

2011–2020 年太湖藻源性碳汇时空特征分析与估算模型构建*

朱鹏¹, 李子轩¹, 秦伯强², 施文卿^{1**}

(1: 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 生态系统碳汇被认为应对气候变化的关键途径之一。富营养化湖泊由于初级生产力较高而碳汇能力较强。本研究以富营养化太湖为研究对象, 利用垂向归纳模型 (VGPM) 分析了 2011 年至 2020 年太湖藻源性碳汇时空特征, 利用广义相加模型 (GAM) 识别了关键因子, 最后构建了耦合单一参数的自回归滑动平均时序模型 (ARIMA) 藻源性碳汇估算方法。研究表明, 2011 年至 2020 年期间, 太湖藻源性碳汇量累积达到 3.8×10^6 吨, 但表现出明显的时空异质性。2019 年最高 (7.2×10^5 吨), 2011 年最低 (1.7×10^5 吨); 竺山湖的平均碳汇量最高 (291 g/m^2), 胥湖最低 (66 g/m^2)。叶绿素 a 浓度是影响太湖藻源性碳汇的关键因子, 贡献度最高 (86.0%), 而光合有效辐射强度、悬浮物浓度和水温贡献分别为 13.2%、4.6% 和 39.3%。在仅引入叶绿素 a 浓度作为单一参数的条件下, 利用 ARIMA 模型可以有效估算太湖藻源性碳汇 ($r^2 = 0.76$)。研究结论为富营养湖泊碳汇评估提供了重要的理论参考与方法支撑。

关键词: 富营养; 湖泊; 藻类; 碳汇; 短期预测

Spatial-temporal Patterns of Algae-derived Carbon Sink in Lake Taihu from 2011 to 2020 and Estimation Model Development*

ZHU Peng¹, LI Zixuan¹, QIN Boqiang², & SHI Wenqing^{1**}

(1: School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Natural ecological carbon sinks are a critical pathway for mitigating climate change. Eutrophic lakes, characterized by high primary productivity, possess significant carbon sequestration potential. This study quantified the algae-derived carbon sink in eutrophic Lake Taihu from 2011 to 2020 using the Vertically Generalized Production Model (VGPM). The key influencing factors were identified with a Generalized Additive Model (GAM), and an Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model was developed for estimation. The results show that the cumulative algae-derived carbon sink reached $3.8 \times 10^6 \text{ t}$ over the decade, with substantial spatiotemporal heterogeneity. The annual sink peaked in 2019 ($7.2 \times 10^5 \text{ t}$) and was lowest in 2011 ($1.7 \times 10^5 \text{ t}$). Spatially, Zhushan Bay had the highest carbon sink (291 g/m^2), while Xuhu Bay had the lowest (66 g/m^2). Chlorophyll a concentration was identified as the primary driver, explaining 86.0% of the variation. The contributions of photosynthetically active radiation, water temperature, and suspended matter concentration were 13.2%, 39.3%, and 4.6%, respectively. The ARIMA model, utilizing chlorophyll a concentration as a single parameter, effectively estimated the algal-derived carbon sink. These findings provide important theoretical and methodological support for assessing carbon

* 2024-10-09 收稿; 2025-06-21 收修改稿。

江苏省科技厅项目 (BK20220041) 和国家自然科学基金项目 (42422605, 42277060) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: wqshi@nuist.edu.cn。

sinks in eutrophic lakes.

Keywords: Eutrophication, Lake, Algae, Carbon sink, Short-term prediction

当前, 气候变化日益加剧, 极端天气事件频发, 严重威胁社会发展与人类生存, 其主要原因在于过度碳排放导致大气温室气体浓度上升^[1]。为应对这一挑战, 我国积极参与全球气候治理, 实施“碳达峰、碳中和”战略。生态系统碳汇被认为是应对气候变化的关键途径之一^[2-3], 其主要通过吸收、固定和埋藏大气中的二氧化碳 (CO₂) 来降低温室气体浓度。

湖泊作为水生态系统碳循环的热区, 尽管其面积仅占陆地的 1.8%^[4], 但其在调节大气温室气体水平方面发挥着关键作用^[5]。湖泊沉积物是重要的碳汇, 每年埋藏大量有机碳^[6]。据统计, 全球湖泊沉积物每年埋藏约 0.15 Pg 的碳^[7]。除陆源输入的有机碳外, 藻类等水生植物通过光合作用固定的内源有机碳也是沉积物碳汇的主要来源。藻类生命周期较短, 通常仅持续数天至数周, 因此在其生命过程中能够持续将大气中的 CO₂ 固定并沉积到沉积物中^[8]。据统计, 我国湖库藻类年固碳量可达 18.69 Tg^[9]。藻类固碳受到多种因素的影响, 如营养水平、光照强度和温度等^[10-12]。富营养化已成为全球水环境的主要现状。据统计, 全球约 63% 的湖泊存在不同程度的富营养化, 而我国湖泊的富营养化比例高达 69.5%^[13]。富营养化湖泊中, 藻类的大量生长可能增强了湖泊的碳汇能力。因此, 开展藻类碳汇研究对于评估湖泊生态系统的碳汇功能具有重要意义。藻类固碳能力的测定方法主要包括原位测定 (如黑白瓶法) 和模型估算 (如垂向归纳模型 (VGPM) 模型)。黑白瓶法操作繁琐, 难以满足多点位和长时间序列分析的需求, 而 VGPM 模型对参数要求较高, 需要输入叶绿素浓度 (*Chl-a*)、水温 (WT)、总悬浮物浓度 (*C_{ss}*) 及表面光合有效辐射 (PAR) 等多个参数, 这也限制了其广泛应用^[14-15]。因此, 亟需开发一种高效、简便的湖泊藻源性碳汇估算方法。

太湖是我国第三大淡水湖, 位于经济发达的长三角地区, 面积为 2400 平方公里, 平均水深 1.9 米, 水力停留时间为 284 天。近年来, 过量的氮磷输入导致太湖富营养化问题日益严重。尽管已实施大规模水环境治理措施, 但太湖每年仍频繁爆发大面积的蓝藻水华^[16]。蓝藻的光合固碳过程被认为是太湖沉积物碳汇的重要来源之一^[17]。目前, 太湖藻源性碳汇的时空分布特征尚不明确, 且缺乏高效、快速估算的方法。因此, 深入研究太湖藻源性碳汇的时空特征及其估算方法, 对全面评估太湖生态系统的碳汇功能具有重要意义。

本研究通过 VGPM 模型估算了太湖藻类碳汇的时空特征, 采用广义相加模型 (GAM) 识别了影响太湖藻源性碳汇的关键因子, 进一步构建了仅需单一参数的自回归滑动平均时序模型 (ARIMA) 估算藻源性碳汇的方法。研究结果为富营养化湖泊碳汇评估提供了重要的理论参考与方法支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

本研究所使用的水体 *Chl-a* 浓度、WT、*C_{ss}* 浓度、PAR、总氮 (TN)、总磷 (TP) 数据均来自江苏太湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站 (<http://thl.cern.ac.cn/meta/metaData>)。WT 通过多传感器 (YSI 6600) 现场测量, PAR 则由球形量子传感器 (LI-COR 192SA) 持续监测。*C_{ss}* 浓度采用过滤称重法进行测定, TN 和 TP 浓度分别通过碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法和过硫酸钾消解-钼锑-抗坏血酸比色法测定^[18]。*Chl-a* 浓度通过 90% 热乙醇提取后, 采用分光光度法进行定量分析^[19]。所有分析仪器在使用前均经过标定, 并使用空白样品、标准物质和参考样品确保测量的准确性。每个样品均进行三次分析, 确保相对标准偏差 (RSD) 低于 5%。考虑到太湖的空间异质性, 通常将其划分为竺山湾、梅梁湾、贡湖、湖心区、东太湖、西部沿岸区、南部沿岸区和胥湖 8 个湖区^[20]。在估算藻源碳汇时, 采用各湖区的面积加权平均值作为整体湖区的代表值。水体 *Chl-a* 浓度、WT 和 *C_{ss}* 浓度也均使用面积加权平均值计算。当使用 ARIMA 模型进行估算时, TP、TN 和 WT 数据同样采用面积加权平均值。

1.2 藻源性碳汇估算

藻源性碳汇是由藻类固碳量及其碳埋藏率决定。太湖藻类固碳量采用简化的 VGPM 模型估算^[21], 而

藻类有机碳埋藏率利用端元平衡混合模型估算^[22]。

1.2.1 藻类固碳量估算 基于简化的 VGPM 模型，藻类固碳量估算如下：

$$PP_{eu} = 0.66125 P_{opt}^B \times \frac{E_0}{E_0+4.1} \times Z_{eu} \times C_{opt} \times D_{irr} \quad (1)$$

式中， PP_{eu} 为水柱真光层初级生产力 (mg C m^{-2})； P_{opt}^B 为水柱最大固碳效率 ($\text{mg C mg}^{-1} \text{ Chl h}^{-1}$)； E_0 为表面光合有效辐射 PAR (mol m^{-2})； Z_{eu} 为真光层深度 (m)； C_{opt} 为 P_{opt}^B 所在处的 *Chl-a* 浓度，用表层 *Chl-a* 浓度代替 (mg m^{-3})； D_{irr} 为光照周期，根据太湖所在位置的赤纬角和纬度计算得出。

P_{opt}^B 是表层水温的函数，根据下列公式^[23]计算：

$$P_{opt}^B \begin{cases} 1.13 & T < -1.0 \\ 4.00 & T > 28.5 \\ P_{opt}^{B'} & -1.0 < T < 28.5 \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{opt}^{B'} = 1.2956 + 2.749 \times 10^{-1} T + 6.17 \times 10^{-2} T^2 - 2.05 \times 10^{-2} T^3 + 2.462 \times 10^{-3} T^4 - 1.348 \times 10^{-4} T^5 + 3.4132 \times 10^{-6} T^6 - 3.27 \times 10^{-8} T^7 \quad (3)$$

式中， T 为表层月平均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

Z_{eu} 基于公式 (4, 5) 中光衰减系数来估算^[24]：

$$Z_{eu} = 4.605/K_d \quad (4)$$

$$K_d = 0.8813 + 0.0931C_{ss} \quad (5)$$

式中， K_d 为光衰减系数 (m^{-1})，在太湖中与 C_{ss} 浓度显著正相关^[25] ($r^2=0.82$, $n=67$, $p<0.0001$)；若计算所得 $Z_{eu} <$ 太湖平均水深 (1.9 m)，则 $Z_{eu} =$ 计算值；反之，则 $Z_{eu} =$ 太湖平均水深 (1.9 m)。

1.2.2 藻源性有机碳埋藏率分析 沉积物有机碳埋藏率是有机碳埋藏速率与总沉积速率的比值^[26-27]。有机碳埋藏率指的是沉积超过 25 年沉积物中有机碳年平均积累速率 (单位： $\text{Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)，而总沉积速率则指沉积物表面有机碳年沉积量 (单位： $\text{Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)。本研究假定太湖的沉积过程保持稳定，基于沉积物年沉积速率 (0.32 cm)^[28]，通过计算 15-40 cm 深度 (> 50 年) 沉积物以及表层沉积物中的藻源性有机碳沉积速率，定量估算了藻源性有机碳的埋藏率。

藻源性有机碳沉积速率由沉积物沉积速率与藻源性有机碳含量等参数确定，而藻源性有机碳的含量是根据总有机碳含量与藻源性有机碳占比计算而来。为了确定藻源性有机碳的来源比例，我们采用了基于 IsoSource 的优化型三元端元平衡混合模型^[22]。该模型将浮游植物、外源物质 (如土壤有机物) 以及水生植物作为主要碳来源，并利用 IsoSource 软件来估算每个端元对总有机碳的贡献比例：

$$\delta_m = f_a \cdot \delta_a + f_b \cdot \delta_b + f_c \cdot \delta_c \quad (6)$$

$$1 = f_a + f_b + f_c \quad (7)$$

式中， δ_m 代表样品中的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素或者 N/C 的值； δ_a 、 δ_b 、 δ_c 分别以 *a*、*b*、*c* 3 种端元 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素分布范围的中间值或 N/C 的值作为端元值； f_a 、 f_b 、 f_c 分别代表 *a*、*b*、*c* 3 种端元物质相应的贡献百分比。

研究表明，太湖沉水植物、浮叶植物以及漂浮植物占其水生植物总生物量的 90%^[29]，而太湖沉水植物 $\delta^{13}\text{C}$ 为-15.19‰，浮叶植物和漂浮植物 $\delta^{13}\text{C}$ 为-25.32‰^[30]。沉水植物、浮叶植物以及漂浮植物 N/C 值分别为 0.061、0.056 与 0.063^[31]。太湖表层沉积物层总有机碳含量 (0.77‰)、 $\delta^{13}\text{C}$ (-26.55‰) 和 N/C 值 (0.189) 和埋藏沉积物层总有机碳含量 (0.52‰)、 $\delta^{13}\text{C}$ (-23.63‰) 和 N/C 值 (0.175) 数据均引自倪兆奎等 (2011)^[28] 的研究。太湖流域土壤、大气沉降和有机污水外源有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ (-22‰、-24.5‰、-22.55‰) 和 N/C (0.077、0.029、0.102) 的均值以及太湖藻类 $\delta^{13}\text{C}$ (-30‰) 和 N/C (0.154) 值均源自季等 (2022)^[32-36]。IsoSource 可通过指定的增量 (本研究为 1%)，使用标准线性混合模型在 0-100% 内以该增量为间隔来计算所有可能的源贡献组合，其中满足质量平衡容差范围内 ($\pm 0.1\%$) 的组合被认为是可行解。IsoSource 提供了每个端元贡献的平均值、标准差、最小值、最大值等，本研究采用端元贡献的平均值来代替每类端元的贡献比例 (表 1)。结合以上数据经计算，太湖藻源性有机碳的埋藏率为 38.8%。

表 1 太湖沉积物有机碳端元贡献

Tab.1 Contributions of organic carbon end-member in sediments in Taihu Lake

| 沉积物深度/ (cm) | 浮游植物/ (%) | 外源/ (%) | 水生植物/ (%) |
|-------------|-----------|---------|-----------|
| 0.5 | 65.6 | 25.1 | 9.3 |
| 15-40 | 37.7 | 45.4 | 16.9 |

1.3 基于 GAM 模型的藻源性碳汇关键因子识别

GAM 是由数据驱动的非参数回归模型，能够较好的描述解释变量与响应变量之间的复杂非线性关系^[37-38]，主要通过自由度、 P 、 F 统计值、调整判定系数 (R^2)、方差解释率等参数表征：

$$g(\mu) = \alpha + s_1(X_1) + s_2(X_2) + \dots + s_n(X_n), \quad \mu = E(Y/X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (8)$$

式中， $g(\cdot)$ 为连接函数， α 为截距， $s_i(\cdot)$ 为平滑函数， X_i 为解释变量， μ 为响应变量的期望值， Y 为响应变量。

本研究利用 GAM 模型将藻源性碳汇核算所用参数 $Chl-a$ 浓度、PAR 强度、 C_{ss} 浓度以及 WT 作为解释变量，碳汇量为响应变量，分析各解释变量对响应变量的影响显著性及模型的拟合优度：

$$[Carbon\ sink] = \alpha_1 + s(Chl - a) \quad (9)$$

$$[Carbon\ sink] = \alpha_2 + s(Par) \quad (10)$$

$$[Carbon\ sink] = \alpha_3 + s(Css) \quad (11)$$

$$[Carbon\ sink] = \alpha_4 + s(WT) \quad (12)$$

式中， α_i 为不同变量在 GAM 模型中对应的截距。

本研究选取三次样条函数作为平滑函数，选择 identity 函数作为连接函数。

1.4 基于 ARIMA 模型的太湖藻源性碳汇估算模型构建

1.4.1 数据平稳化与白噪声检验 若时间序列数据中包含趋势变化、季节性变动和随机变动等特征，则需对序列进行适当的差分处理以实现数据的平稳化。数据平稳化处理后，进行白噪声检验 ($Ljung-Box$ 检验)。若结果为非白噪声数据，即观测值之间存在自相关性，则符合建模条件；反之，无提取价值。本研究所使用的碳汇序列为平稳序列且通过 $Ljung-Box$ 检验 ($p < 0.001$)。

1.4.2 模型定阶 在一个 p 阶自回归模型中，序列中的每一个值均可采用之前 p 个值的线性组合来表示：

$$AR(p) : Y_t = \mu + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (13)$$

式中， Y_t 是时序中的任一观测值， μ 是序列的均值， β 是权重， ε_t 是随机扰动。在一个 q 阶移动平均模型中，时序中的每一个值都可以用之前 q 个残差的线性组合来表示：

$$MA(q) : Y_t = \mu - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} \dots - \theta_p \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (14)$$

式中， ε 是预测的残差， θ 是权重。

以上两种方法的混合即 $ARMA(p, q)$ 模型，表达式如下：

$$Y_t = \mu + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} \dots - \theta_p \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (15)$$

序列中的每个观测值由过去的 p 个观测值和 q 个残差的线性组合表示。 $ARIMA(p, d, q)$ 模型表示序列经过 d 次差分，每个观测值都是过去 p 个观测值和 q 个残差的线性组合^[39]。

季节性 $ARIMA$ 模型表示为 $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ 。其中， P 和 Q 、 p 和 q 分别表示季节与非季节自回归移动平均算子的最大滞后阶数， D 、 d 分别表示季节和非季节性差分次数， s 代表季节周期。

差分后的序列的自相关函数图和偏自相关函数图通常用来确定 p 和 q 。季节性参数 P 和 Q 则通过从低阶到高阶的逐步试探方法来确定。本模型将对太湖藻源性碳汇影响最大的 $Chl-a$ 浓度 (表 1) 作为自变量纳入序列拟合。模型的定阶均采用 R 语言中的 $auto.arima$ 代码来实现。

本研究中自动化拟合的模型为 $ARIMA(0, 1, 1) \times (1, 0, 0)_{12}$ 。估算前，对拟合碳汇与实际碳汇值进行验证比较，以评估模型的性能，评价标准采用下式中决定系数 r^2 计算：

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (16)$$

式中, r^2 是决定系数; y_i 是观测值; \hat{y}_i 是模型拟合的观测值; \bar{y} 是观测值的平均值。

2 结果与讨论

2.1 太湖藻源性碳汇时空特征

经十多年的治理,太湖水体的 TP 浓度虽然在 0.11 - 0.18 mg/L 范围内波动变化,但 TN 浓度明显下降,从 2011 年的 2.70 mg/L 降至 2020 年的 2.21 mg/L (图 1 a)。然而,太湖水体 *Chl-a* 浓度及其藻源性碳汇在 2011 - 2020 年期间呈现波动上升趋势(图 1 b 和图 2)。年均 *Chl-a* 浓度及碳汇量分别从 2011 年的 17.5 mg/m³ 和 1.7 × 10⁵ 吨增长至 2020 年的 41.85 mg/m³ 和 5.6 × 10⁵ 吨,并在 2019 年达到最大值 53.5 mg/m³ 和 7.2 × 10⁵ 吨,累积碳汇量达到 3.8 × 10⁶ 吨。这一趋势可能与气候变化对蓝藻水华的促进作用有关。在气候变化的背景下,温度和 CO₂ 浓度的升高、极端降雨频率的增加、风速的下降等因素均促进了蓝藻水华的发生。湖泊中蓝藻最适生长温度为 25°C~35°C,气温升高促进了蓝藻的增殖,增强了其在水体中的竞争优势,并缩短了水华形成所需的积温时间^[40-42]。大气 CO₂ 浓度的增加显著改变了水体的 pH 值和碳化学环境,削弱了浮游植物对碳浓缩的需求,从而减少了 CO₂ 对蓝藻水华形成的限制^[43]。极端降雨频率的增加导致面源氮磷通量上升,进而提高了水体中的氮磷浓度,为蓝藻生长提供了更丰富的营养物质^[44-46]。此外,风速下降减少了水体表层的扰动,有助于蓝藻的聚集,从而促进水华的形成^[47-48]。研究表明,风速越低,蓝藻水华越容易发生,当风速低于 3 m/s 时,蓝藻更容易聚集形成水华。尽管太湖水面 PAR 有所下降,但由于大气中 CO₂ 浓度升高、WT 上升(图 1 b)以及风速的明显下降^[49],这些因素共同作用导致了太湖叶绿素浓度及其藻源性碳汇强度的增加。在 2011-2020 年期间,水面 PAR 在范围 8321 - 9831 mol/m² 内波动下降,WT 在 18.18 - 19.98 °C 范围内平稳上升(图 1),年均升高约 0.05 °C。风速的下降导致了 C_{ss} 浓度在 45.2 - 66.7 mg/L 范围内波动下降(图 1)。2019 年的日均水温(19.6°C)为 2011-2020 年期间的第二高值,这一环境条件可能促使了藻类的过度繁殖。此外,2019 年太湖流域经历了多次台风降雨和短时强降雨,导致入湖氮磷负荷增加,为藻类的生长提供了充足的营养物质^[50]。

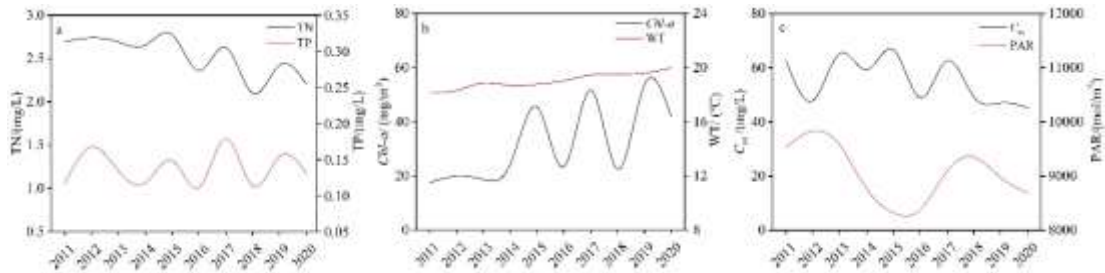


图 1 2011-2020 年太湖水体基本性质随时间的变化规律: a) TN 和 TP; b) *Chl-a* 和 WT; c) C_{ss} 和 PAR 强度

Fig 1 Changes in water properties of Lake Taihu over time, 2011 - 2020: a) TN and TP; b) *Chl-a* and WT; c) C_{ss} and PAR

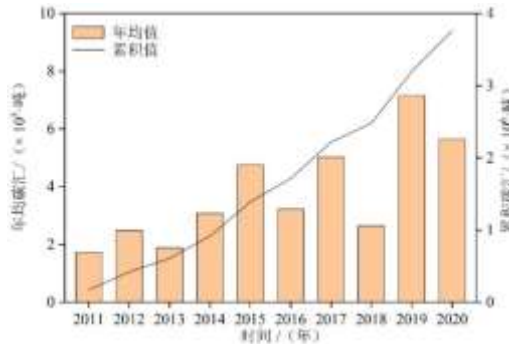


图 2 2011-2020 年太湖藻源性碳汇年均量及累积量

Fig 2 The annual and cumulative algae-derived carbon sink in Lake Taihu from 2011 to 2020

根据水环境特征，太湖被划分为竺山湾、梅梁湾、贡湖、湖心区、东太湖、西部沿岸区、南部沿岸区和胥湖 8 个湖区^[51]，这些湖区藻源性碳汇也表现出明显的空间异质性（图 3）。总体而言，藻源性碳汇分布呈现西北高，东南低的空间特征。西北湖区中竺山湾和梅梁湾的碳汇强度最高，年平均值分别为 291 g/m² 和 251 g/m²，而东南湖区的胥湖碳汇强度最低，平均值仅为 66 g/m²。贡湖、东太湖、西部沿岸区、南部沿岸区和湖心区年平均碳汇强度分别为 147 g/m²、81 g/m²、170 g/m²、75 g/m²、136 g/m²。这种空间差异主要与不同湖区的水环境条件有关。西北湖区及沿岸区入湖氮磷负荷较高，为藻类生长提供了充足的营养^[52]。中东部以草型或草藻过渡型湖区为主，这些大型水生植物不仅在营养、光照和空间上与藻类直接竞争，还能通过释放化感物质抑制藻类的生长^[53]。此外，在藻类爆发季节，太湖盛行的东南季风使湖面表层流场呈现由东南向西北的流动特征，导致藻类迁移至太湖西北湖区^[54]。因此，西北湖区表现出较高的藻类碳汇强度。



图 3 2011-2020 年太湖藻源性碳汇空间特征

Fig. 3 Spatial pattern of algae-derived carbon sink in Lake Taihu from 2011 to 2020

2.2 太湖藻源性碳汇关键影响因子

藻源性碳汇主要通过藻类的光合作用实现。因此，*Chl-a* 浓度、PAR 强度和 WT 等环境因子是影响藻源性碳汇强度的关键因素。*Chl-a* 作为藻类光合作用的核心指标，直接反映了藻类的生物量和光合作用能力。光照强度影响藻类的光合作用效率。通常情况下，藻类的光合作用速率与光照强度呈正相关关系，其碳固定效率随之呈现同步提升趋势。WT 则通过影响细胞分裂速率和代谢关键酶活性，对藻类生长周期起决定性作用。当处于适宜的温度区间时，藻类的光合效率显著增强，从而碳汇效能大幅提升^[55-56]。GAM 分析结果显示，除 C_{ss} 浓度外，其它环境因子对太湖藻源性碳汇均有显著影响 ($p < 0.01$) (表 2)。其中，*Chl-a* 浓度对太湖藻源性碳汇影响最大，贡献度达到 86% ($R^2 = 0.858$)，远高于 PAR 强度和 WT。这是因为 *Chl-a* 浓度直接反映了藻类生物量，浓度较高时，藻类光合作用活跃，能够固定更多碳。WT 对碳汇的影响显著高于光合有效辐射强度，贡献度分别为 39.3% 和 13.2%， R^2 分别为 0.348 和 0.116。WT 通过影响藻类的生长和光合作用效率，间接促进碳的固定。相比之下，PAR 强度的影响较小，主要受到水体光照条件和藻类光合作用能力的限制。

2.3 太湖藻源性碳汇估算模型

目前，藻类碳汇测定方法主要分为原位测定和模型估算两类。原位测定方法（如黑白瓶法）虽然准确性较高，但操作繁琐，难以满足多点位和长时间序列动态监测的需求。因此，黑白瓶法在大范围和长期观测中的应用受到较大限制^[14]。此外，该方法对实验条件和操作规范要求较高，且难以有效捕捉瞬时变化的固碳情况。相比之下，模型估算法（如 VGPM）能够快速完成碳汇估算，尤其适用于大尺度和长时间序列数据的分析。然而，VGPM 模型对输入数据的要求较高，需依赖多个环境参数，如 *Chl-a*、WT、 C_{ss} 及 PAR 强度等^[15]，这使得模型的应用受到数据可得性和质量的限制。因此，当前缺乏一种既简便

又高效的定量方法，能够在保证准确性的同时，具备较广泛的适用性，特别是在多区域和长时间序列的碳汇研究中。本研究基于 VGPM 模型计算的碳汇量，进一步引入了 GAM 模型识别的 Chl-a 浓度作为外生变量，构建了基于 ARIMA 模型的藻源性碳汇估算方法。该方法结合时间序列分析和环境因子，能够有效捕捉数据的时序特征，提升了碳汇量波动性和变化趋势的预测精度。利用 2019 年至 2020 年的数据对模型进行了验证，结果如图 5 所示，ARIMA 模型在藻源性碳汇的估算中表现较好，能够准确地预测碳汇的年度波动和总量变化 ($r^2 = 0.76$) (图 4)。目前，Chl-a 浓度可以通过卫星遥感技术进行反演，结合本研究提出的估算模型，克服了传统地面观测的时空限制，有望实现高频率、广覆盖的藻源性碳汇估算，为太湖生态系统碳汇研究提供有力的技术支持。

表 2 基于 GAM 模型的碳汇影响因素贡献分析

Table 2 Analysis of the contribution of influencing factors to algae-derived carbon sink using GAM model.

| 平滑效应项 | 估计 自由度 | 参考 自由度 | <i>F</i> | <i>P</i> | 方差解释率 / (%) | 调整判定系数 (<i>R</i> ²) |
|--------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|----------------|-------------------------------------|
| <i>Chl-a</i> 浓度 | 1.97 | 2.304 | 310 | < 2e-16** | 86.0 | 0.858 |
| PAR 强度 | 2.09 | 2.625 | 5.907 | 0.00142** | 13.2 | 0.116 |
| 平滑效应项 | 估计 自由度 | 参考 自由度 | <i>F</i> | <i>P</i> | 方差解释率 / (%) | 调整判定系数 (<i>R</i> ²) |
| <i>C_{ss}</i> 浓度 | 1 | 1 | 5.606 | 0.0195* | 4.6 | 0.038 |
| 水温 | 8.156 | 8.806 | 7.563 | < 2e-16** | 39.3 | 0.348 |

1) *表示在 0.05 水平下变量显著；**表示在 0.01 水平下变量显著。

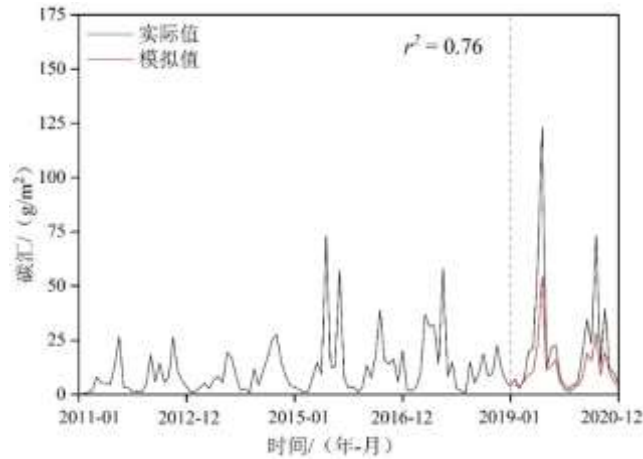


图 4 基于 ARIMA 模型的藻类碳汇评估

Fig.4 Evaluation of algae-derived carbon sink estimation based on the ARIMA Model

2.4 生态学意义

藻类作为湖泊生态系统的重要初级生产者，能够通过光合作用固定 CO₂，在湖泊碳循环中发挥关键作用。藻类固定的碳经过沉积或埋藏，长期存储在沉积物中，能够有效地减少大气中 CO₂ 浓度。藻源性碳汇的估算不仅有助于揭示湖泊生态系统中的碳汇过程，还为其定量评估提供了重要支持。不同湖泊的

藻类固碳能力可能存在差异,这与藻的种类以及湖泊的地理位置、水面面积、水深等物理特征密切相关。因此,亟需开展不同湖泊之间的对比研究,以深化对这一领域的理解。此外,藻类固定的有机碳在沉积后会经历再分解过程,其中部分碳会转化为增温潜能更高的 CH_4 ,可能加剧温室效应,进而削减湖泊藻源性碳汇的净效益^[57]。为了全面评估藻源性碳汇对气候变化的潜在影响,未来需要将 CH_4 转化为 CO_2 当量,以便更准确地量化藻源性碳汇的气候效应。

3 结论

本研究利用 VGPM 模型分析了富营养太湖 2011-2020 年期间藻源性碳汇的时空特征,采用 GAM 模型识别了关键影响因子,并基于 ARIMA 模型构建了依赖单一环境参数的藻源性碳汇估算方法。取得的主要结论如下:

1)太湖藻源性碳汇呈波动上升趋势,累积碳汇量达到 3.8×10^6 吨。2011 年碳汇量最低,约为 1.7×10^5 吨,占总量的 4.5%;2019 年碳汇量最高,达到 7.2×10^5 吨,占总量的 18.2%。

2)太湖藻源性碳汇表现出明显的空间异质性,西北部湖区显著高于东南湖区。竺山湾的平均碳汇强度最高,达到 291 g/m^2 ,胥湖则最低,仅为 66 g/m^2 。

3)*Chl-a* 为太湖藻源性碳汇的关键因子,其贡献度达到 86.0%。光合有效辐射强度和水温贡献度次之,分别为 13.2%和 39.3%。 C_{ss} 的影响较小,贡献度仅为 4.6%。

4)基于 *Chl-a* 单一参数的 ARIMA 估算方法能较好地定量藻源性碳汇,为太湖生态系统碳汇未来研究提供了有力的方法支撑。

4 参考文献

- [1] Legg, S. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. Interaction, 2021, 49(4):44-45. DOI: 10.1515/ci-2021-0407.
- [2] Yu G, He N, Wang Q. Carbon budget and carbon sink of ecosystems in China: theoretical basis and comprehensive assessment. Beijing: Science Press. (in Chinese): 2013.
- [3] Wang F, Harindintwali J. D, Yuan Z *et al.* Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. The Innovation, 2021, 2(4). DOI: 10.1016/j.xinn.2021.100180.
- [4] Yao C, Wang Q, Jiang, X *et al.* Review of lake ecosystem's characteristics of carbon sink and potential value on carbon neutrality. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3):893. DOI: 10.5846/stxb202112283680.
- [5] Finlay K, Leavitt P, Wissel B *et al.* Regulation of spatial and temporal variability of carbon flux in six hard-water lakes of the northern Great Plains. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6part2):2553-2564. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2553.
- [6] Marotta, H, Pinho, L, Gudas, C *et al.* Greenhouse gas production in low-latitude lake sediments responds strongly to warming. Nature Climate Change, 2014, 4(6):467-470. DOI: 10.1038/nclimate2222.
- [7] Mendonça, R, Müller, R A., Clow, D *et al.* Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. Nature communications, 2017, 8(1):1694. DOI: 10.1038/s41467-017-01789-6.
- [8] Anderson, S R, Diou-Cass, Q P, Harvey, E. L. Short-term estimates of phytoplankton growth and mortality in a tidal estuary. Limnol. Oceanogr., 2018, 63(6):2411-2422. DOI: 10.1002/lno.10948.
- [9] Sun K, Deng W, Jia J *et al.* Spatiotemporal patterns and drivers of phytoplankton primary productivity in China's lakes and reservoirs at a national scale. Global and Planetary Change, 2023, 228:104215. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104215.
- [10] Wang X, Yin Z, Chen J *et al.* Phytoplankton Carbon Utilization Strategies and Effects on Carbon Fixation. In *Water*, 2023; Vol. 15. DOI: 10.3390/w15112137.
- [11] Yin CQ, Lan ZW. Determination of algal growth limiting factors in Chaohu Lake and its application. Environmental Chemistry, 1993, 12(5): 380-386. [尹澄清, 兰智文. 富营养化水体中藻类生长限制因素的确定及其应用. 环境化学, 1993, 5(5):380-386.]
- [12] Tsai, D DW, Chen P H, Chou C M-j *et al.* Carbon sequestration by alga ecosystems. Ecological Engineering, 2015, 84(386-389). DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.024.
- [13] Wang S, Li J, Zhang B *et al.* Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. Remote

sensing of environment,2018,217:444-460. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.026.

- [14] Zhang Q, Yuan YJ, Mi WJ *et al.* Primary production and its influencing factors in Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir. *J. Lake Sci.*2015,27(3):436-444. DOI:10.18307/2015.0310 [张琪, 袁轶君, 米武娟等. 三峡水库香溪河初级生产力及其影响因素分析.湖泊科学,2015,27(03):436-444.]
- [15] Yin Y, Zhang YL, Shi ZQ *et al.* Estimation of phytoplankton primary productivity in Meiliang Bay based on VGPM model and MODIS data. *Journal of Ecology*,2012,32(11):3528~3537. DOI: 10.5846/stxb201105070595 [殷燕, 张运林, 时志强等. 基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力.生态学报,2012,32(11):3528-3537.]
- [16] 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. 浅水湖泊沼学与太湖富营养化控制研究.湖泊科学,2020,32(5):1229-1243.]
- [17] Wang X, Li ZC, Li X *et al.* Effect of the decline of cyanobacterial bloom on the organic carbon composition of lake sediment carbon pool. *J Lake Sci*, 2020,32(2):346-356. DOI: 10.18307/2020.0212. [汪旋, 李致春, 李翔等. 蓝藻水华衰亡对沉积物碳库有机碳组分的影响.湖泊科学,2020,32(2):346-356.]
- [18] Pan G, Dai L, Li L *et al.* Reducing the Recruitment of Sedimented Algae and Nutrient Release into the Overlying Water Using Modified Soil/Sand Flocculation-Capping in Eutrophic Lakes. *Environ. Sci. Technol.*,2012,46(9):5077-5084. DOI: 10.1021/es3000307.
- [19] Párista É, Ács É, Böddi, B. Chlorophyll-a determination with ethanol – a critical test. *Hydrobiologia*,2002,485(1):191-198. DOI: 10.1023/A:1021329602685.
- [20] Xu H, McCarthy M J, Paerl H W *et al.* Contributions of external nutrient loading and internal cycling to cyanobacterial bloom dynamics in Lake Taihu, China: Implications for nutrient management. *Limnol. Oceanogr.*,2021,66(4):1492-1509. DOI: 10.1002/lno.11700.
- [21] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and oceanography*,1997,42(1):1-20. DOI: 10.4319/lo.1980.25.1.0072.
- [22] He XJ, He HB, Ma, Z *et al.* Spatial distribution characteristics of exogenous and exogenous organic carbon in surface sediments of the Erhai Sea, Yunnan Province, and its environmental significance. *Bulletin of Mineral and Rock Geochemistry*,2022,41(05):1003-1013+1914. DOI: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.028. [何学军,贺海波,马震等. 云南洱海表层沉积物内外源有机碳的空间分布特征及其环境意义.矿物岩石地球化学通报,2022,41(05):1003-1013+1914.]
- [23] Zhang YL, Qin BQ, Hu WP *et al.* Spatial and temporal variations of true photosphere depth and its ecological significance in a typical lake area of Taihu Lake *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 2006,03:287-296. DOI: 10.1360/zd2006-36-3-287. [张运林, 秦伯强, 胡维平等. 太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义.中国科学(D辑:地球科学),2006,03:287-296.]
- [24] Zhang YL, Qin BQ, Chen WM *et al.* Characterization and parameterization of optical attenuation coefficients in Lake Taihu waters *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004,03:209-213. DOI: 10.3321/j.issn:0029-814X.2004.03.003. [张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化.海洋与湖沼,2004,03:209-213.]
- [25] Stone C J. Additive regression and other nonparametric models. *The annals of Statistics*,1985,13(2):689-705. DOI: 10.1214/aos/1176349548.
- [26] Sobek S, Durisch-Kaiser E, Zurbrügg, R *et al.* Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. *Limnology and Oceanography*,2009,54(6):2243-2254. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6.2243.
- [27] Radbourne A D, Ryves D B, Anderson N J *et al.* The historical dependency of organic carbon burial efficiency. *Limnology and Oceanography*,2017,62(4):1480-1497. DOI: 10.1002/lno.10512.
- [28] Ni ZK, Li YJ, Wang SR *et al.* Sources of organic carbon and nitrogen in Lake Taihu sediments. *Journal of Ecology*,2011,31(16):4661~4670 [倪兆奎, 李跃进, 王圣瑞等.太湖沉积物有机碳与氮的来源.生态学报,2011,31(16):4661-4670.]
- [29] Zhao K, Zhou YF, Jiang ZL *et al.* Changes of aquatic vegetation in Lake Taihu since 1960s. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(2): 351-362. DOI: 10.18307/2017.0211. [赵凯, 周彦锋, 蒋兆林等. 1960 年以来太湖水生植被演变.湖泊科学,2017,29(2):351-362.]
- [30] Liu JL, Cheng LJ, Yao SC *et al.* Variations in stable carbon isotopes in different components of aquatic macrophytes from Taihu Lake, China. *Ecological Indicators*,2020,118: 106721. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106721.

- [31] 夏成星. 中国东部内陆水域水生植物生态化学计量学研究. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [32] Ji NN, Liu Y, Wang SR. The sources characteristics of stable isotope organic carbon and nitrogen in suspended particles and surface sediments in Lake Erhai and their water quality implications. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 118-133. DOI: 10.18307/2022.0111. [季宁宁, 刘永, 王圣瑞. 洱海悬浮颗粒物和表层沉积物有机碳氮同位素来源特征及水质指示意义. *湖泊科学*, 2022, 34(01): 118-133.]
- [33] Liu Q, Pang Y, Xiang S *et al.* Distribution characteristics and source analysis of organic matter in surface sediments of Luoma Lake. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4850-4856. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210421.001. [刘倩, 庞燕, 项颂等. 骆马湖表层沉积物有机质分布特征及来源解析. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4850-4856.]
- [34] Lu X, Huang C, Chen F *et al.* Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in the upwelling zone off the east coast of Hainan Island, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112349. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112349.
- [35] Shao L, Wu D, Zhang D *et al.* Using Isotopes to Identify the Sources of Organic Carbon and Nitrogen in Surface Sediment in Shallow Lakes Alongside Poyang Lake. *Wetlands*, 2018, 39. DOI: 10.1007/s13157-017-0988-z.
- [36] Guo W, Wang Y, Shi J *et al.* Sediment information on natural and anthropogenic-induced change of connected water systems in Chagan Lake, North China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(3): 795-808. DOI: 10.1007/s10653-019-00280-z.
- [37] Hastie T J. Generalized additive models. In *Statistical models in S*, Routledge, 2017; pp 249-307.
- [38] Newbold P. ARIMA model building and the time series analysis approach to forecasting. *Journal of forecasting*, 1983, 2(1): 23-35. DOI: 10.1002/for.3980020104.
- [39] Faruk D Ö. A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series prediction. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2010, 23(4): 586-594. DOI: 10.1016/j.engappai.2009.09.015.
- [40] Paerl H W, Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(1): 27-37. DOI: 10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x.
- [41] Visser P M, Verspagen J M H, Sandrini G *et al.* How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms. *Harmful Algae*, 2016, 54: 145-159. DOI: 10.1016/j.hal.2015.12.006.
- [42] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach. *Limnology*, 2001, 2(1): 45-48. DOI: 10.1007/s102010170015.
- [43] Van Dam B R, Tobias C, Holbach A *et al.* CO₂ limited conditions favor cyanobacteria in a hypereutrophic lake: An empirical and theoretical stable isotope study. *Limnol. Oceanogr.*, 2018, 63(4): 1643-1659. DOI: 10.1002/lno.10798.
- [44] Wang CL, Pan WY, Han YQ *et al.* Impact of global climate change on the development and evolution of cyanobacterial blooms in Lake Taihu. *China Environmental Science*, 2010, 6(7): 7. [王成林, 潘维玉, 韩月琪等. 全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响. *中国环境科学*, 2010, 6(7): 7.]
- [45] Huang GC, Wu SQ, Zhou J *et al.* Response of cyanobacterial habitats to climate change in Lake Taihu. *Journal of Water Resources and Water Transportation Engineering*, 2014, 6(6): 39-44. DOI: 10.3969/j.issn.1009-640X.2014.06.006. [黄国情, 吴时强, 周杰等. 太湖蓝藻生境对气候变化的响应. *水利水运工程学报*, 2014, 6(6): 39-44.]
- [46] Xiao PQ, Wang LL, Yang JS *et al.* Study on sediment reduction benefits of soil and water conservation measures in typical watersheds in the Loess Plateau under the heavy rainfall. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9). DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20200568. [肖培青, 王玲玲, 杨吉山等. 大暴雨作用下黄土高原典型流域水土保持措施减沙效益研究. *水利学报*, 2020, 51(9):]
- [47] Zhang Y, Shi K, Liu J *et al.* Meteorological and hydrological conditions driving the formation and disappearance of black blooms, an ecological disaster phenomena of eutrophication and algal blooms. *Sci. Total Environ.*, 2016, 569-570(1517-1529). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.244.
- [48] Wu T, Qin, BQ, Brookes J D *et al.* The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China. *Sci. Total Environ.*, 2015, 518-519(24-30). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.090.
- [49] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊生态环境研究报告. 北京: 科学出版社, 2023: 73-74.
- [50] Wu YN, Li P. Overview of flood and drought disaster defense in Taihu Lake Basin in 2019. *China Flood & Drought Management*,

- 2020, 30(1): 31-33,118. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2019272. [伍永年, 李鹏. 太湖流域 2019 年水旱灾害防御工作综述.中国防汛抗旱,2020,30(01):31-33,118.]
- [51] Wang M, Zhang JY, Chen QW *et al.* Variations in nitrogen and phosphorous concentrations and major phytoplankton species in the northwestern Lake Taihu between 2003-2012. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 164-172. DOI: 10.5846/stxb201803060449. [王敏, 张建云, 陈求稳等. 太湖西北湖区 2003-2012 年间氮磷浓度及浮游植物主要类群变化趋势分析.生态学报,2019,39(1):164-172.]
- [52] Yu H, Yan SW, Xu J. Multivariate statistical analysis of water quality of rivers entering and leaving Taihu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010,19(6):696-702. [余辉, 燕姝雯, 徐军.太湖出入湖河流水质多元统计分析.长江流域资源与环境,2010,19(6):696-702.]
- [53] Gao YN, Dong J, He Y *et al.* Research advances on the modes of action for allelopathic algal inhibition by submerged macrophytes based on the release characteristics of allelochemicals. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016,40(6):1287-1294. DOI: 10.7541/2016.167. [高云霓, 董静, 何燕等. 基于化感物质释放特性的沉水植物抑藻作用模式研究进展.水生生物学报,2016,40(6):1287-1294.]
- [54] Wu T, Qin BQ, Ding W *et al.* Field observation of different wind-induced basin-scale current field dynamics in a large, polymictic, eutrophic lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*,2018,123(9):6945-6961. DOI: 10.1029/2018JC014040.
- [55] Zhao QH, Sun GD, Wang JJ *et al.* Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, 30(2): 385-393. DOI: 10.18307/2018.0210. [赵巧华, 孙国栋, 王健健等. 水温, 光能对春季太湖藻类生长的耦合影响.湖泊科学,2018,30(2):385-393.]
- [56] Thorel M, Fauchot J, Morelle J *et al.* Interactive effects of irradiance and temperature on growth and domoic acid production of the toxic diatom *Pseudo-nitzschia australis* (Bacillariophyceae). *Harmful Algae*,2014,39(232-241). DOI: 10.1016/j.hal.2014.07.010.
- [57] Shi WQ, Qin BQ, Zhang QJ *et al.* Global lake phytoplankton proliferation intensifies climate warming. *Nature Communications*,2024,15(1):10572. DOI: 10.1038/s41467-024-54926-3.