

## 湖泊光学研究进展及其展望\*

张运林

(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)

**摘要:** 从湖泊光学研究理论框架、研究方法、水体生物光学特性、有色可溶性有机物(CDOM)生物地球化学循环、光与浮游植物相互关系、沉积物再悬浮光学效应、湖泊水色遥感等几个方面全面回顾了湖泊光学研究进展. 湖泊光学研究理论框架主要包括各光学组份吸收、散射、漫射衰减及辐射传输方程; 近年来, 逐步发展了野外时空格局调查、水动力水华过程连续观测、生物光学参数高频自动监测、室内模拟控制实验等相结合的一系列研究方法; 水体生物光学特性方面, 开展了大量不同类型湖泊水体颗粒物吸收、散射、后向散射、漫射衰减、真光层深度的野外测定, 获得了固有、表观光学特性之间相互关系以及与光学组份浓度之间定量关系; CDOM生物地球化学循环方面, 利用CDOM光谱吸收、三维荧光技术定量表征了CDOM空间分布、来源、组成差异、消除途径及对紫外辐射衰减影响程度; 光与浮游植物相互关系方面, 获得UV-B辐射对浮游植物生长影响, 发展了浮游植物初级生产力计算的垂向归纳模型; 沉积物再悬浮光学效应方面, 发现沉积物再悬浮显著影响光场结构, 降低透明度和真光层深度进而降低湖泊初级生产力; 湖泊水色遥感方面, 建立了湖泊水质参数悬浮物、叶绿素a浓度及浮游植物、CDOM吸收系数等遥感反演算法, 并应用到卫星影像对富营养化湖泊蓝藻水华开展遥感监测. 最后, 基于以上几个方面湖泊光学的研究现状, 从微观和宏观不同层面就湖泊光学研究进一步发展做出了展望.

**关键词:** 湖泊光学; 固有光学特性; 表观光学特性; 有色可溶性有机物; 初级生产力

## Progress and prospect in lake optics: A review

ZHANG Yunlin

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

**Abstract:** This paper reviews the study progress of lake optics including the theory framework, study methods, bio-optical properties, chromophoric dissolved organic matter (CDOM) biogeochemical cycle, relationships between light and phytoplankton, optical effect of sediment resuspension, lake water color remote sensing. The theory framework of lake optics includes absorption, scattering and attenuation of four optically active substances (pure water, CDOM, phytoplankton and tripton) and the water radiation transfer equation. A series of methods including the field investigation of spatial-temporal pattern of lake optics, the successive observation of hydrodynamic and algal bloom processes, high frequent observation of bio-optical parameters, the experiment controlled and simulated are presented. The spatial-temporal patterns of particles absorption, scattering, backscattering, diffuse attenuation coefficients and euphotic depth in different lakes are obtained, and the interrelationship of particles absorption, scattering, backscattering, diffuse attenuation coefficients, euphotic depth and the concentrations of optically active substances are presented. CDOM spectral absorption coefficient, excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy are used to characterize the spatial-temporal distribution, source, composition, removal and the contribution of CDOM to ultraviolet radiation attenuation. There is also considerable evidence that ultraviolet B radiation has an effect on phytoplankton growth and community structure. A vertically generalized production model of primary production is widely used to estimate phytoplankton primary production. Sediment resuspension has a significant effect on underwater light climate, which decreases transparency and euphotic depth, and further decreases phytoplankton primary production. Many algorithms are presented to estimate several water quality parameters including total suspended mat-

\* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-QN312)、国家自然科学基金项目(40971252, 40825004)、江苏省自然科学基金项目(BK2009336)、香港研究资助局项目(CUHK454909)和香港创新及技术基金(ITS/058/09FP)联合资助. 2011-02-14 收稿; 2011-04-11 收修改稿. 张运林, 男, 1976年生, 研究员; E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn.

ter, chlorophyll-a concentrations and CDOM, phytoplankton absorption coefficients. These results are applied to satellite images for the monitoring of algal bloom in eutrophic lakes. Finally, the future developments of lake optics from the macro and microscopic perspectives have been expected.

**Keywords:** Lake optics; inherent optical properties; apparent optical properties; chromophoric dissolved organic matter; primary production

湖泊光学是研究湖泊水体光学性质、光在湖泊水体的传输分布规律及运用光学技术探测湖泊的科学,是湖沼学与光学的交叉学科,属于物理湖泊学范畴。湖泊光学的研究理论框架起源于海洋光学,其基本理论就是光的吸收、散射、衰减、水体辐射传输方程,最易获取的测量参数是水体透明度。湖泊光学与湖泊物理过程、化学过程及生物生态过程密切相关。测定湖水的光学性质、浑浊度可为研究湖流、波浪的环境效益提供一种有效监测指标。随机湖面的光学研究,为遥测波浪方向谱建立了物理模型,并可为现场测定波浪要素提供快速有效的手段。水下辐照的强度、光谱分布与湖泊中一些光化学过程,湖泊浮游植物、沉水植物分布及初级生产力的估算密切相关,如辐照强度、真光层深度是浮游植物初级生产力方程的主要参数。探测湖泊等内陆水体的光学遥感传感器的波段、视场角和动态范围等参数要根据湖泊光谱辐射的数据来确定,而湖泊中辐射传递理论更是水色光学遥感方法的基础。

我国湖泊光学的研究主要起步于 1990s,近 10 年来得到迅速发展,其迅猛发展得益于以下几个方面:(1) 太阳辐射是驱动湖泊生态系统的最基本源动力,湖泊物理、化学、生物、生态过程都受制于此;(2) 1980s 初观测到南极臭氧层的空洞使得到达地表的紫外辐射特别是 UV-B 辐射增强,给湖泊生物个体、群落和生态系统都带来了负面影响;(3) 湖泊富营养化过程、水环境恶化,频繁水污染事件及蓝藻水华大范围长时间暴发迫切需要开展湖泊水质和蓝藻水华遥感监测;(4) 全球气候变暖背景下需要知道湖泊等内陆水体碳循环速率及碳通量,而影响光辐射传输的溶解性有机物是重要的溶解性有机碳库。正是由于湖泊光学的迅速发展,需要对过去十几年的研究进行系统梳理,本文从湖泊光学研究理论框架、研究方法、水体生物光学特性、有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter; CDOM)生物地球化学循环、光与浮游植物相互关系、沉积物再悬浮光学效应、湖泊水色遥感等几个方面全面回顾了湖泊光学研究进展,并对未来发展作出展望。

## 1 理论框架

湖泊光学研究的基本理论就是光的吸收、散射、衰减、水体辐射传输。从水光学角度分类,影响光辐射在水体内传输分布的成分主要有 4 种,即纯水、CDOM、浮游植物和非色素颗粒物,浮游植物和非色素颗粒物又统称为颗粒物,而 CDOM 和非色素颗粒物由于其光谱吸收形状比较一致,在海洋光学研究中有时又一起被称为有色碎屑物<sup>[1]</sup>。

太阳辐射进入水体后要受到纯水、浮游植物、非色素颗粒物的吸收和散射,而 CDOM 一般被认为只有吸收没有散射<sup>[2]</sup>。如果进入水体的太阳光全为直射光,在水体内的衰减则为光束衰减,是吸收与散射之和,均为固有光学特性。但实际上任何时候都有漫射光,因而引入了漫射衰减系数来表示光在不同水层的衰减程度,为表观光学特性。固有光学特性(Inherent Optical Properties, IOPs)指只与水体光学组份有关而不随光照条件变化而变化的光学特性,表征水体固有光学特性的参数有纯水、CDOM、浮游植物和非色素颗粒物光束衰减系数、吸收系数、散射系数、后向散射系数、它们的比吸收、比散射系数以及体散射函数等<sup>[2]</sup>。根据 Lambert Beer 定律,水体的总光束衰减系数、吸收系数、散射系数、后向散射系数可表示为各种光学成份光束衰减系数、吸收系数、散射系数、后向散射系数的线性相加<sup>[2]</sup>。表观光学特性(Apparent Optical Properties, AOPs)是指不但与水体光学组份有关,而且会随光场条件(如太阳高度角、直射光漫射光比例等)变化而变化的光学特性,表征表观光学特性的参数有向上向下辐照度、向上向下辐亮度、离水辐射率、漫射衰减系数、真光层深度、辐照度比、遥感反射率等<sup>[2]</sup>。生物光学特性包括水体光学成份的固有光学特性、表观光学特性的定量描述,表观光学特性与固有光学特性之间的关系以及表观光学特性、固有光学特性与各光学组份浓度的关系。

表观光学特性是入射太阳光与水体固有光学特性相互作用的结果和产物。对于特定的太阳辐射场,即特定的太阳高度角、漫射太阳光的角分布,表观光学特性可以由固有光学特性计算得到。

向下辐照度的漫射衰减系数  $K_d(\lambda)$  可以用下式来描述<sup>[2]</sup>:

$$K_d(\lambda) = \frac{1}{\mu_0} [a(\lambda)^2 + G(\mu_0)a(\lambda)b(\lambda)]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $a(\lambda)$ 、 $b(\lambda)$  为总吸收、总散射系数 ( $\text{m}^{-1}$ );  $\mu_0$  为刚好水面下入射太阳光的折射角余弦值.  $G(\mu_0)$  表示散射对垂直衰减的相对贡献, 可以表示为<sup>[2]</sup>:

$$G(\mu_0) = g_1\mu_0 - g_2 \quad (2)$$

对整个真光层深度计算  $K_d(\lambda)$  时  $g_1$ 、 $g_2$  值分别为 0.425、0.190, 对 1/2 真光层深度计算  $K_d(\lambda)$  时  $g_1$ 、 $g_2$  值分别为 0.473、0.218<sup>[3]</sup>.

向上辐照度与向下辐照度比值即辐照度比  $R(\lambda, 0)$  可以用后向散射和吸收系数来表示<sup>[4]</sup>:

$$R(\lambda, 0) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (3)$$

式中,  $b_b(\lambda)$  为总后向散射系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $a(\lambda)$  为总吸收系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $f$  为系数, Spinrad 等<sup>[3]</sup> 用蒙特-卡罗模型得出  $f$  为  $\mu_0$  的函数:

$$f(\mu_0) = -0.629\mu_0 + 0.975 \quad (4)$$

水面下和水上遥感反射率可以用下式表示<sup>[2]</sup>:

$$R_{rs}(\lambda, 0^-) = L_u(\lambda, 0^-)/E_d(\lambda, 0^-) = \frac{E_u(\lambda, 0^-)}{Q \cdot E_d(\lambda, 0^-)} = \frac{R(\lambda, 0^-)}{Q} = \frac{(0.975 - 0.629\mu_0)}{Q} \cdot \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (5)$$

$$R_{rs}(\lambda, 0^+) = 0.544R_{rs}(\lambda, 0^-) = \frac{0.544(0.975 - 0.629\mu_0)}{Q} \cdot \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (6)$$

式中,  $R_{rs}(\lambda, 0^-)$ 、 $R_{rs}(\lambda, 0^+)$  为水面下、水面上遥感反射率;  $L_u(\lambda, 0^-)$ 、 $E_u(\lambda, 0^-)$ 、 $E_d(\lambda, 0^-)$  分别为水面处向上辐亮度、向上、向下辐照度;  $Q$  为几何因子, 可以由  $\mu_0$  计算得到.

## 2 研究方法

### 2.1 时空格局调查及野外室内测定

湖泊光学野外调查研究不同于一般的湖泊物理、化学和生物生态调查, 对一些表观光学参数的测定必须是天气晴好并且太阳高度角比较大的条件下开展, 如春、夏、秋季开展光辐射垂直剖面测定以及水面遥感反射率的测定宜在 9:00-17:00 进行, 而冬季宜在 10:00-16:00. 此外为了开展湖泊水质遥感反演模型并进行遥感影像的应用与验证, 许多情况下的光学野外调查必须与卫星过境同步开展, 特别是一些航空飞行试验. 当然对于光学组份浓度的调查以及固有光学参数的测定其要求不需要这么严格, 与正常的湖泊物理、化学、生物生态野外调查基本类似.

湖泊光学野外调查的目的地是获得水体固有和表观光学特性的时空分布规律. 表观和固有光学特性野外现场测定有两种方法, 即垂直剖面测量法和水面以上测量法. 其中吸收系数、散射系数、后向散射系数通过垂直剖面测定可以获得这些参数的垂直变化, 而漫射衰减、真光层深度等表观光学参数一般通过水下光谱垂直剖面测定不同水层的辐照度进而计算得到<sup>[5]</sup>. 而辐照度比、遥感反射率等参数则一般采用水面以上测量法<sup>[6]</sup>. 目前商业上被广泛使用的水体生物光学特性野外原位测定仪器有美国 Wetlabs 公司的 AC-9 (AC-S) 吸收仪、Bb9 后向散射仪、CDOM 吸收仪; 美国 HOBI 实验室的 HydroScat-6 后向散射仪、德国 TRIOS 公司不同波长系列的辐亮度、辐照度水下光谱仪及 CDOM 吸收仪; 美国 ASD 公司、SVC 公司不同波长系列的地物光谱仪. 生物光学特性的实验室测定主要包括 CDOM、浮游植物、非色素颗粒物光谱吸收系数测定, 在分光光度计上测定吸光度然后计算得到<sup>[7-8]</sup>. 早期颗粒物吸收测定一般采用透射法 ( $T$  方法), 最近一些研究提倡对于浑浊水体颗粒吸收测定透射-反射法 ( $T-R$  方法) 更准确<sup>[9-10]</sup>, 并且从早期直接在分光光度计上测定发展

到用带积分球的分光光度测定<sup>[10]</sup>. 而对于颗粒物散射和后向散射系数没有统一的标准实验测定方法, 一种可替换的方法就是通过光束衰减系数、颗粒物和 CDOM 吸收系数的测定近似计算获得颗粒物散射吸收和后向散射系数.

## 2.2 关键过程连续观测

野外时空格局调查往往只能获得生物光学特性现状的描述, 无法获知影响生物光学特性变化的一些过程与机理. 就湖泊生态系统而言, 影响水体生物光学特性及光学组份浓度的主要关键过程有水动力扰动、蓝藻水华、河流输入等过程. 过去十年湖泊光学的发展除了开展大量野外同步协同观测外, 逐步建立了水动力水华过程中水体生物光学特性和光学组份浓度的连续观测. 通过在野外原位搭建临时观测平台, 在不同风浪和水华过程中同步开展风速风向、波浪湖流、水下光场、水化学参数、初级生产力的测定<sup>[5]</sup>, 旨在揭示风浪与沉积物再悬浮及生物光学特性、初级生产力之间的内在联系, 水华发生发展消亡过程中水体生物光学特性的响应机制.

## 2.3 生物光学参数高频自动监测

过程的连续观测尽管能捕捉到部分典型过程, 但毕竟人工布局进行观测, 监测的密度和频率不会太高, 并且时间序列上都是“离散”的, 往往无法捕捉到水动力、蓝藻水华过程短时间尺度上对水体生物光学特性的影响. 随着监测和观测技术的迅速发展, 现在逐步发展起来的一些生物光学特性监测仪器已能开展高频自动监测, 比方说美国 Wetlabs 公司生产的总吸收仪、颗粒物后向散射仪、CDOM 吸收、叶绿素 a、藻蓝素监测探头, 德国 TRIOS 公司生产的 CDOM 吸收探头都能开展野外原位连续高频监测<sup>[11-12]</sup>, 监测时间间隔可以从 1min 到 1h 不等. 生物光学特性的高频自动监测实现了许多在以往传统监测方法中无法获取的实时数据和现象, 更有助于我们进一步开展湖泊光学的一些过程与机理研究. 目前我们已在太湖布设了一套 Wetlabs 公司的生物光学特性高频自动监测系统.

## 2.4 室内及原位模拟控制实验

过程观测和高频监测能够获得某些关键过程中生物光学特性的变化, 但由于野外现场的复杂性和不可控制性, 许多因素交织在一起, 很难分离出某一种因素的影响和贡献, 无法解释湖泊光学中的一些机理问题. 而室内及原位模拟控制实验通过对影响要素进行简单化和单一化处理, 能够有效分离单要素对湖泊水体生物光学、水下光场结构的影响机制及水下光场变化后的一些环境和生态效益. 相关的一些控制实验包括纯藻及颗粒物对吸收、比吸收、遥感反射率的影响<sup>[13-15]</sup>; 模拟及现场原位紫外辐射对浮游植物、浮游动物等及 CDOM 光化学降解的影响<sup>[16-20]</sup>, 生物生长降解对颗粒物吸收及 CDOM 吸收和荧光的影响<sup>[21-22]</sup>, 模拟动力扰动对水下光场及初级生产力的影响等<sup>[23]</sup>.

# 3 水体生物光学特性

## 3.1 固有光学特性

由于纯水的吸收和散射近似为常数, 而 CDOM 吸收后面会单列专门讨论, 因此这里探讨的水体固有光学特性仅针对颗粒物的吸收、散射和后向散射.

颗粒物吸收是水色遥感的生物-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. 随着近十年湖泊水色遥感中分析模型和半分析模型的广泛使用, 为发展区域生物光学模式, 许多湖泊都开展了颗粒物吸收的测量、计算、数值分离及分析, 探讨了吸收系数与总悬浮物、非色素颗粒物和浮游植物叶绿素 a 浓度之间的定量关系, 获得了非色素颗粒物和浮游植物比吸收系数<sup>[5, 7-8, 24-31]</sup>. 不同湖泊水体颗粒物浓度、组成、粒径存在很大差异, 因此颗粒物吸收系数的量值和谱型也存在很大差别. 但总结起来不外乎 3 种类型: (I) 总颗粒物吸收光谱与浮游植物吸收光谱相似, 在 440nm、675nm 处都表现出明显的吸收峰; (II) 总悬浮颗粒物吸收光谱与非藻类颗粒物吸收光谱相似, 短波部分颗粒物吸收随波长增加大致按指数规律递减, 仅在 675nm 处表现出一微弱的浮游植物吸收峰; (III) 总颗粒物吸收光谱既不完全类似浮游植物吸收光谱, 也不完全类似非藻类颗粒物吸收光谱, 在短波的 440nm 浮游植物吸收峰不是很明显, 但在 675nm 处浮游植物吸收峰非常明显<sup>[5]</sup>. 不同类型的湖泊以及同一湖泊不同季节, 颗粒物吸收的主导类型都不一样. 如贫营养以及不受底泥沉积物再悬浮影响的富营养湖泊, 颗粒物吸收以 I 型为主导, 而浑浊的浅水湖泊则

以Ⅱ型为主导.对于Ⅱ型中在颗粒物以非色素颗粒物占绝对主导的情况下,无论实验还是数值分离获得的浮游植物吸收都会存在较大的误差,尤其是在短波部分,如数值分离法对颗粒物中叶绿素 a 与总悬浮浓度比值低于 0.02% 的站点就不适用<sup>[30]</sup>.

相比于颗粒物吸收系数,散射和后向散射系数的测定和计算要更为困难和复杂,其测定一般都是在野外原位条件下进行,受其它环境要素的干扰较大.同颗粒物吸收一样,散射和后向散射系数的测定也得益于水色遥感分析模型和半分析模型的快速发展,迫切需要知道特定区域的颗粒物散射、后向散射系数及它们各自的比散射系数.为此近年来在一些湖泊中进行了大量散射系数和后向散射系数的野外测定,分析了其光谱变化、与颗粒物浓度之间关系、颗粒物粒径对散射和后向散射系数的影响;获得各自比散射系数<sup>[32-37]</sup>.颗粒物散射系数和后向散射系数光谱变化比较平缓,随波长增加有所降低,与悬浮物特别是无机颗粒物浓度存在非常好的函数关系,可以通过无机颗粒物浓度获得特征波长颗粒散射系数和后向散射系数<sup>[34-37]</sup>.

关于散射与后向散射系数之间的关系,早期的研究认为两者是线性关系,用后向散射系数与散射系数的比值即后向散射概率来表示,不同类型的水体,后向散射概率的值存在一些差异,随水体浑浊度的增加,后向散射概率会有所增加.在大洋水体和清洁水体其值常用 0.015 代替,而在沿岸和内陆湖泊混浊水体,一般取值 0.019 较为适合<sup>[2]</sup>.但后来不同研究获得的后向散射概率值不一样,如 Campbell 等<sup>[31]</sup>在澳大利亚 3 个水库得到的值在 0.013 - 0.014 之间;马荣华等<sup>[37]</sup>在太湖计算获得的均值为  $0.041 \pm 0.03$ ; Whitlock 等<sup>[38]</sup>在河流观测到的值在 0.025 - 0.07 之间, Dekker 等<sup>[39]</sup>在荷兰湖泊获得的均值为  $0.026 \pm 0.006$ .最近基于一些野外测定的结果显示,可以用幂函数、逆函数和 S 形曲线等模型表征后向散射系数和散射系数之间关系,并且对于不同波段拟合的函数关系会存在一些差异<sup>[36, 40]</sup>,不同研究区域拟合系数也会存在差异,这对先前用单一常数来表示两者之间关系进行了很好的修正.

### 3.2 表观光学特性

表观光学特性中使用最广泛,最有环境意义的参数有漫射衰减系数、真光层深度、遥感反射率、辐照度比,其中漫射衰减系数和真光层深度表征太阳辐射在水体内的衰减程度,而遥感反射率、辐照度比表征的太阳辐射被水体反射程度.漫射衰减系数综合反映非色素颗粒物、浮游植物和 CDOM 对光的吸收和散射,直接影响水体的透明度和真光层深度.同时由于非色素颗粒物、浮游植物和 CDOM 对不同波长光的选择性吸收和散射,水体漫射衰减系数会有明显的光谱变化,如短波的紫外辐射漫射衰减系数一般最大,光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)波段在浑浊的内陆湖泊漫射衰减的最小值出现在 600nm 附近,而一些清洁的高山高原湖泊漫射衰减的最小值则一般出现在蓝绿光波段<sup>[41-43]</sup>.为表征 PAR 在水体内的综合衰减程度,一般通过测定不同水层 PAR 强度进而计算漫射衰减系数加以表征.不同水体以及同一水体不同季节影响漫射衰减系数的主导因素都不一样,不同研究者根据各自的研究区域建立了 PAR 漫射衰减系数计算公式,分离各光学组份对 PAR 漫射衰减系数的贡献率,也有研究利用实测遥感反射率和卫星影像来反演水体漫射衰减系数并分析其时空变化和影响因素<sup>[24, 27, 41-42]</sup>.在浑浊的浅水湖泊,影响 PAR 漫射衰减系数的主导因子是非色素颗粒物,其次是浮游植物,CDOM 的贡献最小<sup>[31, 43-45]</sup>,而在一些近似 I 类水体的湖泊中,浮游植物对 PAR 漫射衰减的贡献均超过 50%,PAR 漫射衰减系数与叶绿素 a 浓度存在很好的相关性<sup>[46]</sup>.

真光层深度是衡量湖泊生态与环境总体状况最重要的环境因子之一,是湖泊物理、化学、生物综合作用的关键指标.不同的水体真光层深度差异显著,在清洁的海洋其值可以高达 100m 以上,而在浑浊的内陆水体有时则只有几十厘米<sup>[2, 44, 47-48]</sup>.由于浮游植物主要分布在这一层,因此其深度直接影响到浮游植物光合作用过程和水体初级生产力,是初级生产力计算模型的关键参数<sup>[47, 49-51]</sup>.真光层深度除在湖泊初级生产力和营养盐估算方面的意义之外,还决定了沉水植物分布<sup>[52-53]</sup>.因此研究真光层深度的时空分布、影响机制对于沉水植被恢复、湖泊生态修复和水质改善具有非常重要的指导意义.在富营养化浅水湖泊中,由于浮游藻类的大量生长和风浪对底泥的再悬浮作用,往往使得真光层深度较低,水下光场较弱,导致沉水植物消退<sup>[52]</sup>,因此要恢复沉水植物首先要弄清真光层深度的影响机制,进而提出改善水下光学条件的措施.

水色遥感的基础是获取地面或者卫星影像提取的遥感反射率,与水色参数浓度建立某种定量关系,因此针对不同水体国内外研究者开展了大量野外遥感反射率测定,分析了不同水体或同一水体在不同季节遥感反射率光谱特征<sup>[54-61]</sup>.归纳起来,内陆湖泊二类水体遥感反射率具有以下共同的特征:在 560、705、

810nm 附近会出现明显的峰值,在 680nm 附近具有明显的谷值. 560nm 附近处峰值主要是由于藻类色素的低吸收和无机悬浮物、浮游植物细胞壁的散射作用所致,705nm 属于叶绿素 a 荧光峰,随着叶绿素 a 浓度的增加,峰高随之增加,反射峰位置也向着长波方向移动,其位置从 688nm 开始到 713nm 结束<sup>[59]</sup>,与叶绿素 a 浓度密切相关,可作为判断是否有叶绿素的依据,680nm 附近的谷值是叶绿素 a 在红光波段的强烈吸收所致. 810nm 反射峰主要由悬浮物引起,因此可以用于表征水体悬浮物浓度. 在一些以蓝藻占优势的湖泊水体,由于藻蓝素吸收遥感反射率往往在 620nm 也会表现出明显谷值,因此可以用于区分浮游植物群落结构是否以蓝藻为主,进而进行有毒有害蓝藻水华监测. 基于遥感反射率的峰谷特征和主导影响因素,提出了悬浮物、叶绿素 a、藻蓝素浓度和 CDOM、浮游植物吸收单波段、波段比值、三波段、多波段组合、荧光峰位置高度等不同反演算法<sup>[54-67]</sup>.

#### 4 CDOM 生物地球化学循环

CDOM 既是光学活性物质,对紫外辐射吸收强烈,会显著改变水下光场结构<sup>[43,68-70]</sup>,同时又是营养物质,富含丰富碳、氮、磷等湖泊生源要素,影响湖泊营养盐生物地球化学过程、湖泊富营养化进程及碳循环与全球变暖<sup>[71-74]</sup>. 此外,CDOM 还是荧光物质,在紫外辐射激发下会发出荧光. 因此,研究 CDOM 吸收荧光特性、地域分布、来源、组成、消除途径等生物地球化学循环过程以及对紫外辐射衰减的贡献成为湖泊光学研究中非常重要的部分.

##### 4.1 光谱吸收特性及地域分布

由于 CDOM 是一类来源各异,成分复杂的物质组成,目前很难对其有机成分进行全面分析,因而往往借助其吸收系数等光学特性来表示其浓度. 全世界不同湖泊观测的结果显示,CDOM 吸收系数存在极大的空间差异,440nm 处吸收系数在一些富营养化以及腐殖化程度很高的湖泊大于  $6\text{m}^{-1}$ ;而在一些清澈的高原高山湖泊为 0,接近甚至低于仪器的检测限<sup>[43,58,68-70,75]</sup>. CDOM 吸收光谱被广泛认为从紫外到可见光随波长的增加大致呈指数函数下降,然而最近的一些研究也表明指数模型并不是模拟 CDOM 光谱吸收的最好模型. 如 Stedmon 等<sup>[76]</sup>为了消除长波 CDOM 吸光度测定中的噪声以及由非 CDOM 吸收引起的吸收系数波动,在指数模型上增加一个背景项,其回归拟合精度显著高于简单指数模型. 又如 Twardowski 等<sup>[77]</sup>分析比较了指数模型、增加背景项的指数模型以及幂函数模型等 6 种模型,统计分析结果显示,幂函数和带背景项指数模型能更真实地模拟 CDOM 的光谱吸收. 刘明亮等<sup>[78]</sup>,姜广甲等<sup>[79]</sup>根据各自研究数据对各种 CDOM 光谱吸收模型进行了比对. 尽管幂函数模型能更好模拟 CDOM 光谱吸收,然而为了与前期的研究对比,目前大多数研究仍然使用简单或带背景项指数模型来模拟 CDOM 光谱吸收<sup>[72]</sup>. 另外,表征 CDOM 吸收系数随波长增加而递减的参数指数函数斜率  $S$  值与 CDOM 组成和分子大小及拟合的波长范围密切相关. 研究显示陆源湖泊 CDOM 光谱斜率( $0.013 - 0.018\text{nm}^{-1}$ )一般要小于海洋( $\geq 0.02\text{nm}^{-1}$ )<sup>[80]</sup>,短波范围内  $S$  值要高于长波范围内  $S$  值<sup>[81]</sup>.

##### 4.2 三维荧光特性及其组成来源

近年来发展起来的三维荧光光谱技术越来越广泛应用于区分湖泊 CDOM 结构、组成和来源<sup>[82-87]</sup>. 一般而言,CDOM 含有类蛋白质和类腐殖质两类荧光物质. 类蛋白质荧光物质由具有芳香结构的氨基酸如色氨酸、酪氨酸等产生,以内源产生为主,而类腐殖质荧光物质则由分子结构复杂的腐殖酸和富里酸类物质产生,以外源输入为主. 这两类荧光物质包含 5-8 个荧光发色团,其荧光峰位置和来源相对比较确定,因而通过对比分析不同水体 CDOM 中主要荧光峰位置、强度以及各个峰比值之间变化可以定量区分 CDOM 组成和来源<sup>[82,85,88]</sup>,如不同营养状态湖泊 CDOM 三维荧光图谱的峰值和位置均存在明显差异<sup>[85]</sup>(图 1). 对贫营养湖泊而言,内源产生的类蛋白荧光强度要明显大于外源类腐殖酸,三维荧光图谱以类蛋白荧光为主导. 而对于富营养化湖泊而言,外源输入类腐殖质荧光则明显大于内源的类蛋白荧光,三维荧光图谱以类腐殖质荧光为主导. 然而由于三维荧光图谱是各种荧光峰值叠加在一起形成的图谱,各类荧光峰会相互干扰和重叠,使得一些强度较弱的荧光峰在三维荧光图谱中呈现不出来,因此现在许多研究者结合三维荧光图谱和平行因子分析法对来自陆源输入、湖泊及浮游植物培养实验中产生的 CDOM 荧光物质进行了分离和溯源,探讨 CDOM 来源、组成差异及与环境因子的相互关系<sup>[22,84-86,89-91]</sup>.

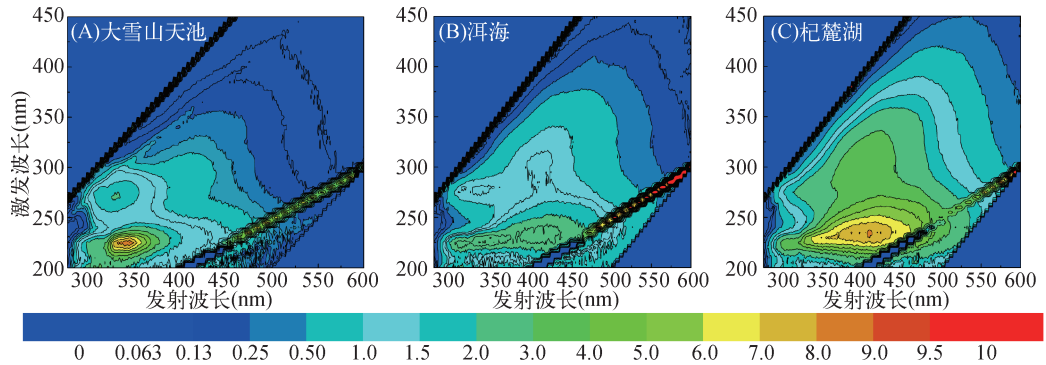


图1 不同类型湖泊 CDOM 三维荧光光谱(A:贫营养;B:中营养;C:富营养)<sup>[85]</sup>

Fig. 1 Fluorescence excitation-emission matrices (EEMs) of chromophoric dissolved organic matter of different trophic states ((A) oligotrophic; (B) mesotrophic; (C) eutrophic). Fluorescence is in QSU units

过去数十年尽管大量研究集中在 CDOM 的地理分布,然而究竟是哪些因素在控制 CDOM 的季节变化、空间分布及来源仍然无法完全弄清.一般而言,CDOM 外源输入主要包括入湖河流和大气降水输入,内源输入则主要包括浮游藻类、沉水植物等死亡降解以及底泥间隙水释放.无疑,外源上流域河流输入是湖泊 CDOM 最主要来源<sup>[82-83,87,91-92]</sup>,如在太湖观测中发现从河流往河口、湾内湾口至大大湖 CDOM 吸收逐渐下降,平行因子分析也显示外源腐殖质荧光占主导地位<sup>[87,92]</sup>.最近也有研究报道大气降水也是水体 CDOM 重要外源来源之一<sup>[93]</sup>.湖泊生态系统内的生物过程会贡献内源的类蛋白荧光有机物<sup>[90-91,94]</sup>,而富营养化湖泊蓝藻水华暴发、死亡、降解释放成为 CDOM 的重要来源<sup>[91]</sup>,在太湖夏季观测发现 CDOM 吸收与叶绿素 a 浓度存在显著正相关,而室内蓝藻水华降解实验也进一步证实蓝藻死亡会释放出大量的 CDOM,主要产生类似海洋中生物来源的一类荧光有机物<sup>[84]</sup>.而对于易受风浪扰动引起再悬浮的浅水湖泊,底泥再悬浮也会引起间隙水中 CDOM 释放进而增加水体 CDOM 浓度<sup>[95]</sup>.

#### 4.3 对紫外辐射衰减贡献

许多研究均表明,湖泊中 CDOM 浓度和比吸收控制着紫外辐射特别是 UV-B 辐射在水体中的传输与衰减,分别建立了不同区域不同湖泊的紫外辐射漫射衰减的计算关系式<sup>[68-69,96-97]</sup>.然而,CDOM 并不是紫外辐射衰减的唯一影响因子,事实上不同水体主导紫外辐射衰减的因子可能有所差异.一些研究也发现紫外辐射衰减除受水体中 CDOM 的吸收影响外,还受浮游植物和非色素颗粒物的影响<sup>[70,75,98-100]</sup>.Bracchini 等<sup>[75]</sup>对意大利深水高山湖泊 Salto 湖研究发现,UV-B 漫射衰减系数与叶绿素 a 浓度的正相关要好于 CDOM 吸收系数,其决定系数分别为 0.89 (142 个样本)、0.70 (136 个样本).Smith 等<sup>[98]</sup>在对低浓度溶解性有机碳(DOC)的伊利湖紫外辐射的研究中发现 UV-B 衰减系数有时与 DOC 的相关性非常低,决定系数仅 0.14;总悬浮物浓度是伊利湖预测 UV-B 和 UV-A 衰减的最有效因子,与 UV-B、UV-A 波段衰减系数线性相关的决定系数分别为 0.91、0.83 ( $P \leq 0.001, n = 28$ ).De Lange<sup>[99]</sup>报道荷兰浅水湖泊紫外辐射衰减与 DOC 的相关性也仅为 0.33,其衰减主要受制于颗粒物浓度.

我们基于云贵高原 16 个湖泊 42 个站点以及长江中下游 4 个湖泊 41 个站点数据,利用线性回归和偏相关分析,对不同区域湖泊紫外辐射衰减的影响因子进行解析发现,云贵高原湖泊 CDOM 吸收主导了 UV-B、UV-A 辐射的漫射衰减,浮游植物和非色素颗粒物的贡献很小,而在长江中下游湖泊,CDOM 吸收、非色素颗粒物和浮游植物浓度共同控制紫外辐射衰减,其中 UV-B 衰减以 CDOM 吸收控制为主,UV-A 衰减则以非色素颗粒物浓度控制为主<sup>[43]</sup>.

#### 4.4 消除途径

由于 CDOM 对光的吸收主要集中在紫外和可见光的蓝光波段,许多野外原位和室内模拟光照射研究均发现 CDOM 吸收紫外光后会显著的光化学降解<sup>[18-19,101-103]</sup>,使得表层水体 CDOM 浓度和组成很大程度上依赖于来源(外源和内源)与沉降(光化学与微生物降解)的动态平衡.光化学降解导致了 CDOM 的重新

矿化, 将那些难于被生物直接吸收利用的高分子化合物降解成低分子化合物, 释放出溶解性有机磷、溶解性有机氮、DOC 及一些无机营养盐, 为微生物和浮游植物生长提供碳、氮、磷等生源要素, 并释放出大量  $\text{CO}_2$ 、CO 和羟基硫化物等温室气体。同时, 光化学降解造成 CDOM 吸收和荧光明显降低而形成光漂白, 往往带来水体透光性尤其是对生物有害的 UV-B 辐射光学透明性的增加, 进而影响水生生态系统结构和功能。伴随着吸收和荧光降低, CDOM 结构发生重大改变, 其原有的化学组成和理化性质发生改变。如许多研究均报道光化学降解会改变 CDOM 光谱斜率  $S$  值以及表征分子量大小的  $M$  值<sup>[18-19, 103]</sup>。此外, CDOM 光化学降解还会影响到与之结合的重金属及有机污染物的形态、分布、迁移转化及其毒性和生物可利用性<sup>[103-104]</sup>。

## 5 光与浮游植物相互关系

### 5.1 UV-B 辐射对浮游植物的影响

浮游植物是湖泊生态系统主要初级生产者, 是湖泊食物网的基础, 其结构和生物量关系到整个湖泊生态系统的结构和功能。增强的 UV-B 辐射对浮游植物的伤害是多方面的<sup>[20, 105-106]</sup>, 主要体现在对 DNA、蛋白质及超微结构的损伤<sup>[106-108]</sup>, 对光合色素的破坏以及浮游植物生产力的降低<sup>[109]</sup>。研究表明, UV-B 辐射能够诱导许多水生有机体 DNA 的破坏和 DNA 合成的推迟。当 DNA 吸收 UV-B 辐射后, 其内部的碱基和多核苷酸链被损伤, 通过共价修饰作用在同一链的相邻嘧啶之间形成嘧啶二聚体, 从而引起遗传基因的突变。增强的 UV-B 辐射对蛋白质的损伤主要是通过色氨酸发生光降解导致酶活性和蛋白质结构发生改变<sup>[20]</sup>。UV-B 辐射很容易破坏光合色素, 抑制光系统 II, 从而降低浮游植物的光合能力<sup>[110]</sup>。由于 UV-B 辐射对光合色素的破坏, 因而 UV-B 辐射的增强会明显降低浮游植物的初级生产力<sup>[111]</sup>, 而初级生产力的降低将导致浮游植物通过生物泵对大气中  $\text{CO}_2$  的固定, 进而影响全球气候变化。另外, UV-B 辐射与其它环境因子对浮游植物的协同作用有时可能存在抵消与增加的交互作用<sup>[112]</sup>, 如一些研究发现在磷添加的情况下, 浮游植物对 UV-B 辐射伤害的修复能力会增加, 同时生长率也会增加<sup>[113-114]</sup>, 而与之相反, 另外一些研究则发现磷添加会加剧 UV-B 辐射对浮游植物的伤害, 降低浮游植物生长率和光合过程<sup>[115-116]</sup>。

不同浮游植物对 UV-B 辐射的响应也不一致, 如微囊藻就具有垂直迁移和释放体内抗紫外辐射物质 (MAAs) 来降低 UV-B 对其自身的伤害<sup>[106, 117]</sup>, 我们在室内模拟 UV-B 辐射控制实验中也发现微囊藻比栅列藻更耐受 UV-B 辐射。由于不同浮游植物对 UV-B 辐射伤害的响应不一样, 因此 UV-B 辐射除了造成浮游植物个体伤害、生物量下降外, 还会明显改变浮游植物种群结构和功能<sup>[115, 118]</sup>。

### 5.2 光与湖泊初级生产力

浮游植物初级生产力是生物泵运转的动力源, 而生物泵在调控大气中二氧化碳浓度以及影响全球气候变暖中发挥了重要作用。目前关于湖泊内光与浮游植物初级生产力的观测研究较多, 也定量探讨了各生态因子对初级生产力的影响<sup>[119-121]</sup>, 如浅水湖泊沉积物再悬浮引起的真光层深度的下降会降低湖泊初级生产力, 最大初级生产力出现的深度随表面光强与水体浑浊度变化而变化<sup>[23, 122]</sup>。但这些研究大多集中在某一区域内的单点观测, 缺乏时空尺度上的连续观测, 也缺乏一些关键过程如水动力扰动、水华过程对初级生产力影响的机制研究。此外, 由于初级生产力现场测定一般采用黑白瓶溶氧法或碳同位素标记法, 测定费时费力, 加之现场测定无论是从空间分布还是时间序列的角度看, 都是“离散”的, 对一些过程与机制的解释缺乏足够的证据。因此, 近年来一些研究成果相继提出了利用与初级生产力相关的生态因子以及叶绿素  $a$  浓度计算初级生产力的许多经验的、半经验半理论的或理论的算法, 并对各种方法的原理、可行性、可靠性做了分析和讨论<sup>[123-127]</sup>。其中 Behrenfeld 和 Falkowski<sup>[123-124]</sup> 提出并被一些研究者进一步改进的初级生产力深度垂向归纳模型 (VGPM 模型) 得到广泛应用<sup>[128-130]</sup>, 该模型可以通过水色遥感反演的资料作为输入进而估算不同区域不同时空尺度上的初级生产力并研究其时空演化机理。

尽管 VGPM 模型最初设计是基于遥感资料作为输入来计算真光层内初级生产力, 但也先后有人利用实测的叶绿素  $a$  浓度、真光层深度及其它资料作为模型输入来计算初级生产力<sup>[131-132]</sup>。我们之前利用一些实测资料估算了 1995 - 2003 年梅梁湾初级生产力的季节变化和年际变化以及 2007 年秋季全太湖初级生产力的空间变化, VGPM 模型估算的初级生产力与经验模型计算的值有很好的对应关系, 两者极显著正相关, 梅梁湾年均初级生产力碳固定量为  $5.85 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[133-134]</sup>。目前正在利用 MODIS 数据对 2002 年以来初级生产力进行



估算以获得初级生产力的时空变化规律,进而估算浮游植物对碳、氮、磷等生源要素的固定能力,并试图探讨湖泊浮游植物初级生产力对全球变暖的响应<sup>[135]</sup>.

## 6 沉积物再悬浮的光学效应

由于频繁的风浪搅动,浅水湖泊沉积物很容易发生再悬浮,进而增加光的吸收、散射与衰减,由此引起的水下光场变化会显著影响到湖泊生态系统的结构和功能.在太湖等长江中下游浅水湖泊开展的研究发现,不同底质条件风浪引起的沉积物再悬浮的光学效应有差异<sup>[5,24]</sup>.如在太湖北部的藻型湖区,水动力扰动会大量增加水体非色素颗粒物浓度,而对浮游植物和 CDOM 的影响相对较小,在梅梁湾从中风浪到大风浪,非色素颗粒物吸收增加,CDOM 吸收基本没有变化,而由于风浪对藻类的混合,随风浪增加浮游植物吸收不但没有增加反而有所降低. PAR 漫射衰减随风浪增加而增加,并且与水下光照观测前半小时平均风速存在显著正相关<sup>[24]</sup>.相反,在沉水植被高度覆盖的太湖东南部湖湾,沉水植被发育季节风浪不大容易引起沉积物再悬浮,对水下光照的影响也小得多.2007 年 8 月我们在东南部湖湾开展的不同风浪过程连续观测发现,风速与 PAR 漫射衰减系数之间的对应关系并不好.

同样,在世界上其它一些浅水湖泊和海湾开展的研究也发现,没有沉水植被分布的湖区沉积物再悬浮的光学效应也非常明显<sup>[12,136-138]</sup>.如 Chen 等<sup>[12]</sup>对美国佛罗里达西海岸的坦帕湾通过高频监测发现,在 2004 年 12 月和 2005 年 1 月间伴随着 3 次大的风浪过程,出现明显的 3 次沉积物再悬浮和 532nm 颗粒物后向散射系数增加过程.除了风浪引起的沉积物再悬浮会影响水下光场外,在浅水湖泊船舶航行产生的船行波也会引起沉积物再悬浮进而影响水下光场<sup>[139-140]</sup>.例如 Erm 等<sup>[140]</sup>通过连续高频监测发现,船的航行能增加 50% 的 PAR 衰减,船行波波高的峰值与 PAR 漫射衰减系数的峰值有非常好的对应关系.

浅水湖泊沉积物再悬浮通过影响水下光场进而会影响到湖泊生态系统结构,其直观表现就是影响浮游植物群落结构、浮游植物初级生产力和沉水植物分布.沉积物再悬浮造成非色素颗粒物大幅度增加,由于非色素颗粒物在短波部分吸收非常强烈,引起辐射光谱中紫、蓝光衰减最强烈,红光其次,黄、绿光衰减最弱,随深度增加光谱中黄、绿光的比例明显上升.由于蓝藻除了在蓝光 440nm 和红光 675nm 叶绿素 a 有吸收峰外,其在 620nm 附近藻蓝素还有吸收峰,波谱成份中蓝光的减少以及桔红光的增加,这非常有利于蓝藻充分利用光谱中桔红光进行光合作用,而其它藻类则没有这样一种吸收机制,这可能是蓝藻在浅水湖泊中具有光竞争优势的原因之一<sup>[7]</sup>.同样,这种水下光谱的变化也使得沉水植物生长明显受到蓝光抑制.沉积物再悬浮由于会显著降低湖泊水体真光层深度进而会影响湖泊初级生产力<sup>[23,50]</sup>,在计算浮游植物初级生产力的垂向归纳模型中,真光层深度是主要输入参数,如果将初级生产力归一化到单位水面辐射强度、单位叶绿素 a 浓度,无疑沉积物再悬浮引起的真光层深度降低会显著降低水柱浮游植物初级生产力.

沉积物再悬浮产生的光学效应还会影响到沉水植被的空间分布.例如在太湖调查研究发现,风浪、沉积物再悬浮、真光层深度与沉水植被的空间分布有很好的相关性,大风浪、高沉积物再悬浮、低真光层深度的湖区一般都没有沉水植被分布,而在低风浪、低沉积物悬浮与高的真光层深度的湖区,沉水植被的分布就较为茂盛<sup>[45]</sup>.同样,国际上一些类似的浅水湖泊,沉积物再悬浮产生的光学效应也明显影响到沉水植被的空间分布甚至草藻型生态系统的转换<sup>[53,141-142]</sup>.当然也有研究认为是漂浮植物、沉水植被的分布抑制了沉积物再悬浮<sup>[143-144]</sup>,提高真光层深度.因此浅水湖泊中风浪扰动、沉积物再悬浮、真光层深度降低与沉水植被的空间分布之间的关系究竟谁因谁果,或者互为因果关系的研究还需要进一步深化,在不同环境条件下,其因果关系会发生不同程度的转换.

## 7 湖泊水色遥感

湖泊水色遥感主要是利用各种星载(或者机载等)传感器探测与反演内陆湖泊水体水色要素参数(主要指叶绿素 a、悬浮物、CDOM)以及湖泊初级生产力,包括卫星影像数据接收处理、大气校正、水色参数反演算法等.目前已建立了湖泊水质参数悬浮物、叶绿素 a、CDOM 等遥感反演算法,并应用到卫星影像对富营养化湖泊蓝藻水华开展初步遥感监测.关于湖泊水色遥感研究现状及存在的主要问题,马荣华等的一篇综述文章<sup>[145]</sup>有专门详细的阐述,在此不再赘述.

## 8 研究展望

湖泊光学研究既有微观尺度上 UV-B 辐射对浮游植物、浮游动物等生理生态影响的实验研究,也有宏观尺度上光学组份的遥感反演、时空序列分析及初级生产力、碳储存转化估算。近十年来尽管湖泊光学得到快速发展,但是也应该认识到,湖泊光学研究还有许多不足:对不同区域不同区域湖泊光学现象缺乏完整的系统认识,还没有形成比较普适性的湖泊生物光学模型,湖泊 CDOM 在全球碳循环中作用机理还没有弄清,因此其对碳循环的贡献还未得到凸显。未来的发展应该从微观和宏观不同视角拓展其研究的深度和广度。具体而言,微观方面研究全球气候变暖背景下,UV-B 辐射增强与温度升高、酸沉降、流域降水及营养盐富集等不同环境问题协同作用下对水生生物个体、群落及生态系统的影响与反馈机制,对 CDOM 生物地球化学过程的影响与反馈。宏观方面研究全世界不同类型、不同区域湖泊生物光学特性时空尺度上分布及其变异性,在此基础上发展普适性的水色、水质和初级生产力遥感反演模式,提高卫星遥感对叶绿素 a、藻蓝素、温度、初级生产力及相关水质指标的反演精度,通过耦合蓝藻生长动力学模型和湖泊水动力学模型,开展蓝藻水华、初级生产力及相关水质参数的遥感监测、预测预警预报及有机碳贮存、循环及转化估算。

## 9 参考文献

- [ 1 ] Siegel DA, Maritorena S, Nelson NB *et al.* Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(C12), 3228 (doi: 10.1029/2001JC000965).
- [ 2 ] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [ 3 ] Spinrad RW, Carder KL, Perry MJ ed. Ocean Optics. New York: Oxford University Press, 1994.
- [ 4 ] Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 1994, **33**(24): 2369-2378.
- [ 5 ] 张运林. 大型浅水湖泊水体生物-光学特性及其生态环境意义[学位论文]. 南京:中国科学院地理与湖泊研究所, 2005.
- [ 6 ] 唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 37-44.
- [ 7 ] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [ 8 ] Zhang YL, Zhang B, Wang X *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **592**(1): 105-120.
- [ 9 ] Tassan S, Ferrari GM. A sensitivity analysis of the 'transmittance-reflectance' method for measuring light absorption by aquatic particles. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(8): 757-774.
- [ 10 ] Woźniak SB, Stramski D, Stramska M *et al.* Optical variability of seawater in relation to particle concentration, composition, and size distribution in the nearshore marine environment at Imperial Beach, California. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**, C08027 (doi: 10.1029/2009JC005554).
- [ 11 ] Saraceno JF, Pellerin BA, Downing BD *et al.* High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**, G00F09 (doi: 10.1029/2009JC000989).
- [ 12 ] Chen ZQ, Hu ZM, Muller-Karger FE *et al.* Short-term variability of suspended sediment and phytoplankton in Tampa Bay, Florida: Observations from a coastal oceanographic tower and ocean color satellites. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **89**(1): 62-72.
- [ 13 ] Hunter PD, Tyler AN, Presing M *et al.* Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: The effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4): 1527-1544.
- [ 14 ] 赵巧华, 秦伯强. 藻类的光谱吸收特征及其混合藻吸收系数的分离. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 313-318.
- [ 15 ] 张俊, 李爱民, 王学军. 混合藻类高光谱特征及其叶绿素 a 分离定量模型. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 349-356.
- [ 6 ] Rhode SC, Pawlowski M, Tollrian R. The impact of ultraviolet radiation on the vertical distribution of zooplankton of the genus *Daphnia*. *Nature*, 2001, **412**(1): 69-72.
- [ 17 ] Fischer JM, Nicolai JL, Williamson CE *et al.* Effects of ultraviolet radiation on diel vertical migration of crustacean zooplankton: An *in situ* mesocosm experiment. *Hydrobiologia*, 2006, **563**(1): 217-224.
- [ 18 ] Zhang YL, Liu ML, Qin BQ *et al.* Photochemical degradation of chromophoric dissolved organic matter exposed to simulated UV-B and natural solar radiation. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 159-168.
- [ 19 ] Loiselle SA, Bracchini L, Cózar A *et al.* Variability in photobleaching yields and their related impacts on optical condi-

- tions in subtropical lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2009, **95**(2): 129-137.
- [20] 谢统刚, 张运林, 朱广伟等. 人工模拟 UV-B 辐射对铜绿微囊藻生长的影响研究. *湖泊科学*, 2011, **23**(2): 223-229.
- [21] Henderson RK, Baker A, Parsons SA *et al.* Characterisation of allogenetic organic matter extracted from cyanobacteria, green algae and diatoms. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3435-3445.
- [22] Jiang DG, Huang QH, Li JH. Spectral characteristics variations of chromophoric dissolved organic matter during growth of filamentous green macroalgae. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(7): 1880-1885.
- [23] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响. *水科学进展*, 2004, **15**(5): 615-620.
- [24] 张运林, 秦伯强, 朱广伟等. 长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮对水下光场的影响研究——以龙感湖和太湖为例. *中国科学(D辑)*, 2005, **35**(增刊II): 101-110.
- [25] Ma RH, Tang JW, Dai JF *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: absorption. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [26] 赵巧华, 张运林, 秦伯强. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物吸收系数的分离. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 356-362.
- [27] Arst H, Erm A, Herlevi A *et al.* Optical properties of boreal lake waters in Finland and Estonia. *Boreal Environment Research*, 2008, **13**(2): 133-158.
- [28] Binding CE, Jerome JH, Bukata RP *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4): 1702-1711.
- [29] 乐成峰, 李云梅, 查勇等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2448-2455.
- [30] Zhang YL, Liu ML, Van Dijk MA *et al.* Measured and numerically partitioned phytoplankton spectral absorption coefficient in inland waters. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(3): 311-323.
- [31] Campbell G, Phinn SR, Daniel P. The specific inherent optical properties of three sub-tropical and tropical water reservoirs in Queensland, Australia. *Hydrobiologia*, 2011, **658**(1): 233-252.
- [32] Simis SGH, Tijdens M, Hoogveld HL *et al.* Optical signatures of the filamentous cyanobacterium *Leptolyngbya boryana* during mass viral lysis. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(1): 184-197.
- [33] Giardino C, Brando VE, Dekker AG *et al.* Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**(2): 183-195.
- [34] Gallegos CL, Davies-Colley RJ, Gall M. Optical closure in lakes with contrasting extremes of reflectance. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(5): 2021-2034.
- [35] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2688-2694.
- [36] 孙德勇, 李云梅, 王桥等. 太湖水体散射特性及其空间分异. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 389-395.
- [37] Ma RH, Pan DL, Duan HT *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China; backscattering. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(9): 2321-2335.
- [38] Whitlock CH, Pool LR, Usry JW *et al.* Comparison of reflectance with backscatter and absorption parameters for turbid waters. *Applied Optics*, 1981, **20**(3): 517-522.
- [39] Dekker AG, Vos RJ, Peters SWM. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(1): 15-35.
- [40] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究. *海洋学报*, 2006, **28**(4): 56-63.
- [41] Belzile C, Vincent WF, Howard-Williams C *et al.* Relationships between spectral optical properties and optically active substances in a clear oligotrophic lake. *Water Resources Research*, 2004, **40**, W12512 (doi: 10.1029/2004WR003090).
- [42] 乐成峰, 李云梅, 查勇等. 太湖水体漫射衰减系数的光学特性及其遥感反演模型. *应用生态学报*, 2009, **20**(2): 337-343.
- [43] Zhang YL, Yin Y, Zhang EL *et al.* Spectral attenuation of ultraviolet and visible radiation in lakes in the Yunnan Plateau, and the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2011, **10**(4): 469-482.
- [44] Reinart A, Pedusaar T. Reconstruction of the time series of the underwater light climate in a shallow turbid lake. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(1): 5-15.
- [45] Zhang YL, Zhang B, Ma RH *et al.* Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Fundamental and Applied Limnology*, 2007, **170**(1): 11-19.
- [46] Horion S, Bergamino N, Stenuite S *et al.* Optimized extraction of daily bio-optical time series derived from MODIS/Aqua imagery for Lake Tanganyika, Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(4): 781-791.
- [47] Harding WR. Phytoplankton primary production in a shallow, well-mixed, hypertrophic South African lake. *Hydrobiologia*,

- 1997, **344**(1-3): 87-102.
- [48] 张运林, 秦伯强, 胡维平等. 太湖典型湖区真光层深度时空变化及其生态意义. 中国科学(D辑), 2006, **36**(3): 287-296.
- [49] Oliver RL, Whittington J, Lorenz Z *et al.* The influence of vertical mixing on the photoinhibition of variable chlorophyll a fluorescence and its inclusion in a model of phytoplankton photosynthesis. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(9): 1107-1129.
- [50] Whalen SC, Chalfant BB, Fischer EN *et al.* Comparative influence of resuspended glacial sediment on physicochemical characteristics and primary production in two arctic lakes. *Aquatic Sciences*, 2006, **68**(1): 65-77.
- [51] Torremorell A, Llamas ME, Perez GL *et al.* Annual patterns of phytoplankton density and primary production in a large, shallow lake: the central role of light. *Freshwater Biology*, 2009, **54**(3): 437-449.
- [52] Gulati RD, Van Donk E. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review. *Hydrobiologia*, 2002, **478**(1-3): 73-106.
- [53] Havens KE. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2003, **493**(1-3): 173-186.
- [54] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度. 遥感学报, 2005, **9**(1): 78-86.
- [55] 段洪涛, 张 柏, 宋开山等. 查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究. 环境科学, 2006, **27**(3): 503-507.
- [56] Gitelson AA, Dall'Olmo G, Moses W *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(9): 3582-3593.
- [57] Le CF, Li YM, Zha Y *et al.* A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(6): 1175-1182.
- [58] Xu JP, Li F, Zhang B *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentration using field spectral data: a case study in inland Case-II waters, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **158**(1-4): 105-116.
- [59] 李云亮, 张运林, 李俊生等. 不同方法估算太湖叶绿素 a 浓度对比研究. 环境科学, 2009, **30**(3): 680-686.
- [60] Zhang YL, Liu ML, Qin BQ *et al.* Modeling remote-sensing reflectance and retrieving chlorophyll-a concentration in extremely turbid Case-2 waters (Lake Taihu, China). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 1937-1948.
- [61] Zhang YL, Feng LQ, Li JS *et al.* Seasonal-spatial variation and remote sensing of phytoplankton absorption in Lake Taihu, a large eutrophic and shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2010, **32**(7): 1023-1037.
- [62] Simis SGH, Peters SWM, Gons HJ. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(1): 237-245.
- [63] Kutser T, Pierson DC, Kallio KY *et al.* Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**(4): 535-540.
- [64] Zhang B, Li JS, Shen Q *et al.* A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **145**(1-3): 339-347.
- [65] Hunter PD, Tyler AN, Carvalho L *et al.* Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(11): 2705-2718.
- [66] Duan HT, Ma RH, Zhang YZ *et al.* A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes. *Environmental Research Letters*, 2010( doi: 10.1088/1748-9326/5/4/044009 ).
- [67] 冯龙庆, 时志强, 潘剑君等. 太湖冬季有色可溶性有机物吸收荧光特性及遥感算法. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 348-356.
- [68] Laurion I, Ventura M, Catalan J *et al.* Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among- and within-lake variability. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1274-1288.
- [69] Huovinen PS, Penttilä H, Soimasuo MR. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 205-214.
- [70] Hayakawa K, Sugiyama Y. Spatial and seasonal variations in attenuation of solar ultraviolet radiation in Lake Biwa, Japan. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2008, **90**(2): 121-133.
- [71] Qualls RG, Richardson CJ. Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida. *Biogeochemistry*, 2003, **62**(2): 197-229.
- [72] Biers EJ, Zepp RG, Moran MA. The role of nitrogen in chromophoric and fluorescent dissolved organic matter formation. *Marine Chemistry*, 2007, **103**(1-2): 46-60.
- [73] 吴丰昌, 王立英, 黎 文等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 1-12.
- [74] Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and*

- Oceanography*, 2009, **54**(6): 2298-2314.
- [75] Bracchini L, Dattilo AM, Hull V *et al.* Spatial and seasonal changes in optical properties of autochthonous and allochthonous chromophoric dissolved organic matter in a stratified mountain lake. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2010, **9**(3): 304-314.
- [76] Stedmon CA, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **51**(2): 267-278.
- [77] Twardowski MS, Boss E, Sullivan JM *et al.* Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 69-88.
- [78] 刘明亮, 张运林, 王鑫等. 太湖有色可溶性有机物4种光谱模型的对比. *生态与农村环境学报*, 2009, **25**(1): 42-46.
- [79] 姜广甲, 刘殿伟, 宋开山等. 有色溶解有机物吸收光谱模型对比. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 383-390.
- [80] Blough NV, Del Vecchio R. Chromophoric DOM in the coastal environment. In: Hansell DA, Carlson CA, eds. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. San Diego: Academic Press, 2002: 509-540.
- [81] Zhang YL, Qin BQ. Variations in spectral slope in Lake Taihu, a large subtropical shallow lake in China. *Journal of Great Lake Research*, 2007, **33**(2): 483-496.
- [82] 王志刚, 刘文清, 李宏斌等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 275-279.
- [83] 刘明亮, 张运林, 秦伯强. 太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 234-241.
- [84] Zhang YL, Van Dijk MA, Liu ML *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [85] Zhang YL, Zhang EL, Yin Y *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [86] 黄昌春, 李云梅, 王桥等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 375-382.
- [87] Yao X, Zhang YL, Zhu GW *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries. *Chemosphere*, 2011, **82**(1): 145-155.
- [88] Fellman JB, Hood E, Spencer RGM. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2452-2462.
- [89] Wang ZG, Liu WQ, Zhao NJ *et al.* Composition analysis of colored dissolved organic matter in Taihu Lake based on three dimension excitation-emission fluorescence matrix and PARAFAC model, and the potential application in water quality monitoring. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(7): 787-791.
- [90] Borisover M, Laor Y, Parparov A *et al.* Spatial and seasonal patterns of fluorescent organic matter in Lake Kinneret (Sea of Galilee) and its catchment basin. *Water Research*, 2009, **43**(12): 3104-3116.
- [91] Miller MP, McKnight DM. Comparison of seasonal changes in fluorescent dissolved organic matter among aquatic lake and stream sites in the Green Lakes Valley. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(G00F12, doi: 10.1029/2009JG000985).
- [92] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption characteristics with relation to fluorescence in Lake Taihu, a large shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 43-52.
- [93] Kieber RJ, Whitehead RF, Willey JD *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater collected in southeastern North Carolina, USA. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2006, **54**(1): 21-41.
- [94] Hua B, Veum K, Yang J *et al.* Parallel factor analysis of fluorescence EEM spectra to identify THM precursors in lake waters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **161**(1-4): 71-81.
- [95] Burdige DJ, Kline SW, Chen WH. Fluorescent dissolved organic matter in marine sediment pore waters. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 289-311.
- [96] Morris DP, Zagarese HE, Williamson CE *et al.* The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(8): 1381-1391.
- [97] Belmont P, Morris DP, Pazzaglia FJ *et al.* Penetration of ultraviolet radiation in streams of eastern Pennsylvania: Topographic controls and the role of suspended particulates. *Aquatic Science*, 2009, **71**(2): 189-201.
- [98] Smith REH, Furgal JA, Charlton MN *et al.* Attenuation of ultraviolet radiation in a large lake with low dissolved organic matter concentrations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **56**(9): 1351-1361.

- [ 99 ] De Lange HJ. The attenuation of ultraviolet and visible radiation in Dutch inland waters. *Aquatic Ecology*, 2000, **34**(3) : 215-226.
- [ 100 ] Vincent WF, Kumagai M, Belzile C *et al.* Effects of seston on ultraviolet attenuation in Lake Biwa. *Limnology*, 2001, **2**(3) : 179-184.
- [ 101 ] Anesio AM, Granéli W. Increased photoreactivity of DOC by acidification: Implications for the carbon cycle in humic lakes. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(2) : 735-744.
- [ 102 ] Pérez AP, Diaz MM, Ferraro MA *et al.* Replicated mesocosm study on the role of natural ultraviolet radiation in high CDOM, shallow lakes. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2003, **2**(2) : 118-123.
- [ 103 ] Vione D, Lauri V, Minero C *et al.* Photostability and photolability of dissolved organic matter upon irradiation of natural water samples under simulated sunlight. *Aquatic Sciences*, 2009, **71**(1) : 34-45.
- [ 104 ] Wu FC, Mills RB, Cai YR *et al.* Photodegradation-induced changes in dissolved organic matter in acidic waters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, **62**(5) : 1019-1027.
- [ 105 ] Shank GC, Whitehead RF, Smith ML *et al.* Photodegradation of strong copper-complexing ligands in organic-rich estuarine waters. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(2) : 884-892.
- [ 106 ] Häder DP, Helbling EW, Williamson CE *et al.* Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2011, **10**(2) : 242-260.
- [ 107 ] Häder DP, Sinha RP. Solar ultraviolet radiation-induced DNA damage in aquatic organisms: potential environmental impact. *Mutation Research*, 2005, **571**(1-2) : 221-233.
- [ 108 ] Bouchard JN, Campbell DA, Roy S. Effects of UV-B radiation on the D1 protein repair cycle of natural phytoplankton communities from three latitudes (Canada, Brazil, and Argentina). *Journal of Phycology*, 2005, **41**(2) : 273-286.
- [ 109 ] Tian JY, Yu J. Changes in ultrastructure and responses of antioxidant systems of algae (*Dunaliella salina*) during acclimation to enhanced ultraviolet-B radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2009, **97**(3) : 152-160.
- [ 110 ] Lesser MP. Effects of ultraviolet radiation on productivity and nitrogen fixation in the Cyanobacterium, *Anabaen* sp. (Newton's strain). *Hydrobiologia*, 2008, **598**(1) : 1-9.
- [ 111 ] Modenutti B, Balseiro E, Callieri C *et al.* Increase in photosynthetic efficiency as a strategy of planktonic organisms exploiting deep lake layers. *Freshwater Biology*, 2004, **49**(2) : 160-169.
- [ 112 ] Doyle SA, Saros JE, Williamson CE. Interactive effects of temperature and nutrient limitation on the response of alpine phytoplankton growth to ultraviolet radiation. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(5) : 1362-1367.
- [ 113 ] Heraud P, Roberts S, Shelly K *et al.* Interactions between UV-B exposure and phosphorus nutrition. II. Effects on rates of damage and repair. *Journal of Phycology*, 2005, **41**(6) : 1212-1218.
- [ 114 ] Delgado-Molina JA, Carrillo P, Medina-Sánchez JM *et al.* Interactive effects of phosphorus loads and ambient ultraviolet radiation on the algal community in a high-mountain lake. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(6) : 619-634.
- [ 115 ] Xenopoulos MA, Frost PC, Elser JJ. Joint effects of UV radiation and phosphorus supply on algal growth rate and elemental composition. *Ecology*, 2002, **83**(2) : 423-435.
- [ 116 ] Carrillo P, Delgado-Molina JA, Medina-Sánchez JM *et al.* Phosphorus inputs unmask negative effects of ultraviolet radiation on algae in a high mountain lake. *Global Change Biology*, 2008, **14**(2) : 423-439.
- [ 117 ] Sommaruga R, Chen YW, Liu ZW. Multiple Strategies of Bloom-Forming Microcystis to Minimize Damage by Solar Ultraviolet Radiation in Surface Waters. *Microbial Ecology*, 2009, **57**(4) : 667-674.
- [ 118 ] Medina CD, Tracanna BC, Hilal M *et al.* Effect of solar UV-B exclusion on the phytoplankton community in a sub-tropical mountain reservoir: a mesocosm study. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2010, **15**(3) : 237-253.
- [ 119 ] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖梅梁湾春季浮游植物初级生产力. *湖泊科学*, 2005, **17**(1) : 81-86.
- [ 120 ] Stenuite S, Pirlot S, Hardy MA *et al.* Phytoplankton production and growth rate in Lake Tanganyika: Evidence of a decline in primary productivity in recent decades. *Freshwater Biology*, 2007, **52**(11) : 2226-2239.
- [ 121 ] Sterner RW. In situ measured primary production in Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, **36**(1) : 139-149.
- [ 122 ] Arst H, Nöges T, Nöges P *et al.* Relations of phytoplankton in situ primary production, chlorophyll concentration and underwater irradiance in turbid lakes. *Hydrobiologia*, 2008, **599**(1) : 169-176.
- [ 123 ] Behrenfeld MJ, Falkowski PG. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(7) : 1479-1491.
- [ 124 ] Behrenfeld MJ, Falkowski PG. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(1) : 1-20.

- [125] Morin A, Lamoureux W, Busnarda J. Empirical models predicting primary productivity from chlorophyll a and water temperature for stream periphyton and lake and ocean phytoplankton. *Journal of the North American Benthological Society*, 1999, **18**(3): 299-307.
- [126] Yacobi YZ. Temporal and vertical variation of chlorophyll alpha concentration, phytoplankton photosynthetic activity and light attenuation in Lake Kinneret: possibilities and limitations for simulation by remote sensing. *Journal of Plankton Research*, 2006, **28**(8): 725-736.
- [127] Bergamino N, Horion S, Stenuite S *et al.* Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and primary production in Lake Tanganyika using a MODIS based bio-optical time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(4): 772-780.
- [128] Kameda T, Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *Journal of Oceanography*, 2005, **61**(4): 663-672.
- [129] Hyde KJW, O'Reilly JE, Oviatt CA. Evaluation and application of satellite primary production models in Massachusetts Bay. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(10-11): 1340-1351.
- [130] Saba VS, Friedrichs MAM, Carr ME *et al.* Challenges of modeling depth-integrated marine primary productivity over multiple decades: A case study at BATS and HOT. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, **24**, GB3020 (doi: 10.1029/2009GB003655).
- [131] Bode A, Varela M. Mesoscale estimations of primary production in shelf waters: a case study in the Golfo Artabro (NW Spain). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, **229**(1): 111-131.
- [132] Holm-Hansena O, Naganobub M, Kawaguchib S *et al.* Factors influencing the distribution, biomass, and productivity of phytoplankton in the Scotia Sea and adjoining waters. *Deep-Sea Research II*, 2004, **51**(12-13): 1333-1350.
- [133] Zhang YL, Qin BQ, Liu ML. Temporal-spatial variations of chlorophyll a and primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, China from 1995 to 2003. *Journal of Plankton Research*, 2007, **29**(8): 707-719.
- [134] 张运林,冯 胜,马荣华等. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 380-388.
- [135] Tadoléki RD. Evidence of warming effects on phytoplankton productivity rates and their dependence on eutrophication status. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(3): 973-982.
- [136] Lawson SE, Wiberg PL, McGlathery KJ *et al.* Wind driven sediment suspension controls light availability in a shallow coastal lagoon. *Estuaries and Coasts*, 2007, **30**(1): 102-112.
- [137] Paavel B, Arst H, Reinart A. Variability of bio-optical parameters in two North-European large lakes. *Hydrobiologia*, 2008, **599**(1): 201-211.
- [138] Pérez GL, Torremorell A, Bustingorry J *et al.* Optical characteristics of shallow lakes from the Pampa and Patagonia regions of Argentina. *Limnologia*, 2010, **40**(1): 30-39.
- [139] Hofmann H, Lorke A, Peeters F. The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(1): 368-380.
- [140] Erm A, Alari V, Listak M. Monitoring wave-induced sediment resuspension. *Estonian Journal of Engineering*, 2009, **15**(3): 196-211.
- [141] Phlips EJ, Aldridge FJ, Schelske CL *et al.* Relationships between light availability, chlorophyll a, and tripton in a large, shallow subtropical lake. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(2): 416-421.
- [142] Schutten J, Dainty J, Davy AJ. Wave-induced Hydraulic Forces on Submerged Aquatic Plants in Shallow Lakes. *Annals of Botany*, 2004, **93**(3): 333-341.
- [143] Huang PS, Han BP, Liu ZW. Floating-leaved macrophyte (*Trapa quadrispinosa* Roxb) beds have significant effects on sediment resuspension in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 189-193.
- [144] Li EH, Li W, Liu GH *et al.* The effect of different submerged macrophyte species and biomass on sediment resuspension in a shallow freshwater lake. *Aquatic Botany*, 2008, **88**(2): 121-126.
- [145] 马荣华,唐军武,段洪涛等. 湖泊水色遥感研究进展. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 143-158.