J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0133
©2027 by Journal of Lake Sciences

洞庭湖四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥适宜生态水位分析*

何术锋[1]，佘星源[1]，冯韬[1]，马一鸣[2]，吴碧琼[2]，杜明成[1]，孙慧敏[1]，何梦男[1]，陈求稳[1**]
（1：南京水利科学研究院生态环境研究所，江苏 南京 210029）
（2：中国长江电力股份有限公司，湖北 宜昌 443000）

摘　要：洞庭湖作为长江中下游第二大天然通江湖泊，是长江四大家鱼重要的栖息地，具有不可替代的生态功能和经济价值。本研究基于洞庭湖 2016—2020 年水文和地形数据，构建了洞庭湖二维水动力模型，模拟了 2016—2020 年洞庭湖流速水深分布，结合文献资料建立了四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥流速、水深适宜度曲线，计算了 2016—2020 年 7—10 月栖息地适宜度指数（habitat suitability index, HSI）和加权可利用面积（weighted usable area, WUA）变化，拟合了 *WUA* 与洞庭湖城陵矶水位关系，确定了洞庭湖适宜生态水位。结果表明：（1）洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥最适流速为 0.1~0.2 m/s，最适水深为 0.7~1.6 m，成鱼索饵育肥最适流速为 0.1~0.3 m/s，最适水深为 2.0~4.0 m。（2）洞庭湖 2016-2020 年 7—10 月月均流速和水深基本呈现逐渐递减的趋势，南洞庭湖流速较大，东洞庭湖水深较大，2020 年较其他年份整体月均流速和水深较大。（3）洞庭湖 2016—2020 年 7—8 月四大家鱼幼鱼索饵育肥月均 *HSI* 和 *WUA* 范围分别为 0.004~0.14、12~402 km^2，9—10 月成鱼索饵育肥月均 *HSI* 和 *WUA* 范围分别为 0.05~0.23、146~683 km^2，幼鱼和成鱼在南洞庭湖非主流区适宜度最高。（4）洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥适宜生态水位为 26.9~28.0 m，对应 *WUA* 为 342 km^2，占总面积的 13%，成鱼索饵育肥适宜生态水位为 29.0~30.0 m，对应 *WUA* 为 832 km^2，占总面积的 32%。研究结果为洞庭湖生态系统保护提供了参考。
关键词：洞庭湖；四大家鱼；幼鱼索饵育肥；成鱼索饵育肥；生态水位

On the suitable ecological water levels for feeding and fattening of juvenile and adult four major Chinese carps in Lake Dongting*

He Shufeng[1]，She Xingyuan[1]，Feng Tao[1]，Ma Yiming[2]，Wu Biqiong[2]，Du Mingcheng[1]，Sun Huimin[1]，He Mengnan[1]，Chen Qiuwen[1**]
(1: *Eco-environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing,* 210029, *P.R.China*)
(2: *China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang, Hubei* 443000, *P.R.China*)

Abstract: Lake Dongting is the second largest natural lake connected to the middle and lower reaches of the Yangtze River. It provides key habitats for four major Chinese carps and bears irreplaceable ecological functions and economic values. Based on hydrological and topographic datasets from 2016 to 2020, this study built a two-dimensional hydrodynamic model for Lake Dongting. This study simulated the spatial distributions of flow velocity and water depth in the study period, and established flow velocity and water depth suitability curves for juvenile and adult individuals of the four fish species via existing peer-reviewed literature. This study further computed the Habitat Suitability Index (HSI) and Weighted Usable Area (WUA) from July to October during 2016–2020, and fitted the correlation between WUA and water level at Chenglingji Station. Suitable ecological water levels of Lake Dongting were therefore determined. The main results are as follows. (1) The optimal flow velocity for phytophagous juvenile four major Chinese carps is 0.1–0.2 m/s, with an optimal water depth of 0.7–1.6 m. Adult individuals have the optimal flow velocity of 0.1–0.3 m/s and the optimal water depth of 2.0–4.0 m. (2) From 2016 to 2020, monthly mean flow velocity and water depth from July to October presented an overall decreasing trend. Flow

*2025-08/-04 收稿; 2006-04-08 收修改稿;2006-05-07 录用。
国家重点研发计划项目(2022YFC3203900;2023YFC3207803)、国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目（U2240207）、中国长江电力股份有限公司科研项目（Z242302052）、国家自然科学基金创新研究群体项目(52121006)和国家自然科学基金青年基金项目（52400223）联合资助。
**通讯作者：E-mail: qwchen@nhri.cn。

velocity was relatively higher in South Lake Dongting and lower in East Lake Dongting. Both hydrological indicators in 2020 were higher than those in other study years. (3) During 2016–2020, monthly mean HSI and WUA of juvenile fish ranged from 0.004 to 0.14 and 12 to 402 km² in July−August, while those of adult fish ranged from 0.05 to 0.23 and 146 to 683 km² in September−October. Both juvenile and adult fish obtained the highest habitat suitability in non-mainstream zones of South Dongting Lake. (4) The ecological water level suitable for juvenile fattening is 26.9–28.0 m, with a corresponding WUA of 342 km² accounting for 13% of the total lake area. The suitable ecological water level for adult fish is 29.0–30.0 m, with a corresponding WUA of 832 km² accounting for 32% of the total lake area. This study provides scientific references for the ecological conservation of Lake Dongting aquatic ecosystems.

Keywords: Lake Dongting; the four major chinese carps; feeding and fattening of juvenile fish; feeding and fattening of adult fish; ecological water level

湖泊作为地球生态系统的重要组成部分，在维持生物多样性、提供防洪抗旱、净化水质与调节气候等生态系统服务方面具有不可替代的作用，对人类社会发展与生态安全具有重要意义[1-2]。洞庭湖是我国第二大淡水湖，承担着调节湘、资、沅、澧四水以及分蓄长江洪水的重要功能，是长江流域关键的水量调蓄节点与水源涵养区，同时，洞庭湖作为国际重要湿地，在区域生态系统稳定与生物多样性保护方面亦具有突出地位[3]。洞庭湖是长江流域四大家鱼（青鱼、草鱼、鲢、鳙）重要的索饵场、育幼场与育肥场，其育肥群体约占长江总量的 10%[3-4]。四大家鱼作为典型的江湖洄游型鱼类，其生活史与洞庭湖的水文节律紧密相关，秋末冬初四大家鱼从洞庭湖洄游至长江越冬，翌年开春，亲鱼开始上溯产卵，受精卵在漂流的过程中发育孵化，孵化后的鱼苗随洪水进入洞庭湖摄食生长，多数产卵后的亲鱼也进入湖泊肥育，汛期洞庭湖水位上涨淹没大面积洲滩湿地，形成水草丰茂、饵料充足的浅水栖息环境，为幼鱼提供了躲避敌害、高效摄食的育幼场所，也为亲鱼提供了产后恢复与能量积累的育肥场所[4-5]，因此，洞庭湖的水位动态直接决定了索饵育幼生境的可及性、面积大小与持续时间等，进而影响四大家鱼的存活率、生长速度及种群补充能力[6]。

目前已有一些洞庭湖生态水位相关研究，余勋[7]2014 年通过引入流量偏差比(ratio flow deviation，RFD)分析了由人类活动和气候变化引起的水文变异，以修正的年比例流量偏差（amended annual proportional flow deviation，AAPFD）为生态系统健康状况指标，确定了洞庭湖水文变异条件下的汛期生态可接受水位为 24.48~30.96 m，非汛期生态可接受水位为 15.59~22.07 m，杨毓鑫等[8]2019 年运用天然水位资料法、年保证率法、最低年平均水位法、生态水位法、湖泊形态分析法及最小空间需求法 6 种分析方法计算了得到了东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位分别为 22.62、27.19 和 28.11 m，王鸿翔等[3]2020 年，结合生态水位年内展布法以及水文指标变异-变动范围法（indicators of hydrologic alteration-range of variability approach，IHA-RVA），计算得到了洞庭湖最小和适宜生态水位分别为 21.41 和 23.29 m，除了水文水和力学法以外，国内相关学者也开始采用生境模拟法，朱永卫[9]2022 年基于数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）和归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）建立了候鸟栖息地适宜性模型，定量计算得到了东洞庭湖候鸟 1—12 月生态水位为 20.90~22.15m、20.86~21.52m、21.74~23.45m、23.76~24.72m、25.81~27.01m、27.57~29.61m、29.36~31.98m、27.24~30.10m、24.64~28.46m、22.59~25.52 m、21.78~23.74m、20.60~21.81 m，李云格等[10]2024 年基于鲤、鲫适宜产卵栖息地适宜面积与水位的响应关系，确定了洞庭湖适宜生态水位为 23.26~26.48 m。综上所述，近年来洞庭湖生态水位研究多集中于传统的水文和水力学法，且仅针对指示物种单一生境需求计算最低生态水位或适宜生态水位，忽略了湖泊年内水位的变化和生物不同时期的生境需求。

根据洞庭湖四大家鱼的生活史周期，幼鱼从长江入湖索饵育肥高峰为 7—8 月，成鱼在湖中索饵育肥高峰为 9—10 月[6,11]，因此，本文收集了三峡集团提供的 2016—2020 年水文数据以及美国对地观测数据库(GLCF)精度约为 90 m 湖底地形数据（2022 年），构建了洞庭湖二维水动力模型和四大家鱼栖息地模型，模拟分析了 2016—2020 年洞庭湖的流速、水深以及栖息地时空变化，建立了水位与 *WUA* 关系曲线，提出了基于四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥的城陵矶年内月尺度适宜生态水位，研究结果与以往只有单一生态水位数值的研究不同，更突出生态目标的波动范围，为洞庭湖生态系统健康的维持提供了参考，也为管理部

门调控水量提供了更科学的理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

洞庭湖（28°30'~30°20N，111°40'~113°10'E）位于湖南省北部长江中下游，湖区坐落在长江中下游的荆江南岸附近，跨越多个省份，面积在 2600~2700 km^2 范围内，天然湖泊容积 178 亿 m^3，是我国五大淡水湖之一，也是长江中下游流域最重要的集中水源，具有强大的调蓄洪水功能[12-13]（图 1）。湖区年均水量居长江流域水系地表水资源之首，汇集了湘江、资江、沅江、澧水四条主要的支流及荆江三口（松滋口、太平口和藕池口）的分洪水流，在湖体进行调蓄，然后通过唯一的出口城陵矶向北流入长江[14]，三峡修建前（1984—2003 年）城陵矶枯水期年均低水位为 20.33 m，三峡修建后（2003—2019 年）城陵矶枯水期年均低水位为 20.99 m[9]。

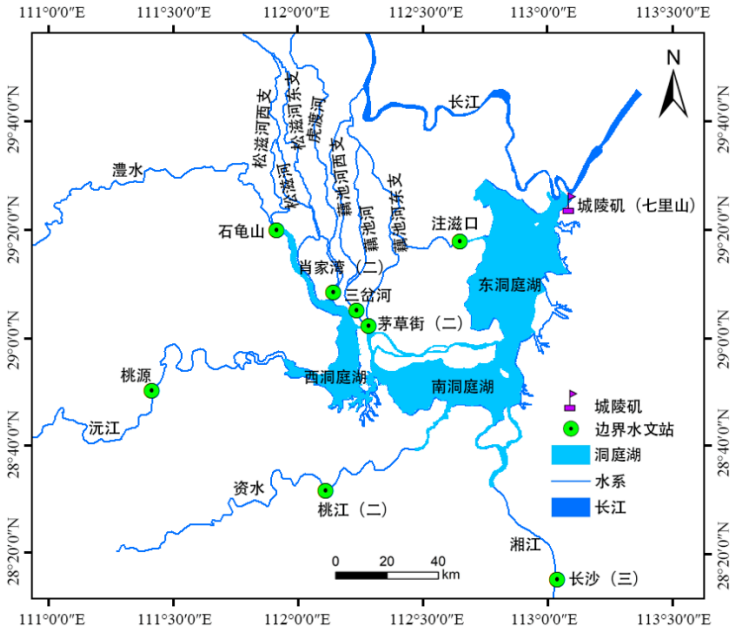

图 1 研究区域及水文站点

Fig.1 Study area and relevant hydrological stations

1.2 研究方法

1.2.1 二维水动力模型　采用环境流体动力学代码（environmental fluid dynamics codes，EFDC）模拟洞庭湖的水动力变化过程，该模型是由威廉玛丽大学维吉尼亚海洋科学研究所（Virginia Institute of Marine Science at the College of William and Mary，VIMS）的 John Hamrick 等人开发的三维地表水水质数学模型，可实现河流、湖泊、水库、湿地系统、河口和海洋等水体的水动力学和水质模拟，是一个多参数有限差分模型[15-16]。

（1）模型原理

质量守恒：

$$\partial_t(m_x m_y H) + \partial_x(m_y H u) + \partial_y(m_x H v) + \partial_z(m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{SS} + Q_{SW}) \quad (1)$$

动量守恒（仅 x 方向）：

$$\partial_t(m_x m_y H u) + \partial_x(m_y H u u) + \partial_y(m_x H v u) + \partial_z(m_x m_y u v w) - f_e m_x m_y H v = -m_y H \partial_x(p + p_{atm} + \varphi) + m_y(\partial_x Z_b^* + z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z\left(m_x m_y \frac{A_v}{H}\partial_z u\right) + \partial_x\left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x u\right) + \partial_y\left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y u\right) -$$

$$m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} u \quad (2)$$

其中，u 和 v 分别是无量纲正交曲线水平坐标系下 x 和 y 方向流速分量；w 是拉伸坐标系统下垂向 z 速度；m_x 和 m_y 是 x 和 y 方向水平坐标比例因子；Z_b^*是河床处的垂向坐标；H 为水深；p_{atm} 为大气压；f 为科氏力加速度；A_H 为水平涡黏系数，正比于水平湍流应力；A_v 是垂向湍流应力，正比于垂向湍流系数，与水平速度分量的垂向剪应力有关；c_p 是阻力系数；D_p 是单位面积上垂直于流动方向的单位植被面积投影（无量纲）。

（2）地形插值

结合 2022 年 9 月下游城陵矶站水位报道：洞庭湖标志性水文站——城陵矶站出现 118 年以来同期最低水位，下跌至 19.89 m，较多年同期均值偏低 7.56 m，为该站自 1904 年建站以来同期最低水位[17-18]。本研究获取同时期美国对地观测数据库(GLCF)精度约为 90 m 湖底地形数据，同时，结合湖区各水文站点的大断面数据对湖区河道地形进行复核，修改河道区域的地形以匹配真实的大断面监测数据，从而得到最接近真实的湖区地形（图 2）。

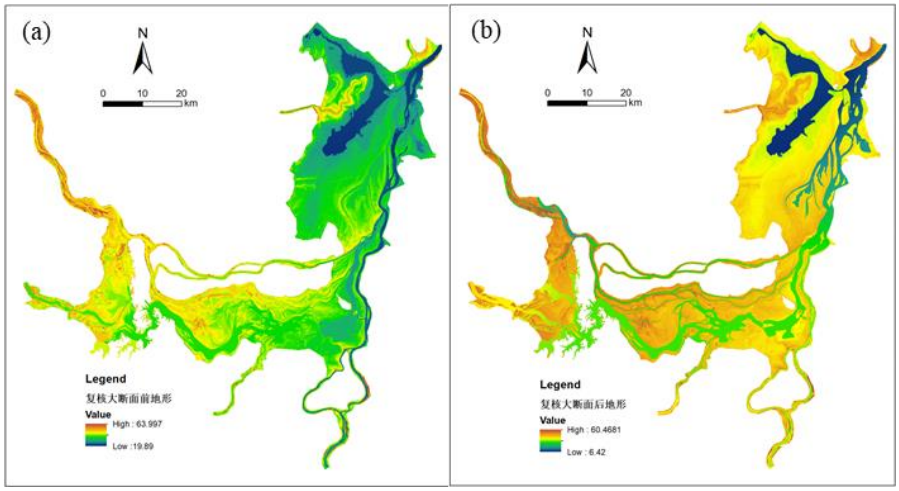

图 2 复核大断面前后湖区地形分布（a：复核前；b：复核后）

Fig.2 Topographic distribution of lake area before and after large cross-section re-check (a: before re-check; b: after re-check)

（3）网格划分、边界设置、风场设置及糙率设置

使用结构化网格（矩形）对洞庭湖湖区滩地及河道区域进行水动力模型网格的划分，划分网格的总面积为 2882.33 km^2。其中，划分的最大网格边长不超过 190 m，网格大小 190 m×185 m，最终洞庭湖湖区划分了 82981 个网格（图 3a）。将入湖来流作为洞庭湖湖区的输入边界，下游城陵矶作为湖泊水动力模型的出流边界，入湖、出湖边界获取到水文数据的站点图 3 所示，同时，考虑到洞庭湖湖区较大，风场对湖泊表面水动力有明显影响[19]，本研究在东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖各耦合了一个风力气象站，并收集了 ERA5 的风场数据导入模型，三个站点的数据采集时间范围均为 2016 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日，且记录数量均为 1827 条，保证了数据统计的时间一致性和样本数量一致性（图 3b、c、d）。

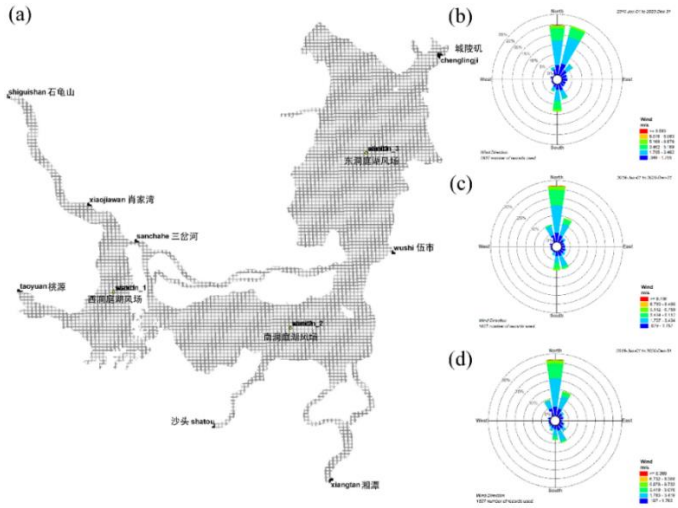

图 3 模型网格、边界及风场设置（a:网格和边界；b:东洞庭湖风场；c:南洞庭湖风场；d:西洞庭湖风场）

Fig.3 Model mesh, boundary conditions and wind field settings (a: Mesh and boundaries; b: Wind field of East Lake Dongting c: Wind field of South Lake Dongting; d: Wind field of West Lake Dongting)

（4）模型率定验证

采用下游城陵矶水位和流速开展模型率定验证，模型的率定期为 2016-2017 年，2018 年作为验证期。其中，所选取的率定和验证指标为纳什系数（*NSE*）和平均绝对误差（*MAE*）[20-21]，计算公式如下：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{3}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i - y_i\right|}{n} \tag{4}$$

式中，x_i 和 y_i 分别为实测值和模拟值；$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为实测值和模拟值的平均值；n 为样本数量。

1.2.2 鱼类栖息地模型 鱼类栖息地模型是用来评价某一环境作为特定物种栖息地适应程度的模型方法，该方法根据指示物种本身对生境的需求，通过将物理生境因子的时空分布和生境评价适宜度指标体系相结合，对影响特定鱼类物种或者种群生存、繁衍的栖息地环境进行系统综合影响评价[22]。四大家鱼栖息地模型如下：

$$HSI=(I_1 I_2 \ldots I_n)^{1/n} \tag{5}$$

$$WUA=\sum_{i=1}^{N} HSI_i * A_i \tag{6}$$

式中，I_n表示物种的第 n 种关键生境因子的适宜度指数，N 表示网格数，HSI_i 表示第 i 个网格的适宜度，A_i 表示第 i 个网格的面积，本文计算采用的网格面积均为 190 m×185 m，环境因子的适合度指数在 0~1 之间，0 表示对应条件完全不适合，1 表示最适宜的条件，通过将不同关键生境因子（流速、水深等）的适宜度指数进行几何平均得到综合栖息地适宜度指数 *HSI*，当 1>*HSI*>0.8 时，表示栖息地高度适宜，当 0.8>*HSI*>0.5 时，表示栖息地中等适宜，当 0.5>*HSI*>0.2 时，表示栖息地临界适宜，当 0.2>*HSI*>0 时，表示栖息地不适宜；在此基础上，将网格面积与对应网格的栖息地适宜性指数 *HSI* 相乘，再求和得出栖息地加权可利用面积 *WUA*，加权可利用面积数值越大，表示该栖息地质量越高，更适宜目标鱼类的生存和繁殖。本文四大家鱼适宜流速和水深主要通过文献研究获取，适宜的流速和水深选取

各研究的交集。

2 结果

2.1 洞庭湖流速和水深时空变化特征

2.1.1 流速和水深率定验证　根据模型率定验证结果（图 4），水位率定期的 *NSE* 为 0.94，*MAE* 为 0.12 m，验证期的 *NSE* 为 0.92，*MAE* 为 0.15 m，流速率定期的 *NSE* 为 0.93，*MAE* 为 0.06 m/s，验证期的 *NSE* 为 0.92，*MAE* 为 0.08 m/s，枯水期模拟效果整体要优于丰水期模拟效果，从整体来看，构建的洞庭湖模型在水位模拟方面性能较好。考虑到洞庭湖高程相差巨大的河槽和滩涂，分区域进行糙率的率定，将粗糙度系数参数设置为空间变异值，采用人工试错法对粗糙度参数进行率定，最终率定湖区河道糙率大致在 0.025，而滩涂区域糙率在 0.35 左右。

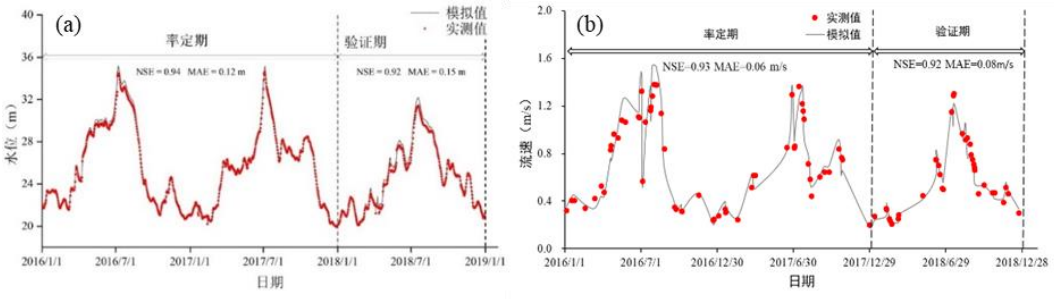

图 4 洞庭湖城陵矶水位和流速率定与验证（a:水位率定验证；b:流速率定验证）

Fig. 4 Calibration and validation of water level and velocity at Chenglingji, Dongting Lake (a: Water level calibration & validation; b: Flow velocity calibration & validation)

2.1.2 流速和水深时空变化特征　采用二维水动力模型模拟了 2016—2020 年洞庭湖水动力场，由于洞庭湖幼鱼入湖高峰期为每年的 7—8 月，成鱼在湖中育肥的高峰期为每年的 9—10 月，因此，提取了 2016—2020 年 7—10 月水动力计算结果（表 1），结果表明，从 7 月到 10 月洞庭湖月均流速无明显规律，月均水深和月均水位基本呈现逐渐递减的趋势，多年月均流速、水深和水位均呈逐渐递减的趋势，2020 年较其他年份整体月均流速、水深和水位较大，其中，最大月均流速出现在 2016 年 8 月和 2020 年 9 月，达到了 0.15 m/s，最小月均流速出现在 2018 年 8 月和 2020 年 10 月，均为 0.07 m/s，最大月均水深/水位和最小月均水深/水位分别出现在 2020 年 7 月和 2016 年 10 月，为 11.66 m/35.86 m 和 2.69 m/26.89 m，月均水深/水位和月均流速极值出现时期不同，表明洞庭湖水深/水位和流速并不呈现正相关的线性关系。

表 1 洞庭湖 2016—2020 年 7—10 月平均流速、水深和水位

Tab. 1 Mean velocity, water depth and water level of Lake Dongting, July–October, 2016–2020

年份	月份	平均流速 m/s	平均水深 m	平均水位 m
2016	7	0.10	7.68	31.88
	8	0.15	7.84	32.04
	9	0.09	2.99	27.19
	10	0.10	2.69	26.89
2017	7	0.12	9.37	33.57
	8	0.10	4.95	29.15
	9	0.10	4.58	28.78

	10	0.08	5.12	29.32
2018	7	0.12	7.28	31.48
	8	0.07	6.04	30.24
	9	0.10	3.82	28.02
	10	0.09	3.67	27.87
2019	7	0.11	8.97	33.17
	8	0.13	6.82	31.02
	9	0.08	3.18	27.38
	10	0.10	2.98	27.18
2020	7	0.14	11.66	35.86
	8	0.09	10.49	34.69
	9	0.15	8.81	33.01
	10	0.07	6.37	30.57
多年平均	7	0.12	9.00	33.20
	8	0.11	7.23	31.43
	9	0.10	4.68	28.88
	10	0.09	4.17	28.37

表中数据代表洞庭湖整个区域的月平均。

提取 2016—2020 年洞庭湖最小月均流速（2018 年 8 月）、最大月均流速（2020 年 9 月）、最小月均水深/水位（2016 年 10 月）和最大月均水深/水位（2020 年 7 月）计算结果并生成空间云图（图 5），从整体流速来看，南洞庭湖流速整体高于其他区域，东洞庭湖和南洞庭湖的连接处流速较大，湘江、资江和沅江入湖附近江段流速大于澧水（图 5(a)、(b)）；从整体水深来看，东洞庭湖水深/水位整体较大，最大水深/水位可达 11.66 m/35.86 m（图 5(c)、(d)）。

2.2 洞庭湖四大家鱼栖息地时空变化

2.2.1 栖息地适宜度曲线 现有研究表明，四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥主要受流速和水深共同影响[23-25]，结合相关文献，确定了四大家鱼幼鱼栖息和成鱼育肥的适宜流速和水深，其中幼鱼（体长（10.60±3.45）cm）索饵育肥流速范围在 0~0.5 m/s，水深范围在 0~3.0 m[26-29]，成鱼索饵育肥流速范围为 0~0.4 m/s，水深范围为 0.5~6.0 m[30-31]，需要指出的是，成鱼抵抗流速的生理能力（如临界游泳速度）显著强于幼鱼，而本文所引用的适宜索饵育肥流速范围属于行为偏好范畴，不代表成鱼的流速耐受极限，该数据与常识之间的矛盾，可能反映了不同规格鱼类在索饵期的能量分配策略差异，或受原文献实验条件的限制。为精准表达四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥对于流速和水深的适宜性，构建基于四大家鱼适宜度曲线（图 6），其中，当流速分别为 0、0.1、0.2 和 0.5 m/s 时，幼鱼索饵育肥适宜度分别为 0、1、1 和 0，其最适流速为 0.1~0.2 m/s，当流速分别为 0、0.1、0.3 和 0.4 m/s 时，成鱼索饵育肥适宜度分别为 0、1、1 和 0，其最适流速为 0.1~0.3 m/s；当水深分别为 0、0.7、1.6 和 3.0 m 时，幼鱼索饵育肥适宜度分别为 0、1、1 和 0，其最适水深为 0.7~1.6 m，当水深分别为 0.5、2.0、4.0 和 6.0 m 时，成鱼索饵育肥适宜度分别为 0、1、1 和 0，其最适水深为 2.0~4.0 m。

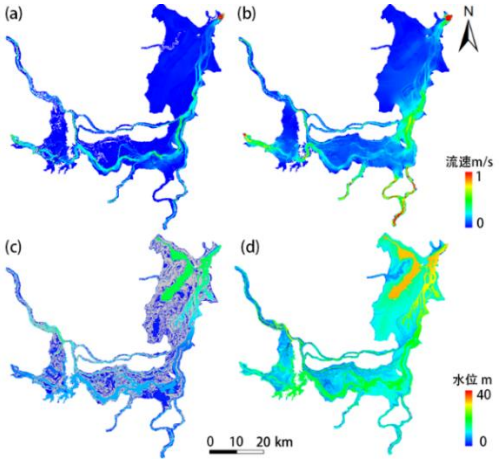

图 5 洞庭湖流速和水深空间分布（a:最小月均流速；b:最大月平均流速；c:最小月平均水位；d:最大月平均水位）

Fig. 5 Spatial distribution of velocity and water depth in Lake Dongting

(a: Min. monthly mean velocity; b: Max. monthly mean velocity; c: Min. monthly mean water level; d: Max. monthly mean water level)

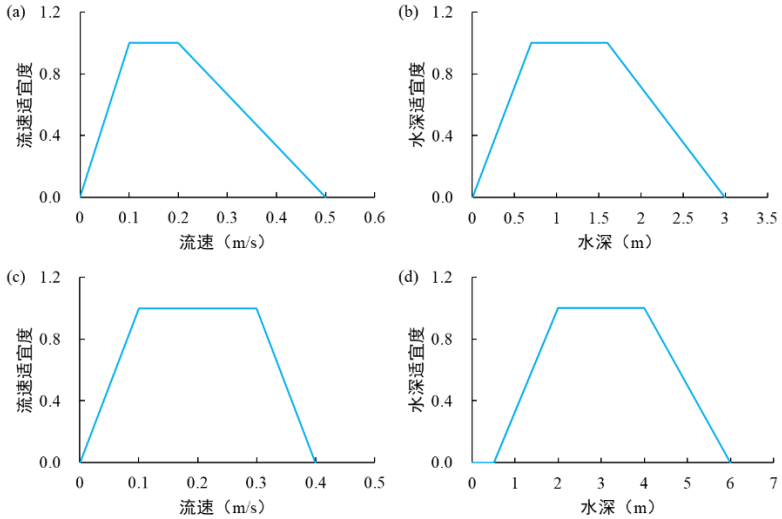

图 6 四大家鱼幼鱼及成鱼育肥的适宜度曲线（a：幼鱼-流速；b：幼鱼-水深；c：成鱼-流速；d：成鱼-水深）

Fig. 6 Fattening suitability curves of juvenile and adult four major Chinese carps

(a: Velocity suitability curve of juveniles; b: Water depth suitability curve of juveniles; c: Velocity suitability curve of adults; d: Water depth suitability curve of adults)

2.2.2 栖息地时空变化特征　由二维水动力和鱼类栖息地计算结果可知，2016—2020 年四大家鱼幼鱼索饵育肥最小月均适宜性指数 *HSI* 接近于 0，最大月均适宜性指数为 0.14，最小月均栖息地可利用面积 *WUA* 为 12 km^2，最大月均栖息地可利用面积为 402 km^2；2016—2020 年四大家鱼成鱼索饵育肥最小月均适宜性指数为 0.05，最大月均适宜性指数为 0.23，最小月均栖息地可利用面积为 146 km^2，最大月均栖息地可利用面积为 683 km^2（表 3）。

表 3 2016—2020 年幼鱼及成鱼索饵育肥月均栖息地适宜性指数及可利用面积

Tab. 3 Monthly mean HSI and usable area for feeding-fattening juveniles and adults, 2016–2020

指标			*HSI*	*WUA*/km^2
2016	幼鱼索饵育肥	7	0.09	256
		8	0.07	202
	成鱼索饵育肥	9	0.05	154
		10	0.05	157
2017	幼鱼索饵育肥	7	0.03	89
		8	0.14	402
	成鱼索饵育肥	9	0.20	589
		10	0.20	594
2018	幼鱼索饵育肥	7	0.10	301
		8	0.11	313
	成鱼索饵育肥	9	0.11	335
		10	0.09	248
2019	幼鱼索饵育肥	7	0.04	117
		8	0.13	377
	成鱼索饵育肥	9	0.07	191
		10	0.05	146
2020	幼鱼索饵育肥	7	0.004	12
		8	0.02	45
	成鱼索饵育肥	9	0.22	650
		10	0.23	683

注：表中数据代表洞庭湖整个区域的月平均。

根据鱼类栖息地计算结果，统计得到不同生境质量类型可利用面积年际变化（图 8），整体来看，洞庭湖成鱼适宜索饵面积远大于幼鱼，2016—2020 年四大家鱼幼鱼索饵育肥高度适宜、中等适宜和临界适宜栖息地面积均呈现先增大后减小趋势，不适宜栖息地面积先减小后增大，变化幅度较大，其中，2018 年整体幼鱼索饵育肥生境质量较好，2020 年整体生境质量较差，适宜生境面积被压缩至 2%；2016—2020 年四大家鱼成鱼索饵育肥高度适宜、中等适宜可利用面积呈现先减小后增大趋势，临界适宜可利用面积呈现先增大后减小趋势，不适宜可利用面积呈现“减-增-减”波动特征，尽管在不适宜可利用面积最大的 2016 年，适宜成鱼索饵育肥的可利用面积仍然高达 85%，表明洞庭湖对成鱼索饵育肥相对友好。

提取月均最大和最小栖息地适宜性指数 *HSI* 计算结果绘制空间云图可知，洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥适宜的主要区域为南洞庭湖和西洞庭湖，并且非主流区域较其他区域适宜性高，当幼鱼索饵育肥月均栖息地适宜性指数 *HSI* 最小时（2020 年 7 月），整个洞庭湖区域几乎没有适宜幼鱼索饵育肥的区域，当幼鱼索饵育肥月均栖息地适宜性指数 *HSI* 最大时（2017 年 8 月），湖体除了非主流区域适宜度较高外，东洞庭湖和南洞庭湖连通处的非主流区适宜度较高，湘江、资江和沅江入湖附近河段 *HSI* 大于澧水（图 9a、b）；洞庭湖四大家鱼成鱼索饵育肥适宜主要的区域为东洞庭湖和南洞庭湖，同样集中于非主流区域，当

成鱼索饵育肥月均栖息地适宜性指数 *HSI* 最小时（2019 年 10 月），适宜区域主要集中于资江和沅江入湖附近河段和湖体，当育肥月均栖息地适宜性指数 *HSI* 最大时（2020 年 10 月），整个洞庭湖适宜性均较高，南洞庭湖适宜度最高，东洞庭湖和南洞庭湖连通处的非主流区适宜度较高，资江、湘江和沅江入湖附近江段 *HSI* 大于澧水（图 9c、d）。

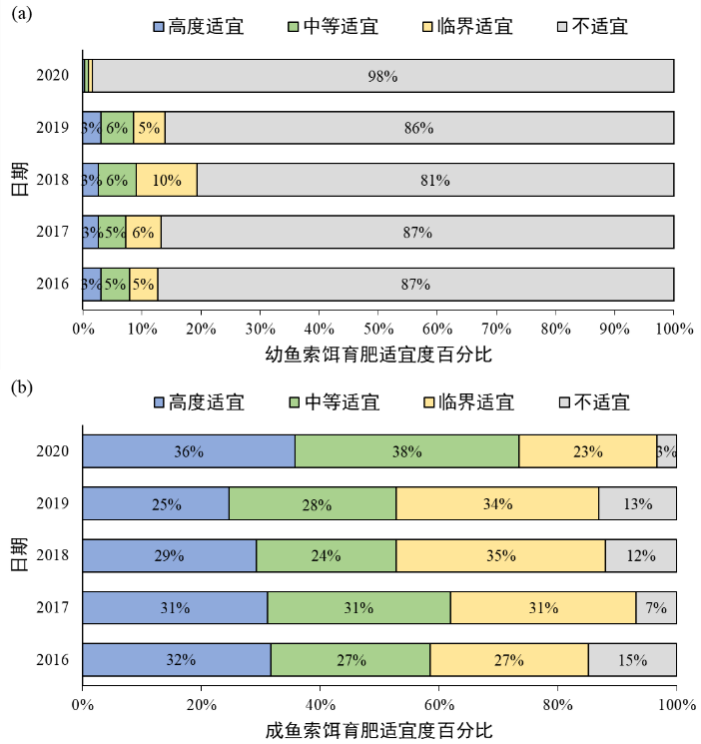

图 8 2016—2020 年四大家鱼幼鱼和成鱼索饵育肥不同生境质量类型占比

（a：幼鱼索饵育肥不同生境质量类型占比；b：成鱼索饵育肥不同生境质量类型占比）

Fig. 8 Proportion of various habitat quality types for feeding-fattening juvenile and adult four major Chinese carps, 2016–2020

(a: Habitat quality proportion of feeding-fattening juveniles; b: Habitat quality proportion of feeding-fattening adults)

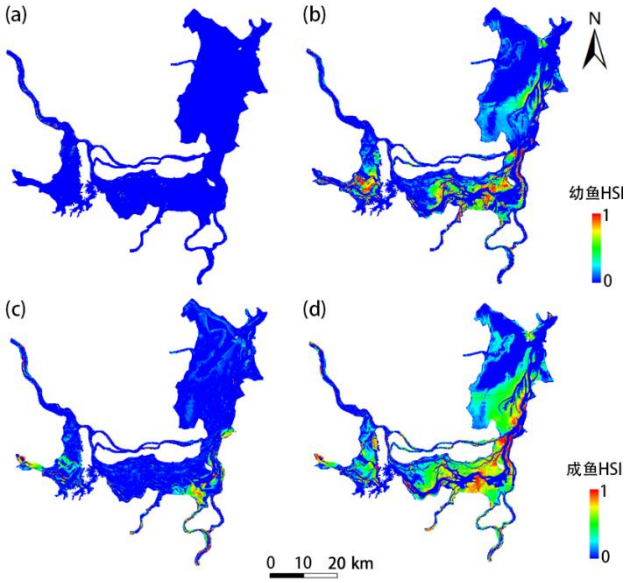

图 9 四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥 *HSI* 空间分布（a：幼鱼索饵育肥最小月均 *HSI*；b：幼鱼索饵育肥最大月均 *HSI*；c：成鱼索饵育肥最小月均 *HSI*；d：成鱼索饵育肥最大月均 *HSI*）

Fig. 9 Spatial distribution of feeding-fattening HSI for juvenile and adult four major Chinese carps (a: Min. monthly mean HSI of juveniles; b: Max. monthly mean HSI of juveniles; c: Min. monthly mean HSI of adults; d: Max. monthly mean HSI of adults)

2. 3 洞庭湖四大家鱼适宜生态水位

根据水动力模型和鱼类栖息地模型计算结果，以城陵矶水位 20.0 m 为基准，间隔 0.2 m，计算 20.0~34.6 m 区间对应的栖息地可利用面积 *WUA*，构建洞庭湖城陵矶水位与幼鱼及成鱼索饵育肥的 *WUA* 关系曲线（图 10），再对关系曲线进行拟合，结果表明，在 20.0~34.6 m 水位之间，洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥 *WUA* 随着城陵矶水位的增加呈现先增大后减小的趋势，当城陵矶水位在 20.0~26.9 m 之间时，*WUA* 呈现二次多项式上升趋势（R^2=0.85，*P*<0.01），当城陵矶水位在 26.9~28.0 m 之间时，*WUA* 为 342 km² 基本保持不变，占洞庭湖总面积的 13%，当城陵矶水位在 28.0~34.6 m 之间时，*WUA* 呈现二次多项式下降趋势（R^2=0.97，*P*<0.01）；洞庭湖四大家鱼成鱼索饵育肥 *WUA* 随着城陵矶水位的增加呈现先增大后减小的趋势，当城陵矶水位在 20.0~29.0 m 之间时，*WUA* 呈现二次多项式上升趋势（R^2=0.92，*P*<0.01），当城陵矶水位在 29.0~30.0 m 之间时，*WUA* 为 832 km² 基本保持不变，占洞庭湖总面积的 32%，当城陵矶水位在 30.0~34.6 m 之间时，*WUA* 呈现线性下降趋势（R^2=0.98，*P*<0.01）。拟合得到的分段函数如下：

$$\mathrm{WUA}_{幼鱼}=\begin{cases}5.0149x^2-186.86x+1795.6, & 20\le x\le 26.9\mathrm{m}\\ 342, & 26.9<\mathrm{x}\le 28\mathrm{m}\\ 6.8833x^2-497.27x+8965.6, & 28<\mathrm{x}\le 34.6\mathrm{m}\end{cases} \tag{7}$$

$$\mathrm{WUA}_{成鱼}=\begin{cases}16.063x^2-723.76x+8341.4, & 20\le x\le 29\mathrm{m}\\ 832, & 29<\mathrm{x}\le 30\mathrm{m}\\ -177.65x+6215.5, & 30<\mathrm{x}\le 34.6\mathrm{m}\end{cases} \tag{8}$$

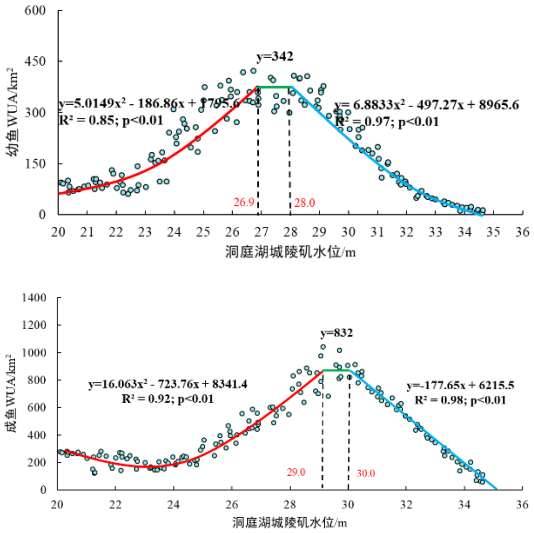

图 10 洞庭湖四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥 *WUA* 与城陵矶水位拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves between WUA of juvenile and adult four major Chinese carps for feeding and fattening and water level at Chenglingji, Lake Dongting

综上所述，当城陵矶水位在 20.0~34.6 m 之间时，洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥适宜生态水位为 26.9~28.0 m，此时 *WUA* 面积为 342 km^2，占洞庭湖总面积的 12%，洞庭湖四大家鱼成鱼索饵育肥适宜生态水位为 29.0~30.0 m，此时 *WUA* 面积为 832 km^2，占洞庭湖总面积的 32%。

3 讨论

3.1 洞庭湖四大家鱼索饵育肥栖息地分布

研究结果表明，四大家鱼幼鱼索饵育肥面积比成鱼索饵育肥适宜面积小，幼鱼及成鱼适宜的区域主要分布于湖体非主流区，其中南洞庭湖非主流区适宜度最高，湘江、资江和沅江入湖附近河段及湖体适宜度大于澧水。在一般情况下，四大家鱼的体型和游泳能力成正比[32]，因此，成鱼索饵育肥的适宜流速和水深比幼鱼大，四大家鱼幼鱼阶段均主要以浮游生物为食，鲢成鱼主要以浮游植物为食，鳙成鱼主要以浮游动物为食，草鱼成鱼主要以草为食，青鱼成鱼主要以底栖动物为食，成鱼的食物种类变得更加多样化[31,33-34]，这也导致了幼鱼在洞庭湖索饵育肥空间相比于成鱼更加有限；湘江、资江、沅江、澧水四条支流对南洞庭湖和西洞庭湖的扰动，使得水流进入东洞庭湖后，在朝向城陵矶的方向上明显增强和集中[14,35]，并且主流区域水深较大，因此，四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥适宜区域一般远离主流区域，表现为主流区域较其他区域适宜性低；南洞庭湖由于特殊的地理位置，水位变动位于四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥适宜水位区间[36-37]，再加上缓慢的非主流区富集较高的营养盐，提供了四大家鱼饵料生长的环境[38-39]，因而四大家鱼在南洞庭湖栖息地适宜性更高；相比于澧水，湘江、资江和沅江水动力条件较大，含沙量低[40]，透明度较高，有利于四大家鱼饵料生物的富集，为四大家鱼提供了适宜索饵育肥的环境，导致了支流入湖口不同空间适宜性的差异。综上，水位变动导致的流速、水深和饵料的时空分布异质性是导致四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥栖息地时空差异的主要原因。

3.2 洞庭湖适宜生态水位合理性分析

本研究基于四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥栖息地水文需求计算得到的洞庭湖适宜生态水位阈值区间分别为 7-8 月 26.9~28.0 m、9—10 月 29.0~30.0 m，总结对比以往研究结果（表 4），在洞庭湖最低生态水位研究中，除了余勋[7]和梁婕等[41]部分计算结果与本研究结果相近外，其他研究结果均偏小[8,42-45]，由于最低生态水位是指为维持河流、湖泊、湿地等水体生态系统基本结构与功能（如水生生物生存、栖息地保

持、水质净化等）所必需的最低水位阈值，计算时较多依赖长序列水文数据，且考虑的指示生物约束单一，因此，以往研究的最低生态水位结果较本研究结果偏小。在洞庭湖最低生态水位研究中，杨波等[46]研究显示当城陵矶水位达到 30 m 左右时，东洞庭湖湿地健康状态达到最佳值，其结果在本研究结果阈值区间内，但未细化区分年内水位差异。黄宇云[47]等提出了洞庭湖 7-10 月适宜生态水位：26.88～29.16 m、25.79～28.32 m、25.12～27.56 m、23.59～25.88 m，其计算结果考虑了三峡水库建设前后水文的变异情况，7-8 月水位与本研究相近，9-10 月计算结果小于本研究结果。朱永卫[9]得到了洞庭湖 7-10 月份适宜生态水位：29.36 m~31.98 m、27.24 m~30.10 m、24.64 m~28.46 m、22.59 m~25.52 m，7-8 月适宜生态水位与本研究结果有交叉，但由于三峡水库稳定运行抬升了汛期洞庭湖城陵矶水位，本研究 9-10 月适宜生态水位结果偏大。实际上，本研究得到的洞庭湖适宜生态水位并不局限于 7-10 月，是四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥栖息地最适宜的阈值范围，综上所述，本研究对洞庭湖四大家鱼适宜生态水位计算基本准确合理，可为人为主导的、新的江湖关系下洞庭湖湿地保护及水生态安全提供科学理论依据。

表 4 洞庭湖生态水位研究成果对比

Tab. 4 Comparison of ecological water level research results of Lake Dongting

生态水位	时间	研究来源	研究方法及时间序列	研究结果
最低生态水位	2009	谭晓明	最小生态需水量分析模型	最低生态水位 25 m
	2011	康婧	湖泊形态分析法	最低生态水位为 25 m
	2013	梁婕等	水文变异法；1952—2006 年水位	7—10 月最低生态水位 29.42、28.58、28.52、26.21 m
	2014	余勋	水文指数的生态可接受水位模型	生态可接受水位汛期 24.48 m~30.96 m；非汛期 15.59 m~22.07 m
	2015	程俊翔等	最低年平均水位法、年保证率设定法、湖泊形态分析法和生态水位法；1955—2011 年水位	4 种方法最低生态水位 24.55 m、25.44 m、26.44m 和 25.24 m
	2019	彭飞宇等	频率曲线法、Qp 法及年保证率设定法；1980—2016 年水位	最低生态水位 24.95 m
	2019	杨毓鑫等	天然水位资料法、年保证率法、最低年平均水位法、生态水位法、湖泊形态分析法及最小空间需求法；1953—2013 年水位	东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位分别为 22.62 m、27.19 m 和 28.11 m
适宜生态水位	2014	杨波等	生态系统健康状态评价指标体系和评价模型；2000~2006 遥感影像	适宜生态水位 30 m
	2020	黄宇云等	水文变异法；1953—2018 年水位	7—10 月适宜生态水位 26.88～29.16、25.79～28.32、25.12～27.56、23.59～25.88 m
	2022	朱永卫	湿地生境适宜性和 RVA 法；2003-2020 年水位	7-10 月适宜生态水位 29.36-31.98、27.24-30.10、24.64-28.46、22.59-25.52 m
	本研究	何术锋等	四大家鱼幼鱼及成鱼索饵育肥需求；2016-2020 年水位	7—8 月适宜生态水位 26.9~28.0 m，9-10 月适宜生态水位 29.0~30.0 m

4 结论

本研究采用洞庭湖 2016—2020 年水文和地形数据，构建了洞庭湖二维水动力模型和鱼类栖息地模型，提出了基于四大家鱼幼鱼和成鱼索饵育肥的洞庭湖适宜生态水位，并探讨了其可行性和合理性，主要结论

如下：

1）洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥最适流速为 0.1~0.2 m/s，最适水深为 0.7~1.6 m，成鱼索饵育肥最适流速为 0.1~0.3 m/s，最适水深为 2.0~4.0 m；洞庭湖 2016—2020 年 7—10 月月均流速和水深基本呈现逐渐递减的趋势，南洞庭湖流速较大，东洞庭湖水深较大。

2）四大家鱼幼鱼索饵育肥面积比成鱼索饵育肥适宜面积小，幼鱼及成鱼适宜的区域主要分布于湖体非主流区，其中南洞庭湖非主流区适宜度最高，湘江、资江和沅江入湖附近河段及湖体适宜度大于澧水。

3）洞庭湖四大家鱼幼鱼索饵育肥适宜生态水位为 26.9~28.0 m，成鱼索饵育肥适宜生态水位为 29.0~30.0 m。

4）在新的江湖关系下，管理者可利用三峡工程调控能力，塑造有利于生态过程的水文情势，例如将四大家鱼适宜生态水位纳入洞庭湖年度水量调度方案，建立基于生态水位阈值的联调联控机制，实现鱼类栖息地的动态管理，有力推动洞庭湖从“水文稳定”向“生态健康”的跨越。

5 参考文献

[1] Zhang GL, Gu XH, Zhao T *et al*. Ecological and environmental changes and protection measures of lakes in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(3): 358-364. [张甘霖, 谷孝鸿, 赵涛等. 中国湖泊生态环境变化与保护对策. 中国科学院院刊, 2023, **38**(3): 358-364.]

[2] Luo JH, Tao Y, Xing P, *et al*. Mini-review: Advances of metagenomics research for lake microbiomes. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 271-280. DOI: 10.18307/2020.0125. [罗建桦, 陶晔, 邢鹏等. 湖泊微生物宏基因组学研究进展. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 271-280.]

[3] Wang HX, Zhu YW, Zha HF *et al*. Ecological water level and its safeguard measures in Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1529-1538. DOI: 10.18307/2020.0524. [王鸿翔, 朱永卫, 查胡飞等. 洞庭湖生态水位及其保障研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1529-1538.]

[4] Zhu Y, Lü C，Hu HJ *et al* Changes in fish community structure in West Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 844-852.

[5] Liu F, Lin PC, Li MZ *et al*. Situations and conservation strategies of fish resources in the Yangtze River basin. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 144-156. [刘飞, 林鹏程, 黎明政等. 长江流域鱼类资源现状与保护对策. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 144-156.]

[6] Zhang G, Wu L, Duan M *et al*. Hatch dates and early growth for juveniles of the four major carps from different sections of the middle Yangtze River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(2): 306-313. DOI: 10.7541/2013.19. [张国, 吴朗, 段明等. 长江中游不同江段四大家鱼幼鱼孵化日期和早期生长的比较研究. 水生生物学报, 2013, **37**(2): 306-313.]

[7] 余勋. 洞庭湖不确定性水质评价及生态水位研究[学位论文]. 湖南：湖南大学, 2014.

[8] Yang YX, Du CY, Zhang JF *et al*. Determination of lowest ecological water level in Dongting Lake area. *Water Resources Protection*, 2019, **35**(3): 89-94. [杨毓鑫, 杜春艳, 张金帆等. 洞庭湖湖区最低生态水位的确定. 水资源保护, 2019, **35**(3): 89-94.]

[9] 朱永卫. 基于湿地生境适宜性的洞庭湖生态水位研究[学位论文]. 河南：华北水利水电大学, 2022.

[10] 李云格, 曾玉红, 胡红亮. 洞庭湖定居性鱼类适宜生态水位研究. 中国水力发电工程学会水工水力学专委会, 国际水利与环境工程学会（IAHR）中国分会, 中国水利学会水力学专委会. 水力学与水利信息学进展，2024.

[11] 茹辉军. 大型通江湖泊洞庭湖水域江湖洄游性鱼类生活史过程研究[学位论文]. 北京：中国科学院大学 2012.

[12] Wang LJ, Tian ZB, Li YJ *et al*. Trend and driving factors of water environment change in Dongting Lake in the last 30 years. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1140-1149. [王丽婧, 田泽斌, 李莹杰等. 洞庭湖近 30 年水环境演变态势及影响因素研究. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1140-1149.]

[13] Qiu HY, Li YQ, Chen L *et al*. Study on patterns of flood coincidence in Dongting Lake basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, **39**(11): 59-70. DOI: 10.11660/slfdxb.20201107. [仇红亚, 李妍清, 陈璐等. 洞庭湖流域洪水遭遇规律研究. 水力发电学报, 2020, **39**(11): 59-70.]

[14] Tian ZB, Wang LJ, Zheng BH *et al*. Impact simulation of the Chenglingji hydraulic project on hydrodynamics of Dongting Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(5): 1883-1890. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0676. [田泽斌, 王丽婧, 郑丙辉等. 城陵矶综合枢纽工程建设对洞庭湖水动力影响模拟研究. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1883-1890.]

[15] Liu J, Chen Q, Xu Y *et al*. Simulation of phosphorus inflow and outflow fluxes and water quality prediction in Dongting Lake area of the Yangtze River Basin: A coupled approach of machine learning and traditional hydrological modeling. *Earth Science*, 2024, **49**(11): 3995-4007. DOI: 10.3799/dqkx.2024.061. [刘杰, 陈前, 许妍等. 长江流域洞庭湖区出入湖磷通量模拟及水质预测：机器学习与传统水文模型耦合方法. 地球科学,

2024, **49**(11): 3995-4007.]

[16] Yang CY, Dai C, Yi X *et al*. Total emission control of water pollutant for the lake basin based on orthogonal experimental design and EFDC Model: A case study of Dianchi Basin. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3696-3702. [杨澄宇, 代超, 伊璇等. 基于正交设计及 EFDC 模型的湖泊流域总量控制——以滇池流域为例.中国环境科学, 2016, **36**(12): 3696-3702.]

[17] Hu Q, Wang JX, Liu SQ *et al*. Calculation of water resources in Dongting Lake Plain based on SWAT model. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, **29**(3): 244-252. [胡倩, 王军霞, 刘世强等. 基于 SWAT 模型的洞庭湖平原水资源量计算. 安全与环境工程, 2022, **29**(3): 244-252.]

[18] Wu J. Comparative analysis of hydrodynamic conditions of "four rivers" in Dongting Lake. *Journal of Shanxi Normal University*: *Natural Science Edition*, 2023, **37**(4): 110-117. [吴晶. 洞庭湖"四水"的水动力条件对比分析. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2023, **37**(4): 110-117.]

[19] Wu H, Feng HH, Zou B *et al*. Land use/cover change (LUCC) response characteristics of the "surface runoff-lake water volume" relationship in the Dongting Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(2): 374-383. [吴宏, 冯徽徽, 邹滨等. 洞庭湖流域"径流—湖泊水量"关系的土地利用/覆盖变化(LUCC)响应特征.长江流域资源与环境, 2023, **32**(2): 374-383.]

[20] Ritter A, Muñoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 2013, **480**: 33-45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.004.

[21] Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW *et al*. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3): 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153.

[22] Yi YJ, Cheng X, Yang ZF *et al*. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **68**: 748-762. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.138.

[23] Li J, Xia ZQ, Dai HC *et al.* The impact of early-stage Three Gorges Reservoir impoundment on the suitability of fish habitats. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(08): 892-900. [李建, 夏自强, 戴会超等. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响, 水利学报, 2013, **44**(8): 892-900.]

[24] Li J, Xia ZQ. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(6): 678-684. [李建, 夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究. 水利学报, 2011, **42**(6): 678-684.]

[25] Yi YJ, Le SH. Habitat suitability function of four major Chinese carps spawning sites in the Yangtze River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, **19**(S1): 117-122. [易雨君, 乐世华. 长江四大家鱼产卵场的栖息地适宜度模型方程. 应用基础与工程科学学报, 2011, **19**(S1): 117-122.]

[26] Bai YQ, Lu B, Luo J *et al*. Induction velocity of juvenile grass carp, silver carp, and darkbarbel catfish. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2085-2089. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0412. [白艳勤, 路波, 罗佳等. 草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2085-2089.]

[27] Song JQ, Wang JB, Huang W *et al*. The response of swimming behavior of juvenile Aristichthys nobilis to turbulence intensity. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(4): 1211-1219. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201804.027. [宋基权, 王继保, 黄伟等. 鳙幼鱼游泳行为与紊动强度响应关系. 生态学杂志, 2018, **37**(4): 1211-1219.]

[28] Zhang H, Mo KL, Li T *et al*. The potential influence of the Poyang Lake Hydraulic Project construction on river-lake migration of grass carp. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 600-610. DOI: 10.5846/stxb202009112368. [张辉, 莫康乐, 李婷等. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对草鱼江湖洄游潜在的影响.生态学报, 2022, **42**(2): 600-610.]

[29] 吴焱. 鄱阳湖水利枢纽运行下四大家鱼过障研究[学位论文]. 重庆：重庆交通大学, 2019.

[30] Dang L, Ma C, Lian JJ. Effects of reservoir regulation on downstream fish habitat suitability. *Journal of Tianjin University*: *Science and Technology*, 2018, **51**(6): 566-574. [党莉, 马超, 练继建. 水库调节对下游鱼类栖息地适宜性的影响.天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2018, **51**(6): 566-574.]

[31] Ding LQ, Li JS, Xu DP *et al*. Spatial and temporal distribution and influencing factors of four major Chinese carps larvae fish resources in lower reaches of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(3): 478-486. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202303003. [丁隆强, 黎加胜, 徐东坡等. 长江下游四大家鱼仔稚鱼时空分布特征及影响因子分析.长江流域资源与环境, 2023, **32**(3): 478-486.]

[32] Lin XJ, Yu LX, Zeng YP *et al*. Fasting on swimming ability in four major carp species of different sizes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(8): 88-98. DOI: 10.3724/1000-3207.2025.2024.0471. [林小菊, 俞立雄, 曾钰评等. 禁食对不同规格四大家鱼游泳能力的影响.水生生物学报, 2025, **49**(8): 88-98.]

[33] Pan WJ, Zheng YH, Gao L *et al*. Food composition and seasonal variation of *Hypophthalmichthys molitrix* and Aristichthys nobilis in Yichang section of the Yangtze River and East Dongting Lake. *Freshwater Fisheries*, 2017, **47**(6): 32-39. [潘文杰, 郑永华, 高雷等. 长江宜昌江段和东洞庭湖鲢、鳙饵料生物组成及季节性变化. 淡水渔业, 2017, **47**(6): 32-39.]

[34] Hu CL, Wang SR, Guo LG *et al*. Food compositon of *Hypophthalmichthys molitrix* and aristichthys nobilis and the diet overlap with *Neosalanx taihuensis* in lake Erhai. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(4): 706-713. [胡翠林, 王圣瑞, 过龙根等. 洱海鲢、鳙的食物组成及与太湖新银鱼的食性重叠研究.水生生物学报, 2014, **38**(4): 706-713.]

[35] Yang YP, Liu WL, Zhang J *et al*. Changes of divergence and confluence relationship between Dongting Lake and the Yangtze River after the operation of the Three Gorges Project and its impact on the waterway depth. *Frontiers in Earth Science*, 2022, **10**: 829669. DOI: 10.3389/feart.2022.829669.

[36] Zhang XD, Zou HM, Xu ZX *et al*. Impact of the Three Gorges Reservoir-induced changes of inflow into the three outlets on the water level of Dongting Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, **56**(10): 1349-1359. [张旭东, 邹红梅, 徐宗学等. 三峡水库运行引起的三口入湖流量变化对洞庭湖水位的影响. 水利学报, 2025, **56**(10): 1349-1359.]

[37] Xu ZX, Zhang XD, Liao RT *et al*. Quantitative attribution of water level changes in Dongting Lake over past 40 years. *Yangtze River*, 2025, **56**(10): 157-165. [徐宗学, 张旭东, 廖如婷等. 近 40 年来洞庭湖水位变化及其量化归因. 人民长江, 2025, **56**(10): 157-165.]

[38] Guo J, Chen DS, Zhang Y *et al*. Community structure and influencing factors of phytoplankton in Dongting lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(5): 161-169, 3. DOI: 10.7541/2025.2024.0427. [郭晶, 陈冬素, 张屹等. 洞庭湖浮游植物群落结构特征及其影响因素分析.水生生物学报, 2025, **49**(5): 161-169, 3.]

[39] Zhang GG. Spatial-temporal distribution of chlorophyll-a and its correlation with environment factors in Dongting Lake. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(4): 84-90. [张光贵. 洞庭湖水体叶绿素 a 时空分布及与环境因子的相关性. 中国环境监测, 2016, **32**(4): 84-90.]

[40] Wang ZC, Mao HT, Qiang Y *et al*. Water and sediment characteristics of the Dongting Lake system and correlations among parameters. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(3): 32-41. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.03.005. [王正成, 毛海涛, 强跃等. 洞庭湖水系水沙特性及参数间的相关性研究. 水生态学杂志, 2020, **41**(3): 32-41.]

[41] Liang J, Peng YR, Guo SL *et al*. Determination of ecological water-level in the eastern Lake Dongting with hydrological alterations. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 330-334. DOI: 10.18307/2013.0303. [梁婕, 彭也茹, 郭生练等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 330-334.]

[42] Tan XM. Analysis on minimum ecological water requirement in Dongting Lake area. *Yangtze River*, 2009, **40**(14): 30-31, 37. [谭晓明. 浅析洞庭湖区最小生态需水量. 人民长江, 2009, **40**(14): 30-31,37.]

[43] 康婧. 三峡工程对两湖地区的生态补偿技术研究[学位论文]. 天津：天津大学, 2012.

[44] Cheng JX, Xu LG, Wu R *et al*. Study on the lowest ecological water level of east Dongting Lake. *Jiangxi Science*, 2015, **33**(6): 932-937. [程俊翔, 徐力刚, 吴睿等. 东洞庭湖最低生态水位研究. 江西科学, 2015, **33**(6): 932-937.]

[45] Peng FY, Xiao SH. Study on ecological water level of east Dongting Lake. *Journal of Green Science and Technology*, 2019, **21**(2): 19-20, 22. [彭飞宇, 肖少怀. 关于东洞庭湖生态水位的研究. 绿色科技, 2019, **21**(2): 19-20, 22.]

[46] Yang B, Liao DX, Li J *et al*. Relationship between water level and wetland ecosystem health state in east Dongting lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(8): 1145-1152. [杨波, 廖丹霞, 李京等. 东洞庭湖湿地生态系统健康状态与水位关系研究.长江流域资源与环境, 2014, **23**(8): 1145-1152.]

[47] Huang YY, Yu MH, Lu J *et al*. Suitable ecological water level of the East Lake Dongting after the Three Gorges Project operation. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 417-427. DOI: 10.18307/2020.0211. [黄宇云, 余明辉, 陆晶等. 三峡建库后东洞庭湖适宜生态水位需求分析. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 417-427.]