J. Lake Sci.(湖泊科学),2027,39(5):000-000
DOI: 10.18307/2027.0501
©2027 by *Journal of Lake Sciences*

湖库广义换水周期概念、计算方法与应用研究进展*

钟　优[1]，吴修锋[1,2]，戴江玉[1,3**]，吴时强[1]，孙儒耳[1]，程　旭[1]，刘倩倩[1,3]，陈晓彬[1]
（1：南京水利科学研究院，南京 210029）
（2：水利部太湖流域水治理重点实验室，南京 210029）
（3：水利部太湖流域浅水湖泊生态系统野外科学观测研究站，无锡 214024）

摘　要：水体更新过程是影响湖泊水动力特征、水环境质量及生态结构演变的关键因素，而换水周期作为核心指标，在富营养化机理分析与藻华发生预测等方面发挥着重要作用。然而，传统的单一宏观时间标量往往掩盖了水体内部真实的输运特性。本文将换水周期由传统的单一物理标量，拓展定义为表征水体更新能力的“广义换水周期”多尺度评估体系。在此框架下，本文厘清了作为稳态宏观值的水力停留时间、表征工程调控与水文脉冲干预的传统换水周期、表征系统级溶质排泄与净化效率的冲刷时间，以及刻画微观质点三维传输历程的水龄与滞留时间的物理内涵与适用边界。系统梳理了基于水量平衡、示踪与水龄分布以及依托三维数值模拟的计算方法演进。揭示了广义换水周期对营养盐循环及藻类演替的驱动机制及高强度水动力调控可能引发的外源负荷侵入与自净功能脱节等生态风险。未来研究应重点关注极低流速死区下水龄空间异质性的高精度识别、物理置换与生化反应速率匹配的生态安全阈值标定，以及基于数字孪生的“空—时—量”智慧精准调控策略。
关键词：广义换水周期；水龄；冲刷时间；滞留时间；数值模拟；水力停留时间；湖库生态响应

Generalized Water Renewal Cycles in Lakes and Reservoirs: Concepts, Calculation Methods, and Applications*

Zhong You[1], Wu Xiufeng[1,2], Dai Jiangyu[1,3**], Wu Shiqiang[1], Sun Ruer[1], Cheng Xu[1], Liu Qianqian[1,3]& Chen Xiaobin[1]
(1: *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *P.R.China*)
(2: *Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Management, Ministry of Water Resources, Nanjing* 210029, *P.R.China)*
(3: *Taihu Basin Shallow Lake Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Water Resources, Wuxi* 214024, *P.R.China*)

Abstract: Water renewal is a key factor affecting lake hydrodynamics, water environmental quality, and ecological structure. As a core indicator, the water renewal cycle helps analyze eutrophication mechanisms and predict algal blooms. However, traditional single macroscopic temporal scalars often hide the real internal transport features of water bodies. This study extends the definition of the water renewal cycle from a single physical scalar to a multi-scale evaluation system of the “generalized water renewal cycle” for describing water renewal capacity. Under this framework, this work clarifies the physical meanings and application limits of four concepts: hydraulic retention time as a steady-state macroscopic value; the traditional water renewal cycle for engineering regulation and hydrological pulse intervention; flushing time for system-scale solute export and purification efficiency; and water age and residence time for describing the three-dimensional transport history of microscale particles. It systematically reviews the development of calculation methods based on water balance, tracer and water age distribution, and three-dimensional numerical simulation. In addition, it explains how the generalized water renewal cycle drives nutrient cycling and algal succession, and notes potential ecological

* 2026-05-08 收稿；026-09-14 收修改稿；2026-09-15 录用。
国家重点研发计划项目(2024YFC3211102)、水利部太湖流域水治理重点实验室开放基金项目（Yk924004-C8）和南京水利科学研究院基金项目（Yy126005）联合资助。
**通信作者；E-mail: jydai@nhri.cn。

risks from strong hydrodynamic regulation, including external load intrusion and decoupling of self-purification functions. Future research should focus on accurate mapping of spatial heterogeneity of water age in extremely low-velocity stagnant zones, calibration of ecological safety thresholds that match physical displacement rates and biochemical reaction rates, and intelligent and precise “space-time-volume” regulation strategies supported by digital twins.
Keywords: Generalized water renewal cycles; Water age; Flushing time; Residence time; Numerical simulation; Hydraulic retention time; Lakes and reservoirs ecological response

水体更新过程是影响湖库水动力特征、水环境质量及生态结构演变的关键因素。换水周期作为核心指标，广泛应用于湖泊与水库研究，并表征污染物滞留、营养盐循环及生态响应过程[1-2]。湖库相对半封闭的水动力特征使得换水周期成为生源要素滞留、累积与自净过程的关键物理约束。随着湖库水环境问题的日益突出，换水周期在水质评价、富营养化机理分析、藻华发生预测以及水资源调控决策等方面发挥着越来越重要的作用[3]。国内外学者围绕换水周期的概念界定、计算方法及其在不同水体和研究情景中的应用开展了大量研究，已形成系统的研究成果[4]。然而，传统的单一宏观时间标量易掩盖局地输运的非均匀特征，相关表征指标在多维生境精准调控中的应用场景与协同关系需进一步系统梳理[5]。因此，有必要在全面梳理国内外相关研究的基础上，对湖库广义换水周期的物理内涵、计算方法及应用进展进行系统总结，并进一步探讨当前研究存在的主要问题与未来发展方向。

文献检索以 Web of Science 和中国知网为主要数据库，检索截止时间为 2026 年 7 月。以“换水周期”、“水力停留时间”、“水龄”、“冲刷时间”、“湖泊/水库”、“数值模拟”等为中英文主题词进行了系统检索与筛选。剔除与湖库水体更新无关的文献后，最终选出 98 篇代表性核心文献（其中中文文献约占 21%，外文文献约占 79%）进行深入剖析。基于上述文献，本文围绕广义换水周期这一多尺度评估体系，系统回顾其概念演化与理论基础，归纳和比较不同计算方法的适用条件与优缺点，总结其在水环境、水动力及水生态等领域的应用研究进展，并在此基础上提出未来研究的发展方向，以期为相关研究与工程实践提供参考。

1 广义换水周期的概念界定与理论基础

1.1 广义换水周期的概念内涵与指标体系

水体更新与物质输运过程的定量表达是物理湖沼学研究的核心基础[6]。在宏观总量层面，水力停留时间（Hydraulic Retention Time, HRT）作为零维全局标量，仅反映稳态及理想完全混合假设下的理论平均换水时间，难以体现非理想混合过程与空间异质性[7-8]。冲刷时间则打破了理想完全混合假设，通过考虑实际水流与溶质运移，提供了系统级整体更新速率与净化效率的修正表征[9]。为了进一步从系统级宏观标量深入至湖库内部的三维局地水动力交换结构，水龄与滞留时间构成了微观时空场上的共轭互补体系[10]。水龄度量水质点自入流边界进入研究区域后迁移至特定位置所消耗的累积时间，反映水体历史传输历程。滞留时间则估算特定位置水质点首次离开研究边界所需的潜在剩余时间，反映水体未来排出历程。二者在时间维度上互补，在稳态流场条件下，在任意空间位置相加即可得到水质点穿过系统的总传输时间，而在非稳态流场中因流场动态变化则不可简单线性叠加。这种三维局地场的空间分异能够精准识别湖湾滞留死角、水力短路通道及水体垂直分层特征，弥补了宏观标量无法刻画局部异质性的缺陷。

在大型引调水等非恒定流场景下，传统换水周期作为一种综合工程管理指标被广泛应用，指水体在水文脉冲或工程调控干预下完成水量物理置换的实际时间历程[11]。事实上，水力停留时间、冲刷时间、水龄、滞留时间与传统换水周期这五个核心概念，在物理内涵上虽各有侧重，但在实际的湖泊诊断与生态应用中具有高度的相关性与重叠性。它们并非相互对立，而是构成了从宏观总量平衡到局部异质性解析、再到生化物质归宿的递进评估矩阵（表 1）。为了在复杂的工程调控与生态响应之间建立统一的宏观联系，本综述将“换水周期”扩展为一个广义概念，即湖库系统的水体更新能力。在该广义框架下，换水周期在保留传统水量物理置换内涵的基础上，延伸为涵盖多维物质传输响应的综合表征体系。其中 HRT 用于约束宏观总量基准，冲刷时间用于表征系统级溶质排泄的时间尺度，水龄与滞留时间用于刻画

三维局地传输历程。各指标多维互补，共同构建了多尺度水体更新能力表征框架，为后续深入剖析驱动机制、评估生态效应及制定工程调控策略提供了统一的概念基础与量化标尺。

表 1 广义换水周期指标体系的概念内涵与特征对比

Tab.1 Comparison of conceptual connotations and characteristics of the indicator system for the generalized water renewal cycle

概念名称	物理内涵	计算与求解方法	主要局限性	应用场景侧重点
水力停留时间	稳态与完全混合假设下，系统完成湖容总量理论置换的平均时间	湖泊总容积与出流量的算术比值	掩盖空间异质性，无法识别局部水力死角	湖泊长期历史水文演变分析、宏观生态分类
冲刷时间	水体或溶质团运移出系统的特征时间	淡水分数法、质量—通量比值法或出流端响应函数积分	难以追溯物质在系统内部的具体迁移路径	突发污染事件排泄评估、营养盐滞留截留率计算
水龄	水质点自入流边界至特定位置的累积时间	基于 CART 理论求解顺时对流—扩散方程或拉格朗日粒子追踪	依赖高精度地形数据与庞大的计算算力	复杂湖泊现状诊断、水力死角精准识别、调水路径优化
滞留时间	水质点自特定位置首次离开边界的潜在剩余时间	求解逆时对流—扩散伴随方程或示踪剂衰减至e^{-1}的特征时间	高度依赖出流边界与强度，无法追溯水体历史来源	突发污染局地滞留风险评估、内源养分累积时间窗口标定
传统换水周期	水文脉冲或调控干预下水量物理置换历程	结合实测与精细化模型解析非稳态过程	受非恒定调水方案干扰大，缺乏通用解析表达	引调水工程生态响应评估、富营养化控制阈值研究

1.2 广义换水周期的物理与水文基础

广义换水周期本质上是表征水体内部物质在复杂物理输运作用下完成置换的宏观时间尺度，其时空分布特征受控于剪切离散、热分层稳定性及风生环流等多重物理机制的非线性耦合。在基础输运理论的现代演进层面，Guan 和 Chen[12]的最新研究精细刻画了湍流剪切流中流速分布不均匀性导致溶质云团沿纵向拉伸与离散的机制，证明了跨时间尺度的横向混合过程会反过来强化纵向离散效率。Shin 等[13]进一步将该理论体系与现代数值分析相结合，并广泛应用于天然河道与复杂开放水体，指出这种由流速梯度主导的剪切离散效应，使得实际水体的混合路径远大于由平均流速推算的理论路径，并从物理上解释了水体停留时间分布为何普遍呈现显著的“长尾效应”，即部分水体在边界层或死水区的滞留时间将呈指数级延长。这种基础物理机制在不同几何形态与热力结构的湖泊中表现出差异化的动力学响应，主要划分为深水湖库的分层隔离机理与浅水湖泊的风场混合机理（图 1）。

在深水湖库中，密度分层主导水体交换，温跃层将水体分隔为上混合层与下滞留层，显著抑制底层更新。Imberger[14] 通过微尺度能量收支分析指出，日变温层与季节性温跃层的存在将水体物理隔离为上层混合区与下层滞留区，导致底层水体在分层期的更新速率受到极大抑制。Spigel 和 Imberger[15] 进一步建立了基于 Wedderburn 数和 Lake 数的混合动力学分类体系，指出当风切变引发的内波破碎能量足以克服水柱的重力稳定性时，可诱发局地跨跃层机械混合。此外，除风动力扰动外，气温下降导致表层水体冷却及垂直温度梯度减小，亦能诱发垂直对流事件，同样是促成跨温跃层垂直交换的关键动力。在宏观气象因素驱动下，全球气候变暖引发的结冰期缩短与热分层时期延长，进一步强化了温跃层的物理阻隔效应[16-19]。此类热动力学结构变化深刻改变了湖水自然更新节律，不仅显著削弱了深层水体的垂直交换效率，更导致局地滞留时间延长与热生境漂移，成为驱动深水湖库广义换水周期演变的关键机制[20-21]。

相比之下，浅水湖泊水动力系统受风场、风生流、吞吐流、风浪、增减水及定振波等多重过程共同驱动。其中，风浪吸收了水体所获风能的绝大部分，在能量输入与高频扰动中起关键作用。而在大尺度

物质输移与水体更新层面，则主要由风生流与吞吐流相互作用构成的流动演变所主导。Hunter 和 Hearn[22]在针对狭长型浅水湖泊的动力学推导中发现，风应力与变深地形的相互作用会诱导产生特征显著的“地形双环流”结构，即浅水区顺风流动、深槽区逆风补偿，这种大尺度的环流模式直接决定了全湖水体的输移通道与换水效率[23]。针对大型浅水湖泊复杂的风场响应特征，胥瑞晨等[24]以太湖“引江济太”工程为例的实证研究表明，风场是控制局部湖湾水体交换效率的决定性因子。模拟显示，特定的东南风场有助于在湖区形成西向补偿流，能显著促进贡湖湾及西北湖区与外部水体的交换，而风向的改变可能导致同一区域的换水效率产生数倍的非线性差异，证明了气象边界条件在浅水湖泊换水评估中的关键作用[25]。

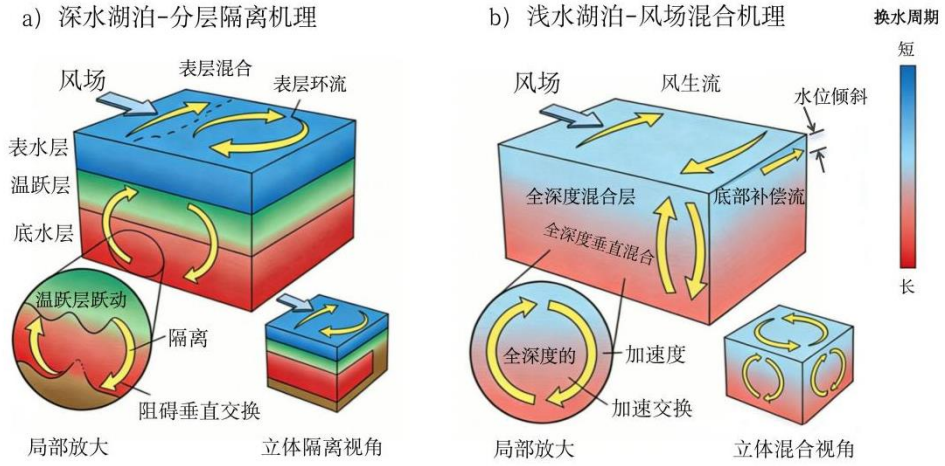

图 1 分层与风场对深水湖库（a）和浅水湖泊（b）广义换水周期影响的机理图

Fig.1 Schematic diagram of the effects of stratification and wind fields on generalized water renewal cycles in deep lakes and reservoirs (a) and shallow lakes (b)

1.3 广义换水周期的概念演化与空间尺度拓展

单一确定性的水力停留时间指标难以反映自然水体显著非均匀的动态更新过程[9]。针对上述宏观指标的局限，水龄研究在近十余年的湖沼学领域迅速兴起并持续成为前沿热点。这一研究热潮的核心驱动力在于，传统水力停留时间通常基于稳态流与完全混合等理想假设，将整个水体简化为零维均质单元[8-10]。这种理论简化在宏观总量评估中虽然有效，但在处理实际湖泊时，极易掩盖由地形阻滞、分层隔离及风生环流引发的局部滞留与水力死角问题。当面临大型湖库局部水华频发等生态危机时，基于水量平衡的全局时间标量难以提供精细的时空动力学证据。这种空间解析力的不足，客观上迫切需要引入能够表征空间非均匀混合强度的度量工具。事实上，评估视角从单一名义常数向水龄概率分布的转变，也是海洋动力学、地下水与流域水文学等多学科交叉融合的结果[26-28]。

为将这一理论视角落到实处，三维精细化数值模拟技术为刻画物质输移路径与空间尺度的拓展提供了关键途径。在基础理论层面，Deleersnijder 等[26]和 Delhez 等[27]提出了基于组分的水龄与滞留时间理论（Constituent-oriented Age and Residence time Theory, CART）。该理论将水体细分为源自不同补给边界或特定属性的水体组分，通过构建对流—扩散方程联合求解组分浓度与水龄浓度场以定量计算平均水龄，实现了水体更新过程的三维连续表征，使广义换水周期由标量扩展为空间分布场，可定量反映水体“新鲜度”及来源结构。基于该理论，空间异质性被证实是识别水体生态风险的关键指标[28]。例如，张素香等[29]基于三维水动力模型对鄱阳湖水龄的时空分布进行了精细刻画，揭示了全湖平均指标的局限性：受复杂地形限制，即使整体换水活跃，局部深湾依然存在交换极缓的“水力死角”。这种高分辨率的空间解析证明，精细化数值模拟在浅水湖泊流动性评估与富营养化空间差异诊断中具有核心价值。

2 广义换水周期的计算方法体系

2.1 基于水量平衡的经典计算方法

基于水量平衡的广义换水周期计算方法是湖泊与水库水动力研究中最早建立、应用最为广泛的基础方法[30-31]。该类方法以控制体水量守恒为基本约束，将湖泊系统视为整体均质单元，通过分析一定时间尺度内水体储量与进出流过程之间的数量关系，对水体更新速率进行宏观刻画。对于非完全平衡的系统（如存在大量内部取水的湖泊或受人工调控的水库），进入水体但未排出的水量并未对主体更新产生实质性贡献，真正决定水体有效更新能力的是系统的总出流量。因此，在广义换水周期评估体系中，作为宏观总量基准的水力停留时间计算方法为湖泊水体总容积与多年平均出流量之比：

$$T = \frac{V}{Q_{out}} \tag{1}$$

式中，T为水力停留时间（d）；V为湖泊总容积（m^3）；Q_{out} 为多年平均出流量（m^3/d）

该定义形式在湖泊生态学研究中得到最早和最为系统的应用。Dillon 和 Rigler[32]在研究湖泊磷负荷与初级生产力关系时，将水力停留时间作为衡量湖泊水体更新能力的重要水文指标。随着研究的深入，Auger 等[33] 通过对 Lake George 的水文模拟分析指出，基于多年平均流量的水力停留时间在短期水文波动下可能低估水体更新的复杂性，但在多年尺度上仍能有效刻画湖泊水体更新强度及物质循环过程。然而，天然湖泊普遍存在显著的季节性和年际尺度水文波动，单一多年平均流量难以反映历史水量变化对广义换水周期估算结果的影响。针对非稳态水文条件，Eriksson[34]提出了基于时间分解的水量平衡思想，即在严格满足水量守恒的前提下，通过对不同时间步内的瞬时蓄水量与出流量进行时间加权整合，将平均水力停留时间表示为：

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i \, \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_i \, \Delta t_i} \tag{2}$$

式中，Δt_i为第i个时间步的长度（d）；V_i为第i个时间步内湖泊的瞬时体积（m^3）；Q_i为第i个时间步内的出流量（m^3/d）；n为划分的总步数。

该方法能够反映历史流量变动对水体更新过程的影响。在此基础上，面对实际湖泊中输入与输出过程在来源、时序和水力通道上的异质性，Dawidek 和 Ferencz[35]进一步采用输入—输出分离的水量平衡形式，以更准确地刻画水体更新过程。近年来，为进一步强化宏观水量平衡对历史滞留特征的刻画能力，Gilboa 等[36]将水量平衡方程扩展为水龄结构形式，通过将水体划分为不同水龄组分并引入留存率矩阵，计算各组分停留时间的加权平均，实现了对非稳态条件下水运移历史的结构化表达。

总体而言，基于水量平衡的方法体系在数学表征上经历了从单一稳态比值（式 1）到非稳态时间加权（式 2），再到结构化水龄拆解的不断深化。基于长系列实测水文资料的宏观统计分析，能够为评估湖泊整体演变规律提供可靠的基准。然而，受制于系统完全混合的零维假定，此类方法的物理内核在空间解析上存在固有局限[10]。特别是对于地形曲折、受高频风浪扰动的浅水湖泊，传统的代数估算难以有效刻画水流输移的三维空间异质性与局部迟滞效应[29]。为弥补这一空间尺度的表征缺环，现代研究在依托客观水文统计数据的基础上，逐步向精细化数值模拟范式拓展。

2.2 基于野外示踪与水龄理论的计算方法

广义换水周期的示踪剂研究最初建立在水力停留时间概念之上。以 Gibson 等[37]为代表的早期研究，在系统完全混合与输入输出处于稳态的假设下，主要利用保守示踪物质建立零维单箱质量平衡方程，以反演湖泊系统的整体更新标量。然而，此类基于单示踪剂与零维单箱假设的方法存在明显的物理局限：一方面，其完全混合假定忽略了自然水体显著的空间异质性；另一方面，单一示踪剂存在表观水龄偏差（如稳定同位素偏向低龄水，放射性同位素对高龄水更敏感），难以独立提取完整的水龄谱信息，导致评估结果产生偏离[38-40]。

为克服零维标量无法表征空间异质性的局限，学者们借鉴地下水与流域水文学中的集总参数模型与水龄概率分布理论，通过引入多源示踪物质进行数学重构[41]。在方法论演进方面，Leray 等[42]从动力学

机理上阐明了水体水龄概率分布的物理基础。Meresescu 等[43]发展了一维反卷积解析方法，实现了由示踪信号向水龄及滞留时间分布曲线的重构。Rädle 等[44]则进一步将多源示踪信息整合至贝叶斯推断框架中，提升了不确定性条件下的反演可靠性。随后，这一评估范式被引入地表湖库系统。徐秋娥等[45]强调需通过水龄概率密度函数捕获水体传输中的“长尾效应”，以精准识别局地滞留特征。胥瑞晨等[46]针对太湖的研究亦证实，基于示踪与水龄分析的局地响应与传统水力停留时间在物理内涵上存在显著差异。然而，集总反演与卷积解析方法在本质上均受到其核心线性时不变假设的约束。在风驱强迫或高频调水等强非稳态流场条件下，系统传输函数会发生动态漂移，导致该假设难以成立。

不同野外示踪与水龄反演方法在示踪物质属性、关键假设、局限性及适用场景上的特征对比见表 2。此类方法的优势在于依托野外实测的人工示踪剂或环境同位素响应反演水体输运过程[37-39]，简化了对湖盆三维地形几何与水动力边界条件的依赖。其方法选型主要取决于水文过程的动态特征与传输时间分辨率要求：对于稳态或微扰动水体，可依据数据可获得性选择单示踪剂平衡或多源示踪反演[44-46]；而对于高频局地传输响应，则需依托脉冲响应分析[43,47]。然而，受限于野外采样在空间维度上的天然离散性，加之对系统线性时不变假定的强依赖，该体系在解析复杂水体的高分辨率空间异质性与连续非稳态流场方面仍存在固有局限[40,43]。

表 2 基于野外示踪剂与水龄理论的广义换水周期计算方法

Tab.2 Calculation methods of generalized water renewal cycles based on field tracer and water age theory

计算方法	示踪物质	核心逻辑	关键假设	主要局限	适用场景	参考文献
系统级单示踪剂质量平衡	保守示踪物质为主	零维单箱质量平衡与信号衰减	完全混合、系统稳态	掩盖空间异质性，具表观水龄偏差	封闭湖库与流域总量估算	[10]
多源示踪联合反演	保守与非保守示踪物质组合	反卷积解析与集总参数模型	满足线性时不变、天然输入历时已知	依赖长序列输入，推断具多解性	缓流水体与地表—地下水交互区	[43]
示踪脉冲响应与卷积分析	人工脉冲示踪剂	穿透曲线统计与卷积积分	满足线性时不变	强非稳态流场失效，难以推演三维场	局地短路识别与突发污染响应	[40]

2.3 基于数值模型的广义换水周期计算

尽管多示踪剂反演与水龄概率分布理论极大提升了自然水体更新历史的评估精度，但受限于高昂的实测成本与难以进行未来情景预测的短板，其在应对复杂水环境工程调控时存在一定局限。随着计算流体力学的突破，近二十年来三维精细化数值模拟已逐步发展为广义换水周期评估的重要范式[48-52]（图 2）。这一演进的核心科学价值在于，其赋予了研究者在复杂动力驱动（如风场，气象）与地形边界约束下，解析湖泊三维水龄空间场动态演变的能力。

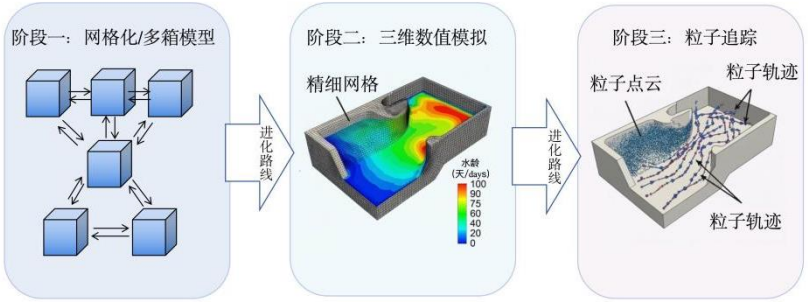

图 2 广义换水周期数值计算范式的演进示意图

Fig.2 Evolutionary diagram of paradigms for the numerical calculation of generalized water renewal cycles

在欧拉网格求解体系中，模型依托连续介质假定下的对流—扩散偏微分方程，在固定网格上对控制体积内的标量进行求解。在标量处理上，主要包括用于评估纯物理水力置换的无衰减保守数值示踪剂[53-54]、用于评估物质有效更新周期的含一级降解与沉降项非保守数值示踪剂，以及基于水龄—滞留时间理论在传输方程中引入时间累积源项直接求解的连续空间水龄场[26-27]。为抑制非稳态强剪切流场中的数值不稳定性并提升求解精度，算法格式上广泛引入了剖开算子法与全变差减小等高阶对流离散格式[48]。此类高阶格式通过引入非线性限制器，有效遏制了数值计算中的非物理耗散，从而显著提升了水龄梯度陡峭区的捕捉精度。然而在物理机制上，欧拉法在解析湖湾死水区或低流速区时，控制体积网格离散化极易产生严重的人工数值弥散，导致水龄场被过度平滑，进而系统性低估局部的真实滞留时间，且该方法对网格正交性与分辨率高度敏感[50,55]。

在数值算法的方法论演进层面，近十年来最为显著的突破与启发，是从传统的欧拉浓度场解析向拉格朗日粒子追踪技术（Lagrangian Particle Tracking, LPT）的视角转换。为从方法论上规避固定网格的人工数值弥散，LPT 技术转为微观质点视角，通过耦合三维流场与随机游走模型记录海量质点的微观输移轨迹，在识别局部高滞留热点与捕捉微观输移路径上展现出独到优势[50-52]。然而作为一种统计型求解工具，LPT 的应用受到严峻的方法学局限与算力瓶颈约束：评估结果对初始释放粒子数量及其时空分布高度敏感[51-52]，在精细网格下为保证统计显著性需释放百万级质点，导致算力负荷与内存占用呈指数级增长；在强紊动区、温跃层剪切带或底床边界层，随机游走模型中的各向异性紊动扩散系数极难通过实测数据精准率定；且质点在曲折岸线与干湿交替单元易产生假捕获或越界流失，极度依赖严格的质量守恒修正算法与反射边界约束。

从方法适用性来看,不同计算范式的选择高度取决于湖库物理形态与动力学特征。对于风生流为主、空间异质性强的浅水湖泊，基于全局水量平衡的箱式模型仅能用于背景粗估，欧拉法可高效反演全湖大尺度水龄场,但局部低流速死区需结合拉格朗日法精细识别[50-52];对于存在强烈热分层的深水湖库[16-17,20],垂向坐标体系的选择对遏制人工数值跨等密面混合、准确捕捉温跃层阻隔下的更新脉动至关重要[21,56],而 LPT 则在追踪质点跨跃层输移与混合路径上具备不可替代性。在模型工具选择上，主流数值模拟工具在不同湖库生境中的适用性差异，主要取决于其空间网格剖分方式（如非结构三角网格与正交曲线网格对曲折岸线的贴合度）与垂向坐标构型（表 3）[57-58]。为突破单一算法在通量守恒与微观死区识别上的内在限制，将欧拉法的宏观通量守恒优势与拉格朗日法的微观轨迹识别能力深度耦合，正成为实现湖库广义换水周期精细化评价的发展方向。

3 广义换水周期的应用

3.1 广义换水周期对水生态环境改善的作用机制

广义换水周期作为刻画湖泊物理生境动态的关键指标，通过改变水体的空间位移与能量通量，深刻驱动着湖泊生源要素的生物地球化学循环过程[67]。从水环境效应来看，广义换水周期的缩短直接强化了对氮、磷等营养盐的物理稀释与水平输送作用[68-69]。在大型浅水湖泊中，较快的周转速率能缩短外源负荷在湖内的滞留时间，降低关键营养物质的积累水平。然而，受湖泊几何形态、水力连通度及季节水情共同调控，自然水体的更新在空间与时间维度上普遍存在显著的非均匀性，这导致了不同湖区对外源负荷稀释净化能力的天然差异，水体滞留时间较长的区域往往更容易成为污染物与营养盐累积的生态敏感区[4,70]。

在生态系统响应层面，广义换水周期是调控藻类生长动力学与水华演变的核心时间开关[71-75]。藻类生物量的时空分布本质上是其自身净生长率与水力移出率博弈的结果。当广义换水周期缩短至低于蓝藻等优势物种的倍增时间时，物理上的移出效应将打破水华形成的静稳水文条件，甚至能抵消气候变暖带来的蓝藻增殖优势，从而显著抑制蓝藻生物量的爆发。此外，广义换水周期的波动还通过改变光照条件（水体透明度）和底质稳定性，间接影响沉水植物的定植与演替[76]。

受湖库水文与地形异质性的影响，这一物理—生物响应机制在实际控藻与水质改善中表现出不同的规律。对于大型浅水湖泊太湖，王冼民等[77]基于 EcoTaihu 模型，在 2010 年实测水文气象及特定外源氮

磷负荷等边界条件下研究指出，当全湖换水周期维持在 150–160 d 时可使全湖氮磷背景浓度相对最低并有效抑制藻类生长，明确了太湖在特定水文气象与负荷背景下的水质与控藻适宜时间[78]。对于江湖连通型湖泊鄱阳湖，黄爱平等[79]揭示了在长江干流顶托影响下的水龄累积现象，主河道水龄小于 10 d 即低于蓝藻倍增时间时能够通过强水力移出有效抑制水华，但局地湖湾与碟形湖受水力阻滞水龄可累积至 280–300 d，水力移出效应显著减弱，成为局地水华爆发与负荷累积的敏感区。这表明全湖平均指标难以表征局地生态响应的异质性，必须开展基于空间异质性的分区定量诊断。

表 3 主流数值模型在广义换水周期计算中的特性对比

Tab.3 Comparison of the characteristics of mainstream numerical models in the calculation of generalized water renewal cycles

模拟工具	坐标系/网格类型	计算核心/方法	适用范围	局限性	代表性研究
EFDC	正交曲线网格	基于欧拉法的示踪剂输移方程与水龄/滞留时间理论	大尺度浅水湖泊与复杂水质/生态耦合模拟，计算效能高	矩形网格对极端曲折岸线的逼近能力有限；陡峭地形下坐标易产生假数值扩散	太湖[59] 菜子湖[60]
MIKE 21/3	非结构网格	基于有限体积欧拉法的标量输移与水龄/冲刷时间求解	复杂曲折岸线与多岛屿浅水湖泊，网格适应性强	商业软件，底层算法透明度较低，高阶离散格式定制化受限。	昆明池[61] 鄱阳湖[54] 安大略湖 [62] 城市人工湖[63]
FVCOM	非结构网格	欧拉有限体积法与拉格朗日质点追踪双向/离线耦合	兼顾质量守恒与地形逼近，适合大尺度滩涂交换	对非稳态高频扰动的步长限制较严，计算负荷较高	密歇根湖[64] 伊利湖[50]
ELCOM	笛卡尔网格	热分层欧拉水动力引擎与离线拉格朗日质点追踪	深水湖库温跃层演变、日变混合及垂向扩散系数精准刻画。	水平方向阶梯状网格对曲折岸线逼近能力弱，易引入局部人工阻力	康斯坦茨湖[19] 圣克莱尔湖[65]
CE-QUAL-W2	纵向—垂向二维	基于侧向平均的纵向—垂向欧拉连续传输求解	狭长型河道与水库河湾的纵向换水计算，算力开销极低	忽略侧向流动及水平环流异质性，无法应用于宽浅型湖泊	三峡水库香溪河湾[56]
Delft3D	正交/非结构网格	欧拉标量输移与拉格朗日粒子追踪耦合	支持粒子追踪与浓度场同步模拟，物理过程全面	粒子追踪模块在质点数极大时内存占用严重，高频非稳态求解较慢	太湖[66]

3.2 广义换水周期调控的伴生风险

通过引排水或闸坝调度缩短广义换水周期，在改变湖泊固有物质输运与生化反应过程的同时，其生态风险集中体现为物理输送增强与外源负荷输入通量之间的空间耦合冲突[80]。高强度的水力驱动在加速湖泊原有污染物移出的同时，必然增大单位时间内进入系统的外源物质总量。若补给水源的化学组分与受纳湖泊存在异质性，或携带较高浓度的颗粒态养分[81]，高频率的水体交换将导致系统由“低通量、慢循环”转向“高通量、快更替”模式。在该模式下，外源负荷的瞬时输入强度若超过系统的稀释与降解阈值，将导致营养盐浓度的逆势上升，产生水动力驱动下的负荷侵入效应[82-83]。

与此同时，工程调控易引发换水效率提升与湖泊自净功能之间的时空动力学失衡。水质改善过程不仅受控于物理置换率，更依赖于生源要素在湖泊内部的生物地球化学反应时间[68,84-85]。当广义换水周期被压缩至低于微生物降解或藻类同化所需的时间阈值时，系统的生物物理过程将发生脱节。低换水频率的水交换虽能维持较长的反应窗口，但易诱发水体静稳导致的内源释放与藻类聚集[86-87]。而高换水效率则导致水体在湖内的停留时间短于生化反应周期，使得湖泊的自然净化功能因物理冲刷而受到抑制。这种物理输送速率与生化反应速率的非对称性，削弱了湖泊生态系统的调节韧性，导致水质改善的实质性效果往往滞后于工程调度[88-90]。

更为严峻的风险在于工程调控所引发的湖泊稳态转换[75]。在引调水等水动力干预过程中，生态系统所面临的风险主要来自外源高泥沙浊水进入湖体后对水生境的冲击。大量细颗粒悬浮泥沙随补给水体集中涌入，不仅导致受纳水体透明度急剧下降、真光层深度大幅压缩，更对健康沉水植物的正常生长造成严重的光照抑制[76]。沉水植物在持续水下弱光胁迫下出现群落萎缩与竞争劣势，其稳定底质以及抑制藻类的生态屏障功能随之瓦解。这种生境扰动促使生态系统打破原有的动态平衡并跨越恢复力临界阈值，最终由维持清澈水质的草型清水态逆转为以浮游藻类富集为特征的藻型浊水态（图 3）[91-92]。因此，将生境耐受的临界流速与外源浊水输入强度作为工程调控的硬性约束，探讨物理置换与生化降解的最优耦合区间，是规避水动力风险、实现水环境精细化调控的科学前提。

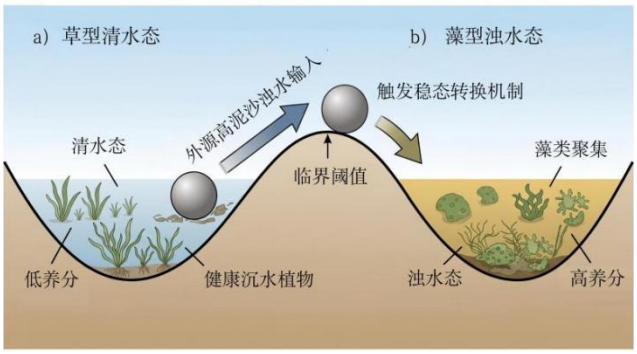

图 3 外源高泥沙浊水输入下湖泊草型清水态（a）向藻型浊水态（b）的稳态转换图

Fig.3 Conceptual diagram of lake regime shifts from a macrophyte-dominated clear-water state (a) to a phytoplankton-dominated turbid state (b) under external high-sediment turbid water input

3.3 基于广义换水周期的多目标优化调控策略

针对换水效率与水质改善之间的协同冲突，未来的水动力调控需从单一缩短广义换水周期的量化驱动转向基于生态阈值的精准驱动[93]。首先，应建立基于关键生源要素反应动力学的广义换水周期调控区间。优化策略的核心在于识别不同营养水平下湖泊自净功能对水龄的敏感窗口，通过多水源组合调度，使目标水域的广义换水周期保持在生物同化速率与物理输送速率相匹配的范围内。对于太湖等大型富营养化湖泊，大型引调水工程在提升局部换水效率的同时，也不可避免地增加了外源污染物的输入与底栖生态扰动[81-82]。因此，必须将水动力调控建立在科学的生态监测网络优化之上[94]，通过精细化的非均匀流场设计优先置换高风险区的滞留水体，而非盲目追求全湖平均广义换水周期的缩短，从而在水体物理置换速率与生态环境承载力之间寻求最佳平衡[36]。

其次，需构建以物理生境稳定性为约束的动力学调控边界。优化策略必须兼顾底泥剪切应力与沉水植被的耐受阈值，规避高流速脉冲导致的水力冲刷风险[76,87]。在调度过程中，应采用平稳、长效的低频动力输入替代短时、剧烈的高频扰动，确保换水效率的提升不以牺牲底质稳定性和透明度为代价。通过集成三维水动力—水环境耦合模型，可以模拟不同调控情势下水体交换速率对草—藻稳态转换的影响[95]，进而确定调控强度的安全阈值。针对此类高精度三维数值模型计算耗时大、难以直接支撑现场在线调度的问题，可进一步构建深度学习代理模型，实现流场与水龄场的快速反演，以支撑安全边界内调控方案的在线评估与决策。这种基于“生态安全边界”的调度模式，能够有效保护湖泊原有的生物地球化学循环路径，提升生态系统对环境波动的调节韧性。

综合而言，应对复杂生境的广义换水周期优化应遵循“空—时—量”三位一体的精细化范式。在空间上，通过闸坝群的优化配置实现局部换水效率的精准提升[96]；在时间上，根据藻类生长周期与水温季节性波动，实施差异化的换水频率策略；在量级上，以维持系统低负荷通量与高自净速率的平衡为目标。未来的研究应进一步探索人工智能算法与物理机制模型的融合（如数字孪生流域技术），实现在线监测数据驱动下的动态实时调控[97-98]，从而在复杂环境情势下构建起既能高效置换水体、又能保障生态系统长期稳定性的智慧水动力调控体系。

4 结语与展望

换水周期是连接水文动力、生物地球化学循环与生态系统演变的核心纽带。本文将“换水周期”由传统的单一物理标量，拓展定义为表征湖库水体更新能力的“广义换水周期”多尺度评估体系。系统厘清了作为稳态宏观值的水力停留时间、表征工程调控与水文脉冲干预的传统换水周期、表征系统级溶质排泄与净化效率的冲刷时间，以及刻画三维局地传输历程的水龄与滞留时间，明确了各指标的物理内涵与适用边界，构建了从宏观总量平衡到微观局地异质性的协同表征框架。基于此，当前研究已不再局限于计算水体更新快慢，而是深入解析换水过程如何通过重塑生境条件（温度、光照、营养盐梯度）来驱动生态系统的演替。然而，面对日益复杂的水环境交互与全球气候变化的不确定性，现有的理论体系与方法在以下三个关键维度仍需实现突破：

1）极低流速死区下水龄空间异质性的高精度识别：传统基于欧拉网格的数值求解在解析湖湾死水区或极低流速区时容易产生严重的数值弥散，导致局地高水龄被过度平滑。大型深水湖泊受密度分层与热力结构主导，浅水湖泊受风生流场与复杂湖盆地形约束，水体交换呈现明显的空间非均匀性。未来的基础理论研究应重点突破欧拉—拉格朗日耦合求解范式，克服 LPT 在强紊动区的扩散率定与算力瓶颈。通过从平均浓度场向质点输移轨迹的视角转换，精准识别难以捕捉的局部高滞留水力死角与短路通道，构建能够量化空间强异质性与高频非稳态响应的高精度评价体系。

2）物理置换速率与生化反应速率匹配的生态安全阈值标定：水动力调控并非单纯的物理流场重塑，其换水效率的变动与湖泊水质改善目标之间存在复杂的非线性交互关系。盲目缩减广义换水周期极易引发外源负荷的高通量侵入，或通过增强底床剪切应力诱发内源污染物的物理释放与生境退化。未来的研究需打破单一的水动力学范畴，将流场输运与生化过程深度耦合；重点剖析物理置换速率与生物反应（如藻类增殖、污染物降解）时间尺度之间的匹配机制。通过识别不同水文情势下的水力冲刷安全边界，科学标定生态适宜广义换水周期的阈值，以确保水流交换通量的提升真正服务于湖泊自然自净能力的恢复。

3）融合数字孪生流域与高频监测数据的智慧精准调控策略：在“自然—人工”二元叠加驱动下，现代湖泊的水体更新过程正日益受到高强度工程调度与全球气候变化的深刻重塑。传统单纯追求全局广义换水周期最小化的调度模式已无法规避系统性的生态风险，工程管理决策必须向基于时空动态的精准调控演进。在空间尺度上，应通过导流工程与闸坝系统的优化布局实现局部流场的精准重构，优先置换高风险区的滞留水团；在时间尺度上，需实施契合热力分层演变与藻类生长节律的差异化调度策略。同时，仍待探索人工智能算法、数字孪生技术与物理机制模型的融合互馈，依托高频在线监测数据实现多约束条件下的动态实时优化，从而在物理置换效率与水生态系统长期承载力之间确立平衡。

声明：（a）作者贡献：钟优负责文献检索与筛选、论文撰写与修改、图表绘制；吴修锋负责论文框架提出、论文修改与审阅；戴江玉负责概念构思、论文审阅与定稿；吴时强负责论文指导、论文修改与审阅；孙儒耳负责文献整理；程旭负责文献检索；刘倩倩负责文本订正；陈晓彬负责文献整理。（2）本文在论文写作及修改过程未使用生成式 AI 或 AI 辅助技术。（3）论文关联数据读者获取渠道及方法：读者需向作者提出申请并获得授权后才能获取。

5 参考文献

[1] Inácio M, Barceló D, Zhao WW *et al*. Mapping lake ecosystem services: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 2022, **847**: 157561. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157561.

[2] Shin S, Her Y, Muñoz-Carpena R *et al*. Quantifying the contribution of external loadings and internal hydrodynamic processes to the water quality of Lake Okeechobee. *Science of the Total Environment*, 2023, **883**: 163713. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163713.

[3] Long YN, Cao JS, Xiong W *et al*. Spatiotemporal pattern of water age in Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Project. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2024, **55**: 101902. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101902.

[4] Zhao Q, Mao JQ, Cai HB *et al*. Local flushing time and its relationship to reservoir eutrophication in Xiangxi Bay, China. *Lake and Reservoir Management*, 2023, **39**(1): 72-87. DOI: 10.1080/10402381.2022.2137071.

[5] Zhang L, Lou Y, Mei JH *et al*. Effect of decreased suspended sediment content on chlorophyll-a in Dongting Lake, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2025, **13**: 1645248. DOI: 10.3389/fevo.2025.1645248.

[6] Hutchinson GE. A Treatise on Limnology. Vol. 1: Geography, Physics, and Chemistry. New York: John Wiley & Sons, 1957.

[7] Fourniotis NT, Leftheriotis GA. Water renewal simulation in two flow-through water bodies in western Greece. *Water*, 2023, **15**(15): 2745. DOI: 10.3390/w15152745.

[8] Ambrosetti W, Barbanti L, Sala N. Residence time and physical processes in lakes. *Journal of Limnology*, 2003, **62**(1s): 1. DOI: 10.4081/jlimnol.2003.s1.1.

[9] Monsen NE, Cloern JE, Lucas LV *et al*. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(5): 1545-1553. DOI: 10.4319/lo.2002.47.5.1545.

[10] Bolin B, Rodhe H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, 1973, **25**(1): 58-62. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01594.x.

[11] Cui YP, Zhang JH, Lai XJ. Variation patterns and influencing factors of inflow/outflow volumes and water retention time of Lake Taihu over the past four decades. *J Lake Sci*, 2026, **38**(5): 2142-2153. [崔彦萍, 张建华, 赖锡军. 太湖近40年来出入湖水量与换水周期变化及影响因素. 湖泊科学, 2026, **38**(5): 2142-2153.]

[12] Guan MY, Li Z, Chen GQ *et al*. Streamwise dispersion in a turbulent open channel flow across all time regimes. *Journal of Fluid Mechanics*, 2026, **1033**: A8. DOI: 10.1017/jfm.2026.11422.

[13] Shin J, Rhee D, Park I. Applications of two-dimensional spatial routing procedure for estimating dispersion coefficients in open channel flows. *Water*, 2021, **13**(10): 1394. DOI: 10.3390/w13101394.

[14] Imberger J. The diurnal mixed layer1. *Limnology and Oceanography*, 1985, **30**(4): 737-770. DOI: 10.4319/lo.1985.30.4.0737.

[15] Spigel RH, Imberger J. The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, **10**(7): 1104-1121. DOI: 10.1175/1520-0485(1980)0101104: tcomld>2.0.co;2.

[16] Woolway RI, Kraemer BM, Lenters JD *et al*. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**(8): 388-403. DOI: 10.1038/s43017-020-0067-5.

[17] Woolway RI, Merchant CJ. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(4): 271-276. DOI: 10.1038/s41561-019-0322-x.

[18] Magee MR, Wu CH. Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, **21**(12): 6253-6274. DOI: 10.5194/hess-21-6253-2017.

[19] Caramatti I, Peeters F, Hamilton D *et al*. Modelling inter-annual and spatial variability of ice cover in a temperate lake with complex morphology. *Hydrological Processes*, 2020, **34**(3): 691-704. DOI: 10.1002/hyp.13618.

[20] Kraemer BM, Pilla RM, Woolway RI *et al*. Climate change drives widespread shifts in lake thermal habitat. *Nature Climate Change*, 2021, **11**(6): 521-529. DOI: 10.1038/s41558-021-01060-3.

[21] Lau MP, Valerio G, Pilotti M *et al*. Intermittent meromixis controls the trophic state of warming deep lakes. *Scientific Reports*, 2020, **10**: 12928. DOI: 10.1038/s41598-020-69721-5.

[22] Hunter JR, Hearn CJ. Lateral and vertical variations in the wind-driven circulation in long, shallow lakes. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 1987, **92**(C12): 13106-13114. DOI: 10.1029/jc092ic12p13106.

[23] Callado MAV, Barros Queiroz AH, Rollnic M. Three-dimensional hydrodynamic and sediment-transport modeling of a shallow urban lake in the Brazilian Amazon. *Water*, 2025, **17**(16): 2444. DOI: 10.3390/w17162444.

[24] Xu RC, Pang Y, Hu ZB *et al*. Influence study about water exchange on the Taihu Lake based on the “water diversion project from the Yangtze River to the Taihu Lake (WDYT)”. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1): 375-382. [胥瑞晨, 逄勇, 胡祉冰等. “引江济太”工程对太湖水体交换的影响研究. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 375-382.]

[25] Peng FJ, Li KF, Liang RF *et al*. Shallow lake water exchange process before and after water diversion projects as affected by wind field. *Journal of Hydrology*, 2021, **592**: 125785. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125785.

[26] Deleersnijder E, Campin JM, Delhez EJM. The concept of age in marine modelling I. Theory and preliminary model results. *Journal of Marine Systems*, 2001, **28**(3/4): 229-267. DOI: 10.1016/S0924-7963(01)00026-4.

[27] Delhez ÉJM, Heemink AW, Deleersnijder É. Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem. *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2004, **61**(4): 691-702. DOI: 10.1016/j.ecss.2004.07.013.

[28] Messager ML, Lehner B, Grill G *et al*. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 2016, **7**: 13603. DOI: 10.1038/ncomms13603.

[29] Zhang SX, Xu XF, Xu X *et al*. Seasonal variations of water age in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 199-210. DOI: 10.18307/2018.0120. [张素香, 许新发, 徐兴等. 鄱阳湖水龄季节性变化特征. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 199-210.]

[30] Vollenweider RA. Input-output models: With special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 1975, **37**(1): 53-84. DOI: 10.1007/bf02505178.

[31] Vanderkelen I, van Lipzig NPM, Thiery W. Modelling the water balance of Lake *Victoria* (East Africa) – Part 1: Observational analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, **22**(10): 5509-5525. DOI: 10.5194/hess-22-5509-2018.

[32] Dillon PJ, Rigler FH. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology and Oceanography*, 1974, **19**(5): 767-773. DOI: 10.4319/lo.1974.19.5.0767.

[33] Auger GAR, Kelly MR, Moriarty VW *et al*. Understanding lake residence time across spatial and temporal scales: A modeling analysis of Lake George, New York USA. *Water Resources Research*, 2024, **60**(2): e2022WR034168. DOI: 10.1029/2022wr034168.

[34] Eriksson E. The possible use of tritium' for estimating groundwater storage. *Tellus A*: *Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1958, **10**(4): 472-478. DOI: 10.3402/tellusa.v10i4.9265.

[35] Dawidek J, Ferencz B. Water renewal time in lakes with transformed water distribution in the catchment areas. *Water*, 2024, **16**(3): 384. DOI: 10.3390/w16030384.

[36] Gilboa Y, Friedler E, Talhami F *et al*. A novel approach for accurate quantification of lake residence time - Lake Kinneret as a case study. *Water Research X*, 2022, **16**: 100149. DOI: 10.1016/j.wroa.2022.100149.

[37] Gibson JJ, Birks SJ, Yi Y. Stable isotope mass balance of lakes: A contemporary perspective. *Quaternary Science Reviews*, 2016, **131**: 316-328. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.04.013.

[38] Jasechko S. Global isotope Hydrogeology—Review. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(3): 835-965. DOI: 10.1029/2018rg000627.

[39] Sprenger M, Stumpp C, Weiler M *et al*. The demographics of water: A review of water ages in the critical zone. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(3): 800-834. DOI: 10.1029/2018rg000633.

[40] Hrachowitz M, Benettin P, van Breukelen BM *et al*. Transit times—the link between hydrology and water quality at the catchment scale. *WIREs Water*, 2016, **3**(5): 629-657. DOI: 10.1002/wat2.1155.

[41] Ma B, Jin MG, Liang X *et al*. Application of environmental tracers for investigation of groundwater mean residence time and aquifer recharge in fault-influenced hydraulic drop alluvium aquifers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, **23**(1): 427-446. DOI: 10.5194/hess-23-427-2019.

[42] Leray S, Engdahl NB, Massoudieh A *et al*. Residence time distributions for hydrologic systems: Mechanistic foundations and steady-state analytical solutions. *Journal of Hydrology*, 2016, **543**: 67-87. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.068.

[43] Meresescu AG, Kowalski M, Schmidt F *et al*. Water Residence Time estimation by 1D deconvolution in the form of a l 2-regularized inverse problem with smoothness, positivity and causality constraints. *Computers & Geosciences*, 2018, **115**: 105-121. DOI: 10.1016/j.cageo.2018.03.009.

[44] Rädle V, Kersting A, Schmidt M *et al*. Multi-tracer groundwater dating in southern *Oman* using Bayesian modeling. *Water Resources Research*, 2022, **58**(6): e2021WR031776. DOI: 10.1029/2021wr031776.

[45] Xu QE, Jiao YM, Zhang ZN *et al*. Definitions of groundwater age and dating methods: Progresses and prospects. *Advances in Earth Science*, 2023, **38**(6): 594-609. [徐秋娥, 角媛梅, 张兆年等. 地下水年龄的概念及其测定方法研究进展. 地球科学进展, 2023, **38**(6): 594-609.]

[46] Xu RC, Pang Y, Hu ZB *et al*. Relationship between water age and hydraulic residence time in Taihu Lake and parameter sensitivity. *Water Resources Protection*, 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.]

[47] Tian K, Zhao YW, Bai J *et al*. Spatio-temporal characteristics of water renewal cycle and tracer transport time in Lake Baiyangdian Wetland under multi-source water supply pattern. *J Lake Sci*, 2025, **37**(4): 1302-1313. DOI: 10.18307/2025.0424. [田凯, 赵彦伟, 白洁等. 多源补水格局下白洋淀换水周期与示踪剂传输时间的时空特征. 湖泊科学, 2025, **37**(4): 1302-1313.]

[48] Shao JR, Wu SQ, Zhou J *et al*. An age model for water transfer. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(5): 695-703. [邵军荣, 吴时强, 周杰等. 水体交换年龄模型研究. 水科学进展, 2014, **25**(5): 695-703.]

[49] Li JL, Wang LL, Xu XZ *et al*. A rapid prediction method for water quality evolution of sudden water pollution based on water age distribution characteristics-a case study of Lihu lake. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024: 1-12. https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20240830.1651.010. [李嘉霖, 王玲玲, 徐项哲等. 基于水龄分布特征的突发水污染水质演变快速预测方法——以蠡湖为例. 武汉大学学报(工学版), 2024: 1-12. https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20240830.1651.010.]

[50] Zhou X, Rowe M, Liu QQ *et al*. Comparison of Eulerian and Lagrangian transport models for harmful algal bloom forecasts in Lake Erie. *Environmental Modelling & Software*, 2023, **162**: 105641. DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105641.

[51] Defne Z, Ganju NK. Quantifying the residence time and flushing characteristics of a shallow, back-barrier estuary: Application of hydrodynamic and particle tracking models. *Estuaries and Coasts*, 2015, **38**(5): 1719-1734. DOI: 10.1007/s12237-014-9885-3.

[52] Xiao Y, Liu JM, Gualtieri C *et al*. The effect of natural and engineered hydraulic conditions on river-floodplain connectivity using hydrodynamic modeling and particle tracking analysis. *Journal of Hydrology*, 2022, **615**: 128578. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128578.

[53] Huang CL, Li X, Sun YY. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 22-31. DOI: 10.18307/2017.0103. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 22-31.]

[54] Li YL, Yao J, Li MF *et al*. Numerical simulations of residence time and tracer travel time in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 32-42. DOI: 10.18307/2017.0104. [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**(1): 32-42.]

[55] Masunaga E, Fringer OB, Kitamura T *et al*. The influence of horizontal dispersion on residence times in shallow lakes. *Water Resources Research*, 2025, **61**(2): e2024WR037509. DOI: 10.1029/2024wr037509.

[56] Xu H, Yan M, Long LH *et al*. Modeling the effects of hydrodynamics on thermal stratification and algal blooms in the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, **8**: 610622. DOI: 10.3389/fevo.2020.610622.

[57] Ziemińska-Stolarska A, Kempa M. Modeling and monitoring of hydrodynamics and surface water quality in the sulejów dam reservoir, Poland. *Water*, 2021, **13**(3): 296. DOI: 10.3390/w13030296.

[58] Li J, Duan ZZ, Gao W *et al*. EFDC modelling revealed COD dynamics in Lake Bosten and regulation mechanism. *J Lake Sci*, 2026, **38**(4): 1561-1574. DOI: 10.18307/2026.0426. [李江, 段仲昭, 高伟等. 基于EFDC模型的博斯腾湖COD动态模拟与调控策略. 湖泊科学, 2026, **38**(4): 1561-1574.]

[59] Li YP, Qiu L, Tang CY *et al*. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 410-416. [李一平, 邱利, 唐春燕等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 410-416.]

[60] Wang Z, Fan ZY, Yang ZY *et al*. Effects of Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River on the water age distribution of Lake Caizi, Anhui Province. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1576-1586. DOI: 10.18307/2018.0609. [王钟, 范中亚, 杨忠勇等. "引江济淮"工程对安徽菜子湖水龄分布的影响. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1576-1586.]

[61] Tang JZ, Zhou WB, An BJ *et al*. Research on characteristics of water change capability of Kunming Lake (test section) in Xi’an based on the MIKE 21 Model. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, **31**(1): 58-63. [唐继张, 周维博, 安宝军等. 基于MIKE21的西安昆明池(试验段)换水能力特征研究. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(1): 58-63.]

[62] Hlevca B, Howell ET, Valipour R *et al*. Modeling nearshore-offshore water exchange in Lake Ontario. *PLoS One*, 2025, **20**(1): e0298702. DOI: 10.1371/journal.pone.0298702.

[63] Yang HY, Wang JQ, Li JH *et al*. Modelling impacts of water diversion on water quality in an urban artificial lake. *Environmental Pollution*, 2021, **276**: 116694. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116694.

[64] Sahoo B, Mao MH, Xia M. Projected changes of water currents and circulation in Lake Michigan under representative concentration pathways scenarios. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 2021, **126**(5): e2020JC016651. DOI: 10.1029/2020jc016651.

[65] Bocaniov SA, Van Cappellen P, Scavia D. On the role of a large shallow lake (lake St. Clair, USA-Canada) in modulating phosphorus loads to Lake Erie. *Water Resources Research*, 2019, **55**(12): 10548-10564. DOI: 10.1029/2019wr025019.

[66] Liu SE, Ye QH, Wu SQ *et al*. Wind effects on the water age in a large shallow lake. *Water*, 2020, **12**(5): 1246. DOI: 10.3390/w12051246.

[67] Catalán N, Marcé R, Kothawala DN *et al*. Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(7): 501-504. DOI: 10.1038/ngeo2720.

[68] Dillon PJ. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes1. *Limnology and Oceanography*, 1975, **20**(1): 28-39. DOI: 10.4319/lo.1975.20.1.0028.

[69] Stachelek J, Soranno PA. Does freshwater connectivity influence phosphorus retention in lakes *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**(4): 1586-1599. DOI: 10.1002/lno.11137.

[70] Cable RN, Beletsky D, Beletsky R *et al*. Distribution and modeled transport of plastic pollution in the great lakes, the world’s largest freshwater resource. *Frontiers in Environmental Science*, 2017, **5**: 45. DOI: 10.3389/fenvs.2017.00045.

[71] Gross E, Holleman R, Kimmerer W *et al*. Using age tracers to estimate ecological rates in a phytoplankton model. *Water*, 2023, **15**(11): 2097. DOI: 10.3390/w15112097.

[72] Ding K, Qin BQ. Global drivers of algal bloom occurrence: The role of climate, hydrology, and morphometry. *Water*, 2024, **16**(24): 3624. DOI: 10.3390/w16243624.

[73] Visser PM, Verspagen JMH, Sandrini G *et al*. How rising CO_2 and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms. *Harmful Algae*, 2016, **54**: 145-159. DOI: 10.1016/j.hal.2015.12.006.

[74] Lee DY, Baek KO. Scenario-based modeling on chlorophyll-*a* in uiam reservoir of Korea according to variation of dam discharge. *Water*, 2024, **16**(15): 2120. DOI: 10.3390/w16152120.

[75] Burford MA, Carey CC, Hamilton DP *et al*. Perspective: Advancing the research agenda for improving understanding of cyanobacteria in a future of global change. *Harmful Algae*, 2020, **91**: 101601. DOI: 10.1016/j.hal.2019.04.004.

[76] Wang P, Zhang Q, Xu YS *et al*. Effects of water level fluctuation on the growth of submerged macrophyte communities. *Flora*, 2016, **223**: 83-89. DOI: 10.1016/j.flora.2016.05.005.

[77] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al*. Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 9-21. DOI: 10.18307/2017.0102. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 9-21.]

[78] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]

[79] Huang AP, Liu XB, Peng WQ *et al*. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of water age in Poyang Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(9): 1082-1090. [黄爱平, 刘晓波, 彭文启等. 鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析. 水利学报, 2021, **52**(9): 1082-1090.]

[80] Lin P, Chen QH, Li QF *et al*. Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(3): 66-73. [林鹏, 陈启慧, 李琼芳等. 环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析. 水资源保护, 2021, **37**(3): 66-73.]

[81] Hu XY, Zhu YR, Sun FH *et al*. Mechanism research of the effects of water quality (nitrogen and phosphorus concentrations) and water volume on eutrophication of Lake Taihu. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(6): 1407-1418. [胡晓燕, 朱元荣, 孙福红等. 河流氮磷和水量输入对太湖富营养化的影响机理研究. 环境科学研究, 2022, **35**(6): 1407-1418.]

[82] Tang CY, He C, Li YP *et al*. Diverse responses of hydrodynamics, nutrients and algal biomass to water diversion in a eutrophic shallow lake. *Journal of Hydrology*, 2021, **593**: 125933. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125933.

[83] Huisman J, Codd GA, Paerl HW *et al*. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(8): 471-483. DOI: 10.1038/s41579-018-0040-1.

[84] Bocaniov SA, Scavia D. Nutrient loss rates in relation to transport time scales in a large shallow lake (lake St. Clair, USA—Canada): Insights from a three-dimensional model. *Water Resources Research*, 2018, **54**(6): 3825-3840. DOI: 10.1029/2017wr021876.

[85] Cheng HM, Wang AA, Zhang J *et al*. Research on influence of water diversion projects on migration and transformation of contaminants in water-carrying lakes. *Yangtze River*, 2023, **54**(3): 49-55, 71. [程浩淼, 王安安, 张健等. 调水工程对过水性湖泊中污染物迁移转化的影响. 人民长江, 2023, **54**(3): 49-55, 71.]

[86] Snortheim CA, Hanson PC, McMahon KD *et al*. Meteorological drivers of hypolimnetic *Anoxia* in a eutrophic, north temperate lake. *Ecological Modelling*, 2017, **343**: 39-53. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.014.

[87] Olsson F, MacKay EB, Barker P *et al*. Can reductions in water residence time be used to disrupt seasonal stratification and control internal loading in a eutrophic monomictic lake *Journal of Environmental Management*, 2022, **304**: 114169. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114169.

[88] Zhao F, Zhan X, Xu H *et al*. New insights into eutrophication management: Importance of temperature and water residence time. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **111**: 229-239. DOI: 10.1016/j.jes.2021.02.033.

[89] Olsson F, MacKay EB, Moore T *et al*. Annual water residence time effects on thermal structure: A potential lake restoration measure *Journal of Environmental Management*, 2022, **314**: 115082. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115082.

[90] Carleton JN, Lee SS. Modeling lake recovery lag times following influent phosphorus loading reduction. *Environmental Modelling & Software*, 2023, **162**: 105642. DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105642.

[91] Janssen ABG, Hilt S, Kosten S *et al*. Shifting states, shifting services: Linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2021, **66**(1): 1-12. DOI: 10.1111/fwb.13582.

[92] Kong XZ, Determann M, Andersen TK *et al*. Synergistic effects of warming and internal nutrient loading interfere with the long-term stability of lake restoration and induce sudden re-eutrophication. *Environmental Science & Technology*, 2023, **57**(9): 4003-4013. DOI: 10.1021/acs.est.2c07181.

[93] Gao XP, Zhang SY, Sun BW *et al*. Assessing the effects of restoration measures on water quality in a large shallow reservoir. *Sustainability*, 2019, **11**(19): 5347. DOI: 10.3390/su11195347.

[94] Dai JY, Feng ZH, Wu XF *et al*. Optimization for cost-effectively monitoring ecological effects of water diversion on the urban drinking water sources in a large eutrophic lake. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, **9**: 762618. DOI: 10.3389/fenvs.2021.762618.

[95] Hipsey MR, Bruce LC, Boon C *et al*. A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geoscientific Model Development*, 2019, **12**(1): 473-523. DOI: 10.5194/gmd-12-473-2019.

[96] Prentice MJ, Allan MG, Bruere A *et al*. Efficacy of an inflow diversion wall for managing eutrophication in two hydrologically connected lakes: A modelling study. *Ecological Engineering*, 2026, **223**: 107862. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107862.

[97] Liu JH, Jiang YZ, Mei C *et al*. Progress of digital twin basin research and construction. *China Water Resources*, 2022(20): 23-24, 44. [刘家宏, 蒋云钟, 梅超等. 数字孪生流域研究及建设进展. 中国水利, 2022(20): 23-24, 44.]

[98] Jiang QS, Li JC, Sun YX *et al*. Deep-reinforcement-learning-based water diversion strategy. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, **17**: 100298. DOI: 10.1016/j.ese.2023.100298.