

文章编号:0559-9350(2021)09-1082-09

鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析

黄爱平, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 韩祯, 王伟杰

(中国水利水电科学研究院 水生态环境研究所, 北京 100038)

摘要: 换水能力是表征湖泊水动力和污染物输移扩散的关键指标, 鄱阳湖水文情势波动显著, 换水能力时空特征和影响因素复杂。本文选取水龄描述鄱阳湖换水能力, 建立鄱阳湖水龄模型, 研究了鄱阳湖水龄的时空特征和影响因素, 分析了水龄对鄱阳湖江湖关系演变的响应规律。结果表明: (1) 鄱阳湖水龄具有显著的时空异质性。夏季和秋季水龄明显大于冬季和春季, 碟形湖和湖湾区域水龄明显大于主河道和滩地。(2) 湖口水位和流域入流是影响鄱阳湖水龄的主要因素。湖口水位对鄱阳湖水龄的影响大于流域入流; 湖口水位越高则鄱阳湖水龄越大, 流域入流与之相反; 鄱阳湖水龄年内显著波动的主要原因是湖口水位的年内显著变化。(3) 2003年后, 随着江湖关系的演变, 鄱阳湖水龄有所减小, 其中秋季减小最为明显。研究成果能为鄱阳湖水资源保护提供科学支撑, 也可可为其他大型湖泊换水能力研究提供参考。

关键词: 鄱阳湖; 江湖关系; 水龄; 时空特征; 影响因素

中图分类号: TV131

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20200807

1 研究背景

湖泊换水能力可表征湖泊水体交换能力的强弱, 是湖泊水动力特性的关键指标^[1], 也是影响水质和富营养化的重要因素, 低换水能力导致水动力扩散条件不足, 进而影响污染物输移扩散, 引发藻类聚集等问题; 反之亦然。湖泊富营养化防治的重要研究内容之一就是分析换水能力对湖泊水质和富营养化的影响^[2-3]。目前, 湖泊换水能力的表示方式有多种, 例如换水周期、水龄等^[4-5]。湖泊换水周期(湖泊蓄水量与出湖流量的比值)物理概念简单且计算方法简便, 是当前较为常用的湖泊换水能力表示方式。但换水周期只能反映整个湖泊的换水时间, 无法刻画局部区域的换水能力。对于大型湖泊, 换水能力具有空间异质性, 湖湾等换水能力弱于主湖区, 也更易于污染物累积。因此对于湖岸线复杂、微地形多样的湖泊, 提出具备空间意义的换水能力表示方式是研究该类湖泊换水能力的关键。水龄是换水能力的另一重要表示方式, 指颗粒物从入口传输到指定点的时间, 即空间某点的水龄是指颗粒物从进入研究区域到流经该点所需要的时间^[6]。Deleernijder等^[7]于2002年提出了可溶物质平均水龄的通用理论, 由于具备时空意义, 近年来得到了国内外学者的广泛关注和应用^[8-12]。

鄱阳湖作为我国最大的淡水湖, 是长江中下游仅存的两个大型通江湖泊之一, 也是国际重要湿地, 拥有丰富的湿地植被, 湖内还有众多候鸟, 是全球最大的鸟类保护区^[13]。鄱阳湖经济和生态地位突出, 对江西省和长江中下游区域的气候、水环境和水生态等都有重要影响。鄱阳湖南北方向总长为173 km, 东西方向平均宽度为17 km, 湖岸线总长为1200 km, 广阔的湖区面积造就了鄱阳湖水文水质的显著空间分布特征。湖岸线复杂多变, 西部、东北部有多处湖湾区; 微地形错综复杂, 分

收稿日期: 2020-10-04; 网络首发时间: 2021-03-08

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210305.1641.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407702); 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101004-001); 中国水利水电科学研究院基本科研专项(WE0145B532017, WE0145B592017, WE0145B382019); 国家自然科学基金项目(51809288)

作者简介: 黄爱平(1989-), 博士, 工程师, 主要从事水资源保护研究。E-mail: huangaiping321@163.com

通讯作者: 刘晓波(1978-), 博士, 正高级工程师, 主要从事水资源保护研究。E-mail: xbliu@iwhr.com

布着碟形湖、深槽、洲滩等多种形式。在独特的湖区地形作用下，加之长江与鄱阳湖之间复杂的江湖关系影响，湖区水文水质的时空分异特征突出，直观地呈现出“高水成湖、低水成河”^[14-15]。近年来随着社会经济快速发展，鄱阳湖水环境状况不容乐观，而且有向富营养化发展的趋势^[16]。因此，开展鄱阳湖水龄研究对揭示鄱阳湖换水能力特性、探究湖区水质和营养状态空间分布特征及其与水动力条件的响应关系具有重要意义。

目前，鄱阳湖水龄已开展了一些相关研究，包括长江顶托和倒灌对湖区水龄的影响、湖口水龄的年内和年际变化、流域入流和风场对湖区水龄的影响等。唐昌新等^[17]通过数值模拟表明长江顶托及倒灌使鄱阳湖水不能顺利外泄，会增大鄱阳湖水龄；Hengda Qi等^[18]模拟分析了湖口水龄的年内和年际变化，定性分析了水龄和水质的相关关系，对比了鄱阳湖水利枢纽工程对湖口水龄的影响；张素香等^[19]研究了湖口水龄的季节性变化特征以及倒灌对湖区水龄的影响，研究表明湖口水龄季节性变化明显，倒灌会导致水龄增加。此外，近几十年来鄱阳湖江湖关系发生了显著演变^[20]，这一演变对鄱阳湖换水能力势必造成了明显影响。根据相关研究进展，本文就鄱阳湖湖口和湖区水龄定量化分析、江湖关系变化对水龄的影响等开展深入研究。本文基于先前建立的鄱阳湖二维水动力模型^[21]，构建了鄱阳湖水龄模型，分析了湖口和湖区水龄的时空变化特征，探究了流域入流和湖口水位对鄱阳湖水龄的影响规律，研究了水龄对江湖关系演变的响应。研究成果深化了对鄱阳湖水动力特征和污染物输移扩散条件的认识，为鄱阳湖水资源保护提供了科学支撑，也为其他大型湖泊提供了有益参考。

2 模型与方法

2.1 水龄模型原理 Bolin等^[22]提出了从动力学角度研究水龄的思路，Deleernijder等据此建立了可溶性物质平均水龄理论^[7]，该理论首先定义某物质在水体中的浓度为 C ，其二维控制方程如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \left[\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \quad (1)$$

式中： C 为某物质在水体中的浓度； x, y 为空间坐标； t 为时间； u, v 分别为 x, y 方向的流速； K_H 为水平扩散系数，可采用Smagorinsky子网格方法求解。

其次，定义加权水龄积 β ，其控制方程为：

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = C - \left[\frac{\partial(u\beta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\beta)}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \beta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \beta}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

式中 β 为加权水龄积。

最后，将加权水龄积 β 除以浓度 C 即得到平均水龄 a ：

$$a = \frac{\beta}{C} \quad (3)$$

式中： a 为某物质在水体中的平均浓度，其他符号意义如前。

2.2 鄱阳湖水龄模型构建 鄱阳湖(东经115°49'—116°46'、北纬28°24'—29°46')地处江西省的北部，承纳赣江、抚河、信江、饶河和修水等五大河流(以下简称五河)来水，经湖口流入长江^[23]。本文前期已构建了基于EFDC的鄱阳湖二维水动力模型，并采用星子、都昌、棠荫和康山站等4个水位站验证该模型的水位模拟效果，4个水位站水位平均相对误差为1.31%~2.85%，纳什系数为0.91~1.00；模型的流量模拟效果验证采用湖口流量，其平均相对误差和纳什系数分别为9.87%和0.93；对比2014年7月20日、2013年10月5日和2013年11月22日等丰平枯水期典型日期的水面面积模拟值与遥感影像数据，模拟的相对误差为1.59%、5.37%和11.15%。该模型经过率定和验证，可准确反映鄱阳湖的水动力过程^[21]。

本文在二维水动力模型的基础上构建了鄱阳湖水龄模型，模型示意图见1。水龄计算设置如下：
(1)网格划分。模型采用180 m×180 m的均匀网格，网格总数为93 410个。(2)边界位置及水动力条件

设置。模型的入口边界分别在修水、赣江、抚河、信江、乐安河、昌江等6处，水动力条件为流量数据。出口边界为湖口，水动力条件为湖口站水位数据。气压、气温、降雨、蒸发等气象数据，以及风速和风向等风场数据均来自鄱阳国家气象站。(3)物质浓度初始和边界条件。物质浓度在入口边界为1，整个模型计算区域的初始浓度为零。(4)水龄浓度初始和边界条件。入口边界处水龄浓度为零，整个模型计算区域初始浓度也为零。

2.3 鄱阳湖水龄分析方法 针对不同的研究内容采用不同的水文条件，据此设计了不同的模拟工况：(1)鄱阳湖湖口和湖区水龄的时空特征分析。鄱阳湖水文情势年际变化较大，多年平均水文条件可反映某段时间内水文条件的平均状态，模拟多年平均水文条件下的鄱阳湖水龄比模拟典型年份更具普适性，故入口流量和出口水位采用2003—2016年多年平均数据(水动力设置见表1的工况1)。(2)鄱阳湖水龄影响因素及规律。鄱阳湖水龄的可能影响因素有流域入流、湖口水位、风场、温度和降雨，已有研究表明风场、温度和降雨对鄱阳湖水动力状况影响较小，对鄱阳湖水龄的影响可忽略^[19]，故本文只研究流域入流和湖口水位对水龄的影响。鄱阳湖2003—2016年流域逐日入流量变化区间为422~45 820 m³/s，湖口水位变化区间为4.7~19.5 m，在此变化区间内，分别设置了基于工况1的入流增加、入流减少、入流平均、水位增加、水位减少、水位平均等工况(水动力设置见表1的工况1-1到工况1-6)，通过这7种工况的对比，可量化分析流域入流和湖口水位对鄱阳湖水龄的影响规律。(3)鄱阳湖水龄对江湖关系演变的响应。2003年以后，鄱阳湖江湖关系发生显著变化，故以1956—2002年多年平均和2003—2016年多年平均情况表示江湖关系的演变(水动力设置见表1的工况2)。

表1 模拟工况的水动力条件设置

工况编号	入口边界	出口边界
工况1	2003—2016年多年平均五河流量	2003—2016年多年平均湖口水位
工况1-1	入流增加，五河流量为工况1的1.2倍	2003—2016年多年平均湖口水位
工况1-2	入流减少，五河流量为工况1的0.8倍	2003—2016年多年平均湖口水位
工况1-3	入流平均，五河流量为工况1的均值	2003—2016年多年平均湖口水位
工况1-4	2003—2016年多年平均五河流量	水位增加，湖口水位为工况1的1.2倍
工况1-5	2003—2016年多年平均五河流量	水位减少，湖口水位为工况1的0.8倍
工况1-6	2003—2016年多年平均五河流量	水位平均，湖口水位为工况1的均值
工况2	1956—2002年多年平均五河流量	1956—2002年多年平均湖口水位

鄱阳湖湖盆、流速等都呈现明显的空间异质性，以往研究多以松门山为界将鄱阳湖分为北部的入江水道区和南部的主湖区，但主湖区内空间异质性依然很大，这种划分较难反映鄱阳湖的空间特点^[24]。为有效分析鄱阳湖湖区水龄的空间特征，本文根据承纳五河来水情况，结合湖盆形态和保护区分布将鄱阳湖划分成6个分区，见图1。分区VI为南部区，该区域承纳抚河、信江西支来水，主要反映了抚河、信江西支来水对鄱阳湖水龄的影响，区域主要为河口三角洲，但分布有水龄值较大、存在富营养化风险的湖湾区域；分区IV为东部湖区，该区域承纳饶河和信江东支来水，区域的北边为典型湖湾区域，该区域水龄值也较大；分区V为中部湖区，该区域承纳赣江北支、中支和南支来水，分布大量碟形湖和滩地，以及鄱阳湖南矶山湿地国家级自然保护区；分区II为西部湖区，该区域

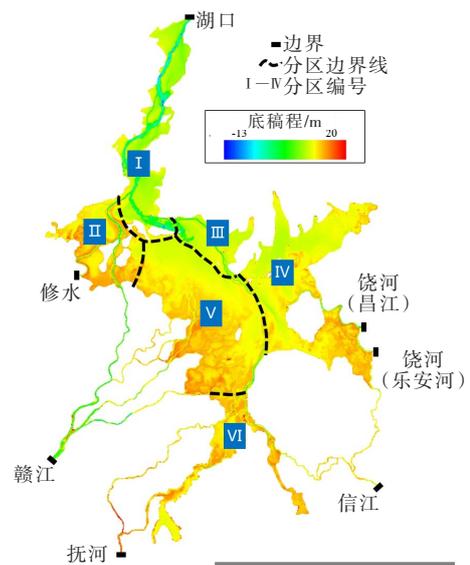


图1 鄱阳湖水龄模型和分区示意

承纳赣江西支和修水来水，大部分区域为水龄值较大的蚌湖等碟形湖，也是鄱阳湖国家级自然保护区所在地；分区Ⅲ为东北湖区，该区域承纳除赣江西支和修水以外的五河来水；分区Ⅰ为入江水道区，该区域承纳所有的五河来水，主要是河道型水体，流速较大。

3 结果分析

3.1 鄱阳湖湖口水龄时间特征 工况1的计算结果表明，鄱阳湖湖口年均水龄为16 d，年内变化显著，月均水龄变化区间为9~32 d，最大值发生在8月，最小值发生在4月份，最大值是最小值的3.5倍，逐月水龄值见图2。鄱阳湖水龄呈现明显的季节性波动，逐季水龄值见图2。春、夏、秋、冬四季湖口平均水龄值分别为10 d、23 d、22 d、11 d，夏季和秋季水龄明显大于冬季和春季，约为两倍的关系。从水龄的概念内涵和计算公式可知，水龄与水体的流速等水动力状态密切相关。当鄱阳湖处于夏季，流域降雨丰沛，五河入湖流量较大，但此时长江对鄱阳湖的顶托作用也较强，两者综合作用导致鄱阳湖水面坡降较缓，整个鄱阳湖的水体交换能力不足，湖口水龄值较大。当进入秋季，入湖流量减少，而且长江对鄱阳湖的顶托作用依然存在，此时鄱阳湖的水面坡降依然较缓，湖口水龄值较大。在冬季，入湖流量相对较小，但此时鄱阳湖呈现明显的河相，加之长江干流水位较低而导致的对鄱阳湖水位的拉空效应，鄱阳湖水面坡降较大，水体交换能力较强，湖口水龄值较小。在春季，鄱阳湖水面仍保持较大的水力坡降，湖口水龄值较小。

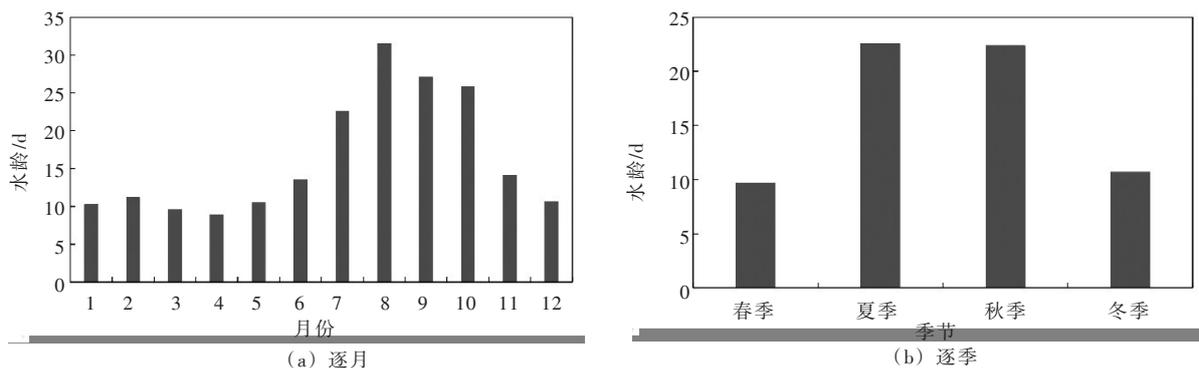


图2 湖口水龄的时间变化特征

3.2 鄱阳湖湖区水龄时空特征 根据工况1的计算结果，鄱阳湖春夏秋冬典型日期下的水龄空间分布见图3。从图可知，鄱阳湖湖区水龄在不同季节均具有明显的空间异质性，水龄空间分布格局在不同季节具有相似性，碟形湖和湖湾区域明显大于主河道。(1)春季。分区Ⅰ的水龄值明显小于其他分区；分区Ⅱ的碟形湖此时与河道处于部分或者完全脱离状态，两者之间水力联系较弱，导致碟形湖区域水龄值较大，最大值接近280 d；分区Ⅲ与主河道水动力交换频繁，水龄值较小，但略大于分区Ⅰ；分区Ⅳ的北部湖湾区域明显大于南部区域，该区域水体和周围水体交换较为困难，最大值接近300 d，是导致该区域藻类浓度较高的原因之一；分区Ⅴ的西南区域分布着大量碟形湖，和分区Ⅱ类似，这些碟形湖与主河道的水力联系较弱，水龄值较大，而西北区域的滩地和主河道相连，呈现西南水龄大、东北水龄小的分布特征；分区Ⅵ的南部湖叉区域水体长时间得不到交换更新，水龄值较大，其余与主河道相连区域水龄较小。(2)夏季。由于受到长江干流的顶托作用，整个鄱阳湖的流速变缓，湖口水龄相对春季要大很多，但湖区水龄的异质性要比春季小很多。此时整个鄱阳湖呈湖相，各个分区水体之间都存在水力联系，尤其是碟形湖区域大多与主河道相连，因此各分区之间的水龄空间分布格局与春季类似，但相对差异较春季更小。(3)秋季。与夏季相似，秋季鄱阳湖湖口水龄较大，但碟形湖开始逐渐和主河道脱离，水龄空间异质性开始加大。(4)冬季。与春季类似，整个鄱阳湖主河道流速较大，湖口水龄较小，但碟形湖区域水龄较大，水龄空间异质性大于夏秋季。

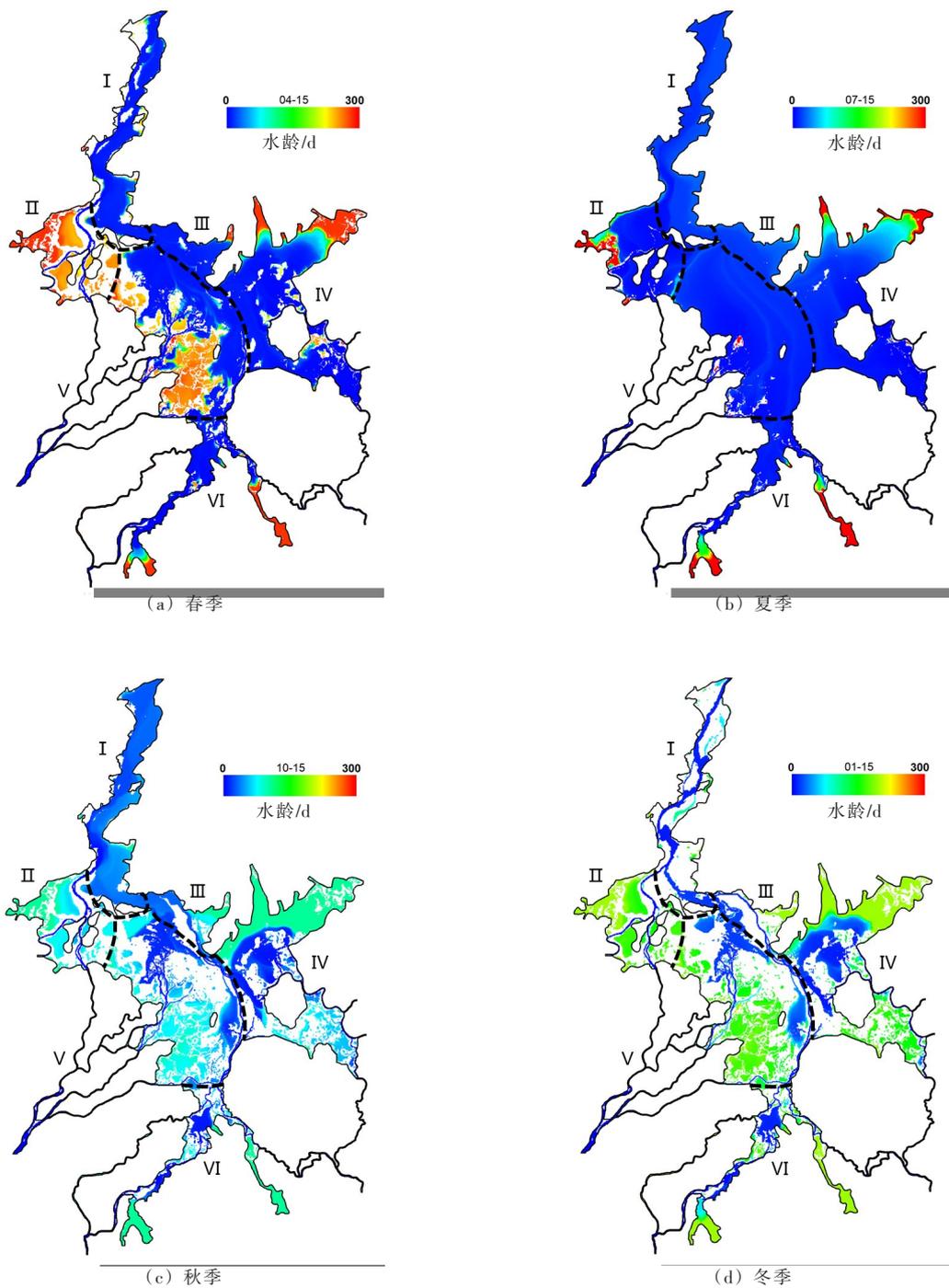


图3 湖区水龄的时空变化特征

为量化分析鄱阳湖水龄的空间分布特点，统计了不同分区的年均水龄值，见图4。(1)分区 I 的年均水龄值最小，只有 22 d。(2)分区 II 由于大部分区域为蚌湖、大湖池等碟形湖而导致整个区域水龄值较大，高达 128 d，是鄱阳湖水龄最大的分区。(3)分区 III 大部分时间与主河道保持良好水力联系，因此水龄值仅大于分区 I。(4)分区 IV 和 V 较为类似，同时分布碟形湖和滩地或湖湾和滩地，碟形湖和湖湾水龄较大而滩地水龄较小，导致整个分区的水龄值在鄱阳湖处于中等水平。(5)分区 VI 主要由湖湾构成，水龄值相对较大。此外，由于碟形湖、湖湾与滩地的水龄值差异较大，分区 II、IV 和 V 的水龄值较其他分区更为分散。

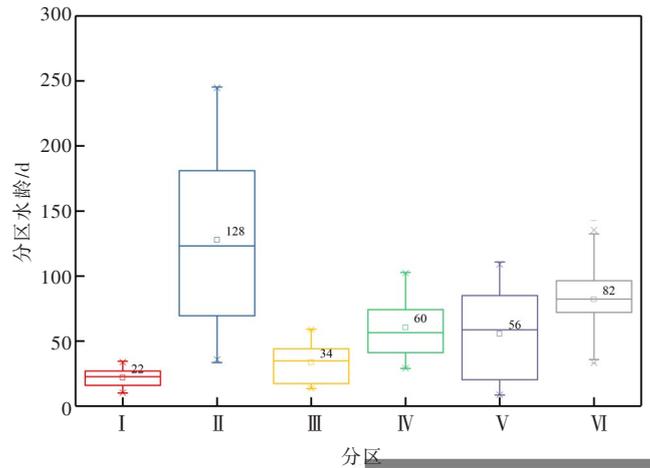


图4 湖区各分区水龄的年均值

3.3 鄱阳湖水龄影响因素 一般而言,影响湖泊水龄的因素主要有上下游边界、风场、温度^[11]。鄱阳湖是典型的大型浅水湖泊,不存在温度分层,温度对水龄的影响很小;鄱阳湖湖流类型以重力吞吐型为主,流场受风场影响有限,风场对水龄的影响较小。鄱阳湖水龄的主要影响因素为流域入流和湖口水位。湖口作为鄱阳湖唯一的出流,承纳了流域五河的来水,可反映鄱阳湖整体的水龄情况,本文通过对比分析不同流域入流和湖口水位条件下的湖口水龄,以揭示流域入流和湖口水位对鄱阳湖整体水龄的影响规律。根据工况1-1至1-6的模拟结果,流域入流和湖口水位对鄱阳湖湖口逐月月均水龄的影响分别见图5和图6。

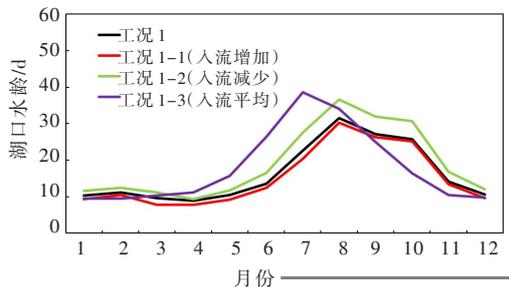


图5 流域入流对湖口水龄的影响

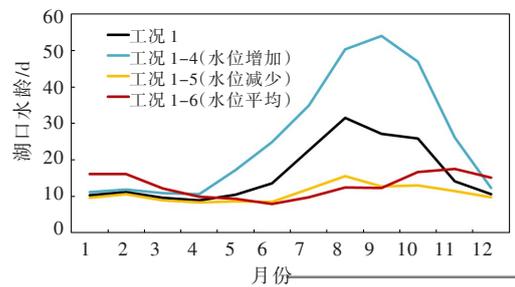


图6 湖口水位对湖口水龄的影响

从图可知,当流域入流增加20%时,鄱阳湖水面坡降增大,湖口水龄各月均值均有所下降,年均值减小了1.2 d,减小比例为7%;当流域入流减小20%,鄱阳湖水面坡降减缓,水体流动性降低,湖口水龄各月均值均增加,年均值增大了2.8 d,增大比例为17%。当湖口水位增加20%,长江对鄱阳湖的顶托明显加强,鄱阳湖水量向外交换的能力大大减弱,湖口水龄年均值增大9.7 d,增大比例为59%;当湖口水位减小20%,湖口水龄年均值减小5.6 d,减小比例为34%。当流域入流全年取固定值时,湖口水龄仍呈现明显的季节变化,此时湖口水龄主要受湖口水位的影响,湖口水位在7月份出现峰值从而导致湖口水龄峰值出现时间由8月变成7月;当湖口水位全年取固定值时,湖口各月水龄之间差异明显变小,水龄年内波动明显削弱。综上,湖口水位对鄱阳湖水龄的影响大于流域入流;湖口水位越高则鄱阳湖水龄越大,流域入流与之相反;鄱阳湖水龄年内显著波动的主因是湖口水位年内变化。

4 讨论

2003年以后,三峡水库等长江上游控制性工程调度影响了长江干流流量的年内分配,加之长江干流河道下切等影响,蓄水期内宜昌、汉口等站径流量和水位发生趋势性下降。长江干流水位下降

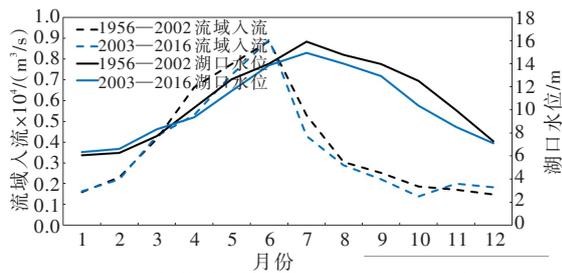


图7 2003年前后流域入流和湖口水位的演变

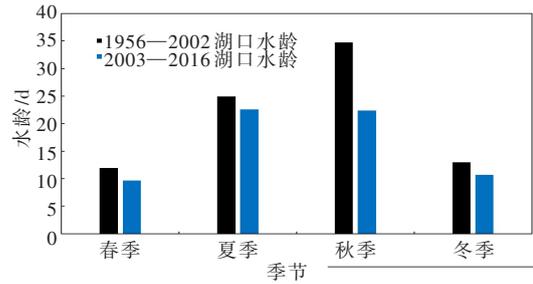


图8 湖口水龄对流域入流和湖口水位演变的响应

削弱了其对鄱阳湖的顶托效应，湖口水位下降明显，鄱阳湖与长江之间的江湖关系发生明显演变。1956—2002和2003—2016年湖口多年平均逐月水位对比见图7，从图可知，2003—2016年的4—12月水位均有所下降，其中10月份最大下降了2.2 m，而1—3月份由于长江干流的补水效应，湖口水位略有上升。与1956—2002相比，2003—2016年鄱阳湖流域入流整体呈下降趋势，其中4月等大部分月份的流域入流有所下降，1月等部分月份有所上升，见图7。根据工况1和2的模拟结果分析了江湖关系和流域入流演变对鄱阳湖水龄的影响，见图8。

由前面分析可知，湖口水位下降将导致鄱阳湖水龄减小，流域入流下降将导致鄱阳湖水龄增大，而湖口水位演变对水龄的影响强于流域入流。与1956—2002相比，2003—2016年鄱阳湖在湖口水位和流域入流下降的双重影响下，湖口水龄年内分布特征未发生变化，但水龄值有所减小，鄱阳湖的换水能力有所增强，其中秋季水龄减小最为明显，减少了12.4 d，春、夏、冬季减少了2.3~2.4 d。

5 结论

本文建立了鄱阳湖二维水龄模型，采用情景分析方法，研究了鄱阳湖水龄的时空特征和影响因素，分析了水龄对江湖关系演变的响应，主要研究结论如下：

(1) 鄱阳湖水龄时空异质性显著。鄱阳湖水龄具有明显的季节性特征，湖口在春、夏、秋、冬季平均水龄分别为10 d、23 d、22 d、11 d，夏季和秋季水龄明显大于冬季和春季。鄱阳湖是一个快速换水和慢速换水共存的复杂洪泛系统，碟形湖和湖湾区域水龄明显大于主河道；从6个分区看，各分区之间水龄差异明显，其中分区Ⅰ(入江水道区)水龄最小，分区Ⅱ(西部湖区)最大。

(2) 鄱阳湖水龄的主要影响因素是湖口水位和流域入流。通过设置不同的模拟工况，发现湖口水位降低会导致鄱阳湖水龄减小，而流域入流下降则会增加鄱阳湖水龄；湖口水位的年内波动导致了鄱阳湖水龄的年内波动；湖口水位是鄱阳湖水龄的主导因素。

(3) 近几十年来江湖关系演变导致了鄱阳湖水龄的减小。2003年后，鄱阳湖江湖关系发生变化。与1956—2002相比，2003—2016年湖口水位下降，鄱阳湖水龄减小，其中秋季减少最多，为12.4 d。

此外，水龄除了可以反映水体交换能力还能表征营养盐、叶绿素等物质在水体中输移扩散的快慢，三峡水库等区域的水龄与富营养化相关关系研究已有报道。未来在揭示鄱阳湖水龄时空特征与规律的基础上，定量化探究鄱阳湖水龄与营养盐迁移转化、富营养化时空分布之间的关系将是研究水文情势变化下鄱阳湖水环境演变规律的一个重要内容。

参 考 文 献：

- [1] KÄRNÄ T, BAPTISTA A M . Water age in the Columbia River estuary [J] . Estuarine Coastal & Shelf Science, 2016, 183: S0272771416303213 .
- [2] MEREL, SYLVAIN, WALKER, et al . State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins [J] . Environment International, 2013, 59(3): 303-327 .
- [3] 任杰, 朱广伟, 金颖薇, 等 . 换水率和营养水平对太湖流域横山水库硅藻水华的影响 [J] . 湖泊科学,

- 2017, 29(3): 604–616 .
- [4] 王洗民, 翟淑华, 张红举, 等 . 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析[J] . 湖泊科学, 2017, 29(1): 9–21 .
- [5] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰, 等 . 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性[J] . 水资源保护, 2020, 36(3): 34–39 .
- [6] DELHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al . Toward a general theory of the age in ocean modelling[J] . Ocean Modelling, 1999, 1(1): 17–27 .
- [7] DELHEZ É J M, DELEERSNIJDER É . The concept of age in marine modelling[J] . Journal of Marine Systems, 2002, 31(4): 279–297 .
- [8] GAO Q, HE G, FANG H, et al . Numerical simulation of water age and its potential effects on the water quality in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J] . Journal of Hydrology, 2018, 566: 484–499 .
- [9] 黄春琳, 李熙, 孙永远 . 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响[J] . 湖泊科学, 2017, 29(1): 22–31 .
- [10] PINILLA E, CASTILLO M I, PÉREZ-SANTOS I, et al . Water age variability in a Patagonian fjord[J] . Journal of Marine Systems, 2020, 210: 103376 .
- [11] 刘岩, 赵智杰 . 前海湾填海区的水龄特征及改善措施模拟[J] . 环境科学与技术, 2015, 38(2): 162–168 .
- [12] 杨金艳, 徐勇, 周杰, 等 . 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选[J] . 水利水运工程学报, 2020(2): 85–90 .
- [13] TAN Z, CHEN P, ZHANG Q, et al . Vegetation changes in the Poyang Lake wetland linked to the Three Gorges Dam: an assessment based on moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations from 2000 to 2012[J] . Wetlands, 2019, 39(1): 151–163 .
- [14] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等 . 鄱阳湖换水周期与示踪剂传输时间特征的数值模拟[J] . 湖泊科学, 2017, 29(1): 32–42 .
- [15] LI Y, ZHANG Q, XINGGEN L, et al . Water balance and flashiness for a large floodplain system: A case study of Poyang Lake, China[J] . Science of the Total Environment, 2019, 710: 135499 .
- [16] 黄爱平 . 鄱阳湖水文水动力特征及富营养化响应机制研究[D] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018 .
- [17] 唐昌新, 熊雄, 邬年华, 等 . 长江倒灌对鄱阳湖水动力特征影响的数值模拟[J] . 湖泊科学, 2015, 27(4): 700–710 .
- [18] QI H, LU J, CHEN X, et al . Water age prediction and its potential impacts on water quality using a hydrodynamic model for Poyang Lake, China [J] . Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (13) : 13327–13341 .
- [19] 张素香, 许新发, 徐兴, 等 . 鄱阳湖水龄季节性变化特征[J] . 湖泊科学, 2018, 30(1): 199–210 .
- [20] 赵贵章, 董锐, 王赫生, 等 . 近30年鄱阳湖与洞庭湖水文变化与归因分析[J] . 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 74–83 .
- [21] HUANG A, PENG W, LIU X, et al . Characteristics and factors influencing the hysteresis of water area–stage curves for Poyang Lake[J] . Water, 2017, 9(12): 956 .
- [22] BOLIN B, RODHE H . A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs[J] . Tellus, 1973, 25(1): 58–62 .
- [23] 韩祯, 王世岩, 刘晓波, 等 . 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值[J] . 水利学报, 2019, 50(2): 252–262 .
- [24] 张琨, 陈晓玲, 张媛, 等 . 水文地貌分区下鄱阳湖丰水期水质空间差异及影响机制[J] . 中国环境科学, 2014, 34(10): 2637–2645 .

Spatial and temporal characteristics and influencing factors of water age in Poyang Lake

HUANG Aiping, LIU Xiaobo, PENG Wenqi, DONG Fei, HAN Zhen, WANG Weijie

(Department of Water Ecology and Environment China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Water exchange capacity is a key index to characterize the hydrodynamic and pollutant transport and diffusion of lakes. The hydrological regime of Poyang Lake fluctuates violently, and the spatial and temporal characteristics and influencing factors of water exchange capacity are complex. In this paper, water age is selected to describe the water exchange capacity of Poyang Lake, and the water age model of Poyang Lake is established. The temporal and spatial characteristics and influencing factors of water age are studied, and the response law of water age to the evolution of River-Lake relationship is analyzed. The results show that: (1) the water age of Poyang Lake has significant temporal and spatial heterogeneity. The water age in summer and autumn is significantly longer than that in winter and spring, and the water age in inner lake and bay area is significantly longer than that in main river channel and beach. (2) The water level at Hukou and the inflow of the basin are the main factors affecting the water age of Poyang Lake. The influence of the water level at Hukou on the water age of Poyang Lake is greater than that of the basin inflow; the higher the water level at Hukou, the longer the water age of Poyang Lake, while the inflow of the basin is the opposite; the main reason for the drastic fluctuation of the water age of Poyang Lake is the drastic change of the water level at Hukou. (3) After 2003, with the evolution of the River-Lake relationship, the water age of Poyang Lake decreases, especially in autumn. The research results can provide scientific support for the protection of water resources of Poyang Lake, and also provide reference for the study of water exchange capacity of other large lakes.

Keywords: Poyang Lake; river-lake relationship; water age; temporal and spatial characteristics; influencing factors

(责任编辑:李福田)

论文摘要编写要点

论文摘要十分重要,它是沟通读者和作者之间的桥梁。在今天信息时代,读者不可能阅读刊物的每一篇论文去查找所需的信息,只有通过摘要了解论文的主要内容,从而判断有无必要阅读全文。国内外的检索系统为了信息交流,更建立了各种二次文献数据库,帮助读者通过查找论文摘要,以便提取原文。而二次文献数据库的基础是作者的论文摘要。但许多作者却往往忽视了论文摘要的这一重要意义,没有下工夫把论文摘要写好,尤其是英文摘要。当今科技领域,英文已经成为国际交流语言,世界各国学者想追踪了解某一学科的发展情况,多会用英文工具书、数据库进行检索。而国外的检索系统也主要通过英文摘要判断论文是否被收录进数据库。为了帮助作者写好摘要,我编辑部在给作者的论文修改通知中都附有《摘要编写要点》,供作者参考。现再刊登于下,以便作者查阅。

1. 摘要是论文内容不加注释和评论的简短陈述,应包括正文的要点,具有独立性和自含性,让读者不阅读全文就能了解论文的基本内容,以判断有无必要阅读全文,也可供二次文献采用。

2. 摘要应说明研究工作的目的、方法与手段、结果和结论,要尽量简短,尽可能省略课题的背景信息。

3. 摘要中的内容应在正文中出现,不能对正文进行补充和修改。

4. 摘要中不用图、表、非公用共知的符号和术语,不能引用文献;缩写名称在第一次出现时要有全称(包括中文和英文)。

5. 摘要中不要多列数据,出现的应该是最重要的、最关键数据。

6. 中文摘要一般300字左右,中英文摘要应基本对照,不能因为某些内容不好翻译就略去。

7. 关键词是为了文献标引工作,是从论文中选取出来用以表示全文主题内容信息的单词或术语,一般为3~8个词,尽量用规范词。

《水利学报》编辑部