

# 养殖型湖泊水体叶绿素a含量与营养盐相关性分析

朱文谨, 张梅, 董啸天\*, 王娜, 李雪

江苏海洋大学土木与港海工程学院, 江苏 连云港

收稿日期: 2021年8月22日; 录用日期: 2021年9月23日; 发布日期: 2021年9月30日

## 摘要

为了反映阳澄湖水体叶绿素a和营养物质浓度的关系, 在分析阳澄湖水体营养盐浓度对叶绿素a含量影响的基础上, 建立了叶绿素a和营养盐浓度的定量关系。结果表明: 阳澄湖水体总氮浓度与叶绿素a浓度之间呈显著正相关; 化学需氧量和总磷浓度也分别与叶绿素a浓度之间呈现正相关关系, 相关系数与总氮相比较低。根据叶绿素与营养盐浓度的定量关系, 论文提出仅仅利用阳澄湖水体总氮含量计算叶绿素a浓度的单变量方法和同时利用总氮、化学需氧量计算叶绿素a浓度的多变量方法。研究思路和建立的方法能够给大型养殖型湖泊水体叶绿素a含量与营养盐浓度关系的研究提供借鉴。

## 关键词

养殖型湖泊, 叶绿素a浓度, 总氮, 化学需氧量, 相关关系

# Correlation Analysis of Chlorophyll a Content and Nutrients in Aquaculture Lakes

Wenjin Zhu, Mei Zhang, Xiaotian Dong\*, Na Wang, Xue Li

School of Civil and Harbor Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang Jiangsu

Received: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Sep. 30<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

In order to study the relationship between Chl-a concentration and nutrients concentration in Yangcheng Lake, the quantitative relationship between Chl-a and nutrient concentration in the lake was established. The results showed that the total nitrogen concentration ( $C_{TN}$ ) and Chl-a concentration had significant positive correlation. Chemical oxygen content concentration ( $C_{COD}$ ) and total phosphorus ( $C_{TP}$ ) were both considered to study correlation with Chl-a concentration, and the correlation decreased. Based on this, new methods for computing Chl-a concentration were proposed in this paper, considering single variable ( $C_{TN}$ ) and two variables ( $C_{TN}$  and  $C_{COD}$ ) separately. The research idea and method can provide successful experiences for studying relationship between Chl-a and nutrient concentration in large-scale crab breeding lake.

## Keywords

Aquaculture Lake, Chl-a Concentration,  $C_{TN}$ ,  $C_{COD}$ , Correlations

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

湖泊水质富营养化问题影响太湖流域经济和社会的发展,是治理湖泊水体面临的主要问题之一[1]。近年来,有关湖泊水质现状特征及成因分析、湖泊水体营养元素时空变化及富营养化的研究逐渐增多,但对类似于阳澄湖等螃蟹养殖型湖泊的研究相对偏少[2]。在阳澄湖养殖大闸蟹的面积一度占到整个湖泊面积的90%,严重影响了阳澄湖水域的生态环境[3]。有研究表明,在一个养殖周期内,大闸蟹养殖产生的最大总氮负荷为 $68.29 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,其中饵料残留的贡献最大,其次是大闸蟹排泄物的贡献[4]。

已有研究表明,水体中叶绿素 a (Chl-a)浓度的含量是表征浮游藻类生长非常重要的指标。大型养殖型湖泊在氮磷污染负荷下直接影响湖泊水体叶绿素 a 浓度的含量[5]。现有湖泊水库水质模型中,通过研究水体营养物质浓度变化来反映水体叶绿素 a (Chl-a)浓度的变化已经成为探究湖泊水质和富营养化的重要方法[6]。目前国内外常用的水质模型一般都是通过叶绿素 a 浓度和总磷浓度之间的定量关系来反映水体富营养化情况。已有研究表明,除了总磷之外,水深、水温等物理因素或其他营养元素也有可能在一定程度上影响着叶绿素 a (Chl-a)浓度[7]。有学者在关于阳澄湖水体营养物质浓度方面的研究中发现水体叶绿素浓度和总氮浓度存在较高的相关系数,在此基础上建立了阳澄湖水体内的总氮浓度( $C_{TN}$ )和叶绿素 a (Chl-a)浓度的线性方程,但并未进行较为深入的定量研究[8]。

本研究拟在2009年5月、2009~2013年丰水期(6~9月)阳澄湖水体水质监测数据基础上,定量分析湖泊水体中叶绿素浓度与各营养物质浓度之间的关系,由此确定影响叶绿素浓度的主要因素;根据叶绿素浓度与水体营养盐浓度的定量关系,提出利用阳澄湖水体总氮浓度计算叶绿素 a 浓度的单变量方法和同时利用总氮、化学需氧量计算叶绿素 a 浓度的多变量方法,为水质模型中模拟水体富营养化过程提供参考,为大型养殖型湖泊水体富营养化防治提供技术支持[9]。

## 2. 区域概况

阳澄湖(图1)为苏州市的大型湖泊,总面积为 $119.04 \text{ km}^2$ ,南北长约 $17.0 \text{ km}$ ,东西宽约 $8.0 \text{ km}$  [10]。

是苏州市区重要的储水源地、备用水源，同时也是江苏最大的淡水湖泊之一。除了是十分重要饮水源地之外，阳澄湖还承担了旅游、航运、养殖等多种功能[11]。阳澄湖东湖面积最大，中湖次之，西湖面积最小。湖泊水体来源于太湖及湖泊西部地区，最终汇入长江[12]。整个湖区水位变幅不大，年变化一般不超过 1.2 m，平均水位在 3 m 左右，平均流速一般在 0.03 m/s~0.06 m/s。阳澄湖水生环境和水域环境得天独厚，水产资源也是应有尽有，是全国著名的养殖型湖泊之一，阳澄湖大闸蟹“蟹中之王”美誉更是无人不知，无人不晓[13]。



Figure 1. The monitoring spots of the Yangcheng Lake

图 1. 湖体监测点位图

### 3. 阳澄湖水体 Chl-a 浓度与营养物质浓度之间关系分析

为了获得到水体中叶绿素 a (Chl-a)和营养物质浓度之间的定量关系，本文分析了 2009 年 5 月和 2009~2013 年丰水期(6~9 月)阳澄湖水体 Chl-a 浓度与总氮浓度( $C_{TN}$ )、硝酸氮浓度( $C_{NO_3^-}$ )、氨氮浓度( $C_{NH_4^+}$ )、总磷浓度( $C_{TP}$ )、化学需氧量( $C_{COD}$ )之间相关关系；利用相关性分析选取显著相关的影响因素作为主要自变量，拟合出以总氮浓度为自变量，Chl-a 浓度为因变量的单变量方程；以总氮和化学需氧量为自变量，Chl-a 为因变量的双变量方程，得到水体 Chl-a 浓度的计算方法。

#### 3.1. 影响水体 Chl-a 浓度变化的主要因素

阳澄湖 2009 年 5 月和 2009~2013 年丰水期(6~9 月)表层水体中 Chl-a 与每种营养物质浓度的相关系数如表 1 所示。总的来说，阳澄湖水域 Chl-a 浓度与  $C_{TN}$  呈正相关，且相关系数关系较为显著；2009~2013 年期间的丰水期，阳澄湖水体 Chl-a 浓度与  $C_{COD}$  也呈正相关关系，但是与  $C_{TN}$  相比，相关性有所下降；目前不少水质模型中均有 Chl-a 浓度与  $C_{TP}$  的相关性表述，但阳澄湖水体 2009~2013 年丰水期呈现出， $C_{TP}$  的影响远不如  $C_{TN}$  和  $C_{COD}$  的影响大。

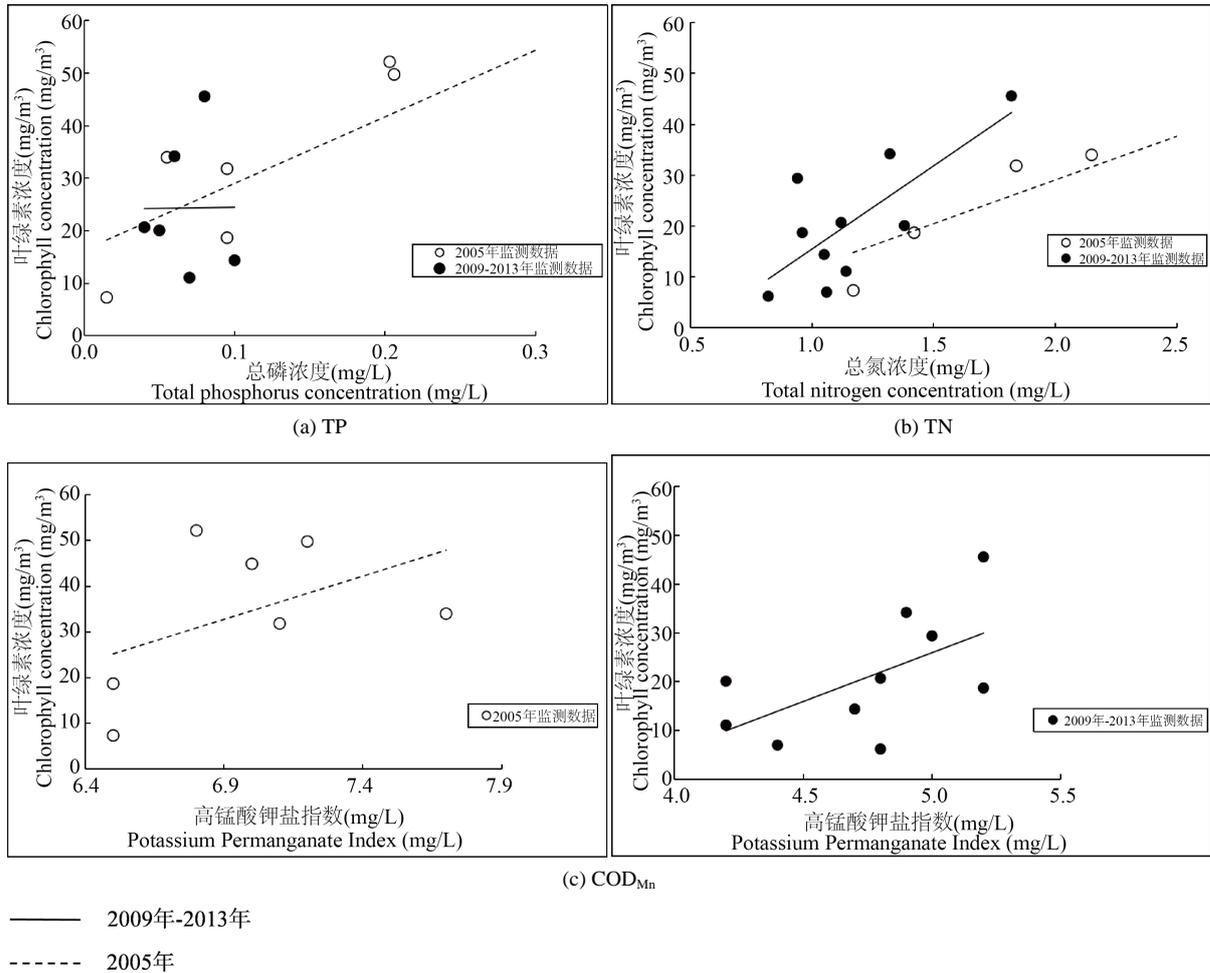
Table 1. Correlation coefficient between chlorophyll a concentration and nutrient concentration

表 1. 叶绿素 a 浓度与各营养物质浓度之间关系

Chl-a	$C_{TN}$	$C_{NH_4^+}$	$C_{NO_3^-}$	$C_{COD}$	$C_{TP}$
2009 年 5 月	0.835	0.038	0.834	0.233	0.520
2009~2013 年(6~9 月)	0.524	0.168	-	0.347	0.003
所有样品	0.687	0.120	-	0.324	0.349

注：标注“-”为并未测量。

图 2 为相关性较为明显的氮、磷和化学需氧量与水体叶绿素浓度之间的关系图。在光合作用下, 浮游植物可产生大量的有机物, Chl-a 在浮游植物中大量存在, 随着水中 Chl-a 浓度的增加, 高锰酸盐指数也会随之增加。由此可见,  $C_{\text{COD}}$  是 Chl-a 浓度变化的变量之一, 阳澄湖 2009~2013 年丰水期  $C_{\text{COD}}$  与 Chl-a 浓度之间相关系数的可达 0.347。



**Figure 2.** Relationship between Chl-a and total phosphorus, total nitrogen and chemical oxygen demand in water  
**图 2.** 水体 Chl-a 与总磷、总氮和化学需氧量之间的线性关系

现有研究显示, 大多数浅水湖泊中, 磷为限制性营养盐。学者们多采用  $C_{\text{TP}}$  与 Chl-a 的关系探究水体中限制性营养盐的决定因素[14]。表 1 的数据可知, 阳澄湖水域水体 Chl-a 和  $C_{\text{TP}}$  的相关性不如与  $C_{\text{TN}}$  的相关性。虽然大部分湖泊是以磷为限制性营养盐, 而阳澄湖却是以氮为限制性营养盐[15]。原因可能是阳澄湖是螃蟹养殖类湖泊, 一方面大量螃蟹饲料残余遗留在湖中, 为阳澄湖提供了较为丰富的氮磷营养, 另一方面湖中养蟹在一定程度上影响了湖中氮磷比, 从而影响了湖中限制性营养物质的种类[16]。

### 3.2. 水体 Chl-a 浓度计算方程

阳澄湖是大型养殖类湖泊, 其营养物质组成结构与一般的大型自然湖库营养物质组成结构存在不同, 大量残余饲料和螃蟹的生存活动一定程度上影响了湖泊内水体氮磷比例, 从而影响了湖泊内 Chl-a 浓度与营养物质浓度的关系。

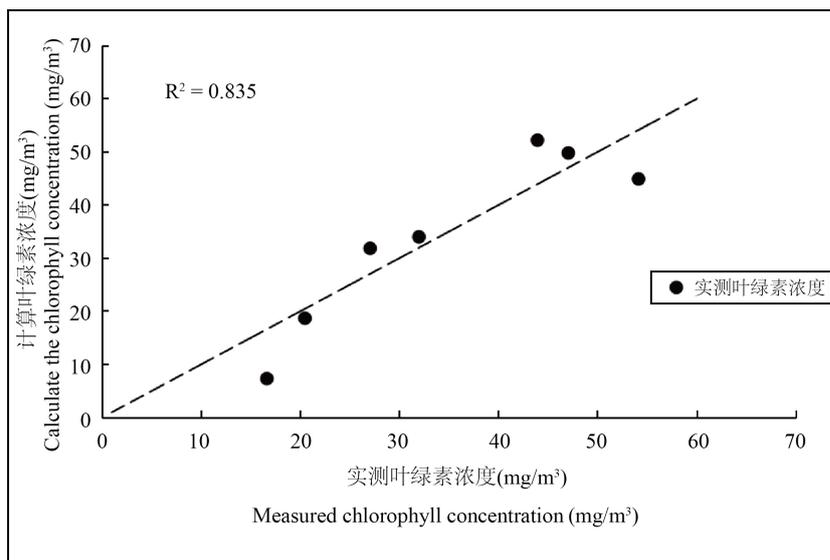
### 3.2.1. 单变量方程

一般情况下, 营养物质浓度接近于零时叶绿素浓度也趋向于零, 拟建立的单变量方程应通过坐标原点, 选取指数函数作为目标函数[17]。2009年5月, 将Chl-a浓度作为因变量, 同时以 $C_{TN}$ 为自变量, 拟合方程的相关系数为0.835。

$$(2009\text{年}5\text{月})\rho(\text{Chl-a}) = 14.05C_{TN}^{1.074} \quad (1)$$

公式中: (2009年5月) $\rho(\text{Chl-a})$ 为2009年5月份的叶绿素a浓度, 单位为 $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $C_{TN}$ 为总氮浓度, 单位为 $\text{mg}/\text{L}$ 。

式(1)拟合如图3所示:



**Figure 3.** Function relationships between Chl-a concentrations and nutrient  $C_{TN}$  in May 2009

**图3.** 2009年5月Chl-a浓度与营养物质 $C_{TN}$ 的关系

2009~2013年丰水期(6~9月), 同样以Chl-a浓度为因变量,  $C_{TN}$ 为自变量, 其相关系数为0.524, 虽然这一时段的相关系数较2009年5月有所降低, 但Chl-a浓度与营养物质 $C_{TN}$ 仍然明显优于其他变量。

$$(2009\sim 2013\text{年丰水期}(6\sim 9\text{月}))\rho(\text{Chl-a}) = 15.23C_{TN}^{1.786} \quad (2)$$

公式中: (2009~2013年丰水期(6~9月)) $\rho(\text{Chl-a})$ 为2009年~2013年丰水期(6~9月)的叶绿素a浓度, 单位为 $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

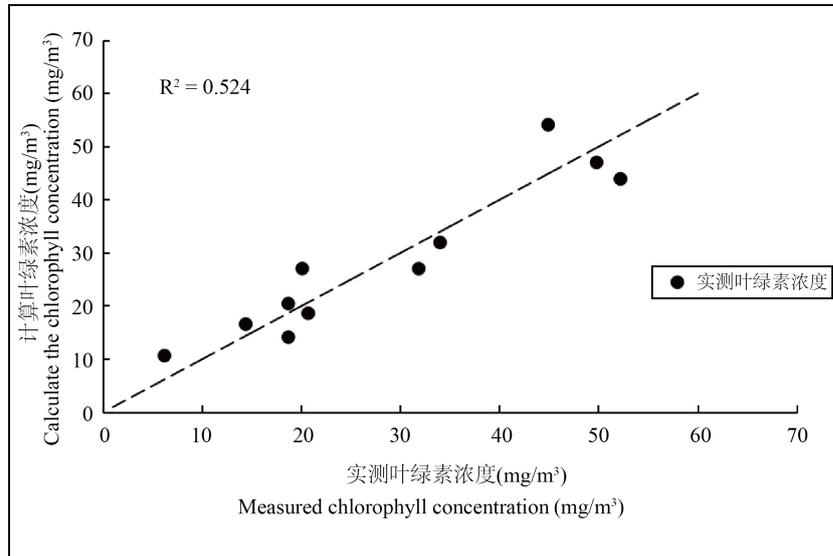
式(2)拟合如图4所示。

2009年5月和2009~2013年丰水期(6~9月)监测数据显示, Chl-a浓度与营养物质 $C_{TN}$ 浓度显著相关, 对这两个时期的所有样本进行分析, 拟合方程的相关系数为0.69。Chl-a与营养物质浓度 $C_{TN}$ 的指数函数关系式如下:

$$\rho(\text{Chl-a}) = 16.86C_{TN}^{0.94} \quad (3)$$

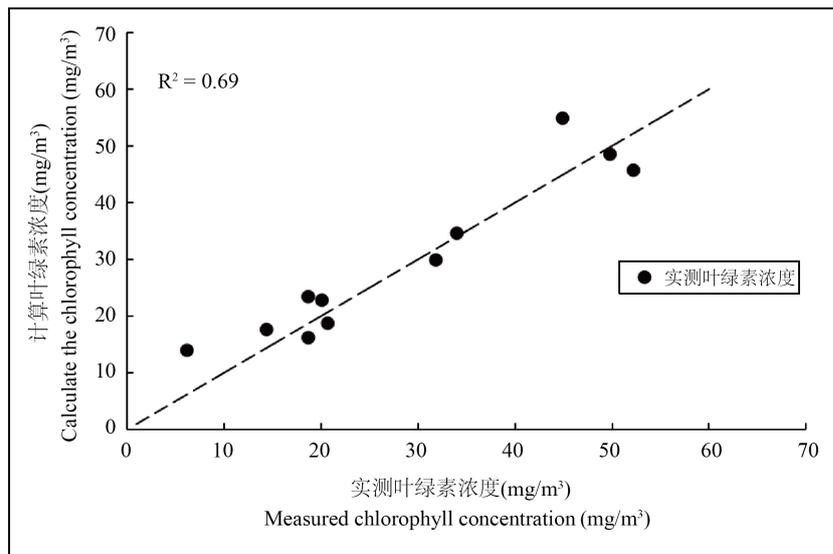
公式中:  $\rho(\text{Chl-a})$ 为叶绿素a浓度, 单位为 $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

式(3)拟合如图5所示。



**Figure 4.** Function relationships between Chl-a concentrations and nutrient  $C_{TN}$  during the period of wet season from 2009 to 2013

**图 4.** 2009~2013 年丰水期 Chl-a 浓度与营养物质  $C_{TN}$  的关系



**Figure 5.** Function relationships between Chl-a concentration and nutrient  $C_{TN}$  in all samples during wet season

**图 5.** 所有样本丰水期 Chl-a 浓度与营养物质  $C_{TN}$  的关系

### 3.2.2. 双变量方程

总所周知,光合作用下 Chl-a 浓度有所增加时,化学需氧量也相应增加。一般来说,  $C_{COD}$  是引起 Chl-a 浓度变化的变量之一。从表 1 和图 2 可以看出, 2009 年 5 月与 2009~2013 年丰水期(6~9 月)阳澄湖 Chl-a 浓度也随  $C_{COD}$  的增加而增加,  $C_{COD}$  与 Chl-a 浓度呈正相关。根据前面的分析可知,  $C_{TN}$  和  $C_{COD}$  均能够影响到 Chl-a 的浓度。Chl-a 浓度计算的双变量方程为:

$$(2009 \text{ 年 } 5 \text{ 月}) \rho(\text{Chl-a}) = 16.13C_{TN} + 5.53C_{COD} - 41.48 \quad (4)$$

公式中:  $C_{COD}$  为化学需氧量浓度, 单位为 mg/L。

式(4)拟合如图 6 所示:

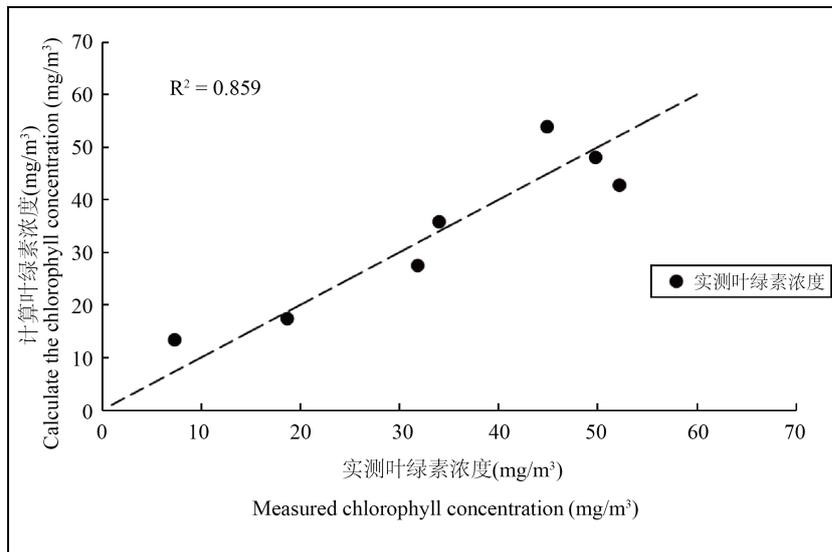


Figure 6. Function relationships between Chl-a concentrations and nutrient  $C_{TN}$  in May 2009

图 6. 2009 年 5 月 Chl-a 浓度与营养物质  $C_{TN}$  的关系

由图 6 可知, 采用双变量方程计算的叶绿素浓度和测得的叶绿素浓度的相关系数为 0.859, 与单变量方程相比相关系数(0.835)有所提高。采用  $C_{TN}$  和  $C_{COD}$  计算叶绿素浓度的双变量方程具有更高的精度。2009~2013 年丰水期(6~9 月)的双变量方程:

$$(2009\sim 2013 \text{ 年丰水期}(6\sim 9 \text{ 月})) \rho(\text{Chl-a}) = 17.37C_{TN} + 0.0019C_{COD} + 0.83 \quad (5)$$

式(5)拟合如图 7 所示:

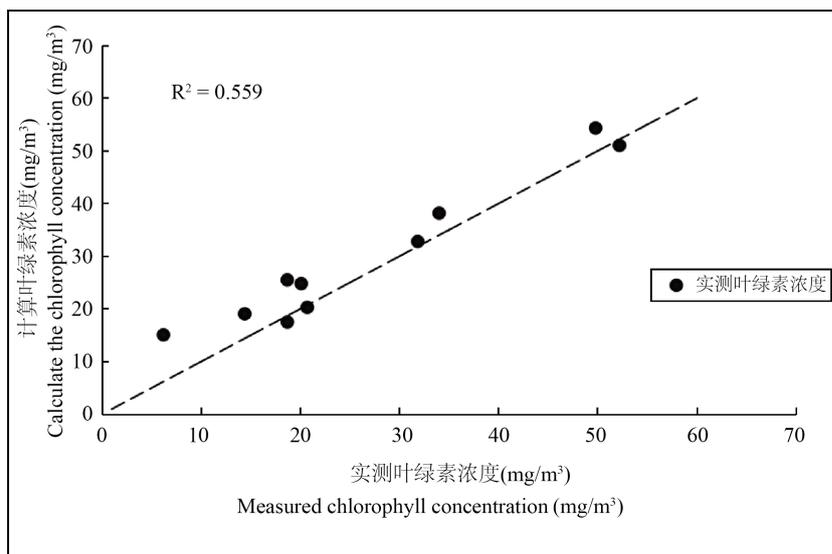


Figure 7. Function relationships between Chl-a concentrations and nutrient  $C_{TN}$  during the period of wet season from 2009 to 2013

图 7. 2009~2013 年丰水期 Chl-a 浓度与营养物质  $C_{TN}$  的关系

2009~2013 年丰水期(6~9 月), 采用双变量方程计算的叶绿素浓度和测得的叶绿素浓度相关系数为 0.559, 高于单变量方程的相关系数 0.524。双变量方程的精度要略高于单变量方程。

为了能够更好的计算叶绿素浓度, 对这一时期所有样本进行分析, Chl-a 浓度与营养物质  $C_{TN}$  的和化学含氧量  $C_{COD}$  指双变量方程如下:

$$\rho(\text{Chl-a}) = 16.59C_{TN} - 0.94C_{COD} + 4.56 \quad (6)$$

式(6)拟合如图 8 所示。双变量方程计算这一时期的叶绿素浓度与实测值的相关性可达 0.71。较高的相关性说明了, 本文提出的双变量方程能够较为准确地反映阳澄湖水体浓度与营养物浓度之间的关系。

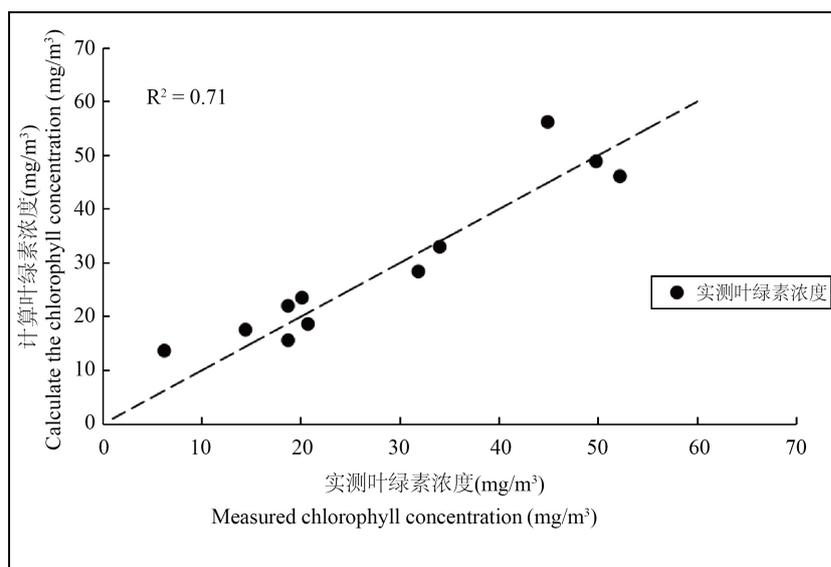


Figure 8. Function relationships between Chl-a concentrations and nutrient  $C_{TN}$  in all samples

图 8. 所有样本丰水期 Chl-a 浓度与营养物质  $C_{TN}$  的关系

#### 4. 结论

论文在阳澄湖 2009 年 5 月、2009~2013 年丰水期(6~9 月)水质监测数据基础上, 定量分析了湖泊水体中叶绿素与各营养物质浓度之间的关系, 由此确定了影响叶绿素浓度的主要因素, 并提出了利用阳澄湖水体总氮浓度计算叶绿素 a 浓度的单变量方法和利用总氮、化学需氧量计算叶绿素 a 浓度的多变量方法。通过研究得出以下结论:

1) 分析 2009 年 5 月和 2009~2013 年丰水期(6~9 月)阳澄湖水体叶绿素浓度与营养物质浓度的相关性可知, 湖泊浮游藻类生长的主要限制元素可能为氮元素。总氮浓度( $C_{TN}$ )变化对与 Chl-a 浓度变化的影响更为显著, 其相关系数达到了 0.8 以上。 $C_{COD}$  和  $C_{TP}$  与 Chl-a 相关程度低于  $C_{TN}$ 。

2) 分析了水体营养物质浓度与 Chl-a 浓度之间的定量关系, 提出了阳澄湖水体 Chl-a 浓度计算方法。双变量方程计算效果好于单变量方程, 有较高的可信度。新的计算方法比以往阳澄湖水域的水体叶绿素 a 和水体营养物质浓度关系的研究更进了一步。

3) 大部分湖泊都是以磷为限制性营养盐, 而阳澄湖却是以氮为限制性养分, 这大概是由于阳澄湖是养殖类湖泊, 一方面, 大量螃蟹饲料残余为阳澄湖提供了较为丰富的氮磷营养。另一方面, 湖中养蟹在一定程度上影响了湖中氮磷比, 从而影响了湖中限制性营养物质的种类。

## 基金项目

江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180803, BK20170871); 江苏省海洋科技专项基金(JSZRHYKJ202008)、江苏海洋大学研究生科研与实践创新计划项目(KYCX20\_2900, KYCX2021-040)。

## 参考文献

- [1] 黄佳慧, 张念辰, 卢仁杰. 2000-2019年阳澄湖水质变化趋势分析[J]. 环境监测与预警, 2021, 13(3): 40-43.
- [2] 周静, 刘松华. 2015-2016年阳澄湖水质变化原因及对策研究[J]. 四川环境, 2017, 36(6): 130-133.
- [3] 李芬芳, 黄代中, 莲花, 郭晶, 欧阳美凤, 尹宇莹. 洞庭湖及其入湖口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2307-2313.
- [4] 刘松华, 周静, 武瑾. 苏州市阳澄湖地区氟污染来源及管控研究[J]. 绿色科技, 2019(2): 40-42.
- [5] 孙宁宁, 陈蕾. 湖泊沉积物磷释放的影响因素研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(3): 715-718.
- [6] 郭西亚, 凌虹, 周旭, 盛洁, 岳强, 沈辛怡, 等. 阳澄湖沉积物氮磷与有机质分布及污染评价[J]. 环境科技, 2020, 33(2): 59-64.
- [7] 王欣, 陈欣瑶, 邹云, 陈界江, 李凤彩. 阳澄湖沉积物中氮、磷及有机质空间分布特征与污染评价[J]. 环境监测与预警, 2021, 13(3): 44-49.
- [8] 金文龙, 周维. 阳澄湖氮磷时空变化特征及富营养化评价[J]. 四川环境, 2019, 38(3): 58-62.
- [9] 王晋虎, 古向前, 俞悦. 阳澄湖环湖河道总磷通量变化分析[J]. 绿色科技, 2021, 23(2): 110-112, 160.
- [10] 武瑾, 金文龙, 陈亢利. 阳澄湖水体富营养化特征及其主控因子分析[J]. 环境保护科学, 2021, 47(2): 86-91.
- [11] 陈亦晶. 阳澄湖水质评价及污染控制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [12] 周静, 刘松华. 阳澄湖水质现状、存在的问题及对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(8): 47-51.
- [13] 张舒羽, 凌虹, 巫丹, 苏小妹. 阳澄湖水质现状特征及其成因分析[J]. 治淮, 2019(6): 12-14.
- [14] 穆玉林, 石鸿韬, 赵博文, 孙承兴, 高月淑, 张振家, 等. 阳澄湖围网养殖氮磷污染负荷分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21): 86-91.
- [15] 辛玉婷. 阳澄湖围网养殖污染负荷计算及其污染效应研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [16] 吕文, 孙瑞瑞, 王诚, 谈剑宏, 钮锋敏, 杨金艳, 等. 阳澄湖西湖水源地富营养化年内变化分析[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(5): 33-37.
- [17] 景二丹, 阮春蓉, 吕弈成, 顾青清, 方月英, 关永年, 等. 阳澄湖藻类数量与水质参数关系初探[J]. 净水技术, 2018, 37(8): 28-33.