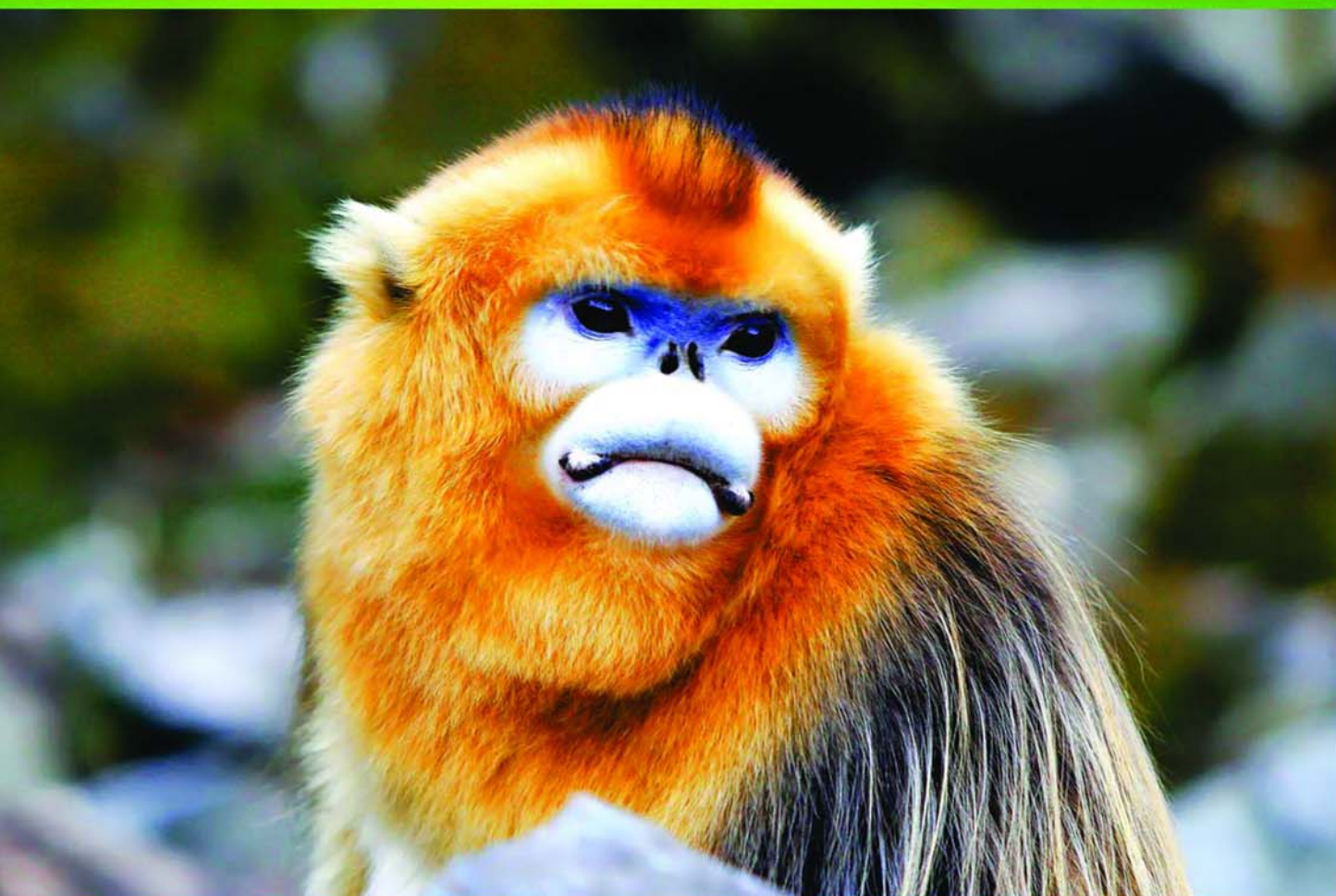


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第2期 Vol.32 No.2 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 2 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

北部湾秋季底层鱼类多样性和优势种数量的变动趋势	王雪辉,邱永松,杜飞雁,等 (333)
中国大陆鸟类和兽类物种多样性的空间变异	丁晶晶,刘定震,李春旺,等 (343)
粉蝶盘绒茧蜂中国和荷兰种群学习行为及 EAG 反应的比较	王国红,刘 勇,戈 峰,等 (351)
君主绢蝶的生物学及生境需求	方健惠,骆有庆,牛 犇,等 (361)
西南大西洋阿根廷滑柔鱼生物学年间比较	方 舟,陆化杰,陈新军,等 (371)
城市溪流中径流式低坝对底栖动物群落结构的影响	韩鸣花,海燕,周 斌,等 (380)
沉积再悬浮颗粒物对马氏珠母贝摄食生理影响的室内模拟	栗志民,申玉春,余南涛,等 (386)
太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制	徐燕青,陈建芳,高生泉,等 (394)
几株赤潮甲藻的摄食能力	张清春,于仁成,宋静静,等 (402)
高摄食压力下球形棕囊藻凝聚体的形成	王小冬,王 艳 (414)
大型绿藻浒苔藻段及组织块的生长和发育特征	张必新,王建柱,王乙富,等 (421)
链状亚历山大藻生长衰亡相关基因的筛选	仲 洁,隋正红,王春燕,等 (431)
太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响	刘忠华,李云梅,吕 恒,等 (438)
程海富营养化机理的神经网络模拟及响应情景分析	邹 锐,董云仙,张祯祯,等 (448)
沙质海岸灌化黑松对蛀食胁迫的补偿性响应	周 振,李传荣,许景伟,等 (457)
泽陆蛙和饰纹蛙蝌蚪不同热驯化下选择体温和热耐受性	施林强,赵丽华,马小浩,等 (465)
麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析	赵紫华,王 颖,贺达汉,等 (472)
镉胁迫对芥蓝根系膜过氧化及 ATPase 活性的影响	郑爱珍 (483)
生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响	韩春梅,李春龙,叶少平,等 (489)
九州虫草菌丝体对 Mn 的耐性及富集	罗 毅,程显好,张聪聪,等 (499)
土霉素暴露对小麦根际抗生素抗性细菌及土壤酶活性的影响	张 昊,张利兰,王 佳,等 (508)
氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响	沈芳芳,袁颖红,樊后保,等 (517)
火炬树雌雄母株克隆生长差异及其光合荧光日变化	张明如,温国胜,张 瑾,等 (528)
湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能	潘春翔,李裕元,彭 亿,等 (538)
祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响	赵锦梅,张德罡,刘长仲,等 (548)
沙质草地生境中大型土壤动物对土地沙漠化的响应	刘任涛,赵哈林 (557)
腾格里沙漠东南缘可培养微生物群落数量与结构特征	张 威,章高森,刘光琇,等 (567)
塔克拉玛干沙漠南缘玉米对不同荒漠化环境的生理生态响应	李 磊,李向义,林丽莎,等 (578)
内蒙古锡林河流域羊草草原 15 种植物热值特征	高 凯,谢中兵,徐苏铁,等 (588)
不同密度条件下芨芨草空间格局对环境胁迫的响应	张明娟,刘茂松,徐 驰,等 (595)
环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响	任学敏,杨改河,王得祥,等 (605)
海藻酸铈配合物对毒死蜱胁迫下菠菜叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响	栾 霞,陈振德,汪东风,等 (614)
城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例	黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等 (622)
基于遥感和 GIS 的川西绿被时空变化研究	杨存建,赵梓健,任小兰,等 (632)
亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单——以台州地区为例	常 杰,任 远,史 琰,等 (641)
研究简报	
不同水分条件下毛茛苔草枯落物分解及营养动态	侯翠翠,宋长春,李英臣,等 (650)
大山雀对巢箱颜色的识别和繁殖功效	张克勤,邓秋香,Justin Liu,等 (659)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-01	



封面图说: 雄视——中国的金丝猴有川、黔、滇金丝猴三种,此外还有越南和缅甸金丝猴两种。金丝猴是典型的森林树栖动物,常年栖居于海拔 1500—3300m 的亚热带山地、亚高山针叶林、针阔叶混交林,常绿落叶阔叶混交林中,随着季节的变化,只在栖息的生境中作垂直移动。川金丝猴身上长有柔软金色长毛,十分漂亮。个体大,嘴角处有瘤状突起的是雄性金丝猴的特征。川金丝猴只分布在中国的四川、甘肃、陕西和湖北省。属国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012101759

刘忠华, 李云梅, 吕恒, 檀静, 郭宇龙. 太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响. 生态学报, 2012, 32(2): 0438-0447.

Liu Z H, Li Y M, Lu H, Tan J, Guo Y L. Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 0438-0447.

太湖春季水体固有光学特性及其 对遥感反射率变化的影响

刘忠华, 李云梅*, 吕 恒, 檀 静, 郭宇龙

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要: 吸收特性和后向散射特性是水体重要的光学特性, 同时也是建立生物光学模型的基本参数。利用 2009 年 4 月太湖春季实测数据, 结合生物光学模型推导了太湖春季水体颗粒物后向散射系数, 分析了太湖春季水体的吸收特性和后向散射特性, 并利用经验正交分解方法对遥感反射率变化的影响因子进行了分析。结果表明: (1) 非色素颗粒物是影响太湖春季水体吸收特性的主导因子, 色素颗粒物和有色可溶性有机物 (CDOM) 对总吸收 (不包含纯水) 的贡献相对较小, 且色素颗粒物在梅梁湾湖区的包裹效应明显大于其他湖区。(2) 颗粒物后向散射系数与总悬浮物和无机悬浮物具有很强的相关性 (相关系数均在 0.88 以上), 与有机悬浮物的相关性相对较弱 (相关系数均在 0.73 以下), 且水体中多次散射对水面总辐亮度有较大的贡献, 平均贡献率高达 93.46%。(3) 利用经验正交分解方法将遥感反射率变化光谱分解成 3 个正交因子, 3 个正交因子总共解释了约 99% 的遥感反射率变化信息, 其中, 第一正交因子解释了 93% 的变化信息, 第二和第三正交因子分别解释了 5% 和 1% 的变化信息。通过对各正交因子与水体不同组分的吸收和后向散射系数进行相关性分析得出, 颗粒物的后向散射对水面反射光谱的形成具有非常重要的影响, 太湖春季水体遥感反射率的变化主要取决于无机颗粒物的吸收和后向散射, 有机颗粒物对遥感反射率的变化影响较小。

关键词: 吸收系数; 后向散射系数; 遥感反射率; 经验正交分解; 太湖

Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance

LIU Zhonghua, LI Yunmei*, LU Heng, TAN Jing, GUO Yulong

Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

Abstract: Absorption and backscattering characteristics are important optical properties and they are also two basic parameters of bio-optical model. Remote Sensing reflectance is the basis for inversing water quality parameters and its character mainly depends on absorption and backscattering of all kinds of optical active substances of water, so it is very important to study absorption and backscattering characteristics of water and its influence on remote sensing reflectance. Lake Taihu is one of the five major freshwater lakes and also a typically shallow inland eutrophic lake in China with an area of 2338 km² and an average depth of about 2 m. In this paper the in situ remote sensing reflectance and absorption coefficients measured in April 2009 in Lake Taihu were firstly used to deduce backscattering coefficients of particles combined with bio-optical model. Then we analyzed the absorption and backscattering characteristics of Lake Taihu in spring, and Empirical Orthogonal Function (EOF) was used to decompose remote sensing reflectance in order to analyze the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971215); 江苏省研究生培养创新工程项目 (CX10B_392Z); 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项资助 (E0203/1112/JC01); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (1411109012)

收稿日期: 2010-12-10; 修订日期: 2011-06-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

influence of absorption and backscattering characteristics on the change of remote sensing reflectance. The results show that: (1) Non-algal particle is the dominant factor which influences the absorption characteristic of Lake Taihu in spring, and its average contribution rate to the total absorption coefficients (exclusion of pure water) is 66.92%. While the contribution of algal particles and CDOM to the total absorption coefficients (exclusion of pure water) is relatively small and their average contribution rates are 21.83%, and 11.25%, respectively. The specific absorption coefficient and the size of algal particles in Meiliang Bay are all smaller than that in other areas of Lake Taihu, which means the package effect of algal particles in Meiliang Bay is obviously larger than that in other areas. (2) The backscattering coefficients of particles between 400nm and 750nm have a strong correlation with the concentration of total suspended matters and inorganic suspended matters with the correlation coefficients larger than 0.88, but a relatively weak correlation with the concentration of organic suspended matters with the correlation coefficients less than 0.73. The multiple scattering has great contribution to the total radiance of water surface and the average contribution rate can reach 93.46%. (3) The EOF analysis provides three dominant modes which account for about 99% of the total variance of remote sensing reflectance in Lake Taihu in spring, i. e. the first EOF mode accounts for 93% of the total variance, while the second and the third modes only explain 5%, and 1%, respectively. The backscattering coefficients of particles have an important influence on the spectral reflectance, and the change of remote sensing reflectance of Lake Taihu in spring is mainly ruled by absorption and backscattering of inorganic particles while the effect of organic particles is relatively small.

Key Words: absorption coefficients; backscattering coefficients; remote sensing reflectance; empirical orthogonal function; Lake Taihu

遥感技术以其宏观、观测面积大和实时性强等特点,能够提供同一时刻区域面状水域的遥感影像,因此在水环境监测中有其特有的优势。在利用遥感技术监测水环境时,可见光波段的遥感反射率通常能为水质参数的反演提供定量信息,例如在大洋水体中,通常采用遥感反射率在蓝、绿波段的比值变化进行叶绿素浓度的反演^[1]。随着人们对水体光学特性研究的深入,以生物光学模型为基础的分析模型逐渐成为人们关注的焦点,而水体的吸收系数($a(\lambda)$)和后向散射系数($b_b(\lambda)$)则是构建生物光学模型的基本参数。在生物光学模型中,遥感反射率同水体的后向散射系数成正比,而同水体的吸收系数成反比,遥感反射率的光谱模式在清洁水体中主要取决于 $b_b(\lambda)/a(\lambda)$,在浑浊水体中主要取决于 $b_b(\lambda)/(a(\lambda) + b_b(\lambda))$,因而研究水体的吸收特性和后向散射特性尤为重要。在二类水体中,水体的吸收特性受水体中各种组分的影响,而影响水体后向散射特性的水体组分较为单一,其后向散射特性主要取决于总悬浮物^[2]。国内外许多学者^[3-7]对不同季节不同湖区水体组分的吸收特性进行过相关的研究,然而对于水体(特别是内陆湖泊水体)的后向散射特性研究较少,原因之一是测量水体后向散射系数的仪器大部分都是针对海洋水体而设计的,其在内陆浅水湖泊的应用具有一定的局限性^[8],因此,内陆湖泊水体精确的后向散射系数的获取相对于吸收系数要困难的多,基于此,本文中后向散射系数的获取采用半分析模型进行拟合,该方法结合了水体的生物光学特性和辐射传输理论,具有很好的物理基础,在水体固有光学特性的反演中具有很好的效果^[9-11]。此外,之前的研究主要是侧重于对水体组分吸收特性和后向散射特性的分析,而针对不同的光学特性对遥感反射率变化影响的研究还相对欠缺。

太湖位于长江中下游地区,属于典型的富营养化浅水湖泊。本研究拟采用太湖春季实测数据,基于生物光学模型推导出太湖春季水体颗粒物后向散射系数,进而分析其吸收特性和后向散射特性,然后利用经验正交分解方法(empirical orthogonal function, EOF)对遥感反射率变化光谱进行正交分解,通过分析多种生物光学参数与各正交因子的相关性,阐明驱动太湖春季水体遥感反射率变化的光学特性及主导的生物光学参数,以期发展为区域化的生物光学模型提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 采样时间与点位

太湖位于长江三角洲南缘,水面面积约2338 km²,平均水深约为2 m。于2009年4月16—27日对太湖进

行采样,并同步测量水体的固有光学量和表观光学量数据,采样点分布如图 1 所示。

1.2 数据获取

水体反射光谱的测量采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计。为减少水体镜面反射和船体阴影的影响,测量时采用唐军武等^[12]提出的关于内陆二类水体水面以上光谱测量的方法。提取遥感反射率时需要测量的数据包括标准灰板、天空光、水体等的光谱辐亮度信息,每个对象都要采集 10 条以上的光谱数据,剔除异常光谱数据,剩余数据做均值处理。遥感反射率提取的具体方法见参考文献^[13]。

总悬浮物和非色素颗粒物的吸收系数采用定量滤膜技术(QFT)进行测定,总悬浮物吸收系数减去非色素颗粒物吸收系数得到色素颗粒物吸收系数;黄色物质(CDOM)吸收系数的测定参见文献^[14]。

在光谱测量的同时采集表层水样,低温冷藏带回实验室测量悬浮物的浓度。总悬浮物、无机悬浮物浓度的测量采用较为常规的方法,具体见参考文献^[15]。

1.3 太湖春季水体颗粒物后向散射系数模拟

国内外诸多学者^[8-11]基于水体的生物光学特性和辐射传输理论,结合生物光学模型进行过水体后向散射系数的模拟,并获得了较好的模拟结果,本研究参照李俊生等^[8]所提出的方法对太湖春季水体的后向散射系数进行模拟。

内陆水体常用的生物光学模型为^[16]:

$$R(0^-) = f \frac{b_b}{a + b_b} \quad (1)$$

式中, $R(0^-)$ 为刚好位于水面以下遥感辐照度比, f 是一个与光场有关的参数,取值范围为 0.2—0.56^[17], a 为水体总的吸收系数,由室内实验测得, b_b 为水体总的后向散射系数,可以分解为纯水和悬浮物的后向散射系数之和,即:

$$b_b = b_{bp} + b_{bw} \quad (2)$$

$R(0^-)$ 可以通过水面以上遥感反射率计算得到,即:

$$R(0^-) = R_{rs} \times \frac{Qn^2}{t(1 - \rho_{aw})} \quad (3)$$

式中, R_{rs} 为水面以上遥感反射率, Q 为光场分布参数,受水体、太阳角度、观测角度的影响而不同, n 为水体的折射指数,一般取值为 1.34, t 为气-水界面 Fresnel 透射系数,取值为 0.98, ρ_{aw} 为气-水表面的辐照度反射率,取值在 0.04—0.06 之间^[12]。

水体中颗粒物的后向散射系数通常采用指数模型进行参数化模拟^[17]:

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta \quad (4)$$

式中, $b_{bp}(\lambda_0)$ 为参考波长 λ_0 处的后向散射系数,本研究中参考波长 λ_0 取值为 532 nm, η 为后向散射系数随波长变化的指数。

联合方程(1)—(4),可以得到:

$$R_{rs} = F \frac{b_{bw} + b_{bp}(532) \left(\frac{532}{\lambda} \right)^\eta}{a + b_{bw} + b_{bp}(532) \left(\frac{532}{\lambda} \right)^\eta} \quad (5)$$

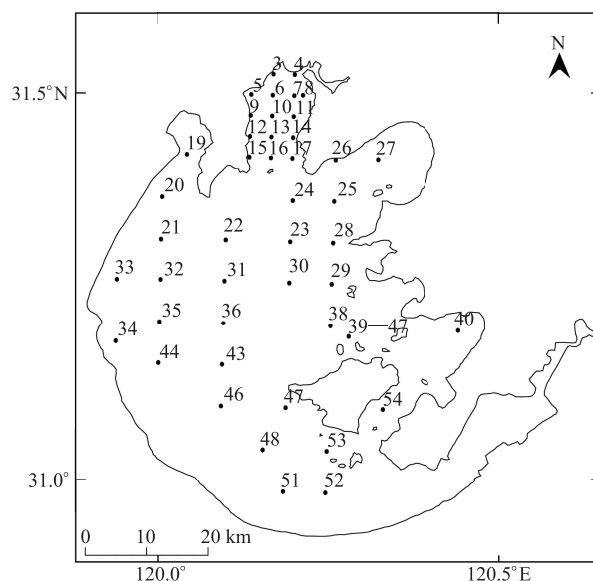


图 1 太湖样点分布示意图

Fig. 1 Sampling sites of Lake Taihu

式中, $F = \frac{f(1 - \rho_{aw})}{Qn^2}$ 。这样在公式(5)中存在 3 个未知数: F 、 $b_{bp}(532)$ 和 η , 本文利用 400—750 nm 范围内 351 个波段的实测遥感反射率数据和水体各组分吸收数据对上述 3 个参数进行最小二乘拟合。

1.4 经验正交分解方法

为了研究太湖春季水体不同的生物光学参数对遥感反射率变化的影响, 采用经验正交分解方法^[18]对遥感反射率变化光谱进行分解, 在进行 EOF 分析之前首先计算出所有光谱数据的平均值作为平均光谱, 然后将每条光谱数据减去平均光谱以反映其相对变化。因此, 原始光谱数据可以看作是所有的正交因子与其相应的因子载荷的乘积和平均光谱的线性组合, 即:

$$M = \bar{M} + \sum_{i=1}^p F_i S_i \quad (6)$$

式中, M 为原始光谱, $\bar{M}$ 为平均光谱, F_i 为第 i 个正交因子, S_i 为第 i 个正交因子的载荷, p 为波段数目。

利用 EOF 方法分解出的各因子之间虽然都是严格正交的, 但每一个正交因子并不一定仅同一种物理过程或一种光学特性相关^[18], 因此为了确定决定每一个正交因子的主导生物光学参数, 还需要对不同的生物光学参数与每个正交因子相应的因子载荷进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 太湖春季水体吸收特性

2.1.1 色素颗粒物吸收系数和比吸收系数

图 2 给出了太湖春季色素颗粒物吸收系数光谱曲线, 可以看出, 除少数叶绿素浓度较高的样点外, 大部分样点曲线在 440 nm 处的吸收峰不明显或完全消失, 其原因可能是太湖春季叶绿素浓度较低, 440 nm 左右的吸收峰信息被非色素颗粒物的吸收所湮没, 而在 675 nm 左右吸收峰较明显, 主要是因为叶绿素 a 在该波段具有很强的吸收, 且其他色素对该波段的影响较小, 因此能够较好地显示出叶绿素 a 的吸收特征。

太湖春季水体中色素颗粒物在 440 nm 处比吸收系数($a_{ph}^*(440)$)最大值为 0.24 m²/mg, 最小值为 0.008

m²/mg, 平均值为 (0.091±0.059) m²/mg, 675 nm 处比吸收系数($a_{ph}^*(675)$)介于 0.002—0.075 m²/mg, 平均值为 (0.033±0.013) m²/mg, 比吸收系数都在已有报道的范围之内^[19-20]。从空间分布上来看, 梅梁湾湖区 $a_{ph}^*(675)$ (平均值为 (0.029±0.008) m²/mg) 要小于其他湖区 (平均值为 (0.035±0.014) m²/mg), 而 $a_{ph}^*(440)$ 主要受色素包裹效应的影响, 其他辅助色素的影响较小, 由此可以看出, 梅梁湾湖区浮游藻类的色素包裹效应要大于其他湖区。无论是在梅梁湾湖区还是在整个太湖, $a_{ph}^*(440)$ 的空间差异性都大于 $a_{ph}^*(675)$, 其原因是 $a_{ph}^*(440)$ 除了受色素包裹效应外, 还要受到各种辅助色素的影响。

2.1.2 色素颗粒物粒径大小光谱参数

相对于色素颗粒物的组成而言, 色素颗粒物的大小变化是决定色素颗粒物的吸收系数与叶绿素浓度之间关系的主导因素^[21], 因此研究色素颗粒物粒径大小对于建立色素颗粒物吸收系数与叶绿素浓度的关系, 进而发展生物光学模型具有重要的意义。由于本次实验中没有色素颗粒物粒径大小数据, 因此本研究中采用 Ciotti 等^[21]提出的色素颗粒物粒径大小光谱参数(S_f)来间接研究太湖春季水体色素颗粒物粒径大小。 S_f 同主导粒径大小呈相反的变化趋势, 其值在 0—1 之间变化, 当 S_f 为 0 时, 色素颗粒物为小型藻类 (粒径 > 20 μm), 当 S_f 为 1 时, 色素颗粒物为微微型藻类 (粒径 < 2 μm), 当 S_f 介于 0—1 之间时则反映了微微型藻类和小型藻类对色素颗粒物吸收系数的相对贡献。

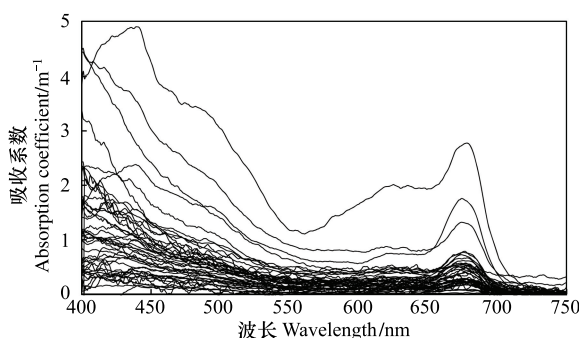


图 2 色素颗粒物吸收系数光谱曲线

Fig. 2 Absorption coefficient curves of algal particles

本文中采用公式(7)来计算色素颗粒物粒径大小光谱参数^[21]:

$$a_{ph}(\lambda) = a_{<ph>}(\lambda) [S_f a_{<pico>}(\lambda) + (1 - S_f) a_{<micro>}(\lambda)] \tag{7}$$

式中, $a_{<ph>}(\lambda)$ 为 400—700 nm 范围内色素颗粒物吸收系数平均值, $a_{<pico>}(\lambda)$ 和 $a_{<micro>}(\lambda)$ 分别代表微藻和大型藻类归一化吸收系数,其值参见文献^[21-22]。

图 3 给出了 S_f 随叶绿素 a 浓度的变化趋势,可以看出, S_f 大致与叶绿素 a 浓度呈负相关,随叶绿素 a 浓度的增加而减小,该结果与 Ferreira A 等^[7]的研究结果一致。整个太湖区域 S_f 的最小值为 0.03,最大值为 0.78,平均值为 0.31 ± 0.17 ,总体上来看,整个太湖浮游藻类以粒径较大的藻类为主,而从 S_f 的空间分布来看,梅梁湾湖区(平均值为 0.21 ± 0.14)明显小于除梅梁湾之外的湖区(平均值为 0.37 ± 0.17),其藻类粒径要明显大于其他湖区。Bricaud 等^[23]认为浮游藻类的粒径结构主要取决于水体的富营养化程度,在富营养化程度较高的水体中,粒径往往较大,而包裹效应与藻类的粒径有关,粒径越大,包裹效应越大,由此可见,梅梁湾湖区富营养化程度更为严重,浮游藻类的色素包裹效应明显大于其他湖区,这与 2.1.1 节的分析结果一致。

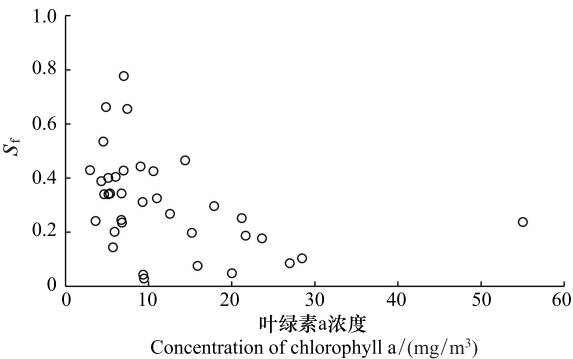


图 3 叶绿素 a 浓度与 S_f 统计关系

Fig. 3 Statistical relationship between chlorophyll a and S_f

2.1.3 非色素颗粒物和 CDOM 吸收特性

非色素颗粒物(NAP)吸收系数与 CDOM 吸收系数具有相似的光谱特征,都是随波长的增加呈指数形式衰减,由于两者具有一致的光谱特征,遥感反演中也通常将两者合在一起称作 CDM^[7]。国内外诸多学者^[24-25]对非色素颗粒物和 CDOM 的吸收特性进行过研究,通常采用下述公式进行其吸收系数的拟合:

$$a_x(\lambda) = a_x(\lambda_0) \exp(-S_x(\lambda - 440)) \tag{8}$$

式中, x 代表 NAP 或 CDOM; λ_0 为参考波长,通常取值为 440 nm; S_x 为 NAP 或 CDOM 吸收曲线斜率。

CDOM 在紫外波段具有强烈的吸收,为了准确分析 CDOM 的光谱特征,分别对 CDOM 在短波紫外 UV-C (240—280 nm)、中波紫外 UV-B (280—320 nm)、长波紫外 UV-A (320—400 nm) 和可见光波段 (400—700 nm) 的吸收系数和 S 值进行分析,而对 NAP 和 CDM 仅在可见光范围内进行分析。表 1 给出了太湖春季水体中 CDOM、NAP 和 CDM 的吸收系数及其 S 值,可以看出,CDOM 吸收最强的波段为 UV-C,吸收系数的平均值为 $(15.923 \pm 4.136)/m$,其次为 UV-B 和 UV-A,可见光波段吸收系数较弱,平均值不及 UV-C 波段的 1/80,其 S 值在各个波段范围内也不相同,UV-B 波段 S 值最大,其次为 UV-C 和 UV-A 波段,可见光波段 S 值最小,其平均值为 $(0.0171 \pm 0.0032)/nm$,该研究结果与孙德勇等^[2]对太湖夏、冬季节 CDOM 吸收特性的研究结果有所区别,其原因可能是不同季节 CDOM 的来源及组成不同,从而导致 CDOM 的吸收特性产生一定的差异。在可

表 1 太湖春季水体 CDOM、NAP 和 CDM 的吸收系数及其 S 值统计

Table 1 Statistics of absorption coefficient and S of CDOM, NAP and CDM in Lake Taihu in spring

波长/nm Wavelength	吸收系数 Absorption coefficient/ m^{-1}		S/nm^{-1}	
	变化范围 Range	平均值 Mean value	变化范围 Range	平均值 Mean value
CDOM(240—280)	8.134—38.939	15.923 ± 4.136	0.0171—0.0251	0.0197 ± 0.0016
CDOM(280—320)	3.017—20.718	7.797 ± 2.783	0.0170—0.0268	0.0203 ± 0.0019
CDOM(320—400)	0.401—8.388	2.183 ± 1.175	0.0145—0.0269	0.0187 ± 0.0023
CDOM(400—700)	0—2.105	0.188 ± 0.259	0.0091—0.0289	0.0171 ± 0.0032
NAP(400—700)	0—24.610	1.775 ± 2.502	0.0114—0.0149	0.0122 ± 0.0007
CDM(400—700)	0—25.274	1.963 ± 2.647	0.0117—0.0148	0.0130 ± 0.0007

CDOM: Colored dissolved organic matter, 有色可溶性有机物; NAP: Non-algal particle, 非色素颗粒物; CDM: Colored detrital matter, 有色碎屑物质, 等于有色可溶性有机物与非色素颗粒物之和

见光范围内, NAP 的吸收系数远大于 CDOM 的吸收系数, 而 CDOM 的吸收系数与 NAP 的吸收系数较为接近, 这表明太湖春季水体中 NAP 的吸收在 CDOM 的吸收中占据主导地位。从两者 S 值的比较来看, S_{nap} 和 S_{cdm} 均小于 S_{cdom} , 而 S_{nap} 和 S_{cdm} 较为接近, 但 S_{cdom} 的空间差异性远大于 S_{nap} 和 S_{cdm} , 因此在建立太湖春季生物光学模型时将 CDOM 和 NAP 作为一个参数(即 CDOM)会在一定程度上降低模型的误差。

2.1.4 水体组分对总吸收的贡献

在典型的水体 4 种组分(纯水、色素颗粒物、非色素颗粒物、CDOM)中, 纯水的吸收是固定的, 因此本节中所指的总吸收不包含纯水的吸收。图 4 给出了 440 nm 处 3 种组分对总吸收的贡献, 可以看出, 非色素颗粒物(NAP)的吸收在总吸收中占据主导地位, 除两个样点外, 其余样点的贡献率均在 40% 以上, 平均贡献率为 66.92%, 色素颗粒物对总吸收的贡献远低于非色素颗粒物, 平均贡献率为 21.83%, CDOM 对总吸收的贡献最小, 所有样点的贡献率均在 40% 以下, 平均贡献率仅为 11.25%, 由此可以看出, 影响太湖春季水体吸收特性的主要是非色素颗粒物, 色素颗粒物和 CDOM 的影响相对较小, 这主要是因为太湖春季水体中叶绿素浓度相对较低, 非色素颗粒物是总悬浮物的主要组成部分。

2.2 太湖春季水体后向散射特性

利用 1.3 节的方法计算出了各个样点处 3 个参数的最优值, 从计算的结果来看, 参数 F 的值介于 0.048—0.13 之间, 平均值为 0.074 ± 0.016 , $b_{\text{bp}}(532)$ 的值在 0.33—8.04 m^{-1} , 平均值为 $(1.98 \pm 1.65) \text{m}^{-1}$, 而参数 η 的变化范围为 0.86—3.03, 平均值为 2.08 ± 0.48 。Morel^[26] 认为 f/Q 的值通常介于 0.08—0.24 之间, 结合 F 中其他经验参数的取值可以得出 F 的取值范围介于 0.042—0.125 之间, 而从已有的对 η 值的研究结果来看, 不同的研究区域, η 在 0—3 之间变化^[17], 本研究中绝大部分样点参数 F 和 η 的取值均在已有报道的范围之内, 这也从一个侧面反映出利用优化拟合的方法可以较为准确地估算太湖春季水体颗粒物后向散射系数。

图 5 给出了 400—750 nm 范围内颗粒物的后向散射系数, 可以看出, 不同样点的后向散射系数具有一致的光谱特征, 但由于不同采样点水体各组分浓度、组成、颗粒大小等的差异使得不同样点后向散射系数的数值大小存在一定的差异, 并且波长越短, 差异性越大。蓝光波段(440 nm)后向散射系数最小值为 0.44 m^{-1} , 最大值为 12.32 m^{-1} , 平均值为 $(3.07 \pm 2.72) \text{m}^{-1}$; 绿光波段(532 nm)后向散射系数最小值为 0.33 m^{-1} , 最大值为 8.04 m^{-1} , 平均值为 $(1.98 \pm 1.65) \text{m}^{-1}$; 红光波段(675 nm)后向散射系数最小值为 0.20 m^{-1} , 最大值为 4.71 m^{-1} , 平均值为 $(1.16 \pm 0.89) \text{m}^{-1}$ 。

为了研究太湖春季水体中有机悬浮物和无有机悬浮物对后向散射系数的影响, 分别对总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度和有机悬浮物浓度与 400—750 nm 范围内的后向散射系数进行相关性分析, 结果表明, 在整个波段范围内, 总悬浮物和无有机悬浮物与后向散射系数均具有较好的相关性, 相关系数都在 0.88 以上, 并且相对于总悬浮物而言, 无机悬浮物与后向散射系数具有更高的相关性, 而相对于总悬浮物和无有机悬浮物而言, 有机

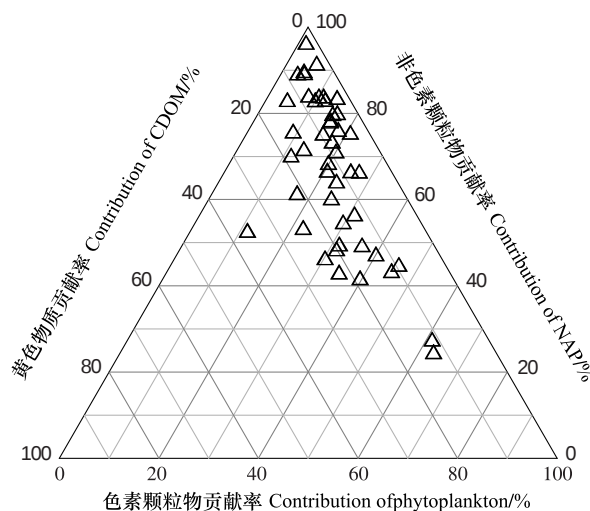


图 4 水体中不同组分对总吸收的贡献

Fig. 4 The contribution of different water components to the total absorption coefficients

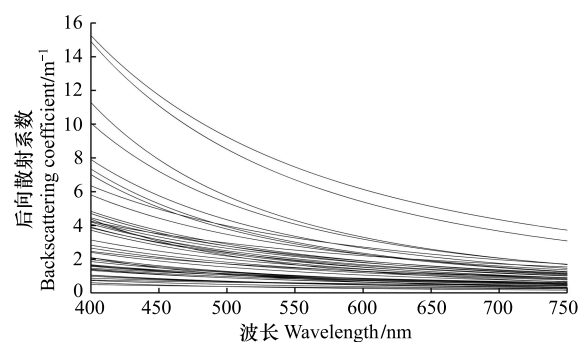


图 5 后向散射系数光谱曲线

Fig. 5 Backscattering coefficient curves

悬浮物与后向散射系数的相关性相对较低,400—750 nm 范围内相关系数均低于 0.73,其原因是太湖春季水体中无机悬浮物在总悬浮物中占据主导地位(采样点无机悬浮物所占比例最小为 50.95%,最大为 90.37%,平均为 79.41%),而水体中颗粒物的后向散射主要来自于无机颗粒物的后向散射。图 6 给出了 532 nm 处的颗粒物后向散射系数与总悬浮物浓度的统计关系,可以看出两者具有较好的相关性,模型拟合的 R^2 为 0.8775,D'Sa^[27]、乐成峰^[17]、姜光甲^[28]等学者分别对墨西哥湾、太湖、石头口门水库水体的后向散射系数与悬浮物浓度之间的关系进行过相关的研究,研究结果均表明两者具有较高的相关性,然而由于不同水体组分浓度及光学性质存在一定的差异,使得水体后向散射系数与悬浮物浓度的表达式并不唯一。根据上述分析并结合公式(4)可以将太湖春季水体 400—750 nm 范围内颗粒物的后向散射系数参数化为:

$$b_{bp}(\lambda) = (4 \times 10^{-5} [\text{TSM}]^2 + 0.0196 [\text{TSM}] + 0.3528) \left(\frac{532}{\lambda} \right)^{2.08 \pm 0.48} \quad (9)$$

式中,[TSM]为总悬浮物浓度。

Chami 等^[29]研究认为,在浑浊水体中多次散射对水面总辐亮度具有较大的贡献,当 $b_b/a > 0.05$ 时,超过 50% 的总辐亮度与多次散射有关,当 $b_b/a > 0.3$ 时,多次散射对总辐亮度的贡献高达 94% 以上,即使在清洁的水体中($b_b/a = 0.01$),多次散射对总辐亮度的贡献也有 20% 左右,由此可见,在浑浊水体中多次散射不容忽视。为了定量研究太湖春季水体中多次散射对水面总辐亮度的影响,本研究中采用 Chami 等^[29]建立的多次散射贡献率与固有光学量 b_b/a 之间的关系式计算出各样点的贡献率,计算结果表明,除个别样点的贡献率稍低于 90% 以外,绝大部分样点的贡献率都在 90% 以上,平均贡献率高达 93.46%,该研究结果高于 Sun 等^[30]对太湖的研究结果(平均贡献率为 81%),其原因可能是本研究所用数据为太湖春季数据,叶绿素浓度较低,从而使得水体总吸收系数相对较小。这表明太湖水体中多次散射对水面总辐亮度具有相当高的贡献率,强烈影响太湖水下光场结构,因此在建立太湖区域化生物光学模型时必须考虑多次散射的影响。

2.3 生物光学特性对遥感反射率变化影响分析

图 7 给出了遥感反射率数据经验正交分解的结果,前 3 个正交因子总共概括了大约 99% 的遥感反射率的变化信息,其中第一正交因子(EOF1)解释了约 93% 的变化信息,而第二正交因子(EOF2)和第三正交因子(EOF3)仅分别解释了约 5% 和 1% 的变化信息。由于第三正交因子对解释遥感反射率变化信息贡献很小并且同各生物光学参数没有明显的相关性,因此本研究中着重分析第一正交因子和第二正交因子。为了研究不同的生物光学参数对各正交因子的影响,分别对它们进行相关性分析,结果如图 8—9 所示。

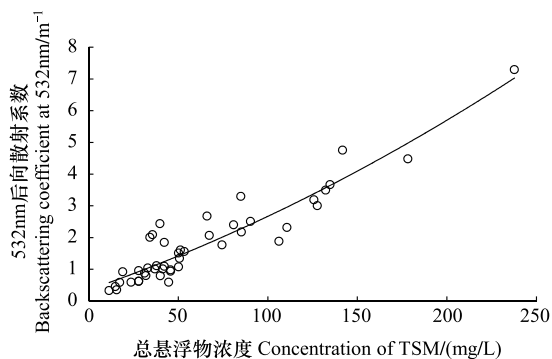


图 6 532nm 后向散射系数与总悬浮物浓度的关系

Fig. 6 Relationship between backscattering coefficients at 532nm and TSM

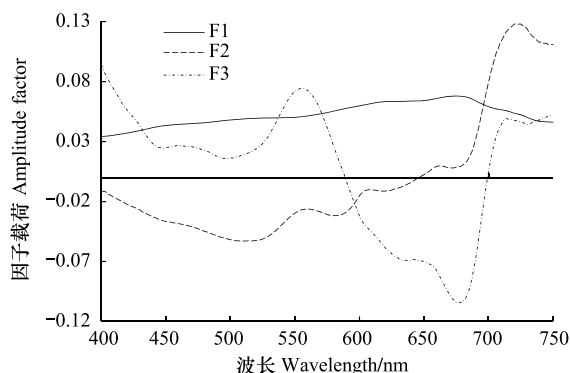


图 7 经验正交分解结果

Fig. 7 The result of empirical orthogonal function

F1: Factor 1, 正交因子 1; F2: Factor 2, 正交因子 2; F3: Factor 3, 正交因子 3

第一正交因子(EOF1)在整个波段范围内均为正值,且曲线较为平缓,在 670 nm 左右出现一小的峰值,同时缺少叶绿素在 700 nm 左右的荧光峰。从图 8 中可以看出,与第一正交因子相关性较高的生物光学参数为

总悬浮物浓度(TSM)、无机悬浮物浓度(ISM)、440 nm 处非色素颗粒物吸收系数($a_{\text{nap}}(440)$)和 532nm 处颗粒物后向散射系数($b_{\text{bp}}(532)$),其相关系数均在 0.75 以上,而其他生物光学参数与第一正交因子的相关性相对较低,相关系数均在 0.5 以下。在上述 4 种生物光学参数中, $b_{\text{bp}}(532)$ 与第一正交因子的相关性最高($r=0.81$),说明颗粒物的后向散射对第一正交因子起着非常重要的作用,同时注意到 $a_{\text{nap}}(440)$ 与第一正交因子的相关性也很高($r=0.78$),说明非色素颗粒物的吸收在很大程度上也决定着第一正交因子的变化,从图 8 中还可以看出,与第一正交因子相关性较高的生物光学参数主要为与无机颗粒物有关的参数。上述分析表明,第一正交因子并不是单纯地由一种光学特性驱动,而是由吸收和后向散射两种光学特性共同驱动,决定其变化的主要是与无机颗粒物相关的生物光学参数。

第二正交因子(EOF2)曲线变化与第一正交因子完全不同,以 650 nm 左右为分界点,往前均为负值,往后变为正值,在 710 nm 左右出现一明显的峰值,其原因是叶绿素 a 在该波段处有一明显的荧光峰,由于叶绿素 a 浓度的差异使得该处的荧光峰值变化较大,从而导致遥感反射率在 710 nm 处变化较大,这一变化特征没有出现在第一正交因子而出现在第二正交因子上,从一方面说明第二正交因子与叶绿素 a 浓度变化有关。从图 9 中可以看出,与第二正交因子相关系数较高的生物光学参数为有机颗粒物浓度(OSM)、叶绿素 a 浓度(Chla)、440 nm 处色素颗粒物吸收系数($a_{\text{ph}}(440)$)和 675 nm 处色素颗粒物吸收系数($a_{\text{ph}}(675)$),其他生物光学参数与第二正交因子的相关性相对较低,相关系数均在 0.5 以下,上述与第一正交因子相关性较高的生物光学参数均为与有机颗粒物相关的参数,而有机颗粒物主要以吸收为主,后向散射较弱,因此驱动第二正交因子变化的光学特性主要是有机颗粒物的吸收特性。

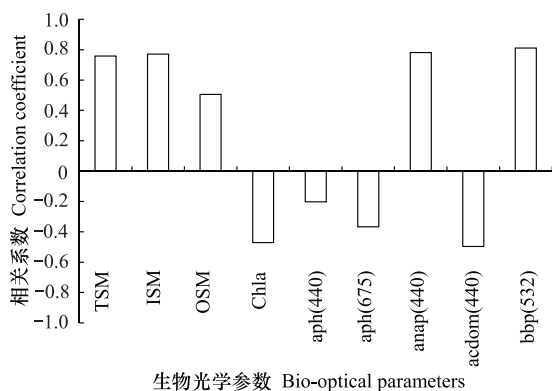


图 8 不同生物光学参数与第一正交因子相关性分析

Fig. 8 Correlation between EOF1 and different bio-optical parameters

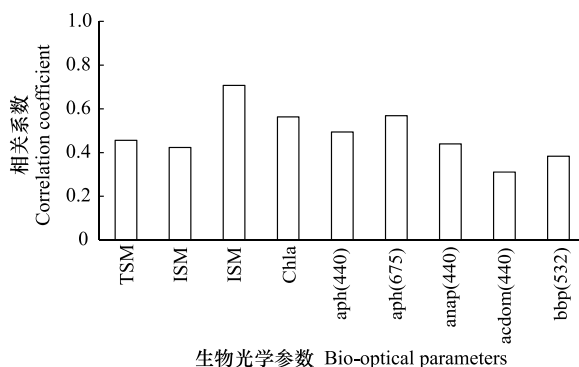


图 9 不同生物光学参数与第二正交因子相关性分析

Fig. 9 Correlation between EOF2 and different bio-optical parameters

从上述分析可以得出,第一正交因子由吸收和后向散射两种光学特性驱动,其变化主要与无机颗粒物有关,而第二正交因子主要由吸收这一种光学特性驱动,其变化主要与有机颗粒物有关。第一正交因子解释了约 93% 的遥感反射率变化信息,而第二正交因子仅解释了约 5% 的变化信息,并且颗粒物后向散射系数与第一正交因子具有最大的相关性,说明太湖春季水体中颗粒物的后向散射对水面反射光谱的形成具有非常重要的影响,太湖春季水体遥感反射率的变化主要取决于无机颗粒物的吸收和后向散射,有机颗粒物对遥感反射率的变化影响相对较小,因此对颗粒物的后向散射系数进行准确测量及参数化对于建立太湖区域化的生物光学模型具有非常重要的作用。

3 结论

(1) 太湖春季水体中 $a_{\text{ph}}^*(440)$ 的平均值为 $(0.091 \pm 0.059) \text{ m}^2/\text{mg}$, $a_{\text{ph}}^*(675)$ 的平均值为 $(0.033 \pm 0.013) \text{ m}^2/\text{mg}$, S_t 平均值为 0.31 ± 0.17 , 梅梁湾湖区色素颗粒物比吸收系数和 S_t 值均明显小于其他湖区,表明梅梁湾湖区色素包裹效应要大于其他湖区,水体富营养化程度更为严重。

(2) 太湖春季水体中非色素颗粒物对总吸收(不包含纯水)的影响最大,色素颗粒物和 CDOM 的吸收相比较小。

(3) 太湖春季水体颗粒物后向散射系数与总悬浮物、无机悬浮物具有很高的相关性,而与有机悬浮物相关性相对较低,其水体中多次散射对水面总辐亮度具有较大的贡献,平均贡献率高达 93.46%。

(4) 太湖春季水体中颗粒物的后向散射对水面反射光谱的形成具有非常重要的影响,遥感反射率的变化主要取决于无机颗粒物的吸收和后向散射,有机颗粒物对遥感反射率的变化影响较小。

致谢:感谢查勇教授对本文写作的帮助。

References:

- [1] O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, Siegel D A, Carder K L, Garver S A, Kahru M, McClain C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C11): 24937-24953.
- [2] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, Le C F, Huang C C, Wang L Z. Differences of inherent optical properties of inland lake water body in typical seasons. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1117-1124.
- [3] Wang L, Zhao D Z, Yang J H, Fu Y N, Xing X G. Study on seasonal variation of phytoplankton absorption coefficient in north Yellow Sea. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(1): 60-65.
- [4] Gai L Y, Liu Z J, Zhang J X. Absorption coefficient characteristics of the Three Gorges Dam water. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(2): 323-332.
- [5] Wang G F, Cao W X, Yang Y Z, Zhou W, Liang S J. Variations of absorption coefficient of seawater in the Pearl River Estuary and a hyperspectral retrieval model for an algal bloom. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(2): 52-58.
- [6] Wang X, Yang H, Kong D X, Wu X L. Optical absorption properties of chromophoric dissolved organic matter in the seawater of outer Yangtze Estuary. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29(4): 518-524.
- [7] Ferreira A, Garcia V M T, Garcia C A E. 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.
- [8] Li J S, Zhang B, Zhang X, Shen Q, Zhang Y L. A method of calculating back-scattering coefficients of suspended matter in water. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 193-198.
- [9] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optical*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [10] Tzortziou M, Herman J R, Gallegos C L, Neale P J, Subramaniam A, Harding L W Jr, Ahmad Z. Bio-optics of the Chesapeake Bay from measurements and radiative transfer closure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68(1/2): 348-362.
- [11] Loisel H, Stramki D. Estimation of the inherent optical properties of natural waters from the irradiance attenuation coefficient and reflectance in the presence of Raman scattering. *Applied Optical*, 2000, 39(18): 3001-3011.
- [12] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, Wang X M, Song Q J. The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 37-44.
- [13] Tang J W. The Simulation of Marine Optical Properties and Color Sensing Models. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 1999: 107-110.
- [14] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, Le C F, Huang C C, Wang L Z. 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] Sun D Y, Li Y M, Huang J Z, Le C F, Gong S Q, Wu L. Spectral absorption characteristics and slope coefficients analysis of in-water constituents in Meiliang Bay of Lake Taihu in the summer season. *Acta Ecologic Science*, 2008, 28(2): 749-760.
- [16] Dekker A G. Detection of Optical Water Quality Parameters for Eutrophic Waters by High Resolution Remote Sensing. Amsterdam: Vrije University, 1993: 1-240.
- [17] Le C F, Li Y M, Zha Y, Sun D Y, Lu H. Simulation of backscattering properties of Taihu Lake. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 707-713.
- [18] Toole D A, Siegel D A. Modes and mechanisms of ocean color variability in the Santa Barbara Channel. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C11): 26985-27000.
- [19] Bricaud A, Babin M, Morel A, Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C7): 13321-13332.

- [20] Le C F, Li Y M, Zha Y, Sun D Y. Specific absorption coefficient and the phytoplankton package effect in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2009, 619(1): 27-37.
- [21] Ciotti A M, Lewis M R, Cullen J J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(2): 404-417.
- [22] Ciotti A M., Bricaud A. Retrievals of a size parameter for phytoplankton and spectral light absorption by colored detrital matter from water-leaving radiances at SeaWiFS channels in a continental shelf region off Brazil. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2006, 4: 237-253.
- [23] Bricaud A, Claustre H, Ras J, Oubelkheir K. 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] Wang G F, Cao W X, Yang D T, Zhao J. Partitioning particulate absorption coefficient into contributions of phytoplankton and nonalgal particles: a case study in the northern South China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(3): 513-520.
- [25] Shanmugam P. New models for retrieving and partitioning the colored dissolved organic matter in the global ocean; implications for remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(6): 1501-1521.
- [26] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters. II: Bidirectional aspects. *Applied Optics*, 1993, 32(33): 6864-6879.
- [27] D'Sa E J, Miller R L, McKee B A. Suspended particulate matter dynamics in coastal waters from ocean color; application to the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letter*, 2007, 34: L23611, doi:10.1029/2007GL031192.
- [28] Jiang G J, Liu D W, Song K S, Xu J P, Zhang B, Wang Z M. Estimation of total suspended matter concentration in Shitoukoumen Reservoir based on a semi-empirical model. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 107-111.
- [29] Chami M, McKee D, Leymarie E, Khomenko G. Influence of the angular shape of the volume-scattering function and multiple scattering on remote sensing reflectance. *Applied Optics*, 2006, 45(36): 9210-9220.
- [30] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, Gao J, Lu H, Le C F, Huang C C. Light scattering properties and their relation to the biogeochemical composition of turbid productive waters; a case study of Lake Taihu. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 1979-1989.

参考文献:

- [2] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 乐成峰, 黄昌春, 王利珍. 内陆湖泊水体固有光学特性的典型季节差异. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1117-1124.
- [3] 王林, 赵冬至, 杨建洪, 傅云娜, 邢小罡. 北黄海浮游植物吸收系数的季节性变化研究. *海洋环境科学*, 2010, 29(1): 60-65.
- [4] 盖利亚, 刘正军, 张继贤. 三峡坝区水体吸收系数的特征研究. *遥感学报*, 2010, 14(2): 323-332.
- [5] 王桂芬, 曹文熙, 杨跃忠, 周雯, 梁少君. 珠江口藻华水体总吸收系数的变化特性及高光谱反演模式. *热带海洋学报*, 2010, 29(2): 52-58.
- [6] 王翔, 杨红, 孔德星, 吴项乐. 长江口外海水中有色溶解有机物 (CDOM) 的光吸收特性. *台湾海峡*, 2010, 29(4): 518-524.
- [8] 李俊生, 张兵, 张霞, 申茜, 张运林. 一种计算水体中悬浮物后向散射系数的方法. *遥感学报*, 2008, 12(2): 193-198.
- [12] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 王晓梅, 宋庆君. 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.
- [13] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999: 107-110.
- [15] 孙德勇, 李云梅, 黄家柱, 乐成峰, 龚绍琦, 伍蓝. 太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性. *生态学报*, 2008, 28(2): 749-760.
- [17] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 孙德勇, 吕恒. 太湖水体后向散射特性模拟. *水科学进展*, 2009, 20(5): 707-713.
- [28] 姜广甲, 刘殿伟, 宋开山, 徐京萍, 张柏, 王宗明. 基于半分析模型的石头口门水库总悬浮物浓度反演研究. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 107-111.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.2 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Dynamics of demersal fish species diversity and biomass of dominant species in autumn in the Beibu Gulf, northwestern South China Sea	WANG Xuehui, QIU Yongsong, DU Feiyan, et al (333)
Spatial variation in species richness of birds and mammals in mainland China	DING Jingjing, LIU Dingzhen, LI Chunwang, et al (343)
Comparative study on learning behavior and electroantennogram responses in two geographic races of <i>Cotesia glomerata</i>	WANG Guohong, LIU Yong, GE Feng, et al (351)
Biological characteristics and habitat requirements of <i>Parnassius imperator</i> (Lepidoptera: Parnassidae)	FANG Jianhui, LUO Youqing, NIU Ben, et al (361)
Annual variability in biological characteristics of <i>Illex argentinus</i> in the southwest Atlantic Ocean	FANG Zhou, LU Huajie, CHEN Xinjun, et al (371)
The impact of run-of stream dams on benthic macroinvertebrate assemblages in urban streams	HAN Minghua, YU Haiyan, ZHOU Bin, et al (380)
Effect of suspended sediment on the feeding physiology of <i>Pinctada martensii</i> in laboratory	LI Zhimin, SHEN Yuchun, YU Nantao, et al (386)
Potential nutrient limitation of phytoplankton growth in the Western and Central Pacific Ocean	XU Yanqing, CHEN Jianfang, GAO Shengquan, et al (394)
Ingestion of selected HAB-forming dinoflagellates	ZHANG Qingchun, YU Rencheng, SONG Jingjing, et al (402)
Formation of aggregation by <i>Phaeocystis globosa</i> (Prymnesiophyceae) in response to high grazing pressure	WANG Xiaodong, WANG Yan (414)
Growth and reproduction of the green macroalga <i>Ulva prolifera</i>	ZHANG Bixin, WANG Jianzhu, WANG Yifu, et al (421)
Screening of growth decline related genes from <i>Alexandrium catenella</i>	ZHONG Jie, SUI Zhenghong, WANG Chunyan, et al (431)
Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance	LIU Zhonghua, LI Yunmei, LU Heng, et al (438)
Neural network modeling of the eutrophication mechanism in Lake Chenghai and corresponding scenario analysis	ZOU Rui, DONG Yunxian, ZHANG Zhenzhen, et al (448)
The compensatory growth of shrubby <i>Pinus thunbergii</i> response to the boring stress in sandy coast	ZHOU Zhen, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al (457)
Selected body temperature and thermal tolerance of tadpoles of two frog species (<i>Fejervarya limnocharis</i> and <i>Microhyla ornata</i>) acclimated under different thermal conditions	SHI Linqiang, ZHAO Lihua, MA Xiaohao, et al (465)
Effects of landscape structure and key landscape factors on aphids-parasitoids-hyper parasitoids populations in wheat fields	ZHAO Zihua, WANG Ying, HE Dahan, et al (472)
Effects of cadmium on lipid peroxidation and ATPase activity of plasma membrane from Chinese kale (<i>Brassica alboglabra</i> Bailey) roots	ZHENG Aizhen (483)
Effects of ginger aqueous extract on soil enzyme activity, microbial community structure and soil nutrient content in the rhizosphere soil of ginger seedlings	HAN Chunmei, LI Chunlong, YE Shaoping, et al (489)
Manganese tolerance and accumulation in mycelia of <i>Cordyceps kyusyuensis</i>	LUO Yi, CHENG Xianhao, ZHANG Congcong, et al (499)
Influence of oxytetracycline exposure on antibiotic resistant bacteria and enzyme activities in wheat rhizosphere soil	ZHANG Hao, ZHANG Lilan, WANG Jia, et al (508)
Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation	SHEN Fangfang, YUAN Yinghong, FAN Houbao, et al (517)
Differences in clonal growth between female and male plants of <i>Rhus typhina</i> Linn. and their diurnal changes in photosynthesis and chlorophyll fluorescence	ZHANG Mingru, WEN Guosheng, ZHANG Jin, et al (528)
Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province	PAN Chunxiang, LI Yuyuan, PENG Yi, et al (538)
The effect of different land use patterns on soil properties in alpine areas of eastern Qilian Mountains	ZHAO Jinmei, ZHANG Degang, LIU Changzhong, et al (548)
Responses of soil macro-fauna to land desertification in sandy grassland	LIU Rentao, ZHAO Halin (557)
Characteristics of cultivable microbial community number and structure at the southeast edge of Tengger Desert	ZHANG Wei, ZHANG Gaosen, LIU Guangxiu, et al (567)
Physiological and ecological responses of maize to different severities of desertification in the Southern Taramakan desert	LI Lei, LI Xiangyi, LIN Lisha, WANG Yingju, et al (578)
Characterization of caloric value in fifteen plant species in <i>Leymus chinensis</i> steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia	GAO Kai, XIE Zhongbing, XU Sutie, et al (588)
Spatial pattern responses of <i>Achnatherum splendens</i> to environmental stress in different density levels	ZHANG Mingjuan, LIU Maosong, XU Chi, et al (595)
Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an <i>Abies fargesii</i> - <i>Betula utilis</i> mixed forest	REN Xuemin, YANG Gaihe, WANG Dexiang, et al (605)
Effects of alginate cerium complexes on ascorbate- glutathione cycle in spinach leaves under chlorpyrifos stress	LUAN Xia, CHEN Zhende, WANG Dongfeng, et al (614)
Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: a case study of Xiamen City	HUANG Jucong, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (622)
The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and Remote sensing	YANG Cunjian, ZHAO Zijian, REN Xiaolan, et al (632)
An inventory of BVOC emissions for a subtropical urban-rural complex: Greater Taizhou Area	CHANG Jie, REN Yuan, SHI Yan, et al (641)
Scientific Note	
Litter decomposition and nutrient dynamics of <i>Carex lasiocapa</i> under different water conditions	HOU Cuicui, SONG Changchun, LI Yingchen, et al (650)
Nest-box color preference and reproductive success of great tit	ZHANG Keqin, DENG Qiuxiang, Justin Liu, et al (659)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 2 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 2 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元