 50 years. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1545-1550. (in Chinese)
- [6] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.005>
- [7] 郭华, 张奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互关系作用的变化[J]. 地理学报. 2011, 66(5): 609-618.
GUO Hua, ZHANG Qi. Changes in hydrological interactions of the Yangtze River and the Poyang Lake in China during 1957-2008. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 609-618. (in Chinese)
- [8] CHEN M. F., DENG J. Y., FAN S. Y., et al. Applying energy theory to understand the relationship between the Yangtze River and Poyang Lake. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(8): 1059-1071. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1541-6>
- [9] 胡振鹏, 傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 570-579.
HU Zhengpeng, FU Jing. Quantitative study on hydrology relationship between the Yangtze River and Poyang Lake and its changes. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 570-579. (in Chinese)
- [10] 陈金凤, 钱晓燕. 近 60 年来长江对鄱阳湖倒灌水量的变化特征[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(5): 18-22+27.
CHEN Jinfeng, QIAN Xiaoyan. Variation characteristics of water recharge from Changjiang River into Poyang Lake. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(5): 18-22+27. (in Chinese)
- [11] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
RUI Xiaofang. Physical hydrology. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese)
- [12] 王俊, 王建群, 余达征. 现代水文监测技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
WANG Jun, WANG Jianqun and YU Dazheng. Modern hydrological monitoring technology. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese)
- [13] 游海林, 徐力刚, 刘桂林, 等. 基于最小二乘法的鄱阳湖水位流量关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 82-85.

- YOU Hailin, XU Ligang, LIU Guilin, et al. Study on relationship of water level and discharge in Poyang Lake based on least square method. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(1): 82-85. (in Chinese)
- [14] 王俊, 郭生练, 谭国良, 等. 变化环境下鄱阳湖区水文水资源研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
WANG Jiu, GUO Shenglian, TAN Guoliang, et al. Research and application of hydrology and water resources in Poyang Lake under changing environment. Beijing: China Water & Power Press, 2017. (in Chinese)
- [15] 叶许春, 李相虎, 张奇. 长江倒灌鄱阳湖的时序变化及其影响因素[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(11): 1-7.
YE Xuchun, LI Xianghu and ZHANG Qi. Temporal variation of backflow frequency from the Yangtze River to Poyang Lake and its influencing factors. *Journal of Southwest University*, 2012, 34(11): 1-7. (in Chinese)
- [16] 王婧, 曹卫芳, 司武卫, 等. 鄱阳湖湖流特征[J]. 南昌工程学院学报, 2015, 34(3): 71-74.
WANG Jing, CAO Weifang, SI Wuwei, et al. Analysis of the characteristics of water current in Poyang Lake. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2015, 34(3): 71-74. (in Chinese)
- [17] 黄燕, 丁志立, 郭海晋, 等. 基于总入流概念的鄱阳湖设计洪水计算[J]. 人民长江, 2015, 46(1): 58-60.
HUANG Yan, DING Zhili, GUO Haijin, et al. Design flood calculation of Poyang Lake based on concept of total inflow. *Yangtze River*, 2015, 46(1): 58-60. (in Chinese)
- [18] 尹宗贤, 闵騫. 鄱阳湖大水体蒸发实验研究[J]. 海洋与湖沼, 1990(1): 70-79.
YIN Zongxian, MIN Qian. The water body evaporation experiment of Poyang Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990(1): 70-79. (in Chinese)
- [19] 张双虎, 蒋云钟, 刘晓志, 等. 鄱阳湖水利枢纽运行调度方式及其对水资源与防洪的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(4): 257-261.
ZHANG Shuanghu, JIANG Yunzhong, LIU Xiaozhi, et al. Study on dispatching scheme of water control project in Poyang Lake and its influence on water resources and flood control. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, 9(4): 257-261. (in Chinese)
- [20] 中国水利水电科学研究院. 鄱阳湖水利枢纽防洪影响及对策研究[R]. 2010.
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Study on flood control effect and countermeasures of Poyang Lake water. 2010. (in Chinese)
- [21] 刘美玲, 王子佳, 朱丽丽, 等. 齐齐哈尔地区蒸发量与气象因子间灰色关联分析[J]. 东北水利水电, 2018, 36(3): 12-16+71.
LIU Meilin, WANG Zijia, ZHU Lili, et al. Grey correlation analysis for evaporation capacity and meteorological factors in Qiqihar area. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2018, 36(3): 12-16+71. (in Chinese)
- [22] 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.
FANG Chunming, CAO Wenhong, MAO Jixin, et al. Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Georges reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 175-181. (in Chinese)