

巢湖水体漫衰减系数特性及其影响因子分析

金鑫¹, 李云梅¹, 王桥², 刘忠华¹, 王彦飞¹, 张红¹, 尹斌¹, 徐祎凡¹, 徐昕¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 根据 2009 年 6 月巢湖 32 个样点的实测数据, 分析巢湖水体各组分的吸收、后向散射特性以及水体漫衰减系数光谱特征, 并通过 Lee 模型计算各影响因子对漫衰减系数的贡献率, 在此基础上, 进一步探讨巢湖水体漫衰减系数与各衰减因子浓度的关系。结果表明, 非色素颗粒物、有色可溶性有机物 (CDOM) 吸收均随着波段增加呈现不断衰减趋势, 400 ~ 660 nm 范围内, 色素颗粒物吸收的贡献率较平稳, 在 675 nm 处由于色素强吸收, 其贡献率在该处形成峰值, 此后迅速下降, 且色素颗粒物吸收贡献率与非色素吸收贡献率呈现此消彼长的趋势, 纯水吸收的贡献率则随着波长不断增加, 682 nm 以后成为漫衰减最重要影响因子, 颗粒物后向散射的贡献率先增大, 在 571 nm 处达到最大, 之后贡献率不断减小并维持第二主导因子地位。漫衰减系数与主要衰减因子浓度的相关分析显示, 漫衰减系数与悬浮物中无机颗粒物的相关性最好, 其次是有机颗粒物, 与叶绿素 a 的相关性较差, 532 nm 处漫衰减系数与色素颗粒物、非色素颗粒物以及 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 等衰减因子浓度的相关关系好于 440 nm、676 nm、735 nm 等波段。

关键词: 漫衰减系数; 衰减因子; 吸收; 散射; 巢湖

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)06-1581-10

Analysis of Diffuse Attenuation Coefficient Characteristics and Impact Factors in Chaohu Lake

JIN Xin¹, LI Yun-mei¹, WANG Qiao², LIU Zhong-hua¹, WANG Yan-fei¹, ZHANG Hong¹, YIN Bin¹, XU Yi-fan¹, XU Xin¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: According to the in situ data of 32 sampling sites which were measured in June 2009, absorption, backscattering properties of different components and the spectral characteristics of diffuse attenuation coefficient (K_d) were analyzed in Chaohu Lake. And then the contribution of each factor's affecting on K_d were calculated by Lee Model. Based on the analysis, the relationship between K_d and the affects were discussed. The result indicate that: the contribution to K_d of nonpigment suspended matter and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption presented an exponent decreasing trend with the increase of wavelength; from 400nm to 660nm, the contribution of phytoplankton absorption was stable, and for the phytoplankton strong absorption, the contribution had a peak value at 675nm, and then rapidly decreased, the contributions of phytoplankton absorption and nonpigment suspended matter absorption have a relationship of restricting each other; the contribution of water absorption which increased with wavelength was to be the leading contribution factor after 682nm; the contribution of suspended particle backscattering increased till 571nm, after that it decreased and sustained at the second leading factor. The analysis of diffuse attenuation coefficient and its' affecting factors showed that the correlation between K_d and inorganic particulate matter has the best correlation, organic particles followed, and the worst was chlorophyll a. The relationship between $K_d(532)$ and the concentration of pigment particles, non-pigment particle and $a_{\text{CDOM}}(440)$ was higher than $K_d(440)$, $K_d(676)$ and $K_d(735)$.

Key words: diffuse attenuation coefficient; attenuation factor; absorption; scattering; Chaohu Lake

漫衰减系数 (K_d) 直接决定了水体中的光强和光场结构, 当水体中 K_d 较大时, 可能导致沉水植物由于没有足够的光照进行光合作用而死亡和衰退, 导致水体生态系统类型的转化^[1], 因此 K_d 是水生态系统的重要影响因素^[2,3]. 不同水体, 同一水体不同季节, 由于其水动力条件、环境因子等因素的差异, 使得 K_d 具有较大的差异性, 且其主导影响因子也存在一定的差异. Kirk 等^[4] 分析了 K_d 从清洁海水到浑浊河湖及入海口的变化; 王晓梅等^[5] 则提出

了针对黄东海海区二类水体的 K_d 与透明度之间的关系; 张运林等^[6,7] 认为太湖 K_d 存在较大的空间、深度、季节等差异, 并建立了太湖漫衰减系数与悬浮物、叶绿素等衰减因子之间的关系; 乐成峰等^[8] 分析了秋季太湖水体 K_d 的光谱特性及其影响因子, 并

收稿日期: 2010-06-21; 修订日期: 2010-07-11

基金项目: 国家科技重大专项 (E0203/1112/JC01); 国家自然科学基金项目 (40971215); 南京师范大学优秀硕士论文培育计划项目 (2010ss0012)

作者简介: 金鑫 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感、水质遥感, E-mail: jinxinking1986@163.com

利用 550、675、731 nm 的遥感反射率建立其遥感反演模型。

漫衰减系数受到水体中各组分的吸收、散射作用的影响,与固有光学性质有着密切的关系,因此漫衰减系数又被称为“准固有光学性质”^[9,10]。Kirk^[11]通过 Monte Carlo 数值模拟 12 种不同光学性质的水下光场和不同性质的体散射函数,探讨了 K_d 和固有光学性质之间的关系;Morel 等^[12]通过辐射传输方程对固有光学性质和表观光学性质之间的关系进行了修改,并得出了真光层的 K_d 和固有光学性质之间的关系;Lee 等^[13]基于辐射传输方程和 Hydrolight 数值模拟建立了水体不同深度、不同太阳天顶角下, K_d 和固有光学参数之间的关系表达式;黄昌春等^[14,15]研究了秋季太湖以及梅梁湾等湖泊二类水体中,不同水体组分吸收、散射对 K_d 的贡献率。以上研究表明,不同水体具有不同的固有光学特性,尤其是在一类水体与二类水体之间,水体组分的固有光学特性对 K_d 的影响存在较大的差异。

巢湖位于安徽省中部,水域面积约 750 km²,为我国五大淡水湖之一,与太湖同为我国“三河三湖”重点治理的对象,巢湖水质恶化、湖体生态系统衰退等生态环境问题已引起国家的高度重视^[16]。与目前国内研究较多的黄东海、太湖等二类水体相比,巢湖水体的固有光学特性与黄东海、太湖等水体存在地区差异,使得该水体中的漫衰减系数与其他水体也存在较大差异,水体中不同组分的固有光学特性对于 K_d 的影响因子也不一样。因此,有必要对巢湖水体夏季漫衰减系数特征进行分析,以揭示其影响因子,并为水下光场及水生生态环境的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 野外实验采集

于 2009 年 6 月 13 ~ 16 日在巢湖进行采样,共布设了 32 个采样点(图 1),实测水体表观及固有光学量。采样时间为每天 09:00 ~ 16:00,测量时天空基本无云,天气晴朗,平均风速 2 m/s 以下,水面基本平静,外界环境基本变化不大。利用 Trios 水下光谱仪的辐照度探头测量水体中下行辐照度(E_d)以及上行辐亮度(L_u),测量波长范围为 320 ~ 950 nm,光谱分辨率为 3.3 nm,测量深度取 0.2、0.4、0.6、0.8、1 m^[12]。使用标准采样器从水面至水下 30 cm 处采集水样,为避免水样变质,采集的水样在 0 ~ 4℃ 下避光保存并于当天送至实验室进行分析。

1.2 水质参数测定

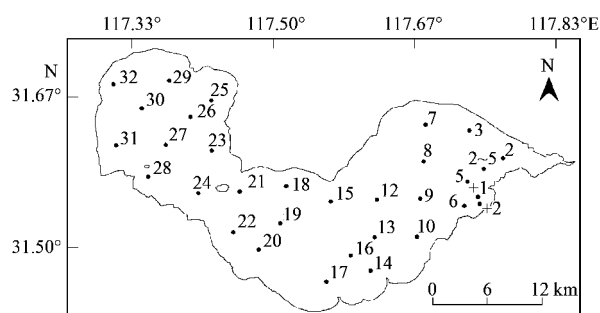


图 1 巢湖采样点位示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Chaohu Lake

采用烘干称重法测定悬浮物的浓度,使用孔径为 0.7 μm 的 GF/F 滤膜,先进行烧膜处理(去除膜上原附有的有机质及水分)。将冷却后的膜进行称量,用来过滤水样。量取一定体积的水样,利用过滤器进行过滤,残留在膜上的物质就是总悬浮物。烘干称量后,用含有总悬浮物的膜的质量减去膜质量得到总悬浮物的质量,利用总悬浮物的质量除以水样的体积,得到总悬浮物浓度。然后 550℃ 高温焚烧载有总悬浮物的膜,去除有机悬浮物,称量得到无机悬浮物的质量,并分别计算无机悬浮物和有机悬浮物浓度^[17]。叶绿素的提取采用萃取和分光光度法,先将水样用 GF/C (Whatman) 过滤膜过滤,再用 90% 乙醇在 80℃ 条件下萃取,然后测定叶绿素在 750 nm 和 665 nm 处的吸光度,从而计算得到叶绿素 a 以及脱镁叶绿素含量^[18,19]。

张运林^[20]、孙德勇^[21]等将 Hoogenboom 等^[22]对荷兰 IJsselmeer 湖泊的研究结论应用于太湖研究中,而巢湖与这些湖区同为浅水湖泊,因此本研究认为该研究结论同样适用于巢湖,则巢湖中色素和非色素颗粒物可根据式(1)从总悬浮中分离出来:

$$c_{\text{Tripton}} = c_{\text{TSM}} - 0.07 \times c_{\text{Chl-a+Pa}} \quad (1)$$

式中, c_{Tripton} 、 c_{TSM} 、 $c_{\text{Chl-a+Pa}}$ 分别表示非色素颗粒物(mg/L)、总悬浮物(mg/L)和浮游植物色素(叶绿素 a 和脱镁叶绿素之和, mg/m³) 颗粒物浓度。

1.3 固有光学量测定

悬浮颗粒物的吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定:用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200 ~ 400 mL 水样,在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,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,得到总悬浮物的光谱吸收系数 $a_p(\lambda)$ 。利用 NaClO₃ 对总悬浮物颗粒物进行漂白处理,得到非藻类颗粒物,再利用定量滤膜技术得到非藻类颗粒物的吸收系数。

藻类颗粒物吸收系数由总悬浮颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物吸收系数获取. 有色可溶性有机物 (CDOM) 吸收系数测定: 采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤除去总悬浮物的水样, 得到 CDOM 水样, 利用分光光度计测量 CDOM 的吸光度, 计算各波长的吸收系数, 并以 750 nm 的吸光度作散射校正^[17].

水体中颗粒物后向散射系数通过 Wetlabs 公司的散射仪 (BB9) 获得^[23], 测量了 412、440、488、510、532、595、660、676 和 715 nm 共 9 个光谱通道的后向散射系数.

1.4 漫衰减系数的计算

水下辐照度在光学性质均一的水体中遵从指数规律衰减^[24]:

$$K_d(\lambda) = - \left(\frac{1}{z} \right) \ln \left[\frac{E_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z_c)} \right] \quad (2)$$

式中, $K_d(\lambda)$ 为波长 λ 处的光学漫衰减系数; z 为从参考水层到测量处的深度, 本研究选择 0.2 m 作为参考水深; $E_d(\lambda, z)$ 为深度 z 处的辐照度; $E_d(\lambda, z_c)$ 为参考水层深度处的辐照度. $K_d(\lambda)$ 通过对 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1 m 等不同深度水下的辐照度进行指数回归, 回归方程只有当 $R^2 \geq 0.97$ 时认为是有效值, 否则认为是无效值.

2 巢湖水体漫衰减因子分析

水体的漫衰减系数主要是由纯水、CDOM、悬浮颗粒物 (包括色素和非色素) 的吸收和颗粒物的后向散射特性决定的, 其中纯水的吸收、后向散射系数在任何水体中都是相同的, 一般该值被认为是水体漫衰减系数的背景值, 因此水体的漫衰减系数的差异主要由 CDOM、色素和非色素颗粒物的吸收和后向散射的变化引起.

2.1 吸收系数、后向散射系数光谱特性

色素颗粒物的吸收由光合作用的活性叶绿素 a 和其他辅助色素浓度决定, 而它们的浓度随着水体环境和藻类的不同而变化. 巢湖水体色素颗粒物的吸收具有不同的吸收光谱特性 [图 2(a)], 其中 440 nm 附近由于叶绿素 a 在该处的强烈吸收, 使得 21 号点、31 号点等采样点在该处形成其色素颗粒物吸收曲线的最大峰值, 28、+1 等样点吸收曲线在 440 nm 吸收峰不明显, 这主要是由于这些采样点总颗粒物吸收曲线属于非藻类颗粒物主导型, 藻类含量相对较低引起的; 而 675 nm 处的峰值则相对较小, 32 号点由于叶绿素 a 含量较高, 其吸收系数可

以达到 2.69 m^{-1} , 但某些点的叶绿素 a 含量较低 (如 5 号点), 色素颗粒物的吸收在该处未形成峰值, 只是出现一个相对的肩部; 550 nm 附近易出现吸收谷, 主要是由于叶绿素吸收系数在该处达到极小值; 由于藻蓝蛋白的吸收作用, 使得某些点在 625 nm 附近也形成一个峰值, 如 29、30、32 号点, 该吸收曲线的峰值是藻蓝蛋白最显著的特征. 巢湖水体非色素颗粒物和 CDOM 具有相似的吸收光谱曲线特征, 其吸收系数随波段的增加呈指数递减趋势. 非色素颗粒物的吸收主要在可见光波段, 400 nm 处的吸收系数最大, 最大可达到 9.28 m^{-1} , 之后开始下降; 700 nm 以后, 除个别悬浮物浓度较高的点, 其他点位的非色素颗粒物的吸收系数都降至 0.3 m^{-1} 以下; 到了 750 nm, 几乎所有点的吸收系数都降到 0.1 m^{-1} 以下 [图 2(b)]. 而 CDOM 的强烈吸收主要在短波波段, 400 nm 处的吸收系数最大值达到 1.71 m^{-1} , 400 ~ 500 nm 之间 CDOM 的吸收系数下降速度较快, 500 nm 以后, CDOM 吸收系数全都降到 0.5 m^{-1} 以下, 此后, CDOM 的吸收系数下降较慢. 到了 600 nm 附近, CDOM 的吸收系数降到 0 [图 2(c)].

本研究中的后向散射系数通过 BB-9 进行测量, 但是由于仪器只能测量 9 个波段的后向散射系数, 要了解水体中颗粒物后向散射特性就需要根据 Sun^[23]、Lee^[25] 等的研究, 采用指数模型对水体中颗粒物后向散射系数进行参数化模拟:

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n \quad (3)$$

式中, $b_{bp}(\lambda)$ 为波长 λ 处的后向散射系数, $b_{bp}(\lambda_0)$ 为参考波段 λ_0 处的后向散射系数, 为了与其他研究者的结果进行比较, 本研究选用 532 nm 作为参考波段; n 为后向散射系数随波长变化的指数.

通过研究发现, n 的值在 2.54 ~ 3.69 范围之内变动, 平均值为 3.27, 该值与 Sun 等^[23] 对于太湖的研究结论相似, 但是与宋庆君等^[26] 获得的黄东海海区后向散射系数光谱模型的指数均值 1.146 相差较大, 反映了不同水体 n 的取值不同, 这可能是不同水体中颗粒物的组成相异造成的, 且巢湖等内陆湖泊二类水体中悬浮物浓度高于黄东海水域也导致了 n 值的差异. 根据后向散射系数的参数化模型得到巢湖水体颗粒物后向散射系数 (图 3), 由图 3 可以看出, 巢湖水体中颗粒物后向散射系数的光谱随着波长的增加呈现逐渐减小的趋势, 不存在明显的峰值以及谷值, 其光谱特征比较单一, 400 ~ 550 nm 之间各样点的后向散射系数变化较大, 而在 550 ~ 800

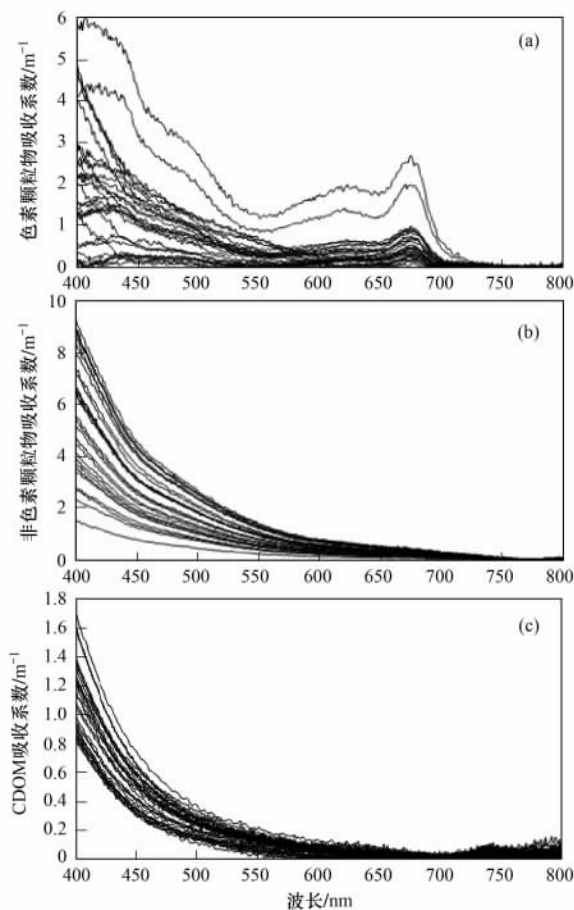


图2 巢湖水体色素颗粒物、非色素颗粒物、CDOM 吸收系数

Fig.2 Absorption coefficient of phytoplankton, nonpigment suspended matter and CDOM in Chaohu Lake

nm 范围内各采样点的后向散射系数几乎趋于一致。选择中心波长 440、532、676 nm 分别代表蓝光、绿光和红光波段,观察发现,在蓝光波段 440 nm 处,后向散射系数在 $0.33 \sim 0.56 \text{ m}^{-1}$ 之间变动,各样点的区域性较显著,其平均值为 0.46 m^{-1} ;在绿光波段 532 nm 处,后向散射系数在 $0.21 \sim 0.28 \text{ m}^{-1}$ 的范围内变化,平均值为 0.25 m^{-1} ,各采样点的变化不大;到了红光波段 676 nm 处,后向散射系数的变动范围为 $0.11 \sim 0.12 \text{ m}^{-1}$,平均值为 0.11 m^{-1} ,各采样点之间后向散射系数的差异性几乎消失,后向散射系数趋于一致。综上所述,不同样点间颗粒物组分及浓度差异引起了后向散射特性的差异。

2.2 漫衰减系数光谱特性

巢湖水体漫衰减系数较大,在蓝光波段 440 nm 处的漫衰减系数最大值为 13.49 m^{-1} ,最小值也达到 3.94 m^{-1} ;在绿光波段 532 nm 处的漫衰减系数在 $1.56 \sim 8.13 \text{ m}^{-1}$,平均值为 4.49 m^{-1} ;在红光波段 676 nm 处,漫衰减系数为 $1.74 \sim 6.79 \text{ m}^{-1}$ 。由图

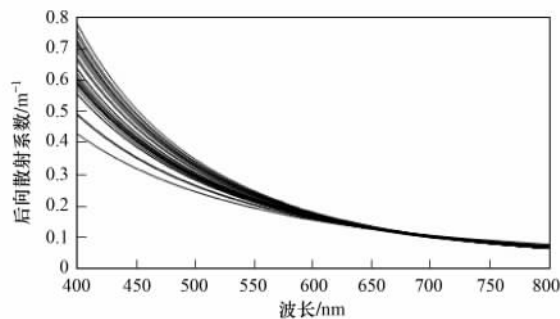


图3 巢湖水体颗粒物散射系数

Fig.3 Backscattering coefficient of suspended matter in Chaohu Lake

4 可以看出,巢湖水体漫衰减系数具有一致的光谱特征,所有采样点的漫衰减系数在 400 ~ 550 nm 之间随波段的变化呈指数衰减趋势,所有样点的平均值大致为 6.77 m^{-1} ,之后漫衰减系数随着波长的变化逐渐衰减,并在 550 nm 附近出现拐点,此时漫衰减系数的最小值降到了 1.36 m^{-1} ,最大值也降到了 7.44 m^{-1} ,平均值为 4.04 m^{-1} ;之后在 550 ~ 650 nm 之间漫衰减系数的变化很小,几乎没产生任何变化,在此波段范围内,漫衰减系数的最小值为 1.22 m^{-1} ,最大值为 7.44 m^{-1} ,所有样点在该波段内的平均值为 3.81 m^{-1} ,这个值与 550 nm 处的漫衰减系数大小相近;但到了 675 nm 附近由于色素的吸收产生一个小的峰值,该峰值漫衰减系数的最大值为 6.8 m^{-1} ,最小值为 1.74 m^{-1} ,其最大值相对于 650 nm 上升了 0.33 m^{-1} ,最小值相对于 650 nm 处也上升了大致 0.31 m^{-1} ;675 nm 以后,漫衰减系数的值也呈现下降的趋势,且在 700 nm 处产生极小值;而在 700 ~ 900 nm 波段范围内漫衰减系数呈现出与纯水相似的吸收光谱特征,主要是由于该范围内悬浮物、浮游藻类和 CDOM 的吸收系数都很小,其光线的衰减主要由纯水吸收所致。

巢湖水体的漫衰减系数随波长变化的特征是蓝

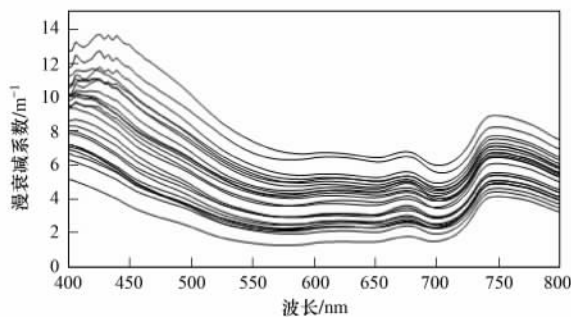


图4 巢湖水体漫衰减系数

Fig.4 Diffuse attenuation coefficient in Chaohu Lake

光部分漫衰减系数大,红光部分漫衰减系数则较小,这个波谱特征与张运林^[7]、乐成峰^[8]等对于太湖的研究结论相似,但与海洋中漫衰减系数随波长变化完全不一样,海洋中的漫衰减系数一般在蓝光波段较弱,而红光波段的漫衰减则较强,该特性体现了海洋一类水体与湖泊二类水体组分之间的巨大差异.

2.3 水体组分吸收、后向散射对漫衰减系数的贡献率分析

为了定量分析水体不同组分吸收、后向散射作用对其漫衰减特性的影响,根据 Lee 等^[25]模型分别利用色素和非色素颗粒物、CDOM、纯水吸收系数以及颗粒物后向散射系数与漫衰减系数 K_d 的比值表示它们对 K_d 的贡献率.图 5 分别显示了各样点色素、非色素颗粒物、CDOM、纯水吸收系数以及颗粒物后向散射系数在特征波长 440、532、676 和 735 nm 处对 K_d 的贡献率.

在 440 nm 附近,非色素颗粒物吸收对于漫衰减系数的贡献率最大,只有 4 个样点的非色素颗粒物吸收贡献小于色素颗粒物吸收贡献;颗粒物后向散射在大部分点是影响衰减系数的第二因素;色素颗粒物的吸收系数在漫衰减系数的贡献率中占据第三的位置,且其贡献率与非色素颗粒物的吸收的贡献率大致呈相反的关系,这主要与有机悬浮物、无机悬浮物在总悬浮物浓度中所占比例有关;CDOM 吸收的贡献率则相对较小;纯水在该波段的贡献率很小,几乎可以忽略.532 nm 波段处,非色素颗粒物吸收减弱,但其贡献率仍然占据首位,颗粒物后向散射的贡献率出现大幅度的上升,依然处于第二贡献率的位置,这两者所占的贡献率之间的差距已较小,并有

7 个点的颗粒物后向散射贡献率超越非色素颗粒物的吸收;色素吸收的贡献率与非色素的贡献率仍然呈现相反的关系,当色素贡献率大时非色素的贡献率则相对较小;随着 CDOM 吸收系数的减小,其在漫衰减系数中的贡献率进一步减小,但在一些叶绿素浓度较低的点位(如 24 号点、27 号点),其贡献率高于色素颗粒物吸收所做贡献率;纯水吸收的贡献率依然较小,但是所占比重有所上升.到了 676 nm 附近,纯水吸收的贡献率迅速上升为最主要的贡献率,而其他各组分的吸收系数都减小,对于漫衰减系数的贡献率也减小;颗粒物后向散射的贡献率则主要作为第二主导因子;但是由于 675 nm 附近叶绿素 a 的强烈吸收,使得高叶绿素含量的样点色素颗粒物的吸收超过纯水吸收成为主要贡献者,但总体上依然小于纯水吸收的贡献率;非色素颗粒物吸收的贡献率则进一步下降到第四,对于漫衰减系数的影响不大;CDOM 的吸收降到 0 附近,其对于漫衰减系数的贡献作用微乎其微.而到了 735 nm,色素颗粒物、非色素颗粒物、CDOM 吸收系数几乎都降到 0,因此这 3 种物质对于漫衰减系数的贡献率可以忽略不计;而纯水的吸收则成为水体漫衰减系数中最主要的贡献因素,颗粒物后向散射系数则成为水体漫衰减系数的第二贡献率,这 2 种固有光学特性对于水体的漫衰减系数的贡献率基本稳定在某一个定值,纯水吸收的贡献率在 85% 左右,而颗粒物后向散射的贡献率则稳定在 10%.该结论与黄昌春等^[14,15]对于太湖的研究结论略有不同,黄昌春等^[14]认为色素颗粒物的吸收是整个太湖 10~11 月之间漫衰减系数的第一贡献者,同时

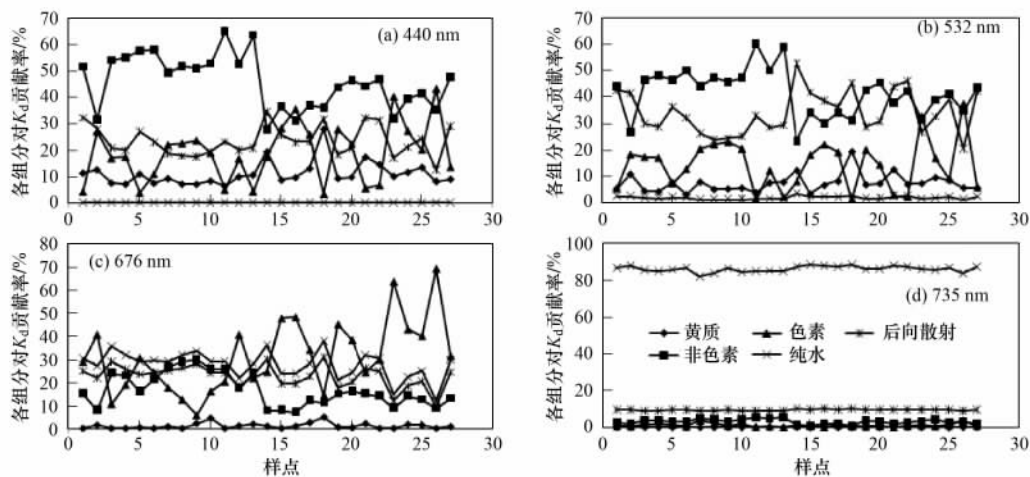


图5 巢湖水体各组分在不同波段对 K_d 的贡献率

Fig. 5 Contribution of each component to K_d at different wavelength in Chaohu Lake

梅梁湾 3 月、8 月其漫衰减系数的主导因子分别是非色素和色素^[15];而黄昌春等^[15]还认为,11 月太湖漫衰减系数主导因子是具有波长依赖性的,440 nm、595 nm 处主导因子都是非色素物质,而在 675 nm 处其主导影响因素是色素物质,本研究的结论与该结论较为相似,主要是由于不同湖区,其水体组分存在较大差异,导致漫衰减系数的主导因子存在着不同,巢湖无机悬浮物浓度较高,因此其水体组分对 K_d 的贡献率与太湖等水体组分对 K_d 的贡献率有区域性差异。

图 6 为不同采样点各组分对 K_d 的贡献率随波长的变化趋势,由图 6 可知所有采样点中各组分对 K_d 的贡献率均呈现较为一致的特征,只是由于不同水体组分的差异导致其贡献率出现不同. 其中,400 ~ 550 nm 范围内所有采样点色素颗粒物吸收系数贡献率都较平稳,波动不大,550 nm 之后各采样点色素颗粒物吸收系数对 K_d 的贡献率不断上升,并由于色素颗粒物的强吸收作用在 675 nm 附近达到最大值,成为 K_d 最主要的衰减因子,之后呈现快速下降的趋势,大部分点在 700 nm 处降到 0,29、32 号等样点由于叶绿素 a 浓度较高,其贡献率到了 750 nm 附近才降到 0;不同采样点非色素颗粒物吸收系数对 K_d 贡献率的最大值在 30% ~ 70% 之间变动,400 ~ 800 nm 范围内所有采样点的非色素颗粒物吸收系数对 K_d 的贡献率均随着波长增加呈现出不断下降的趋势,且所有样点在 750 nm 附近达到 0,此

时非色素颗粒物吸收系数对 K_d 几乎没有任何影响;各采样点 CDOM 吸收系数对 K_d 贡献率的最大值在 7% ~ 35% 之间变动,400 ~ 800 nm 范围内所有采样点的 CDOM 吸收系数对 K_d 的贡献率也随着波长增加呈现出不断下降的趋势,主要是由于该波段范围内 CDOM 的吸收系数也呈现不断下降的趋势,但是由于不同样点 CDOM 浓度存在差异使得其贡献率也出现较大差异,大部分样点在 650 nm 附近其贡献率达到零值,而 24 号等样点其贡献率在 750 nm 以后才降到 0;所有采样点纯水吸收系数的贡献率均随着波长的增加呈现不断上升的趋势,主要是由于纯水的吸收系数不断上升使得其贡献率也不断上升,且在 400 ~ 550 nm、700 ~ 800 nm 之间所有样点的贡献率之间的差异较小,由于 400 ~ 550 nm 范围内,纯水吸收的贡献率微乎其微,700 ~ 800 nm 之间其贡献率则占据主导地位,而在 550 ~ 700 nm 之间其贡献率的差异加大,由于该范围内水体其他组分占主导地位,纯水吸收贡献率相对较小;所有样点中颗粒物后向散射系数的贡献率则呈现先增大后减小的趋势,并在 675 nm 处形成一个相对谷值,主要是由于色素强吸收导致该波段范围内的弱散射,所有样点其贡献率在 750 nm 附近达到最小值,大约为 10%. 综上所述,巢湖水体中不同样点的水体各组分对 K_d 贡献率的变化趋势较为一致,但各采样点随着水体组分浓度的差异而出现大小不一的贡献率。

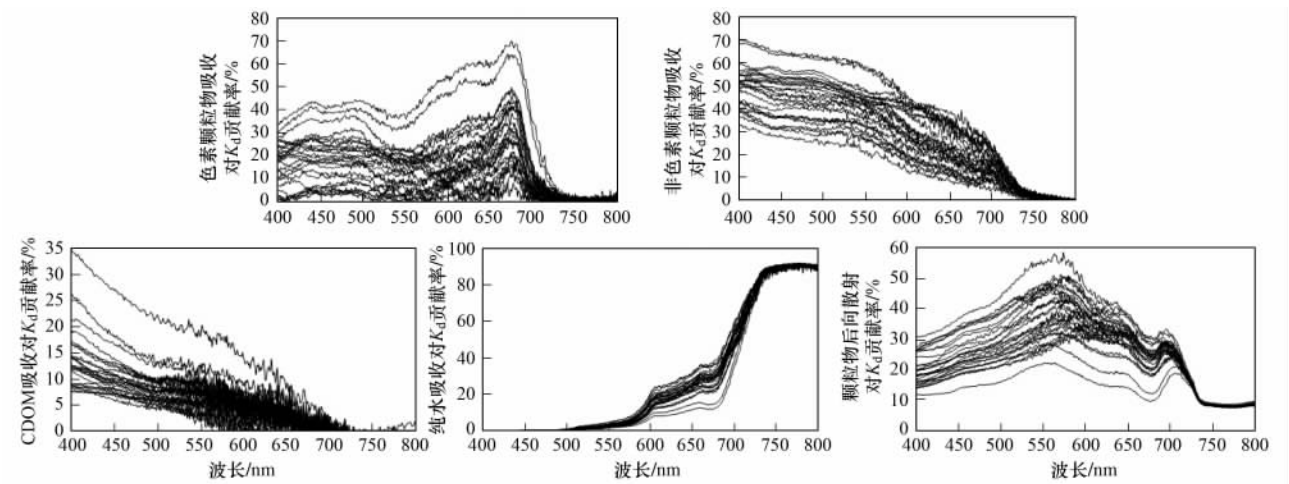


图 6 水体各组分对 K_d 的贡献率随波长的变化趋势

Fig. 6 Trend of each water component contribution to K_d with the increase wavelength

对 400 ~ 800 nm 处所有样点中各组分对漫衰减系数的贡献率进行平均,得到各组分对贡献率随波长的变化趋势. 由图 7 可以看出,400 nm 处非色素

颗粒物吸收的贡献率最大,此后其贡献率随波长而不断减小,在 560 nm 处,非色素吸收的贡献率被颗粒物的后向散射贡献率超过,并在 645 nm、654 nm

处分别被纯水吸收贡献率以及色素颗粒物吸收的贡献率超过,颗粒物后向散射的贡献率先作为第二贡献因子,随波长先呈现增长趋势,571 nm 处达到最大贡献率,此后呈现下降趋势,但在 400 ~ 715 nm 之间其贡献率大都稳定在 20% 以上,其后随着纯水吸收贡献率的增加,其贡献率逐渐减小;在 400 ~ 625 nm 之间,色素颗粒物吸收的贡献率在 15% ~ 20% 之间,基本都维持在第 3 位,由于叶绿素 a 的强吸收在 675 nm 附近形成一个较大的峰值,此后其贡献率开始迅速下降,并在 692 nm 处其贡献率再次小于非色素颗粒物吸收的贡献率,成为第四贡献率;CDOM 也随着波长呈逐渐减小趋势,到了 582 nm 处,CDOM 吸收的贡献率被纯水吸收的贡献率超越,成为影响漫衰减系数最小的贡献组分,其贡献率在 700 nm 以后降到 0;纯水吸收的贡献率随着波长不断增加,在 682 nm 附近超越颗粒物后向散射的贡献率,成为影响漫衰减系数的最主要因素。

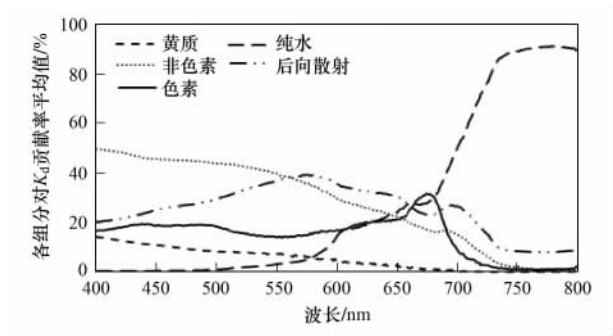


图7 各组分对 K_d 贡献率平均值随波长的变化趋势
Fig.7 Trend of each component average contribution to K_d with the increase wavelength

3 漫衰减系数与衰减因子浓度的关系

3.1 漫衰减系数与悬浮物浓度的关系

悬浮物是水体散射的主要贡献者,因此,其组成及浓度大小是影响漫衰减系数的一个重要因素,张运林等^[6]分析认为,太湖水体漫衰减系数与悬浮物之间存在良好的线性关系。悬浮物中包括无机颗粒物和有机颗粒物,它们对光衰减的影响不一样,乐成峰等^[8]研究表明,太湖水体中无机悬浮物是影响漫衰减系数的主要影响因子。本研究对夏季巢湖水体中漫衰减系数与总悬浮物(TSM)、无机悬浮物(ISM)、有机悬浮物(OSM)之间的相关关系进行了分析(图8),结果表明,总悬浮物、无机悬浮物与漫衰减系数之间的相关关系较高,相关系数都在 90% 以上,且相关系数较为接近,主要是由于夏季巢湖水

体中无机悬浮物浓度在总悬浮物中占主导作用;有机悬浮物与漫衰减系数的相关系数相对较小,两者的相关系数大致在 60% ~ 70% 之间以上波动,与漫衰减系数相关关系较差,由此说明有机悬浮物对于漫衰减系数的影响较小,且在总悬浮物浓度中所占比重较小。

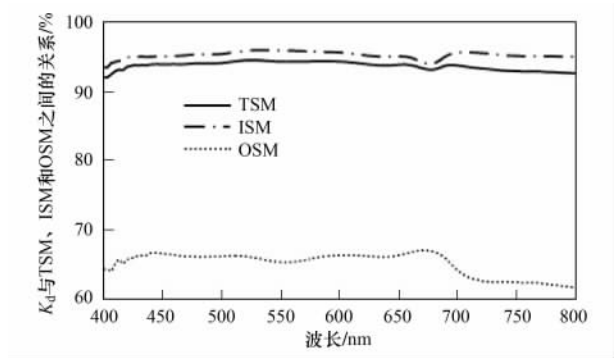


图8 漫衰减系数与总悬浮物、无机悬浮物、有机悬浮物的相关系数
Fig.8 Correlation between diffuse attenuation coefficient and TSM, ISM, OSM

为了定量表达漫衰减系数与悬浮物浓度之间的关系,以相关性较高的 490 nm 波段为例,对漫衰减系数与总悬浮物浓度进行拟合,结果表明,两者之间存在很好的线性关系(图9)。

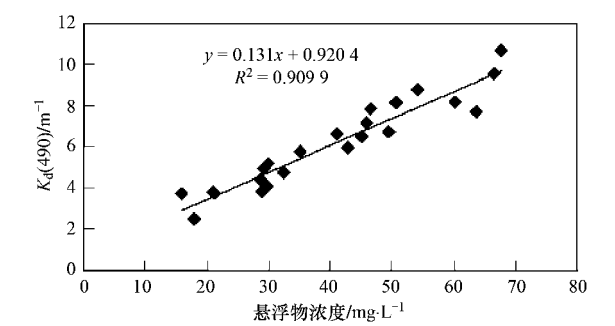


图9 490 nm 处漫衰减系数与总悬浮物浓度的线性关系
Fig.9 Linear correlation between $K_d(490)$ and TSM

综上分析认为,夏季巢湖水体的光学特性主要由悬浮物所决定,光线在水体中传输的衰减主要由悬浮物的吸收和散射所致,且无机悬浮物的影响占主导地位,这与张运林^[6]、乐成峰^[8]、Sun^[23]等的结果一致。

3.2 漫衰减系数与叶绿素 a 浓度的关系

浮游藻类中含有的色素吸收光照进行光合作用,叶绿素 a 是浮游藻类中最丰富的色素,因而浮游藻类对光衰减主要表现在叶绿素 a 对光的衰减。

Wozniak 等^[27]则提出了全球范围内漫衰减系数的对数与叶绿素浓度的对数之间的二次函数关系;张清凌等^[28]分析认为南海水体中 $K_d(490)$ 的垂直分布与叶绿素 a 浓度的垂直分布存在很强的相关性;张运林等^[7]研究了太湖水体漫衰减系数与叶绿素 a 之间关系,认为利用 660 nm 处的漫衰减系数反演叶绿素 a 的效果好于其他波段.但是,由于叶绿素 a 的漫衰减与叶绿素的生理状况有关,主要集中在其吸收峰光谱,用所有波段的漫衰减系数与叶绿素 a 浓度进行回归分析过于粗略.因此,为了更好地反映漫衰减系数与叶绿素 a 浓度的关系,选择两者相关性最好的 676 nm 处的漫衰减系数进行线性回归(图 10),得到:

$$K_d(676) = 2 \times 10^{-4} c_{\text{Chl-a}}^2 + 5.64 \times 10^{-2} c_{\text{Chl-a}} + 1.55$$

$(R^2 = 0.42)$

(4)

式中, $K_d(676)$ 为 676 nm 处的漫衰减系数 (m^{-1}), $c_{\text{Chl-a}}$ 为叶绿素 a 浓度 (mg/m^3).

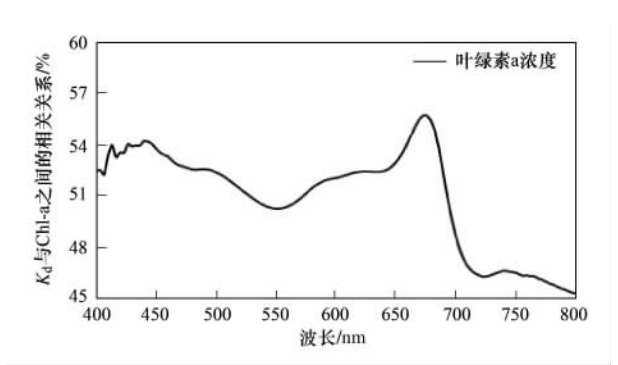


图 10 漫衰减系数与叶绿素 a 浓度的相关系数
Fig. 10 Correlation between K_d and Chl-a

由图 10 分析发现,利用 676 nm 处的漫衰减系数与叶绿素 a 拟合效果好于其他波段的拟合结果,相关系数最高,达到了 56%,但是两者的相关系数相对于悬浮物仍然较低,其相关程度远远不如漫衰减系数与悬浮物之间的关系,说明叶绿素 a 是影响漫衰减系数的重要因子,但不是影响水下光照衰减和分布的首要因子,主要是由于悬浮物浓度中本身就包括浮游植物,因而其相关性自然要高些.

3.3 漫衰减系数与衰减因子浓度的关系

水体中除了悬浮物和叶绿素对光衰减影响以外,CDOM 对光线在水体中的衰减也起着重要作用,其浓度和光学特性显著地改变了水体水色和水体光场强度的分布^[29],因此 CDOM 在自然水体光学特性、生物地球化学和光化学过程中发挥着关键的作用.在水表面 CDOM 的吸收有助于提高表层水生态

系统的初级生产力.同时由于“遮挡作用”抑制深水区域的生态光因子,限制了深层水生态系统的初级生产力^[30].但是目前尚无法确定其浓度,常用 440 nm 处的吸收系数表示其浓度^[31],该波段处的吸收系数越大,表明其对应的 CDOM 的浓度就越高.

为掌握光学衰减系数的主要影响因子,国内外学者研究了漫衰减系数与多种衰减因子之间的关系,提出了一些针对湖泊二类水体的多元线性表达式,Buiteveld 等^[32]从淡水的吸收、散射和衰减的理论模式入手,分析了夏季荷兰湖泊水体中 380nm 处 CDOM 吸收系数以及无机颗粒物、有机颗粒物、叶绿素 a 与漫衰减系数之间的相关关系,取得了较为理想的结果;Lund-Hansen 等^[33]根据 2002 ~ 2003 年巴伦支海的实测数据,分析了浮游植物、悬浮颗粒物和 CDOM 等衰减因子与漫衰减系数之间的线性回归方程,并得到各衰减因子在漫衰减中的贡献率;张运林等^[7,34]根据实测的漫衰减系数与衰减因子作了多元线性回归,得到了太湖、巢湖平均漫衰减系数与各影响因子的关系,认为漫衰减的主要影响因素是无机、有机颗粒物,且短波部分的回归效果要好于长波部分.本研究根据巢湖实测的 440、532、676 和 735 nm 等 4 个特征波长处的漫衰减系数与色素颗粒物、非色素颗粒物、440 nm 处 CDOM 吸收系数作了多元线性回归,得到的回归方程为:

$$K_d(440) = 0.008\,502 \times c_{\text{Chl-a+Pa}} + 2.7 \times$$

$a_{\text{CDOM}}(440) + 0.182 \times c_{\text{Trypton}} + 0.359$

$(R^2 = 0.899)$

(5)

$$K_d(532) = 0.005\,983 \times c_{\text{Chl-a+Pa}} + 1.373 \times$$

$a_{\text{CDOM}}(440) + 0.129 \times c_{\text{Trypton}} - 0.772$

$(R^2 = 0.913)$

(6)

$$K_d(676) = 0.005\,155 \times c_{\text{Chl-a+Pa}} + 0.71 \times$$

$a_{\text{CDOM}}(440) + 0.096\,28 \times c_{\text{Trypton}} + 0.28$

$(R^2 = 0.899)$

(7)

$$K_d(735) = 0.004\,26 \times c_{\text{Chl-a+Pa}} + 0.725 \times$$

$a_{\text{CDOM}}(440) + 0.092\,67 \times c_{\text{Trypton}} + 2.073$

$(R^2 = 0.897)$

(8)

式中, $K_d(440)$ 、 $K_d(532)$ 、 $K_d(676)$ 、 $K_d(735)$ 分别为 440、532、676、735 nm 处的漫衰减系数 (m^{-1}), $c_{\text{Chl-a+Pa}}$ 为色素颗粒物浓度 (mg/m^3), $a_{\text{CDOM}}(440)$ 为 440 nm 处黄质吸收系数 (m^{-1}), c_{Trypton} 为非色素颗粒物浓度 (mg/L).

式(5) ~ (8) 多元回归方程中的各衰减因子系数表明,夏季巢湖水体漫衰减系数的主要影响因素

是色素颗粒物以及非色素颗粒物,受到黄质的影响很小;且非色素颗粒物对光的衰减的影响高于色素颗粒物,巢湖等湖泊水体中,非色素颗粒物浓度要明显高于色素颗粒物浓度,因此非色素颗粒物对光的衰减也就占据了主导地位。

从回归结果看,532 nm 处的相关性最好,735 nm 处相关性相对较差。根据图 5 分析认为,这主要是因为 532 nm 处非色素颗粒物的吸收,颗粒物的后向散射系数对于漫衰减系数的贡献率较大,使得该波段的回归效果最好;而 735 nm 处主要是由于纯水的吸收占据主导地位,而在该模型中未考虑纯水这个衰减因子,因此导致相关性降低;440 nm、676 nm 附近,色素颗粒物吸收峰值使得漫衰减系数在这 2 个波段也存在着峰值,因此这 2 个波段的回归效果较好。该结论与张运林等^[34]关于巢湖的研究结论有差异,张运林等^[34]认为衰减系数与悬浮物、溶解性有机碳、叶绿素 a 的多元线性回归在短波部分要好于长波部分,主要是由于本研究季节是在夏季,而张运林等^[34]的研究是在秋冬季节,根据黄昌春等^[15]研究认为漫衰减系数衰减因子是存在季节差异的,因此出现本研究结论与上述结论的差异。

4 结论

(1)巢湖水体中各组分吸收系数大致呈现随波长增加不断下降的趋势,且降幅较大,其中色素颗粒物的吸收系数在 675 nm 处出现一个吸收峰,非色素颗粒物和 CDOM 的吸收系数呈现指数衰减的趋势;而巢湖水体中后向散射系数也呈指数衰减的趋势。

(2)巢湖水体漫衰减系数具有一致的光谱特征,大部分点位的漫衰减系数在 400 ~ 600 nm 之间随波段的变化呈指数衰减趋势,在 600 ~ 700 nm 之间的变化不大,700 ~ 900 nm 之间的漫衰减系数呈现出纯水吸收的光谱曲线,而部分点位在波长 440 和 675 nm 附近出现峰值。

(3)非色素颗粒物、CDOM 的吸收系数在漫衰减系数中的贡献随波长呈现不断衰减趋势;色素颗粒物吸收系数在 675 nm 附近贡献率出现峰值,此后迅速降低;纯水吸收系数的贡献不断上升;500 nm 之后散射系数的贡献率上升到第一贡献率的位置,到了 700 nm 之后被纯水吸收的贡献率超越,成为第二贡献率因子。

(4)悬浮物中无机颗粒物与漫衰减系数的相关性最好,是其最主要的衰减因子;有机颗粒物的相关性相对较差,而叶绿素 a 对漫衰减系数的影响最小;

且 532 nm 处漫衰减系数与色素颗粒物、非色素颗粒物以及 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 等衰减因子浓度的相关关系好于 440、676、735 nm 等波段。

致谢:感谢参加巢湖实验的所有工作人员在数据获取过程中的所作的贡献,感谢乐成峰博士、黄昌春博士在论文写作及修改中给予的帮助以及指导意见。

参考文献:

- [1] Jerlov N G. Marine Optics[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [2] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semi-analytical model[J]. Applied Optics, 1998, 37(27): 6329-6338.
- [3] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization[J]. Applied Optics, 1999, 38(18): 3831-3843.
- [4] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem[M]. Britain: Cambridge University Press, 1994. 129-144.
- [5] 王晓梅,唐军武,丁静,等. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 38-45.
- [6] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(3): 209-213.
- [7] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 447-453.
- [8] 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[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 337-343.
- [9] Austin R W, Petzold T J. Spectral dependence of the diffuse attenuation coefficient of light in ocean waters: a reexamination using new data[J]. SPIE: Ocean Optics VII, 1990, 1302.
- [10] Baker K S, Smith R C. Quasi-inherent characteristics of the diffuse attenuation coefficient for irradiance[J]. SPIE: Ocean Optics VI, 1979, 208: 60-63.
- [11] Kirk J T O. Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field[J]. Limnology and Oceanography, 1991, 36(3): 455-467.
- [12] Morel A, Loisel H. Apparent optical properties of oceanic water: dependence on the molecular scattering contribution[J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4765-4776.
- [13] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: C02016, doi:10.1029/2004JC002275.
- [14] 黄昌春,李云梅,孙德勇,等. 太湖水体漫衰减系数特征及其对水生态环境影响分析[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 348-355.
- [15] 黄昌春,李云梅,乐成峰,等. 太湖梅梁湾漫衰减系数季节性差异及其主导因素[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3295-3306.
- [16] 荀尚培,翟武全,范伟. MODIS 巢湖水体叶绿素 a 浓度反演模型[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 95-101.
- [17] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, et al. Parameterization of water component absorption in an inland eutrophic lake and its seasonal variability: a case study in Lake Taihu[J]. International Journal

of Remote Sensing,2009,**30**(13):3549-3571.

[18] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学,2006,**18**(5):550-552.

[19] 王建,王骥. 浮游植物叶绿素与脱镁叶绿素的测定方法[J]. 武汉植物学研究,1984,**2**(2):321-328.

[20] 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[J]. 湖泊科学,2008,**20**(3):380-388.

[21] 孙德勇,李云梅,王桥,等. 太湖水体中悬浮颗粒物的比吸收光谱特性及其参数化分析[J]. 环境科学学报,2009,**29**(9):1820-1829.

[22] Hoogenboom J, Dekker A G. Simulation of the medium-resolution imaging spectrometer (MERIS) performance for detecting chlorophyll-a over turbid inland waters[J]. Proceedings of SPIE,1997,**2963**:440-447.

[23] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, *et al.* Light scattering properties and their relation to the biogeochemical composition of turbid productive waters: a case study of Lake Taihu [J]. Applied Optics,2009,**48**(11):1979-1989.

[24] Huovinen P S, Penttö H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lake in Central Finland [J]. Chemosphere,2003,**51**(3):205-214.

[25] 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[J]. Applied Optics,2002,**41**(27):5755-5772.

[26] 宋庆君,唐军武. 黄海东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报,2006,**28**(4):56-63.

[27] Wozniak B, Dera J, Ficek D, *et al.* Modeling light and photosynthesis in the marine environment[J]. Oceanologia,2003,**45**(1):171-245.

[28] 张清凌,陈楚群,施平. 南沙群岛海域水体漫衰减系数 K_d (490) 的特性研究[J]. 热带海洋学报,2003,**22**(1):9-16.

[29] 张运林,吴生才,秦伯强,等. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物对光的吸收[J]. 中国环境科学,2004,**24**(4):405-409.

[30] Arrigo K R, Brown C W. Impact of chromophoric dissolved organic matter on UV inhibition of primary productivity in the sea [J]. Marine Ecology Progress Series,1996,**140**:207-216.

[31] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical Properties and Signatures of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Danish Coastal Waters [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2000,**51**(2):267-278

[32] Buiteveld H A. A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and secchi depth[J]. Netherland Journal of Aquatic Ecology,1995,**29**(1):55-65.

[33] Lund-Hansen L C. Diffuse attenuation coefficients K_d (PAR) at the estuarine North Sea-Baltic Sea transition: time-series, partitioning, absorption, and scattering [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2004,**61**(620):251-259.

[34] 张运林,朱广伟,吴生才,等. 巢湖秋冬季水体生物光学特性对比研究[J]. 农业环境科学学报,2004,**23**(5):949-953.