

文章编号: 0253-2239(2009)07-1766-06

浅水湖泊中介质吸收系数的反演

赵巧华

(南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘要 基于在太湖、天目湖观测的水下光场资料,假定在水体中无内光源及无非弹性散射的情况下,通过水体中向上、向下的辐照度廓线分布,及由此确定的漫射反射率、漫射衰减系数,较为成功地反演了水体中介质的固有光学参数——吸收系数,且在较大程度上降低了由波浪及船舶阴影所带来的误差。同时将该反演结果与通过定量滤膜技术测定的结果进行了比较,二者吻合得较好。该方法有利于研究进入水体的太阳辐射能在各介质之间的分配及水生生态系统对水下光场的响应、大型浅水湖泊中蓝藻水华的暴发机理、提高二类水体水质定量遥感精度。

关键词 辐照度;水光学;反演;吸收系数

中图分类号 P733. 3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092907.1766

Inversion of Absorption Coefficient of Medium in Shallow Lake

Zhao Qiaohua

(College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract Based on the data of underwater light field measured in Taihu lake and Tianmuhu lake, on the supposition that there is source-free and no inelastic-scattering water, the inherent optical property (absorption coefficient) of medium in shallow lakes was successfully inverted by using the profile of upward and downward irradiance, diffuse reflectivity and diffuse decay coefficient. The error aroused from surface wave and ship shadow was reduced by the inversion method. The inversion results agree well with that by using the quantitative filter technique (QFT). The method is helpful to research on photosynthesis available radiation distribution among different media and aquatic ecology responding to underwater light field, to mechanism of cyanobacteria bloom and to remote sensing precision for case 2 water improved.

Key words irradiance; hydro-optics; inversion; absorption

1 引 言

水体介质的吸收系数等固有光学参数的反演是环境光学、水光学及水体遥感中的一个重要问题。太阳辐射在散射、吸收水体的传输过程中,其光谱组成随之发生变化^[1]。水体中,吸收系数、散射系数及体散射相函数决定了水色、水表的热量传输、水柱中光合作用可获得能量的大小和光谱组成、水体的透明度,且水体介质吸收系数是影响、预测水体初级生产率的关键参数^[2],因而水体中介质吸收系数的获取受到诸多学者的关注。

水体介质中的主要吸光成分基本可分为三类:

1) 有色溶解有机质(或称黄质), 2) 非藻类颗粒物, 3) 藻类颗粒物^[3]。其中有色溶解有机质是溶解性的,该吸收系数可通过分光光度计进行测定^[4]。而颗粒物吸收系数的测定主要通过定量滤膜技术^[5,6]。但上述测定方法不仅耗时,而且存在无法完全消除散射的效果^[7]。反射管装置通过取少量水样,分离散射和吸收,可以现场对吸收及消光系数测定,但该装置无法取得水体中的大颗粒或会破碎大颗粒从而使测量结果出现较大的误差^[7],该现象在悬浮颗粒物丰富的大型浅水湖泊中尤为突出。正由于试验测定存在的不足,于是诸多学者通过水下光场的变化

收稿日期: 2008-05-08; 收到修改稿日期: 2008-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(40701168)和国家 863 计划(2002AA601011)资助项目。

作者简介: 赵巧华(1972—),男,副教授,主要从事水光学及大气光学等方面的研究。E-mail: zqh3531@sina.com

反演水体固有光学参数。1) 深水中, 水下光场随深度增加会出现渐进态, 而渐进态处的漫射消光系数及辐照度反射率为固有光学参数, 因而可通过它们反演水体介质的吸收系数^[7,8]。2) 在假定水面无波浪的情况下, 水体中向上、向下的辐照度廓线分布反演水体的吸收系数、后向散射系数、散射相位函数^[9]。但由于大型浅水湖泊中, 有色溶解有机质和颗粒物丰富, 消光作用强烈, 且风浪作用明显, 风浪对水下光场扰动作用也很突出^[10,11], 加上船舶阴影对水下光场测量的影响^[12], 因而针对浅水湖泊水体吸收系数的反演, 上述两种方法并不完全适用。3) 利用 Monte Carlo 模式迭代计算, 反演了均匀水体、分层水体介质的吸收系数和后向散射^[13,14]。但该方法计算量大, 限制了其应用价值。

我国长江中下游大多数浅水湖泊均处于富营养化状态, 而与之伴生的是浮游植物过度生长, 水华频发, 从而造成水质下降^[15]。浅水湖泊的几何深度较小, 易受风浪扰动致使底泥的再悬浮, 造成辐射衰减程度剧烈, 因而光是该类水生生态系统的—个限制性因子, 影响着水生生态系统的结构和功能^[3]。本

文拟通过辐射传输理论, 考虑风浪对光场扰动的作用, 对水体中介质的吸收特性进行反演, 该研究有助于了解水生生态系统的演变、蓝藻水华的形成机理、及有利于提高二类水体水质定量遥感的精度。

2 材料与方法

2.1 水下辐照度的测定

2006 年 7 月 29 日至 7 月 31 日在太湖 11 个点, 2006 年 6 月 12 日在天目湖 2 个点观测点采得水中上行、下行辐照度 (E_u, E_d), 采样点分布见图 1, 采样时天气为晴且无云, 在观测过程中, 选择在船体向阳的一面进行, 以避免船体遮挡直射辐射, 且使仪器离开船体一定的距离; 在深度测量时, 通过—金属标尺垂直插入水中并多次测定对应采样点的深度, 其平均值即为该采样点的水深; 同时通过—与直金属杆垂直的金属横杆将水下光谱仪固定, 以保证仪器探头始终与金属标尺平行, 并且保证观测时间小于 5 min。使用仪器为德国 Trios 公司生产的 SAM-8099 光谱辐射仪, 其校正时间为 2005 年 7 月 18 日。该仪器采样波长的范围为 280~720 nm。

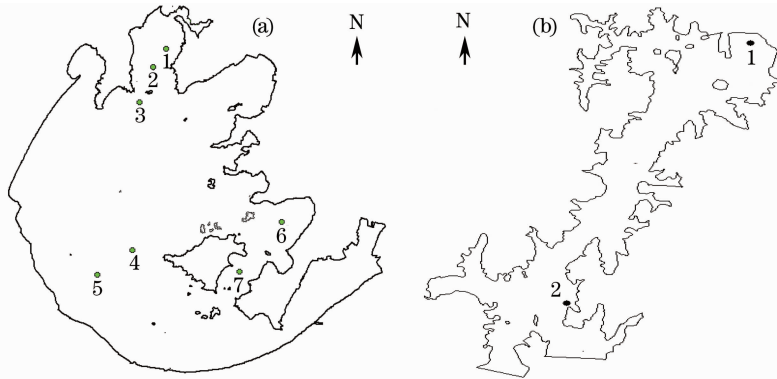


图 1 采样点分布图。(a)太湖;(b)天目湖

Fig. 1 Distribution of sampling location. (a) Taihu lake; (b) Tianmuhu lake

2.2 颗粒物和有色溶解有机质吸收系数的测定

颗粒物的吸收采用定量滤膜技术 (Quantitative Filter Technique: QFT) 测定, 用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜过滤 50~200 mL 水样, 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, 其计算方法见文献^[4~6]。

有色溶解有机质的光谱吸收系数测定采用通过 0.45 μm GF/F 玻璃纤维滤膜过滤的水样再用 Millipore 滤膜过滤, 然后在 UV-2401PC 型紫外分光光度计下测定其吸光度, 计算方法见文献^[6]。

则水体介质的吸收系数为悬浮颗粒物、CDOM 吸收系数的线性加。

由于 400~700 nm 为光合有效辐射, 其对水环境影响较大, 因而本文主要讨论该波段的吸收系数。

3 反演算法

辐射传输方程描述了辐射在水体中的传输规律 (假定水体中无内光源、无弹性散射及光学深水)。

$$\cos(\theta) \frac{dL(z, \theta, \varphi)}{dz} = -c(z, \lambda)L(z, \theta, \varphi) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} L(z, \theta', \varphi') \beta(z, \alpha) d\theta' d\varphi' \quad (1)$$

其中 z 为深度, θ, θ' 为天顶角, φ, φ' 为方位角, α 为散射角, $L(z, \theta, \varphi)$ 为在深度为 z 、天顶角为 θ 、方

位角为 φ 的辐亮度; $\beta(z, \alpha)$ 为在深度 z 处、散射角为 α 的散射相函数; $c(z)$ 为在深度 z 处的光束消光系数,它是吸收系数 $a(z)$ 、散射系数 $b(z)$ 之和,而

$b(z)$ 又可进一步分解为前向散射系数 $b_f(z)$ 、后向散射系数 $b_b(z)$ 之和。上述各个函数均为波长 λ 的函数,但为简便起见而省略(下同)。

$$\overline{\mu_d(z)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(z, \theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(z, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} = \frac{E_d(z)}{E_{od}(z)} = \cos\theta_d(z) \quad (2)$$

$$\overline{\mu_u(z)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} L(z, \theta, \varphi) |\cos\theta| \sin\theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(z, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} = \frac{E_u(z)}{E_{ou}(z)} = |\overline{\cos\theta}|_u(z) \quad (3)$$

$$\overline{\mu_t(z)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} L(z, \theta, \varphi) |\cos\theta| \sin\theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(z, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} = \frac{E(z)}{E_o(z)} = |\overline{\cos\theta}|_t(z) \quad (4)$$

其中 $E_{od}(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(z, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$ 、 $E_{ou}(z) =$

$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} L(z, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$ 为标量照度, $E(z) = [E_d(z) - E_u(z)]$ 为净辐照度, d, u, t 分别表示下、上半球体及整个球体。 μ_d 、 μ_u 、 μ_t 分别标征了下半球、上半球、整个球体的光场平均余弦。

通过对(1)式的积分、整理,可得出下行漫射消光系数 $K_d(z)$ 、净辐照度漫射消光系数 $K_e(z)$ 与水体固有光学特性的关系。

$$K_d(z) = -\frac{1}{E_d(z)} \frac{dE_d(z)}{dz} \approx \frac{a(z) + b_b(z)}{\overline{\mu_d(z)}} \quad (5)$$

$$K_e(z) = -\frac{1}{E(z)} \frac{dE(z)}{dz} = \frac{a(z)}{\overline{\mu(z)}} \quad (6)$$

由此可知,如在深度 z 处整个球体光场平均余弦 $\overline{\mu(z)}$ 已知的条件下,该处的吸收系数 $a(z)$ 是可求得的。

根据 Hirata^[9] 的研究,先定义漫射消光系数的比率,找出了 $\overline{\mu(z)}$ 的表达。

$$q_{ue}(z) = \frac{K_u(z)}{K_e(z)} \quad (7)$$

$$q_{de}(z) = \frac{K_d(z)}{K_e(z)} \quad (8)$$

其中 $K_u(z) = -\frac{1}{E_u(z)} \frac{dE_u(z)}{dz}$ 为上行漫射消光系数。同时由于水体的辐照度反射率相对较小,即 $q_{de}(z) \approx 1$,于是可以进一步化简^[9]:

$$\overline{\mu(z)} = \frac{R(z)}{1 - q_{de}(z) + q_{ue}(z)R(z)} \overline{\mu_d(z)} \approx \frac{\overline{\mu_d(z)}}{q_{ue}(z)} \quad (9)$$

因而可得出水体吸收系数的表达式:

$$a(z) = K_e(z) \overline{\mu(z)} \approx \frac{K_d(z) \overline{\mu_d(z)}}{q_{ue}(z)} \quad (10)$$

同时 Hirata^[9] 进一步通过折射进入水表的太阳天顶角 θ_{ds} 余弦 $\overline{\mu_d(0)} \approx \mu_{ds} = \cos\theta_{ds}$ 及水表下方辐照度反射率 $R(0, \mu_{ds})$, 构建了 $\overline{\mu_d(z)}$ 与水体中辐照度反射率 $R(z)$ 的表达式:

$$\overline{\mu_d(z)} = [\mu_{ds}^{q_{ue}(z)} \frac{R(0, \mu_{ds})}{R(z)}]^{1/q_{ue}(z)} \quad (11)$$

其中 $R(0, \mu_{ds})$ 为紧贴水表下方处,入射辐射天顶角为 θ_{ds} 时的辐照度反射率,因而将(11)式代入(10)式即可得出 $a(z)$ 的表达式:

$$a(z) = \frac{K_d(z)}{q_{ue}(z)} \left[\mu_{ds}^{q_{ue}(z)} \frac{R(0, \mu_{ds})}{R(z)} \right]^{1/q_{ue}(z)} \quad (12)$$

但由于风浪对水下光场的扰动作用,会造成水下光场呈现增大、减小的波动现象^[10,11],因而可能造成 $a(z)$ 的反演出现较大的误差。加上风浪较大,水体介质因风浪扰动而分布较为均匀,本文采用对水体多层吸收系数的加权平均,消除波浪的影响。

$$a = \int_0^{z_m} a(z) f(z) dz / \int_0^{z_m} f(z) dz \quad (13)$$

其中 z_m 为观测时达到真光层附近的深度。 $f(z) = \ln[E_d(z)]$ 为权重因子,由于 $E_d(z)$ 随深度基本呈

指数衰减,因而使得上述权重因子随深度呈近线性变化^[13],即深度越大,该因子权重越大,从而避免了水表浅处因船舶阴影及风浪对水下光场扰动引起的误差^[10~12]。

$$a_m = a - a_w \quad (14)$$

其中 a_m 为水体中介质的吸收系数, a_w 为纯水的吸收系数。

另考虑到非藻类颗粒物及有色溶解有机质的吸收系数随波长呈负指数衰减的形式,因而它们在近红外的吸收非常弱,而藻类颗粒物中色素在 710 nm 以后的吸收也非常弱^[17]。由此需对反演的介质吸收系数进行适当的订正:

$$a_{\text{medium}}(\lambda) = a_m(\lambda) - a_m(\lambda_{710 \text{ nm}}) \quad (15)$$

4 结果与分析

图 2、图 3 分别给出了太湖 7 个采样点及天目湖 2 个采样点实测和反演的吸收系数谱,从中可以看出,反演的水体介质吸收谱与实测的吸收谱均吻

合得较好。反演的吸收系数谱基本体现出吸收系数随波长呈现减小的趋势,但在太湖的 1#、3# 及天目湖 1#、2# 采样点还在 675 nm 附近又有一明显的吸收峰,而在其余各点该峰体现的并不突出,该峰体现出了叶绿素 a 的红光吸收峰^[18],然而由于水体介质中的有色溶解有机质和非藻类颗粒物在短波处吸收强烈,且在浅水湖泊中,由于地表径流的输送及风浪造成的再悬浮,造成水体中该两类介质丰富,因而使得叶绿素 a 在蓝光(440 nm)吸收峰被其淹没,从而在短波处体现出非藻类及有色溶解有机质的吸收特点,这即使在颗粒物的吸收谱中同样有此现象^[19]。而且在太湖的 1#、3# 还呈现出 620 nm 的次峰,该峰主要体现出藻兰素的吸收特点^[17],说明在太湖梅梁湾蓝藻较为丰富,这与文献^[20]的结果基本一致。总之,反演的水体介质的吸收谱基本与用定量滤膜技术测定的结果基本一致,而且也能反映出不同的水体介质的吸收状况。

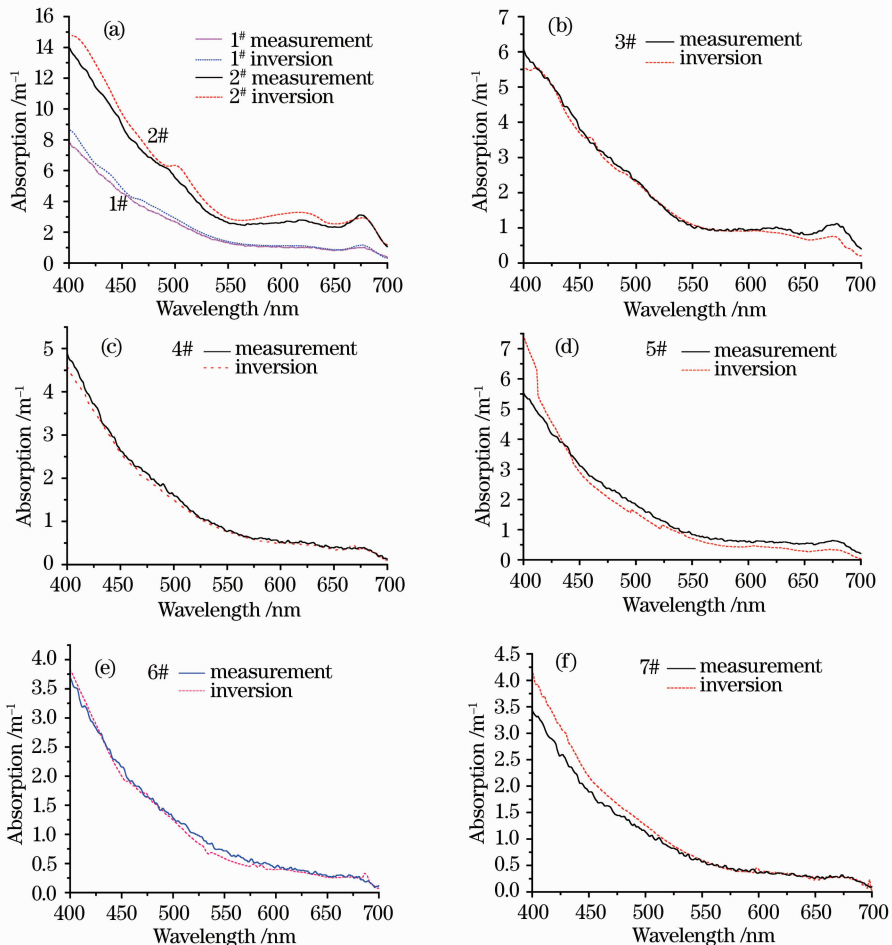


图 2 太湖各采样点吸收系数谱

Fig. 2 Absorption coefficient spectrum of medium in Taihu lake in seven sampling location

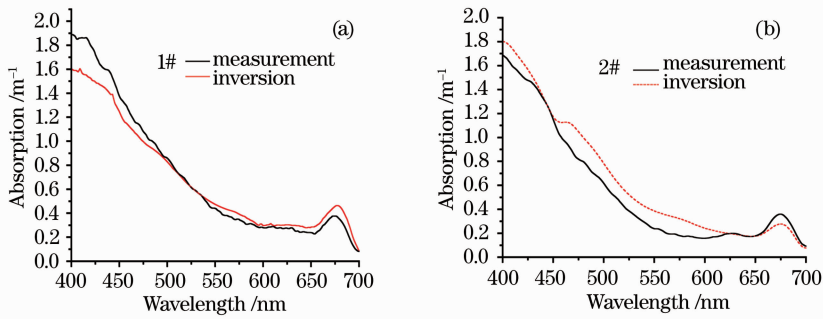


图 3 天目湖各采样点吸收系数谱

Fig. 3 Absorption coefficient spectrum of medium in Tianmuhu lake in two sampling location

5 结 论

水体吸收系数属于固有光学特性,它独立于入射光场的几何结构,水表粗糙程度,其表征的是水体介质的光学特性^[21],然而由易观测的水体中上行、下行辐照度确定的漫射消光系数和辐照度反射率属于表观光学特性,尽管在一定程度上反映了水体的特性,但其是水体、入射光场的几何结构和水表粗糙程度的综合反映^[21,22]。

然而光在水体内的传输过程中,散射仅改变光的传输方向,并不会造成其能量的减小;吸收不会改变光的传输方向。由于散射造成光子的形成增大,提高了光子被吸收的概率,因而吸收和散射在光的传输过程中,是联合对其产生影响,随着光传输深度的加大,光携带吸收和散射的信息增加,而诸如水表粗糙程度等外界因素对其影响减小^[12]。这一过程为通过辐照度廓线反演吸收系数提供了可能。而且吸收系数对介质的体散射系数依赖度并不高^[7,24],因而尽管体散射函数这一固有光学参数难以确定,但对吸收系数的反演仍为可行。

本文通过水体中整个球体的光场余弦平均值与水体吸收系数的关系[见(6)式],将反演吸收系数的问题转化为求水体中下行光场的平均余弦问题,为通过水体中上行、下行辐照度廓线反演水体吸收系数提供了可能。

由于风造成水表起伏,因而水体表面在高度及波面斜率上会出现连续变化,从而改变了光线的传播路程及方向,使得光线出现聚合或发散的周期性变化^[23]。该现象使得近表层光学特性水平均匀的假设可能会引起较大的误差,甚至会造成漫射衰减系数为负值的现象^[10];本文通过对反演各层吸收系数的加权平均,以弱化由水表波浪及观测时船舶阴影对水下光场影响而带来的误差,从而达到提高反

演水体吸收系数精度的目的。

从反演的结果来看,其与用定量滤膜技术测定的结果吻合得较好,而且其体现出了水体各介质的吸收特点,有利于研究进入水体的太阳辐射能在各介质之间的分配及水生生态系统对水下光场的响应、大型浅水湖泊中蓝藻水华的暴发机理、提高二类水体水质定量遥感精度。

总之,假定在水体中无内光源及无非弹性散射的情况下,通过水体中向上、向下的辐照度廓线分布,及由此确定的辐照度反射率、漫射消光系数,较为成功地反演了水体中介质的固有光学参数——吸收系数,且在较大程度上降低了由波浪及船舶阴影所带来的误差。同时将该反演结果与通过定量滤膜技术测定的结果进行了比较,二者吻合得较好。

致谢 野外采样、实验室测定及部分数据的提供得到张运林博士、王鑫硕士的鼎力帮助,谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 M. Kishino, C. R. Booth. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter, and pure water[J]. *Limnol. Oceanogr.* 1984, **29**(2): 340~349
- 2 R. A. Leather, N. J. McCormick. Ocean inherent optical property estimation from irradiance[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33): 8685~8698
- 3 Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge university press, 1994, 54~83
- 4 Zhang yunlin, Qin Boqiang, Yang Longyun. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in meliang bay of lake taihu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(12): 3969~3979
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[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3969~3979
- 5 J. S. Cleveland, A. D. Weidemann. Quantifying absorption by aquatic particles: a multiple scattering correction for glass-fiber filters[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1993, **28**(6): 1321~1327
- 6 曹文熙,杨跃忠,许晓强,珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. *科学通报*, 2003, **40**(17): 1876~1881
- 7 R. A. Leathers, N. J. McCormick. Ocean inherent optical

- property estimation from irradiance [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33): 8685~8698
- 8 B. D. Piening, N. J. McCormick. Asymptotic optical depths in source-free ocean waters [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42** (27): 5382~5387
- 9 T. Hirata. Irradiance inversion theory to retrieve volume scattering function of seawater [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(9): 1564~1573
- 10 J. R. V. Zaneveld, E. Boss, A. Barnard. Influence of surface waves on measurement and modeled irradiance profiles[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1442~1449
- 11 Zhao Qiaohua, Qin Boqiang, Zhang Yunlin. Characteristic Analysis of the Fluctuation of Light Field under Water in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 760~765
赵巧华, 秦伯强, 张运林. 太湖梅梁湾水下光场扰动的特征分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 760~765
- 12 H. R. Gordon. Ship perturbation of irradiance measurements at sea, 1: Monte Carlo simulation [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(23): 4172~4182
- 13 H. R. Gordon, G. C. Boynton. Radiance-irradiance inversion algorithm for estimating the absorption and backscattering coefficients of nature waters; homogeneous waters [J]. *Applied optics*, 1997, **36**(12): 2636~2641
- 14 H. R. Gordon, G. C. Boynton. Radiance-irradiance inversion algorithm for estimating the absorption and backscattering coefficients of nature waters; vertically stratified water bodies [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(8): 3886~3896
- 15 Kong Fanxiang, Gao Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2005, **25**(3): 589~595
- 孔繁翔, 高 光. 大型浅水湖泊富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589~595
- 16 R. C. Smith, K. S. Baker. Analysis of ocean optical data II [C]. *SPIE*, 1986, **637**: 95~107
- 17 C. L. Gallegos, D. L. Correll. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1990, **35**(7): 1486~1502
- 18 Han Boping, Han Zhiguo, Fu Xiang. Algal Photosynthesis: Mechanisms and Models [M]. Beijing: Science press, 2003, 6~18
韩博平, 韩志国, 付 祥. 藻类光合作用机理与模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2003, 6~18
- 19 Zhao Qiaohua, Zhang Yunlin, Qin Boqiang. Partitioning spectral absorption of particulate matter in Meiliang Bay of Lake Taihu [J]. *J. Lake Sciences* 2006, **18**(4): 356~362
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 [J]. *湖泊科学* 2006, **18**(4): 356~362
- 20 Kirk J. T. O. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1984, **29**(2): 350~356
- 21 Curtis D. Mobley. Light and Water Radiative Transfer in Nature Water [M]. San Diego: Academic Press, 1994. 17~24
- 22 H. R. Gordon. Can the Lambert-Beer be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1989, **34**(8): 1389~1409
- 23 D. Stramski, J. Dera. On the mechanism for producing flashing light under a wind-disturbed water surface [J]. *Oceanologia*, 1988, **25**: 5~21
- 24 C. D. Mobley, L. K. Sundamn, E. Boss. Phase function effects on oceanic light fields [J]. *Applied Optics*, **41**(6): 1035~1050