J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(3):000-000
DOI 10.18307/2026.0341

1980—2020 年鄱阳湖退水期水体滞留时间时空演变及对水情响应*

仝 钰[1,2,3,4], 姚静[2,3**], 万荣荣[2,3], 李 冰[2,3], 谭志强[2,3], 徐力刚[2,3], 郑光辉[1]
（1: 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 211800）
（2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135）
（3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站，庐山 332899）
（4: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135）

摘 要：水体滞留时间是表征湖泊水体更新能力与污染物输移过程的关键水动力学指标，与湖泊水环境状况密切相关。近年来，受水文情势变化影响，鄱阳湖水环境面临新的挑战。本研究基于 MIKE21 水动力模型耦合示踪剂模块，模拟并分析了 1980—2020 年间鄱阳湖退水期水体滞留时间的时空演变特征及其对水文变化的响应机制。结果表明：鄱阳湖退水期水体滞留时间呈现显著时空异质性，全湖平均滞留时间为 36d，各区域依次为：东部湖湾（93d）> 南部湖区（53d）> 入江通道（38 天）> 主湖区（26d）> 吴城碟形湖群（17d）。近 40 年来，全湖平均滞留时间呈轻微缩短趋势，三峡工程运行后（2003—2020 年）较运行前（1980—2002 年）缩短约 4d，其中入江通道缩短幅度最大（9d），主湖区次之（5d），其余区域变化不显著。从水文年类型来看，洪水年滞留时间显著大于枯水年；退水期内，滞留率与水位呈显著正相关。退水水位下降与退水速率加快是导致滞留时间缩短的主要驱动因素。本研究可为鄱阳湖水环境治理与生态修复提供科学参考。
关键词：鄱阳湖；滞留时间；水动力模型；示踪剂模拟；时空分布

Spatiotemporal variations in residence time and response to hydrological regime during the receding period of Lake Poyang (1980-2020)

Tong Yu[1,2,3,4], Yao Jing[2,3**], Wan Rongrong[2,3], Li Bing[2,3], Tan Zhiqiang[2,3], Xu Ligang[2,3], Zheng Guanghui[1]
(1: *School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 211800, P.R.China*)
(2: *Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China*)
(3: *Poyang Lake Laboratory for Wetland Ecosystem Research, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Lushan 332899, P.R.China*)
(4: *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, P.R.China*)

Abstract: Residence time is a key hydrodynamic indicator of water renewal and exchange capacity in lakes, directly influencing pollutant transport and migration processes and thus closely linked to a lake's water quality. In recent years, significant changes in the hydrological regime of Lake Poyang have exerted notable impacts on its aquatic environment. This study employs the MIKE21 hydrodynamic model coupled with a tracer module to quantitatively analyze the spatiotemporal distribution and interannual trends of

* 2025-04-15 收稿；2025-08-18 收修改稿。
国家自然科学基金（U2240219，42371044，42171104）、国家重点研发计划（2022YFC3204104）、江西省科技计划项目（20244BCF61001，20241ZDD02019）、中国科学院国际伙伴计划项目（131432KYSB20200029）和九江市科技计划项目（S2024TDJS0009，S2024QNZZ0006）联合资助
** 通讯作者；Email：jyao@niglas.ac.cn

residence time during the receding period (1980–2020) in Lake Poyang, and further elucidates its quantitative response to hydrological variations. Results indicate that residence time during the receding period exhibits strong spatiotemporal heterogeneity. The whole‐lake average residence time is 36 d, with sub‐regional averages ranked as follows: eastern lake bays (93 d) > southern lake area (53 d) > northern outflow channels (38 d) > main lake area (26 d) > Wucheng seasonal disconnected-lake group (17 d). Interannually, the whole‐lake average residence time shows a slight shortening trend over the past four decades. After the Three Gorges Dam began operation (2003‐2020), the average residence time decreased by approximately 4 d relative to the pre‐dam period (1980–2002). The northern outflow channels experienced the largest reduction (9 d), followed by the main lake area (5 d), while changes in other regions were minimal. Residence time was significantly longer in wet years than in dry years. During the receding period, residence rate was positively correlated with water level. The decline in water level and the accelerated recession rate are identified as the primary drivers of the shortened residence time. These findings provide a scientific basis for water environment management and ecological restoration in Lake Poyang.

Keywords: Lake Poyang; residence time; hydrodynamic model; tracer simulation; spatiotemporal distribution

水体滞留时间是指位于研究区域内某一地点的水体离开水域所需的时间，通常用来描述水体在该区域内的平均停留时间，是评价水体更新能力和交换能力的重要指标[1-2]。作为衡量水环境的重要参数，滞留时间对污染物的行为和水质变化有着显著影响[3]。研究水体滞留时间及其变化，是理解河流或湖泊水环境和水生态变化的基础，对水资源规划和生态环境管理具有重要的指导意义。

关于水体滞留时间的研究，目前主要的研究方法有传统比值法和水动力模型法。传统比值法基于湖泊蓄水量和年出流量的比值计算平均滞留时间[4]，该方法适用于水文情势简单的湖泊，但对具有快速换水系统的湖泊，单一比值无法反映湖泊滞留时间的空间异质性和动态变化。基于水动力模型并耦合保守物质示踪剂模拟来确定水体滞留时间的方法，物理机制更强，被广泛应用于不同区域中水体交换与滞留时间的研究。Gao 等[5]利用二维水动力和水体交换模型计算城市人工湖泊的水体滞留时间；结果显示，高流量湖区滞留时间在 1.0 d~66 d，低流量湖区滞留时间在 1.5 d~102 d，即流量越大，滞留时间越短。石泳昊等[6]基于水动力模型 TELEMAC 和示踪剂模拟，计算了湛江湾水体滞留时间，结果表明枯季径流量小、水体滞留时间较长，洪季的滞留时间相对较短；同时，在地形较为封闭的区域，水流速度慢，水体滞留时间长。匡翠萍[7]基于二维水动力模型耦合示踪剂模拟，表明金梦海湾围海造岛工程的增加使研究区域水体滞留时间由 212 h 降至 171 h，降幅约 20%，水体交换率增加了 10%。

鄱阳湖是中国第一大淡水湖，属季节性、吞吐型湖泊，在调蓄长江洪水、涵养水源、改善当地气候和维护周围地区生态平衡等方面都起着重要的作用，具有丰富的生物多样性和自然生态价值[8]。近年来，在气候变化、三峡工程和人类活动的共同作用下，鄱阳湖水文节律发生深刻变化，低水干旱事件频发[9]。受水文变化及复杂地形影响[10]，鄱阳湖水环境问题日益凸显，氮磷浓度有所上升，水流较缓的湖湾及尾闾区等蓝藻水华时有发生[11-12]。目前针对鄱阳湖水环境变化成因的研究主要侧重水生生物、营养盐等方面[11,13]。作为影响水环境的重要因素，鄱阳湖水体滞留时间研究尚不深入，尤其是受高度时空异质性的水动力影响，湖区不同时段、不同区域的水体滞留时间差异巨大，对污染物的扩散输移能力也各不相同。以往关于鄱阳湖水体滞留时间的研究主要集中在季节差异和工程影响等方面[14-15]，而对于年际尺度下滞留时间的时空变化特征、趋势及对不同水文年的响应差异等研究尚且不足。另一方面，从年内不同水文阶段来看，鄱阳湖退水期是水位降低最为显著的时期[16]；这一时期处于丰水-枯水的过渡阶段，也是湿生植被萌发和首批候鸟抵达鄱阳湖的关键期[17]。目前，退水加快和水体滞留时间缩短已经引起了湿地生态部分功能受损[18]，但退水期水体滞留时间变化及对水情响应机制尚不明晰，亟待深入研究。

鉴于上述原因，本研究选择水体滞留时间作为衡量水体更新能力、指示水环境的指标，针对近年来鄱阳湖水位变幅最大的退水期，基于水动力模型耦合示踪剂模拟，开展 1980—2020 年鄱阳湖退水期水体滞留时间的时空变化研究，分析其时空分布特征及演变趋势，揭示退水期水体滞留时间对水情变化的定量响应关系。该结果可为鄱阳湖的水环境治理和湿地生态修复提供科学依据。

1 材料方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖地处长江中下游南岸（28°11′~29°51′N，115°49′~116°46′E），属通江泛洪湖泊，上承赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河流来水，下经湖盆调蓄从湖口汇入长江。受亚热带季风气候影响，鄱阳湖流域降水主要集中在 4 月至 6 月，秋冬季节降水较少[19]。鄱阳湖地形具有极强的空间异质性（图 1a），湖盆地形南高北低，湖底高程从南部的 12 m 降至湖口附近的 1 m 以下，高程落差达 10 m 以上[20]。根据鄱阳湖地形、地貌、水文特征和水动力分区情况[21-22]，将湖区划分为以下五个区域：松门山以北的入江通道区域，松门山以南的主湖区，以及吴城碟形湖群区、南部湖区和东部湖湾区（图 1a）。作为过水性、吞吐型湖泊，鄱阳湖受五河来水和长江干流的双重影响，水文节律呈现显著的季节性变化特征。洪、枯季水位变幅巨大（可高达 15 m），丰水期水域面积广阔，可达 3000 km^2 以上；低、枯水期水域面积萎缩至不足 1000 km^2，表现为“洪水一片、枯水一线”的水文特征[23]。

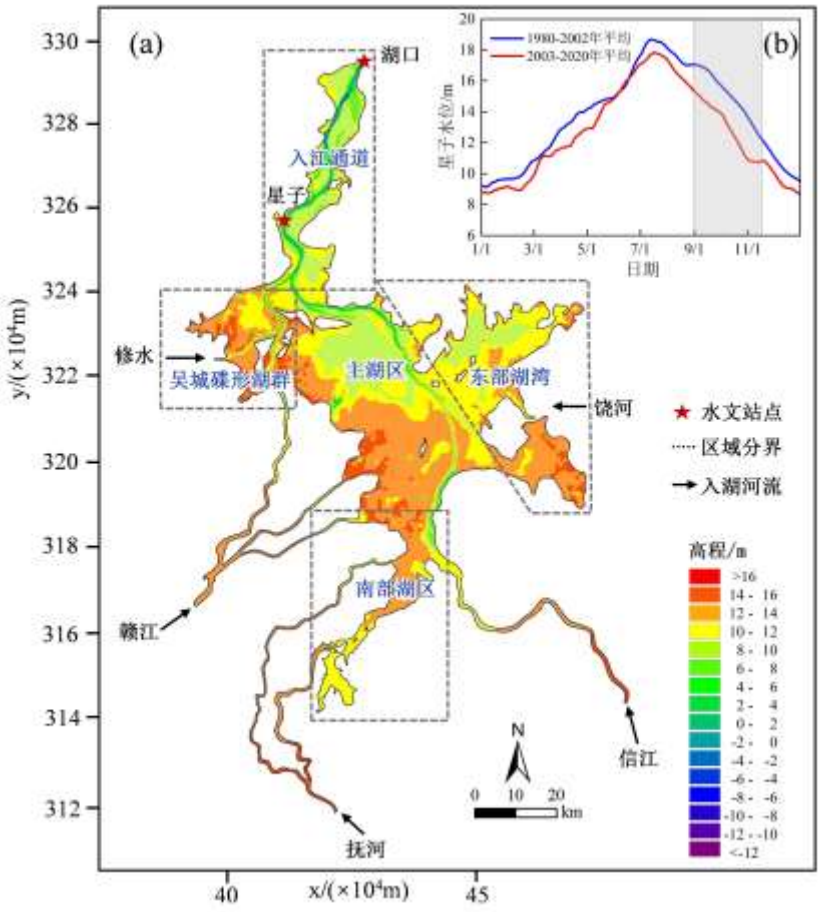

图 1 鄱阳湖地形及水文站点分布（a）和 1980—2002 年、2003—2020 年多年平均水位（阴影部分为水位变幅最显著的退水期）（b）

Fig. 1. Bathymetry and gauging stations distribution (a) and multi-year average water levels 1980-2002 and 2003-2020 (The shaded area represents the receding period with the most significant water level variation) (b) of Lake Poyang

1.2 水动力模拟

鄱阳湖属于典型的宽浅型湖泊，水体垂向混合较好[24]，适用于二维水动力模型。针对鄱阳湖湖盆地形和岸线较为复杂的特点，选择基于无结构网格的二维水动力模型 MIKE 21 进行模拟。目前，该模型已经广泛应用于鄱阳湖水文水动力模拟和旱涝事件的评估研究中[23,25-26]。从模型精度来看，湖区内站点的水位相对误差均在±5%以内，Nash-Sutcliffe 系数达 0.98，模拟效果和精度都较好，具体的率定与验证过程详见文献[25-27]。

根据堤坝分布及湖泊历史洪水淹没范围确定模拟范围。采用三角形格网对模拟范围进行剖分，在主河道局部网格加密，泛洪洲滩区域进行粗化剖分，剖分网格数20450，节点数11251，网格分辨率为70~1500 m。“五河”的入湖径流过程作为上游开边界条件，长江与鄱阳湖交汇处的湖口水位过程线作为下游开边界条件。风作为鄱阳湖水动力场的影响因素之一，可能对局部湖区流速产生影响，故将星子站的逐日风场数据纳入模型中参与计算。模型中涉及到的参数主要有时间步长、底床糙率、涡粘系数等，具体参数为：时间步长为5 s；曼宁糙率系数M取值随空间变化，范围为30~50 $m^{1/3}s^{-1}$；涡粘系数采用Smagorinsky公式进行计算[28]，Smagorinsky系数取均一值0.28。

1.3 示踪剂模拟

在水动力模型基础之上耦合示踪剂模拟，通过示踪剂的浓度变化及所需历时来计算每个网格的滞留时间，进而获取鄱阳湖滞留时间的空间分布特征。本研究模拟年份选取1980—2020年，考虑到近年来鄱阳湖退水速率明显加快、枯水期提前等特征显著，故模拟时间选择退水期。选取每年夏季最高水位作为起算时间，模拟从高水至退水的整个过程，并延续模拟至下一年年底以涵盖所有区域的浓度变化过程。设全湖每个网格的示踪剂初始浓度为1 mg/L；设定湖泊入流为清水，即浓度为零；湖泊出流浓度采用零梯度边界；不计沉降与衰减过程。模拟对流扩散作用下示踪剂浓度逐渐减小的过程，根据每个网格的浓度稀释状况及历时来计算其每年退水期的滞留时间。

1.4 滞留时间计算

选择基于浓度变化的指数衰减模型，即在保守物质示踪剂模拟的基础上引入Takeoka的剩余函数[29]，对滞留时间进行计算。计算公式为：

$$C(x,y,t) = C_0 \cdot e^{-t/\gamma}$$

式中，$C(x,y,t)$为任意点(x,y)的浓度值；$C_0(x,y)$为该点初始浓度值；t为时间；γ为该点的滞留时间，当$t=\gamma$时，表示浓度已经衰减到初始浓度的1/e。因此，滞留时间可具体可量化为湖泊中一个元素浓度降低至初始浓度的1/e（约0.37）所需要的时间[22]。其中，经过时间t后，滞留的浓度$C(x,y,t)$与初始浓度$C_0(x,y)$的比值即为滞留率[30]。

在水动力模拟和示踪剂模拟的基础上，基于上述滞留时间公式，计算1980—2020年高水-退水期的滞留时间。在此基础上，开展年际尺度、区域尺度的水体滞留时间及相关水情趋势分析。此外，考虑到鄱阳湖的水文情势在三峡蓄水2003年后发生明显变化[9]（图1b，其中退水期水位变化最大，平均下降2.15m），故以2003年为时间节点，划分1980—2002年、2003—2020年两个时期，对三峡前后的鄱阳湖退水期水体滞留时间开展进一步对比分析。

2 结果

2.1 滞留时间的时空分布特征及变化趋势

1980—2020年鄱阳湖退水期水体滞留时间的空间分布如图2-3。湖区水体滞留时间表现为“东长西短”的空间分异特征。从空间变化来看，鄱阳湖退水期滞留时间沿主湖区的河道向两侧呈梯度变化。主湖区往西滞留时间呈现缩短的趋势，由主湖区的10-50 d到西部河口区<25 d。主湖区往东滞留时间逐渐变长，从主湖区10-50 d到东部湖湾>100 d。东部湖湾地区滞留时间自湾外向湾内呈梯度增长，滞留时间从100 d到>300 d，变化差异显著，差幅达200 d以上。北部入江通道区域靠近入江口，滞留时间空间分布沿主航道与主湖区东部相连通，整体<75 d。南部湖区湖湾滞留时间梯度变化差异较大，自北向南，滞留时间由50 d增至>300 d。

纵观近40年鄱阳湖退水期水体滞留时间变化情况，不同年代呈现不同的变化趋势。对比图2、图3发现，从多年平均角度，鄱阳湖三峡前后退水期滞留时间空间分布差异不大，但在入江通道和主湖区等局部区域退水期逐年滞留时间表现出略微缩短趋势。此外，不同水文年的水体滞留时间差异较大。如1983年、1998年、2020年等鄱阳湖典型洪水年，退水期滞留时间较其他年份显著增长；而在1997年、2006年典型枯水年，退水期滞留时间较其他年份明显变短。

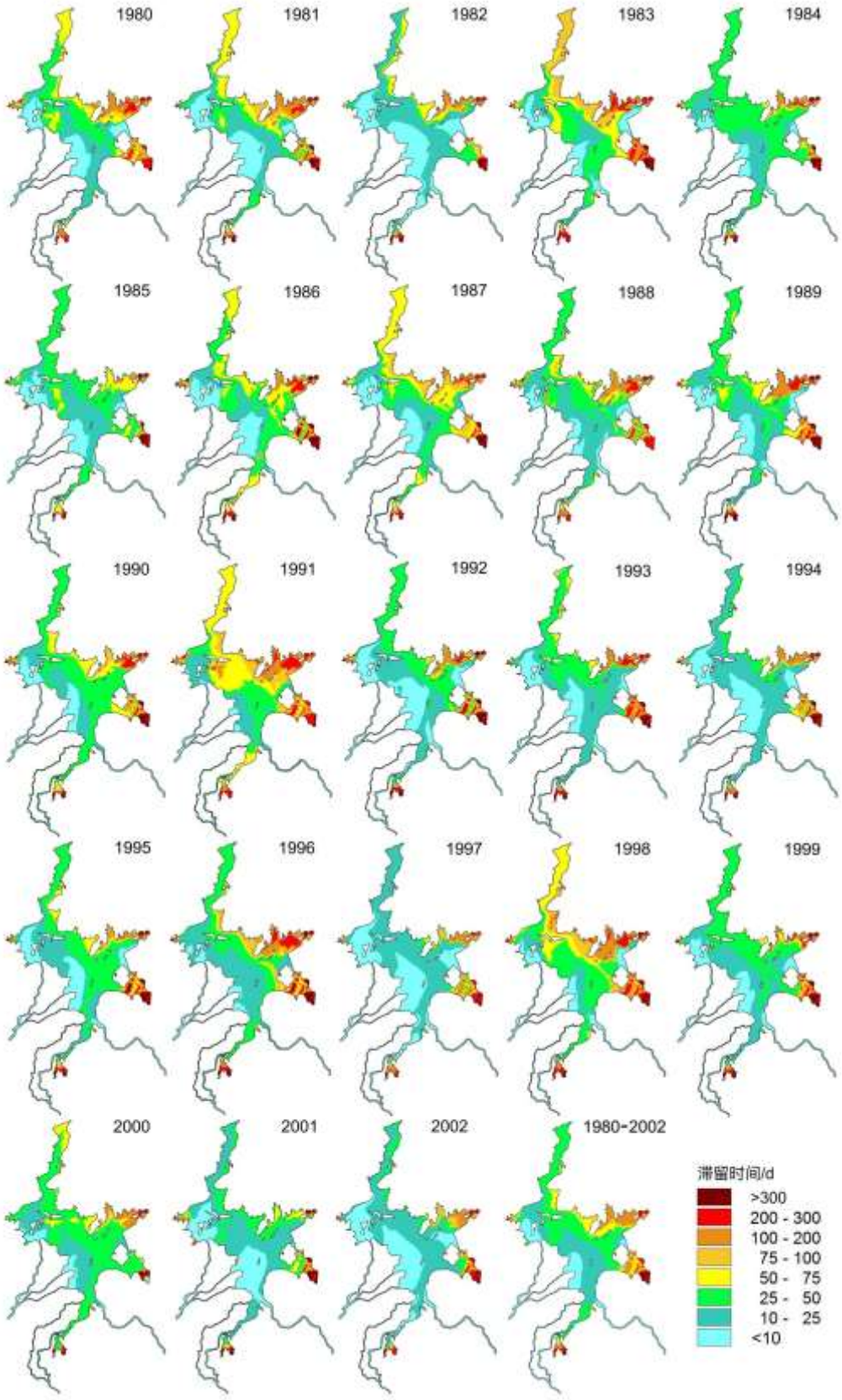

图 2 1980—2002 年间鄱阳湖退水期逐年及多年平均滞留时间时空分布

Fig. 2. Spatiotemporal distributions of annual and multi-year average residence times during the receding period of Lake Poyang from 1980 to 2002

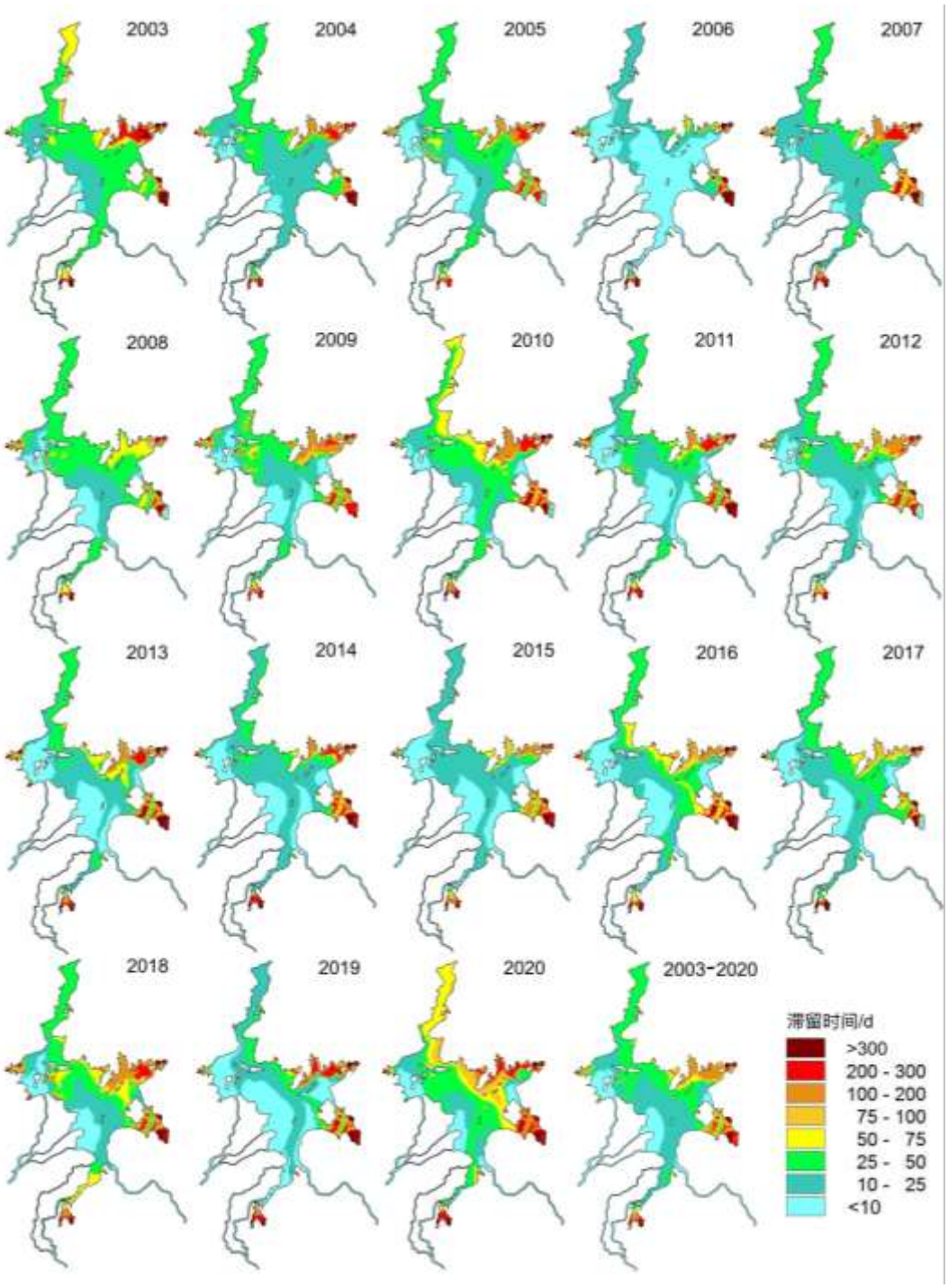

图 3 2003—2020 年间鄱阳湖退水期逐年及多年平均滞留时间时空分布

Fig. 3. Spatiotemporal distributions of annual and multi-year average residence times during the receding period of Lake Poyang from 2003 to 2020

进一步分析鄱阳湖全湖平均和五个不同区域的退水期平均滞留时间及变化趋势。如图 4 所示，从滞留时间量级来看，在 1980—2020 年期间，鄱阳湖全湖平均退水期滞留时间的变化范围在 17~62 d，平均值为 36 d，其中滞留天数最短在 2006 年（7 d），最长在 1991 年（62 d）。就局部区域而言，北部入江通道退水期平均滞留时间变幅在 12~75 d，平均值约 38 d，滞留时间 2006 年最短。主湖区滞留天数变化范围在 8~53 d，滞留时间均值为 26 d，最低值也在 2006 年（53 d）。东部湖湾地区的平均滞留时间在 55 d 和 138 d 之间，平均滞留时间均值长达 93 d。南部湖区和吴城碟形湖群区滞留时间均值分别为 53 d 和 17

d。在退水期，平均滞留时间最长的区域是东部湖湾地区，最短的是吴城碟形湖群区。东部湖湾地区地形较为封闭，水动力较弱，滞留时间显著长于其他区域，其平均滞留时间约是全湖平均滞留时间的 2.6 倍。吴城碟形湖群区处于赣江的入湖口，鄱阳湖入湖流量以赣江所占比重最大，且水流速度较快，水体的循环更新相较于湖区其他部分更为迅速，平均滞留时间约 17 d。故鄱阳湖不同区域平均滞留时间由长到短依次是：东部湖湾>南部湖区>入江通道>主湖区>吴城碟形湖群区。从变化速率来看，鄱阳湖各区域的退水期滞留时间呈现出不同程度的缩短态势。北部入江通道区域滞留时间降幅最为明显（图 4b），以 0.44d yr^{-1} 的速度持续减少，其平均滞留时间较三峡前缩短了约 9 d，由 42 d 降至 33 d，缩短趋势明显。主湖区和全湖平均滞留时间变化趋势相近，分别以 0.22d yr^{-1} 和 0.2d yr^{-1} 的速率下降，平均滞留时间相较于三峡前分别缩短了 5 d 和 4 d。东部湖湾、南部湖区和吴城碟形湖群区也呈现出微弱下降趋势，降速依次为 0.15d yr^{-1}、0.07d yr^{-1} 和 0.04d yr^{-1}。

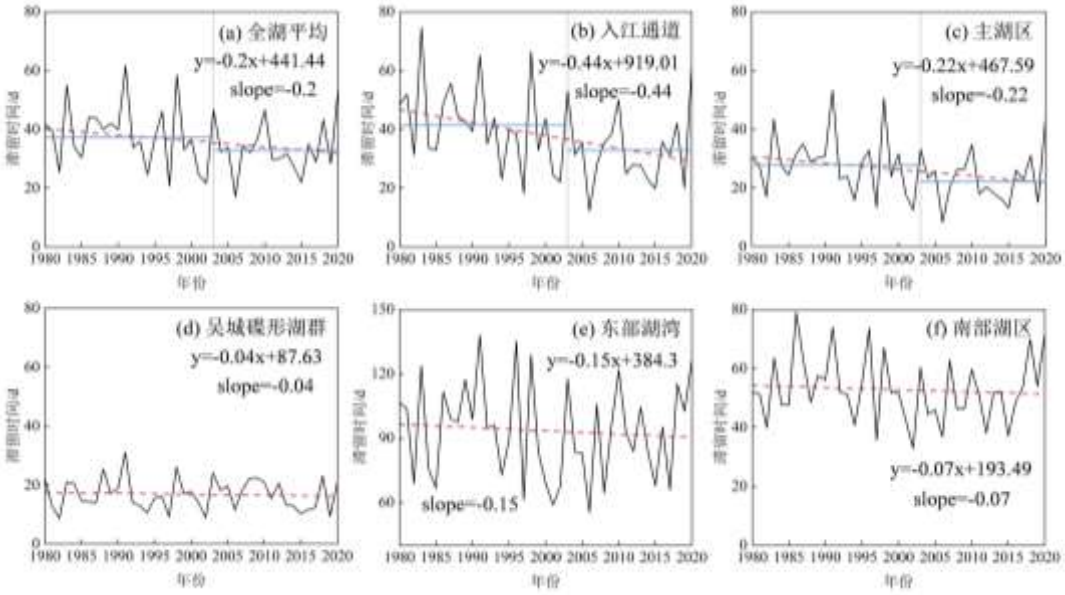

图 4 鄱阳湖不同区域滞留时间年际变化

Fig. 4. Interannual variations of residence time in various regions of Lake Poyang

2.2 滞留时间对水情的定量响应关系

水情变化是影响鄱阳湖水体滞留时间的重要因素。为了探讨鄱阳湖滞留时间对水情变化的响应，选择代表性站点星子站，分析其退水期水位和滞留率的关系。选取部分连续退水年份，将最高水位作为起始点计算滞留率，对滞留率与水位进行拟合分析。研究发现，在退水期水位连续下降的年份（图 5a），如 1985 年、1988 年、1992 年、1995 年、2000 年、2010 年、2018 年，其滞留率与水位呈正相关关系（图 5b-5h），多项式回归拟合的相关系数 R^2值均达到 0.9 以上，拟合效果良好。而在有些年份，退水阶段水位并非连续下降，而是降至一段后又有所回升，这些年份的滞留率与水位拟合关系并不好。由此可以得出结论：在连续退水年份的退水期间，鄱阳湖的滞留率与水位之间呈现显著的正相关。即从高水位到低水位，随着水位的逐步降低，滞留率呈现出相应的下降趋势。

通过分析星子站 1980—2020 年最高水位及其退水两月后的水位（图 6a），发现 2003 年之后鄱阳湖每年最高水位平均值有所降低，由 19.8 m 降至 18.8 m；退水水位更为明显，由平均 15.5 m 降至 13.6 m，最高水位和退水水位差值变大。即三峡后，相同时期的退水幅度变大，湖泊存水时间缩短。进一步计算退水速率，即星子每年最高水位和退水两月后的水位之间的差值与退水天数的比值。从 1980—2020 年退水速率的变化趋势可以看出（图 6b），1980—2020 年星子退水速率从三峡前 0.07 m d^{-1} 提升至三峡后 0.09 m d^{-1}，且变化趋势显著（$p<0.05$）。与此同时，星子滞留时间平均值由三峡前 40d 降至三峡后 30d，滞留时间的缩短趋势高度显著（$p<0.01$），其变化趋势与退水速率正好相反（图 6c）。这表明，近 40 年滞留时

间的缩短与水位降低、退水速率加快直接相关。即，退水速率加快意味着水位下降速度加快，滞留时间随之缩短。

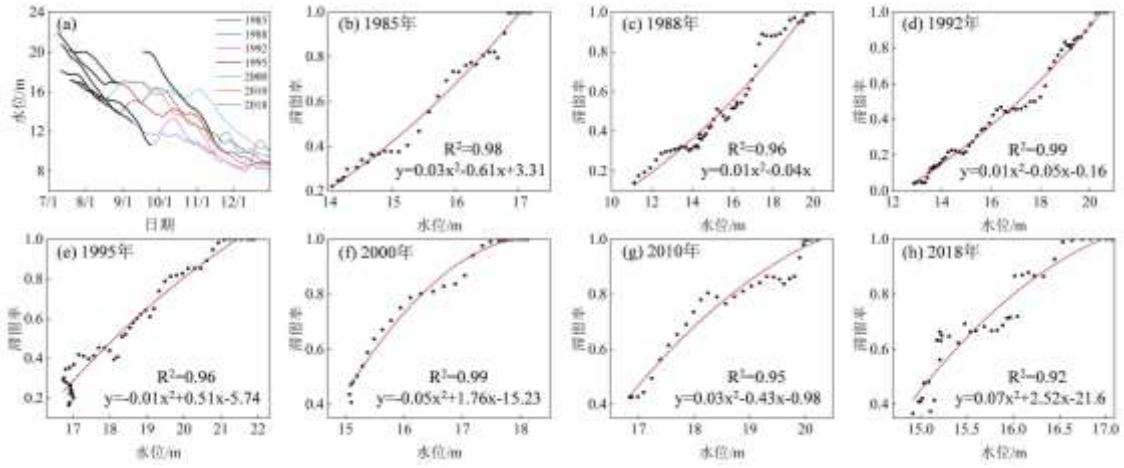

图 5 星子站连续退水年份高水-枯水逐日水位变化

（其中黑色加粗部分为连续退水时段）（a）和滞留率与水位的相关关系（b-h）

Fig. 5. Daily water level variations from high to low water level periods (The black lines indicate continuous receding periods) (a) and correlation between residence rate and water level (b-h) in typical years with continuous receding periods at Xingzi station

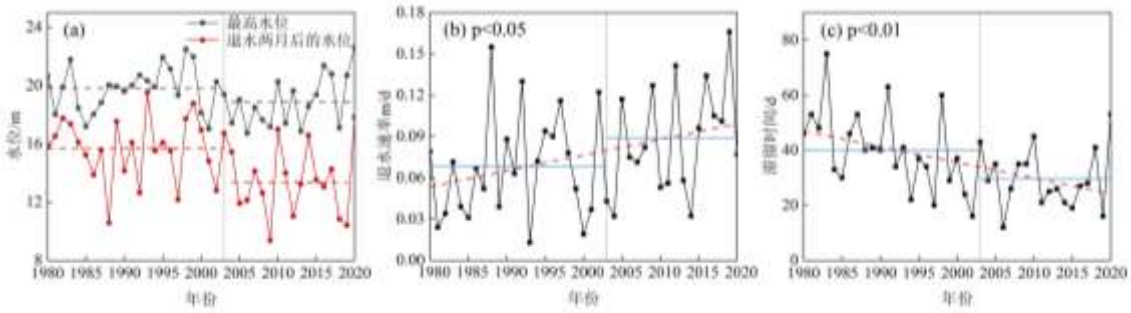

图 6 1980—2020 年星子站最高水位及退水两月后水位（a）、退水速率（b）和滞留时间（c）变化

Fig. 6. Variations in the highest water levels and water levels two months later receding (a), receding rate (b) and residence time (c) of Xingzi station from 1980 to 2020

3 讨论

3.1 通江湖泊滞留时间时空变化特征

不同类型湖泊的滞留时间往往存在差异。通江湖泊水流动态变化受江湖关系、地形、季节变化综合影响，水动力条件复杂。鄱阳湖作为典型的通江吞吐型湖泊，水体更新较快，滞留时间整体较短，退水期平均滞留时间小于 50 d，与风生流湖泊的水体滞留时间截然不同。风生流湖泊依赖风力驱动表层水流，水体交换速度慢，水体滞留时间较长[31]。以太湖为例（水深 1.9 m，面积 2338 km^2），作为典型的大型浅水风生湖，水体滞留时间整体大于 100 d[32]。类似的，荷兰的洛斯德雷赫特湖（面积为 10 km^2[33]，平均水深 1.85 m）水体滞留时间达 365 d[34]。鄱阳湖季节性变化的水情特征和复杂多变的地形条件[20]还导致其滞留时间具有极强的时空异质性。其中，滞留时间最长的区域是东部湖湾地区，湾区滞留时间平均>90 d（最高超过 300 d），越靠近湾区内部滞留时间越长，远大于全湖平均滞留时间。这主要由于东部湖湾地形较为封闭，并且受风场主控，流速小，物质易于堆积，不利于扩散[22]。李云良等[14]针对鄱阳湖涨-洪-退-枯四个时期开展示踪剂模拟，采用与本文相同的方法计算鄱阳湖不同季节的滞留时间；结果表明，春季滞留时间最短，夏季滞留时间最长，湖湾区滞留时间在夏季最长达 300 d。此外，尽管不同时期的滞留时间在数值上呈现较大差异，但其空间分布格局在季节尺度上具有较高的相似性，即湖湾地区滞留时间

整体较长，水流运动较快的主河道区域的滞留时间较短。除滞留时间外，水龄也是描述湖泊水体交换和更新重要参数。范宏翔等[35]表明鄱阳湖水龄存在明显的空间分异，东部和南部湖区尾闾水龄平均为228.01 d，而通江水体的水龄平均为24.21 d；与本文的滞留时间量级及空间分布格局高度一致。此外，同属于通江湖泊的洞庭湖，其换水周期和滞留时间相比鄱阳湖更短，甚至不足30 d[36-37]；且经三峡大坝蓄水后，长江出流和回流大幅减少，滞留率随之下降，滞留时间较三峡前缩短1~2 d[37]，这与本文所揭示三峡工程运行后鄱阳湖滞留时间呈缩短趋势的结论相似。总体而言，长江中下游通江湖泊滞留时间的时空变化特征主要表现为时间短，时空异质性强，并呈微弱下降趋势。

3.2 鄱阳湖滞留时间变化原因

湖泊水体滞留时间变化主要是由湖泊水情变化引起的。受气候变化、三峡蓄水、人类活动等多种因素影响，鄱阳湖水文情势发生了显著的变化；其中退水期的变化尤为明显，具体表现在退水速率明显加快，枯水期提前、延长，且枯水位降低等[9]。史常乐等[38]通过对比分析2003—2014年与1964—2002年鄱阳湖都昌水位资料发现，三峡后鄱阳湖退水过程历时缩短25 d，退水速率显著加快。这与本研究计算的鄱阳湖星子站退水速度加快的情况相符。退水速率加快使得湖泊从高水位状态到低水位状态的过渡时间缩短，从而致使鄱阳湖退水期滞留时间缩短。

通江湖泊水情主要受江湖关系影响。高水位时，受长江顶托作用，呈湖相，水体流速较小，滞留时间延长；随着顶托作用减弱、拉空作用增强，湖相向河相转换，水位降低、流速加快，滞留时间缩短。回顾近40年鄱阳湖滞留时间的时空分布，容易看出部分年份的明显变化。在洪水年，滞留时间相比于其他年份较长，例如2020年鄱阳湖遭遇了持续的强降雨和极端天气，导致水位大幅上升[39]；同时，长江干流的水位较高，顶托作用增强，进一步提高了鄱阳湖水位及高水位持续时间，导致高水-退水期滞留时间变长。而在低水位年，滞留时间明显减短。2006年作为典型的枯水年，流域夏秋季节降水偏少导致入湖水量减少，长江上游夏秋季来水偏少叠加三峡水库蓄水的影响，对鄱阳湖拉空作用增强，从而导致鄱阳湖水位异常偏低，滞留时间整体缩短[40]。从江湖关系变化趋势来看，三峡工程运行以来，长江对鄱阳湖的顶托作用减弱，拉空作用增强[41]。鄱阳湖各湖区近40年滞留时间变化趋势表明，入江通道滞留时间降低趋势最为显著，这正是长江拉空作用最强烈的区域。此外，地形变化也会通过改变湖泊出流速率进而影响滞留时间。如Lai等[10]指出采砂导致入江通道地形下切，使枯水期鄱阳湖的泄流能力增强1.5~2倍；Yao等[42]表明入江通道地形下切，出流能力增加，滞留时间缩短。

3.3 滞留时间时空变化的生态环境指示意义

水体滞留时间影响着湖泊污染物的扩散和迁移，与水环境密切相关。水体滞留时间的时空分布，很大程度上影响了水环境的时空分布[43]。Wu等[44]调查发现鄱阳湖叶绿素a浓度呈现明显的空间分异，其中东部湖区叶绿素a浓度最高，而主河道等水流较快的区域叶绿素a浓度较低；这一特征与本文所揭示的鄱阳湖湖湾高滞留区、河道低滞留区的分布高度一致（图2-3）。鄱阳湖局部湖湾高水体滞留时间，叠加入湖负荷（城市废水和农业非点源污染）[45]和地形影响，导致污染物难以扩散，易出现水体富营养化现象。如饶河入湖口的东部湖湾，受入湖污染物影响，重金属（Cu、Cr和Zn）及总磷、总氮浓度较高[46-47]；而南部军山湖，受水产养殖所产生的氮磷营养盐影响，呈波动上升的趋中营养状态，面临着潜在的富营养化风险[48]。显然，鄱阳湖局部湖湾水体滞留时间较长且无明显缩短趋势（图4e-f），水环境问题相较于其他区域更为突出，是亟需改善的重点区域。此外，鄱阳湖作为重要的洪泛湿地生态系统，是越冬鸟类、江豚、鱼类的重要栖息地。有研究表明鄱阳湖鸟类数量与分布受退水模式影响[49]。然而，随着干旱频发、退水加快、水体滞留时间缩短，鄱阳湖面临候鸟栖息地外迁、鱼类和江豚搁浅及死亡风险加剧等一系列严峻的问题[50]。在此背景下，识别鄱阳湖不同区域的水体滞留时间变化特征及其对水情变化的响应关系，有助于针对性地开展分区域水环境治理和生态调控。针对湖湾区域可能的水体富营养化问题，未来可通过加强局部水文连通，加快水体流动与更新，以缩短水体滞留时间，改善局部水环境；而针对重要的生物栖息地，可开展微地形改造等措施，延长水体滞留时间，提升湿地的水资源存储量，促进湿地生态的保护与修复。

3.4 不足及展望

本文的滞留时间模拟设定初始时全湖均一浓度、流域来水为清水，旨在反映湖区内部污染物在流域来水作用下的传输、扩散能力。但实际上湖泊污染物往往存在外源输入，因此本文滞留时间时空分布模拟结果与湖泊实际污染物分布情况并不完全对应。除此之外，由于鄱阳湖属于季节性湖泊，涨水期、丰水期、退水期和枯水期各阶段水情差异较大，本文仅针对近年来水情变化最大的退水期开展滞留时间的变化研究，未来还需要进一步开展不同水情阶段的滞留时间时空分布及变化趋势研究，以全面揭示鄱阳湖滞留时间对水情的响应机制。

4 结论

本研究针对近年来鄱阳湖水位变幅最大的退水期，基于水动力和示踪剂的耦合模拟，定量模拟分析了 1980—2020 年鄱阳湖水体滞留时间的时空分布特征，揭示了长时序下鄱阳湖滞留时间的时空分布格局、变化趋势及与水情的定量关系。主要结论如下：

（1）鄱阳湖退水期水体滞留时间具有极强的时空异质性。滞留时间沿主湖区向两侧呈梯度变化，往西逐渐降低，往东逐渐增长。鄱阳湖退水期全湖平均滞留时间均值为 36 d。近 40 年来不同区域的平均滞留时间为：东部湖湾（93 d）>南部湖区（53 d）>入江通道（38 d）>主湖区（26 d）>吴城碟形湖群区（17 d）。

（2）从年际变化看，近 40 年鄱阳湖全湖平均滞留时间呈略微缩短趋势，三峡后较三峡前缩短约 4 d；其中入江通道降幅最大，较三峡前缩短 9 d；其次为主湖区缩短 5 d；东部湖湾、南部湖区和吴城碟形湖群区变化微弱。

（3）不同水文年中，鄱阳湖退水期的水体滞留时间在洪水年显著大于枯水年；在年内的连续退水期，滞留率与退水水位呈显著的正相关关系。

（4）水位降低、退水速率加快，是鄱阳湖退水期水体滞留时间缩短的主要原因。

5 参考文献

[1] Wang CF, Hsu MH, Kuo AY. Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, **60**(3): 381-393.

[2] Zimmerman J T F. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1976, **10**(2): 149-191.

[3] Yin Y, Yang K, Cai YJ *et al*. Declined nutrients stability shaped by water residence times in lakes and reservoirs under climate change. *Science of the Total Environment*, 2024. 953.

[4] Wu Z, Lai X, Zhang L *et al*. Phytoplankton chlorophyll a in Lake Poyang and its tributaries during dry, mid-dry and wet seasons: A 4-year study. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2014, **412**: 1-13.

[5] Gao XP, Xu LP, Zhang C. Estimating renewal timescales with residence time and connectivity in an urban man-made lake in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(14): 13973-13983.

[6] Shi YH, Jia LW, Zhang H *et al*. Analysis of residence time and influencing factors of water bodies in Zhanjiang Bay. *Environmental Science and Technology*, 2020, **43**(11): 17-24. [石泳昊, 贾良文, 张恒等. 湛江湾水体滞留时间及影响因子分析. 环境科学与技术, 2020, **43**(11): 17-24.]

[7] Kuang CP, Yu LL, Gu J *et al*. Effects of artificial islands on water exchange in Jinmeng Bay. China Environmental Science, *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 757-767. [匡翠萍, 俞露露, 顾杰等. 人工岛对金梦海湾水体交换的影响. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 757-767.]

[8] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社, 1998.

[9] Song JP, Wang XL, Wan RR *et al*, Changes in hydrological situation and ecological evolution characteristics of Poyang Lake before and after the construction and operation of the Three Gorges Project: review and outlook. *J Lake Sci*, 2025, **37**(3) : 1-20. [宋继鹏, 王晓龙, 万荣荣等. 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征：回顾与展望. 湖泊科学, 2025, **37**(3) : 1-20.]

[10] Lai X, Shankman D, Huber C *et al*. Sand mining and increasing Lake Poyang's discharge ability: Areassessment of causes for lake decline in China. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 1698-1706.

[11] Qian KM, Liu X, Duan M *et al*. Analysis of cyanobacterial distribution and its influencing factors in Poyang Lake. *China Environmental Science*, 2016, **36**(01): 261-267. [钱奎梅, 刘霞, 段明等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, **36**(01): 261-267.]

[12] Du YL, Zhou HD, Peng WQ *et al*. Modeling the impacts of the change of river-lake relationship on the hydrodynamic and water quality revolution in Poyang Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1274-1284. [杜彦良，周怀东，彭文启等. 近10年流域江湖关系变化作用下鄱阳湖水动力及水质特征模拟.环境科学学报, 2015, **35**(5): 1274-1284.]

[13] Dai GF, Zhang W, Peng NY *et al*. Study on the distribution of nitrogen, phosphorus and other pollutants and algal bloom risk in Poyang Lake and its littoral waters during the dry period. *Journal of Ecology and Environment*, 2015, **24**(05): 838-844. [戴国飞, 张伟, 彭宁彦等. 枯水期鄱阳湖及其滨湖水体氮磷等污染物分布与藻华风险研究. 生态环境学报, 2015, **24**(05): 838-844.]

[14] Li YL, Yao J, Li MF *et al*. Numerical simulation of water exchange cycle and tracer transport time characteristics in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2017. **29**(01): 32-42. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(01): 32-42.]

[15] Ye Q, Ji Y, Wu PJ *et al*. Impacts of the Poyang Lake hydraulic hub on lake hydrodynamics and residence time. *Hydropower Energy Science*, 2021, **39**(02): 13-17. [叶群, 计勇, 吴培军等. 鄱阳湖水利枢纽对湖区水动力及滞留时间的影响. 水电能源科学, 2021, **39**(02): 13-17.]

[16] Sun FD, Ma RH. Hydrologic changes of Poyang Lake based on radar altimeter and optical sensor. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(03): 544-557. [孙芳蒂, 马荣华. 鄱阳湖水文特征动态变化遥感监测. 地理学报, 2020, **75**(03): 544-557.]

[17] Hu ZP, Ge G, Liu CL *et al*. Structure of Poyang lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究.长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 597-605.]

[18] Yu FH, Zhai JC, Huang ZQ *et al*. The impact of Poyang Lake water level changes on the landscape pattern of wintering wading bird habitats. *Global Ecology and Conservation*, 2025, **58**: e03453.

[19] Zhang ZX, Huang YH, Xu CY *et al*. Analysis of Poyang Lake water balance and its indication of river–lake interaction. *SpringerPlus*, 2016, **5**(1): 1555.

[20] Wu GP, Liu YB, Fan XW. Characteristics and causes of topographic evolution of the lake basin of Poyang Lake in the last 30 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6) : 1168-1176. ［吴桂平, 刘元波, 范兴旺.近30年来鄱阳湖湖盆地形演变特征与原因探析. 湖泊科学, 2015, **27**(6) : 1168-1176.］

[21] Wu GP, Liu YB. Capturing variations in inundation with satellite remote sensing in a morphologically complex, large lake. Journal of Hydrology, 2015, **523**: 14-23.

[22] Yao J, Li YL, Zhang D *et al*. Wind effects on hydrodynamics and implications for ecology in a hydraulically dominated river-lake floodplain system: Poyang Lake. *Journal of Hydrology*, 2019, **571**: 103-113.

[23] Feng L, Hu C, Chen X *et al*. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**: 80-92.

[24] Li Y, Yao J, Zhang L. Investigation into mixing in the shallow floodplain Lake Poyang (China) using hydrological, thermal and isotopic evidence. *Water Science and Technology,* 2016, **74**(11): 2582-2598.

[25] Yao J, Zhang Q, Li YL *et al*. Effects of constant winds on the hydrodynamics of Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2016, **28**(01): 225-236. [姚静, 张奇, 李云良等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(01): 225-236.]

[26] Yao J, Li YL, Li MF *et al*. Impact of topographic changes on the depletion of Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2017, **29**(04): 955-964. [姚静, 李云良, 李梦凡等. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 955-964.]

[27] Li YL, Yao J. Estimation of Transport Trajectory and Residence Time in Large River-Lake Systems: Application to Poyang Lake (China) Using a Combined Model Approach. *Water*, 2015. **7**(10): 5203-5223.

[28] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations I: the basic experiment. *Monthly Weather Review*, 1963, **91**(3): 99-164.

[29] Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*, 1984, **3**(3): 311-326.

[30] Yu JY, Ma J, Yang ZJ *et al*. Analysis of total phosphorus sources and residence effects in water bodies of Lancang River terrace reservoirs based on water body traceability. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2023, (3):94-101. [余君妍，马骏，杨正健等.基于水体溯源的澜沧江梯级水库水体总磷来源及滞留效应分析.中国农村水利水电, 2023, (3): 94-101.]

[31] Zhou YY, Liu XD, Hua ZL *et al*. Characterisation of spatial and temporal differences in wind-generated flow dynamics in Lake Taihu. *Environmental Protection Science*, 2015, **41**(1): 51-56.[周媛媛，刘晓东，华祖林等.太湖风生流水动力时空差异特征研究. 环境保护科学, 2015, **41**(1): 51-56.]

[32] Xu RC, Feng Y, Hu ZB *et al*. Relationship between age and hydraulic residence time and parameter sensitivity in Lake Taihu. *Water Resources Conservation*, 2020, **36**(3): 34-39. [胥瑞晨，逄勇，胡祉冰等. 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性. 水资源保护, 2020, **36**(3): 34-39.]

[33] Penning W E, Genseberger M, Uittenbogaard R E *et al*. Quantifying measures to limit wind-driven resuspension of sediments for improvement of the ecological quality in some shallow Dutch lakes. *Hydrobiologia*, 2010, **644**(1): 149-167.

[34] Koelmans A A, Quik J T K, Velzeboer I. Lake residence of manufactured nanoparticles. *Environmental Pollution*, 2015, **196**: 171-175.

[35] Fan HX, Xu LG, Zhu H *et al*. Quantitative differentiation of the effects of climate change and human activities on the water age of Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1175-1187. [范宏翔，徐力刚，朱华等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖水龄影响的定量区分. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1175-1187]

[36] Zhao ZH, Yuan J, Tian ZB *et al*. Characteristics of nitrogen and phosphorus fluxes in and out of Dongting Lake and their residence effects. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,2023, **34**(3): 75-81. [赵子豪，袁静，田泽斌等. 洞庭湖出入湖氮磷通量特征及滞留效应研究. 水资源与水工程学报, 2023, **34**(3): 75-81]

[37] Zhang JH, Huang T, Chen L *et al*. Water-Exchange Response of Downstream River-Lake System to the Flow Regulation of the Three Gorges Reservoir, China. *Water*, 2019, **11**(11), 2394.

[38] Shi CL, Tang LM, Xiao Y. Analysis of character variation of water level at Duchang station of Poyang lake for 50 years. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, **27**(2): 45-50. [史常乐，唐立模，肖洋. 鄱阳湖都昌水位站 50 年水位特征变化分析. 水资源与水工程学报. 2016, **27**(2): 45-50.]

[39] Lei S, Review and Reflection on the 2020 Poyang Lake Flood. *Water Resources Conservation*, 2021, **37**(06): 7-12. [雷声, 2020 年鄱阳湖洪水回顾与思考. 水资源保护, 2021, **37**(06): 7-12.]

[40] Li SQ, Min Q, Tan GL *et al*. Cause analysis of low water characteristics of Lake Poyang in 2006. *Journal of China Hydrology*, 2008,(6): 73-76. [李世勤，闵骞，谭国良等. 鄱阳湖 2006 年枯水特征及其成因研究. 水文, 2008, (6): 73-76.]

[41] Yang CR, Deng JY, Chen L *et al*. Study on the change of backwater effect of the connected lakes in the middle reaches of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2024, **35**(1): 98-111. [杨春瑞，邓金运，陈立等. 长江中游通江湖泊对干流顶托作用变化规律. 水科学进展, 2024, **35**(1): 98-111.]

[42] Yao J, Zhang D, Li YL *et al*. Quantifying the hydrodynamic impacts of cumulative sand mining on a large river-connected floodplain lake: Poyang Lake. *Journal of Hydrology*, 2019, **579**: 124156.

[43] Wan Y, Qiu C, Doering P *et al*. Modeling residence time with a three-dimensional hydrodynamic model: Linkage with chlorophyll a in a subtropical estuary. *Ecological Modelling*, 2013, **268**: 93-102.

[44] Wu ZS, He H, Cai YJ *et al*. Spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang: A Yangtze-connected lake. *Hydrobiologia*, 2014, **732**(1): 61-70.

[45] Hou XK, Gao W, Zhang M *et al*. Source apportionment of water pollutants in Poyang Lake Basin in China using absolute principal component score–multiple linear regression model combined with land-use parameters. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, 924350.

[46] Duan WL, He B, Nover D. *et al*. Water Quality Assessment and Pollution Source Identification of the Eastern Poyang Lake Basin Using Multivariate Statistical Methods. *Sustainability*, 2016, **8**(2), 133.

[47] Li B, Yang GS, Wan RR *et al*. Hydrodynamic and water quality modeling of a large floodplain lake (Poyang Lake) in China. *Environment Science and Pollution Research*, 2018, **25**: 35084-35098

[48] Kuang WM, Zhang M, Zhang JM *et al.* Comparative limnological study on annual dynamic pattern of nutrients in water column of three suburb lakes adjacent to Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1293-1305. [匡武鸣, 张萌, 张金美等. 鄱阳湖外围湖泊水体营养波动周年特征的比较湖沼学研究. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1293-1305.]

[49] Wang J, Han Z, Liu XB *et al*. Simulation of habitat pattern and population response of geese under the change of river-lake relationship: a case study of Duchang Nature Reserve, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(21): 9024-9037. [汪洁, 韩祯, 刘晓波等. 江湖关系变化下雁类生境格局模拟及雁类种群的响应——以都昌保护区为例. 生态学报, 2023, **43**(21): 9024-9037.]

[50] Hu ZP. Serious drought in Poyang Lake in 2022 and countermeasures for drought prevention and disaster reduction. *China Flood & Drought Management*, 2023, **33**(2): 1-6, 39. [胡振鹏. 2022 年鄱阳湖特大干旱及防旱减灾对策建议. 中国防汛抗旱, 2023, **33**(2): 1-6,39.]