

## 不同营养水平湖泊浮游植物吸收和比吸收系数变化特征\*

王明珠<sup>1,2</sup>, 张运林<sup>1\*\*</sup>, 刘笑菡<sup>1,2</sup>, 朱广伟<sup>1</sup>, 汤祥明<sup>1</sup>, 周永强<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用太湖和博斯腾湖 8 月份、天目湖 6-8 月份的采样数据, 开展不同营养状态下浮游植物吸收和比吸收系数的变化规律研究, 并探讨其影响因素。利用综合营养指数法, 太湖 8 月 42 个采样点中 20 个点为重度富营养, 标记为太湖 T I, 22 个点为中度富营养, 标记为太湖 T II, 天目湖夏季、博斯腾湖 8 月的富营养水平分别为轻度富营养和中营养。440 nm 处浮游植物吸收系数  $a_{ph}(440)$  按照营养水平从高到低由重度富营养到中营养分别为  $1.02 \pm 0.51$ 、 $0.69 \pm 0.40$ 、 $0.78 \pm 0.24$  和  $0.20 \pm 0.04 \text{ m}^{-1}$ , 相应地 675 nm 处浮游植物吸收系数  $a_{ph}(675)$  分别为  $0.59 \pm 0.32$ 、 $0.38 \pm 0.23$ 、 $0.41 \pm 0.13$  和  $0.08 \pm 0.02 \text{ m}^{-1}$ 。统计检验显示, 重、中度富营养的太湖以及轻度富营养的天目湖浮游植物吸收系数显著高于中营养的博斯腾湖。440 nm 处浮游植物比吸收系数  $a_{ph}^*$  (440) 分别为  $0.013 \pm 0.006$ 、 $0.012 \pm 0.004$ 、 $0.038 \pm 0.008$  和  $0.051 \pm 0.013 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ 。统计检验显示, 重度、中度富营养的太湖浮游植物比吸收系数显著小于轻度富营养的天目湖, 而天目湖浮游植物比吸收系数又显著小于中营养的博斯腾湖。另由 400 ~ 700 nm 浮游植物的光谱曲线可以明显看出不同营养状态浮游植物吸收系数的变化情况, 表现为: 重度富营养太湖 T I > 轻度富营养的天目湖 > 中度富营养的太湖 T II > 中营养的博斯腾湖。太湖和天目湖属于富营养化湖泊, 浮游植物吸收系数明显高于中营养的博斯腾湖, 这充分反映了随营养程度增加, 浮游植物吸收逐渐增加。天目湖浮游植物略高于太湖 T II 是因为太湖非藻类悬浮颗粒物含量高, 所以吸收系数偏小。比吸收系数的变化情况与吸收系数的变化情况恰好相反, 随着营养程度的增加依次递减。随营养程度增加浮游植物吸收逐渐增加是由于水体营养盐增加促进浮游植物生长, 浮游植物生物量逐渐增加所致, 而比吸收系数逐渐降低则由于色素包裹效应所致。

**关键词:** 营养水平; 太湖; 天目湖; 博斯腾湖; 吸收系数; 比吸收系数; 浮游植物

## Phytoplankton absorption and chlorophyll-specific absorption coefficients characteristics of different trophic level lakes

WANG Mingzhu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yunlin<sup>1</sup>, LIU Xiaohan<sup>1,2</sup>, ZHU Guangwei<sup>1</sup>, TANG Xiangming<sup>1,2</sup> & ZHOU Yongqiang<sup>1,2</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

**Abstract:** Phytoplankton absorption and chlorophyll-specific absorption coefficients were analyzed, and the causes were discussed by selecting four different trophic level lakes including Lake Taihu, Lake Tianmu and Lake Bositeng. According to trophic level index using chlorophyll-a (Chl. a), total nitrogen, total phosphorus and secchi disc, Lake Taihu includes hyper and medium eutrophication zones. Meanwhile, Lake Tianmu and Lake Bositeng are light eutrophic and mesotrophic, respectively. Phytoplankton absorption coefficients at 440 nm ( $a_{ph}(440)$ ) are  $1.02 \pm 0.51$  and  $0.69 \pm 0.40$  for hyper and medium eutrophication in Lake

\* 国家自然科学基金项目(41271355)、江苏省杰出青年基金项目(BK2012050)、中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点布局项目(NIGLAS2012135003)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07101-010)联合资助。2012-09-06 收稿; 2012-12-15 收修改稿。王明珠, 女, 1987 年生, 硕士研究生; E-mail: wangmingzhu 0629@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn.

Taihu,  $0.78 \pm 0.24$  in Lake Tianmu, and  $0.20 \pm 0.04 \text{ m}^{-1}$  in Lake Bositeng, respectively. Correspondingly,  $a_{\text{ph}}(675)$  are  $0.59 \pm 0.32$ ,  $0.38 \pm 0.23$ ,  $0.41 \pm 0.13$  and  $0.08 \pm 0.02 \text{ m}^{-1}$ , respectively. Statistics test shows that phytoplankton absorption of hyper and medium eutrophic Lake Taihu, in addition to light eutrophication Lake Tianmu, is significantly higher than that in mesotrophic Lake Bositeng. Chlorophyll-specific absorption coefficients at 440 nm ( $a_{\text{ph}}^*(440)$ ) are  $0.013 \pm 0.006$ ,  $0.012 \pm 0.004$ ,  $0.038 \pm 0.008$  and  $0.051 \pm 0.013 \text{ m}^2/\text{mgChl. a}$ , respectively. Statistics test shows that  $a_{\text{ph}}^*(440)$  of Lake Taihu is much lower than that of Lake Tianmu, and  $a_{\text{ph}}^*(440)$  of Lake Tianmu is significantly less than that of Lake Bositeng. The order of the spectral absorption coefficient is as follows: Lake Taihu T I > Lake Tianmu > Lake Taihu T II > Lake Bositeng, showing that phytoplankton absorption coefficients generally increase with trophic levels, but Lake Taihu T II is lower than Lake Tianmu partly due to the high concentration of non-algae suspended matter. In contrast, chlorophyll-specific absorption coefficients decrease with enhanced trophic levels. Phytoplankton absorption coefficients generally increase with trophic levels due to the increase of biomass caused by high nutrient concentration. However, the decrease of chlorophyll-specific absorption coefficients with enhanced trophic level may be attributed to pigment package.

**Keywords:** Trophic level; Lake Taihu; Lake Tianmu; Lake Bositeng; absorption coefficient; chlorophyll-specific absorption coefficient; phytoplankton

浮游植物的吸收特性可以改变水体的光学特性,它的重要功能包括调节水下光场及影响光合作用光能合成,在利用遥感技术估算色素生物量、初级生产力以及监测水环境变化等方面发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>. 浮游植物的吸收系数和比吸收系数是表征水体固有光学特性的重要参数<sup>[2]</sup>,吸收系数  $a_{\text{ph}}(\lambda)$  是水色遥感的生物-光学模式、光辐射传输、初级生产力估算和生态过程模拟的基本参数<sup>[3]</sup>. 吸收系数  $a_{\text{ph}}(\lambda)$  与叶绿素 a 浓度的比值称为浮游植物的比吸收系数  $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ ,它是建立浮游植物生物量与色素光谱吸收关系的重要参数<sup>[4]</sup>,可以将现场的生物光学测量与卫星遥感数据相联系,从而在利用卫星遥感估测水体初级生产力中发挥着重要作用<sup>[5]</sup>. 比吸收系数曾被认为是一个常数,大约为  $0.016 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ <sup>[6]</sup>,然而目前很多学者认为它并非常量,会随着浮游植物群落结构、色素组成及包裹效应、生长环境和季节变化等变化<sup>[4,5,7]</sup>. 国内外关于浮游植物吸收和比吸收特性的研究以海洋居多<sup>[8,9]</sup>,然而因为浮游植物结构和组成的差异,内陆水体尤其是富营养化湖泊与海洋的差异性显著,目前对内陆水体尤其是湖泊这方面的研究欠缺,并且大部分集中在色素组成及包裹效应、浮游植物群落组成<sup>[4,7,10-12]</sup>或者随季节变化方面<sup>[13-14]</sup>.

本研究详细调查太湖、天目湖、博斯腾湖 3 个湖泊的富营养化代表性指标(透明度、总磷、总氮和叶绿素 a),按照综合营养指数法划分为 4 个不同的营养等级. 从此入手旨在研究湖泊浮游植物吸收系数和比吸收系数随水体营养程度的变化规律,加深对不同水体中比吸收系数变化规律的了解,为进一步研究水下光场与浮游植物相互关系、监测水质变化及湖泊水色遥感提供科学依据,为我国内陆水体光谱库积累数据. 同时通过湖泊营养状态评价,了解湖泊富营养化进程并预测其发展趋势,为湖泊水质管理如太湖水体富营养化的控制提供科学依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样时间和站 位

太湖水样(42 个样点)采自于 2004 年 8 月中旬,分布在梅梁湾等北部湖区;天目湖水样(10 个样点)采自于 2006 年 6、7、8 月每月中旬,较均匀地分布全湖;博斯腾湖水样(22 个样点)采自于 2010 年 8 月,较均匀地分布全湖. 野外采样均在风平浪静和小风浪条件下进行,使用中国科学院水生生物研究所研制的有机玻璃采水器采集表层水样(0~0.5 m),装入干净的塑料桶并置于冷藏箱内黑暗低温保存,带回实验室分析营养盐参数、颗粒物吸收系数以及浮游植物色素浓度等. 透明度(SD)现场用 30 cm 透明度盘测定.

### 1.2 理化参数测定和营养状态评价

总氮(TN)、总磷(TP)测定前采用碱性过硫酸钾消解,然后分别用紫外分光光度法、钼锑抗显色法进行测定. 叶绿素 a 的测定采用分光光度法:用 Whatman GF/F 滤膜过滤水样,然后将滤膜置于冰箱中冷冻 48 h 以上,取出用 90% 的热乙醇萃取,然后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665、750 nm 处吸光度,并加入 1 滴 1% 稀盐酸酸化,换算得到叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度. 浮游植物色素浓度为叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度之

和<sup>[15]</sup>,用 Chl. a 表示.

对水体营养状态评价重点选取了与水体富营养化密切相关的监测项目:透明度、总磷、总氮和叶绿素 a 浓度. 国内常用的评价湖泊富营养化程度的基本方法有:营养状态指数法(卡尔森营养状态指数;  $TSI$ )、修正的营养状态指数、综合营养状态指数( $TLI$ )、营养度指数法、评分法<sup>[16]</sup>. 以上几种方法在实际工作中都被采用,其中营养度指数法计算步骤繁琐、耗时长,不如综合营养指数法简便易行;评分法在实际应用过程中,受人为因素的干扰较多,影响结果的准确性. 因此,本文选取综合营养状态指数法评价湖泊富营养化程度.

评价项目选取了反映水体营养程度的主要指标,包括 Chl. a、TN、TP、SD 4 项. 综合营养状态指数为( $TLI(\Sigma)$ ):

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j TLI(j) \quad (1)$$

式中, $W_j$ 为第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为第  $j$  种参数的营养状态指数.

以 Chl. a 作为基准参数,则第  $j$  种参数的归一化的相关权重计算公式见表 1<sup>[17]</sup>. 各指标营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\text{Chl. a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl. a}) \quad (2)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP}) \quad (3)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (4)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (5)$$

表 1 中国湖泊部分参数与叶绿素 a 的相关关系  $r$  及  $r^2$  值

Tab. 1 The correlation between some parameters and chlorophyll-a in lakes of China

参数	Chl. a	TN	TP	SD
$r$	1.00	0.82	0.84	-0.83
$r^2$	1.00	0.67	0.71	0.69
$W_j (W_j = r^2 / \sum r_j^2)$	0.33	0.22	0.23	0.22

采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级: $TLI(\Sigma) < 30$  为贫营养; $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$  为中营养; $TLI(\Sigma) > 50$  为富营养,其中  $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$  为轻度富营养, $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$  为中度富营养, $TLI(\Sigma) > 70$  为重度富营养.

### 1.3 悬浮颗粒物吸收和比吸收系数测定与计算

悬浮颗粒物的吸收用定量滤膜技术(QFT)测定:用直径为 47 mm 的 Whatman GF/F 滤膜过滤 50~400 ml 水样(根据水里悬浮物浓度决定过滤的体积),在 UV-2401PC 型分光光度计下测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,为较少散射误差,被测滤膜尽量靠近分光光度计的接受窗口,在 350~800 nm 间每隔 1 nm 测定一个吸光度,用各波段的吸光度减去 750 nm 波长的吸光度,采用 Cleveland 等<sup>[17]</sup>提出的公式进行放大因子校正:

$$OD_s(\lambda) = 0.378 OD_f(\lambda) + 0.523 OD_f(\lambda)^2 \quad OD_f(\lambda) \leq 0.4 \quad (6)$$

式中, $OD_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜上悬浮颗粒物吸光度; $OD_f(\lambda)$ 为直接在仪器上测定的滤膜上悬浮颗粒物吸光度.

滤膜上悬浮颗粒物的光谱吸收系数计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (7)$$

式中, $V$ 为被过滤水样的体积, $S$ 为沉积在滤膜上的颗粒物的有效面积.

用 10~20 ml 热甲醇浸泡滤膜 4 h 左右,将色素萃取掉,滤膜上只剩下非藻类悬浮物颗粒物,使用同样浸泡过的空白滤膜作参比,按与总颗粒物吸收系数同样的测定方法得到非藻类吸收系数. 由于浮游植物颗粒物的吸收是非藻类颗粒物和藻类色素吸收的简单线性叠加,因而由总悬浮物颗粒物的光谱吸收系数  $a_p(\lambda)$  减去非藻类的光谱吸收系数  $a_d(\lambda)$  就得到浮游植物的光谱吸收系数  $a_{ph}(\lambda)$ <sup>[19]</sup>,公式为:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (8)$$

浮游植物比吸收系数是单位色素浓度吸收能力的大小,可以表示为浮游植物吸收系数  $a_{ph}(\lambda)$  与叶绿素 a 浓度 (Chl. a,  $\mu\text{g/L}$ ) 的比值,即:

$$a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/\text{Chl. a} \quad (9)$$

#### 1.4 统计分析

运用 SPSS 17.0 进行数据统计分析,包括计算平均值、中值、极值、标准差、方差等. 不同湖泊间参数差异性分析采用独立样品  $t$  检验,显著性水平  $P$  值小于 0.05 表示存在显著性差异.

## 2 结果与讨论

### 2.1 湖泊营养状态评价结果

利用综合营养状态指数法评价湖泊富营养化程度,太湖因湖泊面积较大,生态系统多样,空间异质性较大,逐个计算样点的综合权重后,这 42 个采样点可以划分为两类:其中 20 个点位为重度富营养,记为 T I;其余的 22 个为中度富营养,记为 T II;天目湖 6、7、8 月均为轻度富营养;而博斯腾湖 8 月则为中营养(表 2). 统计检验显示,重度富营养及中度富营养的太湖浮游植物色素、总磷浓度要显著高于轻度富营养的天目湖和中营养的博斯腾湖,而透明度则显著低于天目湖和博斯腾湖( $t$ -test,  $P < 0.05$ ). 研究结果与金相灿等<sup>[20]</sup>对太湖、张运林等<sup>[21]</sup>对天目湖、谢贵娟等<sup>[22]</sup>对博斯腾湖的评价结果一致. 本文结果一方面反映评价的合理性,另一方面也证明 3 个湖泊富营养水平近年来没有发生明显变化.

表 2 太湖、天目湖、博斯腾湖营养程度评价参数值及富营养化评价结果

Tab. 2 Parameter values of four assessment indexes and the evaluation result of eutrophication levels in Lake Taihu, Lake Tianmu and Lake Bositeng

湖泊	Chl. a/( $\mu\text{g/L}$ )	TN/( $\text{mg/L}$ )	TP/( $\text{mg/L}$ )	SD/m	TLI	富营养水平
太湖 T I	98.36 $\pm$ 30.5	2.45 $\pm$ 0.84	0.31 $\pm$ 0.08	0.20 $\pm$ 0.05	75.69	重度富营养
太湖 T II	29.25 $\pm$ 17.4	1.23 $\pm$ 0.27	0.14 $\pm$ 0.04	0.25 $\pm$ 0.04	64.78	中度富营养
太湖全部	62.16 $\pm$ 42.5	1.81 $\pm$ 0.87	0.22 $\pm$ 0.11	0.22 $\pm$ 0.05	—	—
天目湖 6 月	19.63 $\pm$ 3.91	1.06 $\pm$ 0.09	0.04 $\pm$ 0.01	1.12 $\pm$ 0.19	51.59	轻度富营养
天目湖 7 月	12.41 $\pm$ 2.37	1.95 $\pm$ 0.86	0.03 $\pm$ 0.005	0.99 $\pm$ 0.24	51.98	轻度富营养
天目湖 8 月	29.18 $\pm$ 7.61	1.48 $\pm$ 0.30	0.08 $\pm$ 0.02	1.19 $\pm$ 0.17	56.57	轻度富营养
天目湖全部	20.39 $\pm$ 8.54	1.50 $\pm$ 0.63	0.05 $\pm$ 0.02	1.10 $\pm$ 0.21	—	—
博斯腾湖	2.80 $\pm$ 0.81	1.02 $\pm$ 0.28	0.006 $\pm$ 0.01	2.10 $\pm$ 0.81	34.60	中营养

### 2.2 浮游植物吸收系数

浮游植物是湖泊中最主要的初级生产者,440 nm 和 675 nm 附近是浮游植物的特征吸收波段,675 nm 主要是叶绿素 a 贡献,而 440 nm 除了叶绿素还可以反映辅助色素的贡献,因此在国际上被广泛应用于表征浮游植物对光的吸收能力. 在不同的营养状态下,浮游植物的吸收光谱在 440、675 nm 附近有两个吸收峰,但同一营养状态下不同采样点之间由于色素浓度有所差异,相应的浮游植物的吸收系数变化也不同(图 1). 3 个湖泊 4 个不同的营养状态在 440 和 675 nm 处的吸收系数( $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ )的变化范围分别为:太湖 T I 0.35 ~ 2.13、0.20 ~ 1.38  $\text{m}^{-1}$ ,太湖 T II 0.27 ~ 1.58、0.12 ~ 0.89  $\text{m}^{-1}$ ,天目湖 0.41 ~ 1.18、0.23 ~ 0.66  $\text{m}^{-1}$ ,博斯腾湖 0.12 ~ 0.31、0.02 ~ 0.13  $\text{m}^{-1}$ ,均值分别为太湖 T I 1.02  $\pm$  0.51、0.59  $\pm$  0.32  $\text{m}^{-1}$ ,太湖 T II 0.69  $\pm$  0.40、0.38  $\pm$  0.23  $\text{m}^{-1}$ ,天目湖 0.78  $\pm$  0.24、0.41  $\pm$  0.13  $\text{m}^{-1}$ 和博斯腾湖 0.20  $\pm$  0.04、0.08  $\pm$  0.02  $\text{m}^{-1}$ ,不难看出重度富营养的太湖 T I 的浮游植物吸收系数最大,中度富营养状态的太湖 T II 与轻度富营养的天目湖浮游植物吸收系数均值相差不多,而中营养的博斯腾湖最小. 另外将太湖的 42 个采样点作为整体来看,浮游植物吸收系数相对于天目湖、博斯腾湖变化范围最大,但就太湖 T I 和太湖 T II 来说,即使是同一湖泊,但因营养水平的差异,浮游植物吸收系数变化范围和均值差异仍很显著. 原因在于太湖湖面面积大,生态系统类型多样,加之其属于浅水湖泊,沉积物容易再悬浮,开敞水域水体无机颗粒物比较高,各点之间浮游植物色素浓度和吸收系数的差异较其他水体大得多.

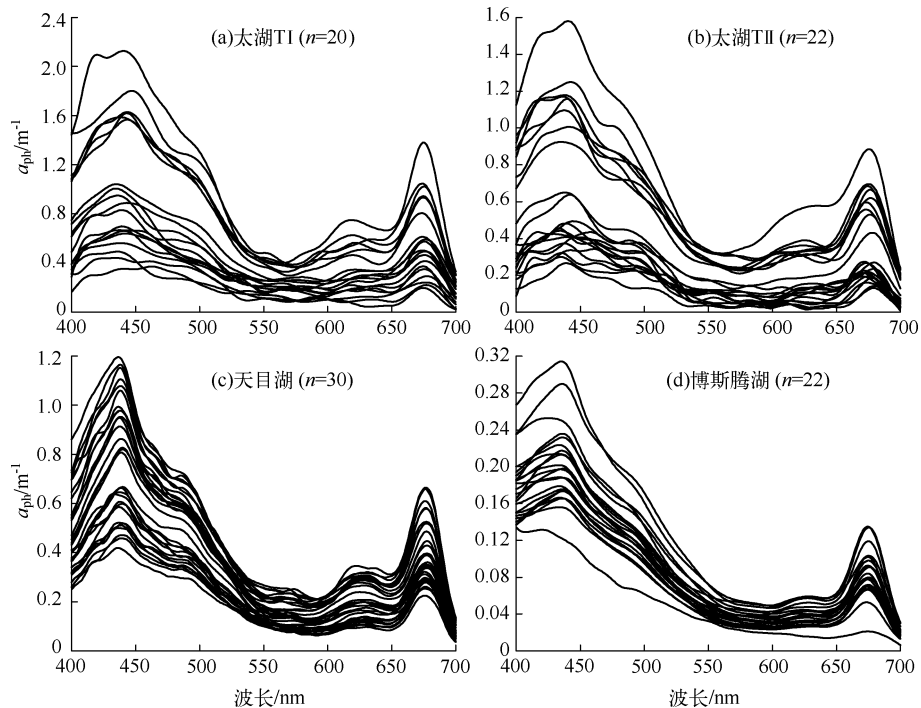


图 1 400 ~ 700 nm 浮游植物吸收系数曲线:太湖 T I (a)、太湖 T II (b)、天目湖 (c)、博斯腾湖 (d)

Fig. 1 Absorption coefficient spectra of phytoplankton at 400 – 700 nm in Lake Taihu T I (a), Lake Taihu T II (b), Lake Tianmu (c) and Lake Bositing (d)

3 个湖泊浮游植物吸收系数平均值的比较可以明显看出,浮游植物吸收系数随营养水平的变化情况:重度富营养的太湖 T I > 轻度富营养的天目湖 > 中度富营养的太湖 T II > 中营养的博斯腾湖 (图 2). 总体来看,太湖和天目湖属于富营养化湖泊,浮游植物吸收系数明显高于中营养的博斯腾湖 ( $t$ -test,  $P < 0.01$ ),这充分反映了随营养程度增加,浮游植物吸收系数逐渐增加. 由于本文水样采集均选择在夏季的 6–8 月,浮游植物密度较高,其吸收系数的分离也较为准确,获得的不同湖泊浮游植物吸收系数具有可比性. 但天目湖浮游植物略高于太湖 T II 可能是因为太湖风浪较大,底泥易发生再悬浮,造成非藻类悬浮颗粒物含量增加而表层的藻类被悬浮到下层水体,因此影响浮游植物的吸收系数,使其偏小. 另外 440 nm 处受非藻类颗粒物的影响较 675 nm 明显,因此 675 nm 处二者的差距更小一些 (图 2). 尽管有关浮游植物吸收系数随湖泊营养程度增加而增加的报告很少见,但在大洋水体的许多研究均显示,浮游植物吸收系数随营养程度的增加显著上升<sup>[23-24]</sup>.

浮游植物吸收系数主要受水体中浮游植物的色素浓度及种群组成的影响,而群落结构的组成与湖泊的营养状态密切相关. 叶绿素 a 是水体富营养化的重要指标,浮游植物的吸收系数随着叶绿素 a 浓度的变化而变化. 4 种营养状态的湖泊水体,相应的叶绿素 a 变化范围及均值为:太湖 T I 47.67 ~ 171.01,  $98.36 \pm 30.50 \mu\text{g/L}$ ,太湖 T II 8.51 ~ 68.25,  $31.04 \pm 17.20 \mu\text{g/L}$ ,天目湖 9.75 ~ 38.6,  $6.20, 39 \pm 8.55 \mu\text{g/L}$ ,博斯腾湖 0.96 ~ 4.39,  $2.80 \pm 0.81 \mu\text{g/L}$ . 统计结果显示,太湖 T I 的叶绿素 a 浓度显著大于太湖 T II、天目湖和博斯腾湖 ( $t$ -test,  $P < 0.01$ ). 湖泊营养状态的差异导致叶绿素 a 浓度间的差异,进而影响到浮游植物吸收系数的差异. 在远海 I 类水体和河口区、沿岸带等 II 类水体的一些研究结果均显示,浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度存在线性或者非线性关系,如 Bricaud 等<sup>[25]</sup>对海洋水体探究显示两者有很好的线性关系,时志强等<sup>[26]</sup>对武汉东湖、梁子湖、洪湖的探究也得到很好的线性关系, Bricaud 等<sup>[27]</sup>在海区的 I 类和 II 类水体的研究显示呈指数函数关系. 本文对不同营养状态湖泊的研究结果与其他地区内陆湖泊的研究结果比较一致,显示两

者有很好的线性关系. 不同营养水平湖泊浮游植物吸收系数与各自叶绿素 a 浓度的线性拟合曲线可以看出, 浮游植物在 440 和 675 nm 处的吸收系数都随水体叶绿素 a 浓度的增加呈线性增加, 线性关系很好地反映了浮游植物吸收系数随叶绿素 a 浓度的变化(图 2).

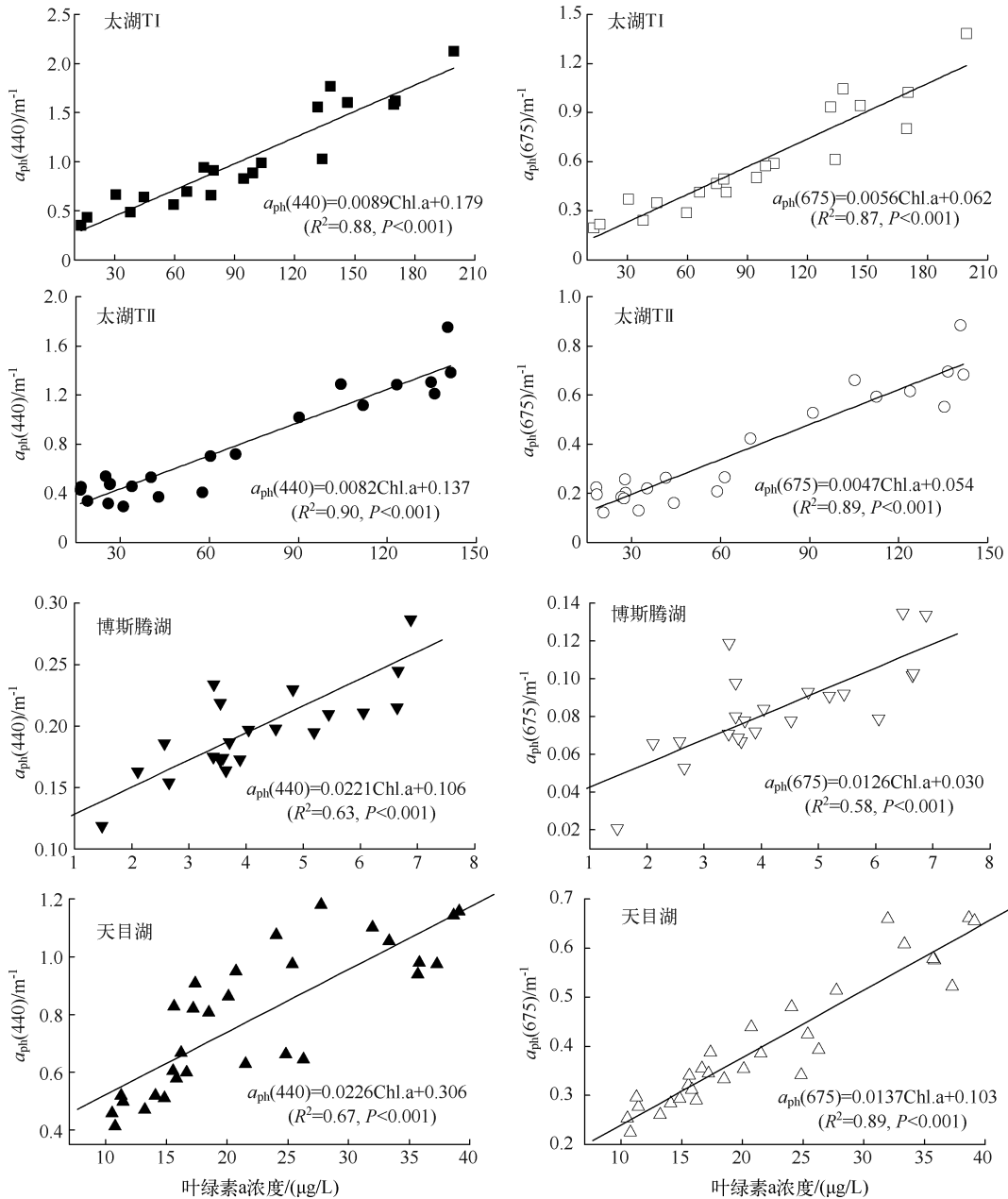


图 2 不同营养水平湖泊浮游植物吸收系数  $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$  与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 2 Correlations between phytoplankton absorption coefficients  $a_{ph}(440)$ ,  $a_{ph}(675)$  and chlorophyll-a concentration in different trophic level lakes

### 2.3 浮游植物比吸收系数

浮游植物比吸收系数表征的是单位叶绿素 a 浓度对光的吸收能力, 它随水体不同营养水平、不同地区、

不同季节、不同光照条件和浮游植物群落结构的变化而变化. 而在这众多的影响因素中, 水体的营养水平往往起到关键作用, 因为水体的营养水平在很大程度上决定水下光照条件和浮游植物的群落结构. 一般贫营养水体浮游植物比吸收系数高于富营养水体,  $a_{ph}^*$  (440) 的变化范围为  $0.01 \sim 0.18 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$  [27]. 本文 4 种营养状态湖泊水体 440、675 nm 波长的比吸收系数变化范围分别是: 太湖 T I  $0.008 \sim 0.027$ ,  $0.003 \sim 0.015 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 太湖 T II  $0.006 \sim 0.023$ ,  $0.004 \sim 0.013 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 天目湖  $0.02 \sim 0.05$ ,  $0.01 \sim 0.03 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 博斯腾湖  $0.03 \sim 0.08$ ,  $0.00 \sim 0.04 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 相应的均值为: 太湖 T I  $0.013 \pm 0.006$ ,  $0.007 \pm 0.003 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 太湖 T II  $0.012 \pm 0.004$ ,  $0.006 \pm 0.002 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 天目湖  $0.038 \pm 0.008$ ,  $0.019 \pm 0.003 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ , 博斯腾湖  $0.051 \pm 0.013$ ,  $0.020 \pm 0.007 \text{ m}^2/\text{mg Chl. a}$ . 统计检验显示, 太湖浮游植物比吸收系数显著小于天目湖, 而天目湖浮游植物比吸收系数又显著小于博斯腾湖 ( $t$ -test,  $P < 0.01$ ). 400 ~ 700 nm 范围浮游植物比吸收系数光谱曲线明显看出 3 个湖泊比吸收系数的变化情况 (图 3): 博斯腾湖 > 天目湖 > 太湖, 按照水体营养状态来看, 大体上随着水体富营养状态的增加而降低, 只是重度富营养的太湖 T I 和中度富营养的太湖 T II 比吸收系数数值很接近, 原因在于太湖 T I 和太湖 T II 虽然浮游植物吸收系数差异显著, 但太湖 T I 的叶绿素 a 浓度较太湖 T II 大的多, 因此太湖 T I 和太湖 T II 的比吸收系数差异并不明显, 其深层次原因是浮游植物群落组成和细胞粒径差异不明显. 由于本研究中 3 个湖泊的采样均选择在夏季, 因此浮游植物比吸收系数的差异很大程度上归因于水体的营养水平, 因此也进一步证实了富营养水体的浮游植物比吸收系数低于贫营养水体的事实, 与张运林 [2] 在太湖与海洋的比较分析结果一致.

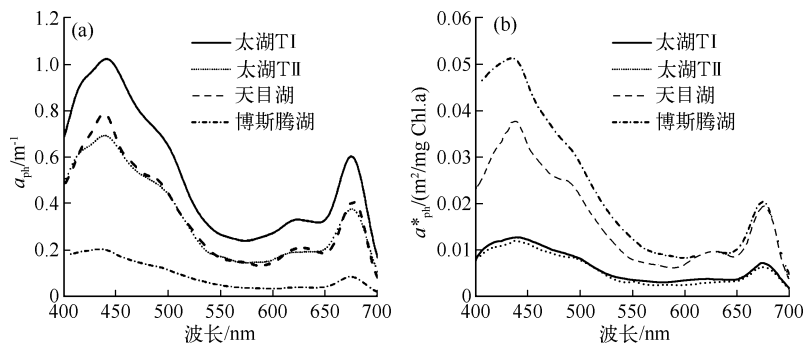


图 3 不同营养水平湖泊 400 ~ 700 nm 浮游植物吸收系数 (a) 和比吸收系数 (b) 变化曲线

Fig. 3 Phytoplankton absorption coefficient spectra (a) and chlorophyll-specific absorption coefficient spectra (b) at 400 - 700 nm in different trophic level lakes

浮游植物比吸收系数随湖泊营养程度增加而降低可归于色素包裹效应. 随着湖泊营养程度增加浮游植物色素浓度明显增加, 相应地色素的包裹效应增加, 使得浮游植物比吸收系数下降 [28-29]. 浮游植物的比吸收系数和叶绿素 a 之间的关系因为受到色素包裹效应的影响多为非线性的, 本研究的相关分析发现, 除了博斯腾湖在 675 nm 处之外, 其他湖泊在 440 nm 和 675 nm 浮游植物比吸收系数和叶绿素 a 浓度之间存在显著的负相关关系 (ANOVA,  $P < 0.05$ ), 即单位浓度的叶绿素 a 对光的吸收能力逐渐减小, 证明了这 2 个波段色素包裹效应的存在. 就 3 个湖泊在 440 nm 和 675 nm 处浮游植物比吸收系数和叶绿素 a 浓度整体分析而言, 这 2 个波段浮游植物比吸收系数与叶绿素 a 浓度存在显著的负相关关系, 且 440 nm 比吸收系数变化更快 (图 4). 与王桂芬等 [5] 对南海北部的研究结果相比, 浮游植物比吸收系数在 440 nm 处变化更慢, 而 675 nm 处变化稍快.

### 3 结论

1) 利用综合营养状态指数法评价 8 月份太湖 T I、太湖 T II、6-8 月份天目湖及 8 月份博斯腾湖的营养状态分别为: 重度富营养、中度富营养、轻度富营养和中营养, 在此阶段 3 个湖泊存在明显营养梯度.

2) 3 个湖泊的浮游植物吸收系数在 440 和 675 nm 有明显的吸收峰, 440、675 nm 处浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度存在显著正相关, 线性关系很好地反映浮游植物吸收系数随叶绿素 a 浓度的变化.

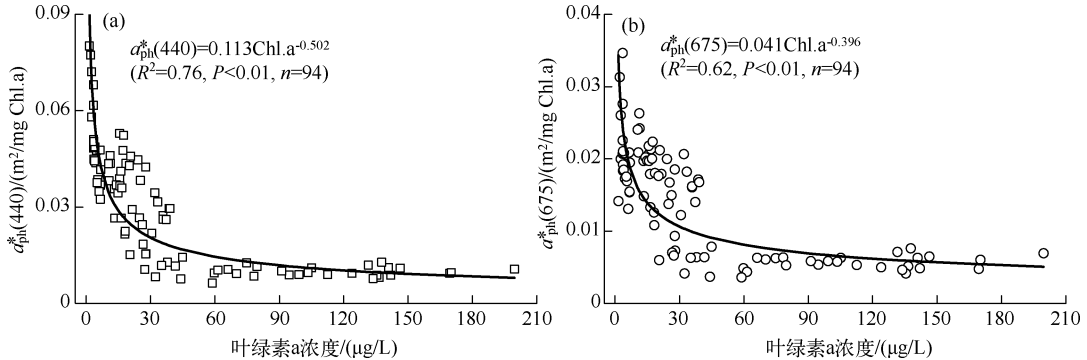


图4 浮游植物比吸收系数与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 4 Correlations between chlorophyll-specific absorption coefficient and chlorophyll-a concentration of phytoplankton

3) 浮游植物比吸收系数和吸收系数光谱相似,在 440 和 675 nm 有明显的吸收峰,但是浮游植物比吸收系数和叶绿素 a 浓度呈现显著的负相关关系,证明了色素包裹效应的存在。

4) 随着富营养水平的增加,由于浮游植物色素浓度增加其吸收系数逐渐增大,而色素包裹效应的存在导致浮游植物比吸收系数明显降低。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Le C, Li Y, Zha Y *et al.* Specific absorption coefficient and the phytoplankton package effect in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2009, **619**(1): 27-37.
- [ 2 ] 张运林. 太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005.
- [ 3 ] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 266-271.
- [ 4 ] Millán-Núñez E, Millán-Núñez R. Specific absorption coefficient and phytoplankton community structure in the southern region of the California current during January 2002. *Journal of Oceanography*, 2010, **66**(5): 719-730.
- [ 5 ] 王桂芬, 曹文熙, 许大志等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化. *热带海洋学报*, 2005, **24**(5): 1-10.
- [ 6 ] Bannister T. Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield, and upper limit to production. *Limnology and Oceanography*, 1974, **19**(1): 1-12.
- [ 7 ] Suzuki K, Kishino M, Sasaoka K *et al.* Chlorophyll-specific absorption coefficients and pigments of phytoplankton off Sanriku, Northwestern North Pacific. *Journal of Oceanography*, 1998, **54**(5): 517-526.
- [ 8 ] Vantrepotte V, Brunet C, Mériaux X *et al.* Bio-optical properties of coastal waters in the Eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **72**(1): 201-212.
- [ 9 ] Organelli E, Nuccio C, Melillo C *et al.* Relationships between phytoplankton light absorption, pigment composition and size structure in offshore areas of the Mediterranean Sea. *Advances in Oceanography and Limnology*, 2011, **2**(2): 107-123.
- [ 10 ] Dupouy C, Neveux J. Spectral absorption coefficient of photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific Ocean (165°11' - 150°W). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1997, **44**(9/10): 1881-1906.
- [ 11 ] Uitz J, Huot Y, Bruyant F *et al.* Relating phytoplankton photophysiological properties to community structure on large scales. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(2): 614-630.
- [ 12 ] Yoshimura K, Zaitsu N, Sekimura Y *et al.* Parameterization of chlorophyll a-specific absorption coefficients and effects of their variations in a highly eutrophic lake: a case study at Lake Kasumigaura, Japan. *Hydrobiologia*, 2012, **691**(1): 1-13.
- [ 13 ] Ferreira A, Garcia VMT, Garcia CAE. Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and dissolved organic matter at the Patagonia shelf-break in spring and summer. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, **56**(12): 2162-2174.



- [14] Sun D, Li Y, Wang Q *et al.* Parameterization of water component absorption in an inland eutrophic lake and its seasonal variability: a case study in Lake Taihu. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(13): 3549-3571.
- [15] 黄祥飞,陈伟民,蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社,2000:138-270.
- [16] 荆红卫,华 蕾,孙成华等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析. *湖泊科学*,2008,**20**(3):357-363.
- [17] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京:海洋出版社,1995.
- [18] Cleveland J, Weidemann AD. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(6): 1321-1327.
- [19] 张运林,秦伯强,杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. *生态学报*,2006,**26**(12):3969-3979.
- [20] 金相灿,王圣瑞,庞 燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响. *中国环境科学*,2004,**24**(6):707-711.
- [21] 张运林,陈伟民,杨顶田等. 天目湖 2001 ~ 2002 年环境调查及富营养化评价. *长江流域资源与环境*,2005,**14**(1): 99-103.
- [22] 谢贵娟,张建平,汤祥明等. 博斯腾湖水水质现状(2010—2011 年)及近 50 年来演变趋势. *湖泊科学*,2011,**23**(6): 837-846.
- [23] Bricaud A, Claustre H, Ras J *et al.* Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**, C11010. doi:10.1029/2004JC002419.
- [24] Cao W, Yang Y, Liu S *et al.* Spectral absorption coefficient of phytoplankton and its relation to chlorophyll a and remote sensing reflectance in coastal waters of southern China. *Progress in Natural Science*, 2005, **15**(4): 342-350.
- [25] Bricaud A, Morel A, Babin M *et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103** (C13): 31033-31044.
- [26] 时志强,张运林,刘明亮等. 湖北东湖,梁子湖和洪湖颗粒物吸收光谱特征分析. *长江流域资源与环境*,2011,**20** (6):736-743.
- [27] Bricaud A, Babin M, Morel A *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [28] Lazzara L, Bricaud A, Claustre H. Spectral absorption and fluorescence excitation properties of phytoplanktonic populations at a mesotrophic and an oligotrophic site in the tropical North Atlantic (EUMELI program). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1996, **43**(8): 1215-1240.
- [29] Babin M, Stramski D, Ferrari GM *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**:3211. doi:10.1029/2001JC000882.