

巢湖水体漫衰减系数空间差异及其遥感反演*

金鑫¹, 李云梅^{1**}, 王桥², 刘忠华¹, 王彦飞¹, 尹斌¹, 张红¹, 徐祎凡¹, 徐昕¹,
朱利², 吴传庆²

(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, 分析巢湖水体漫衰减系数光谱特征、主导因子、空间分布规律以及 400–700nm 各波段 K_d 与 $K_d(490)$ 之间的关系, 并在此基础上, 建立了 K_d 的遥感反演模型. 结果表明: 巢湖水体 K_d 具有一致的光谱特征, 400–600nm 之间 K_d 随波长的增加呈指数衰减趋势, 在 600–700nm 之间的变化较小, 部分点位在波长 675nm 附近出现峰值, 700–900nm 之间 K_d 呈现出类似于纯水的吸收光谱特征; 巢湖中无机颗粒物是水体漫衰减的主导因子, 有机悬浮物影响次之, CDOM 的影响最小; 巢湖东半湖区 $K_d(490)$ 普遍高于西半湖区, 巢湖中部 $K_d(490)$ 等值线分布较密集, 湖区其他部分则相对稀疏; 利用 591、702、842nm 处的遥感反射率进行多元线性回归反演得到的 $K_d(490)$ 与实测 $K_d(490)$ 之间的平均相对误差为 7.85%; 同时, 400–550nm 波段范围内, 可以利用线性关系和 $K_d(490)$ 对 $K_d(\lambda, \lambda \neq 490\text{nm})$ 进行参数化表示, 在 550–700nm 波段范围则可采用常数与 $K_d(490)$ 的乘积来表示 $K_d(\lambda, \lambda \neq 490\text{nm})$. 通过遥感反射率反演 $K_d(490)$, 进而推算 $K_d(\lambda)$, 其结果与实测 K_d 之间的平均相对误差为 6.14%.

关键词: 漫衰减系数; 多元线性回归; 空间差异; 参数化; 巢湖

Spatial variability and diffuse attenuation coefficient of remote sensing inversion in Lake Chaohu

JIN Xin¹, LI Yunmei¹, WANG Qiao², LIU Zhonghua¹, WANG Yanfei¹, YIN Bin¹, ZHANG Hong¹, XU Yifan¹,
XU Xin¹, ZHU Li² & WU Chuanqing²

(1: Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, P. R. China)

(2: Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, P. R. China)

Abstract: According to the *in situ* measured data on 32 sampling sites in Lake Chaohu in June 2009, the spectral characteristics of diffuse attenuation coefficient (K_d), dominant factors, spatial distribution, as well as the relationship between K_d and $K_d(490)$ in 400–700nm bands were analyzed. On the basis of these analysis, remote sensing inversion model was developed to calculate $K_d(490)$. The results indicate that K_d presented the consistent spectral characteristics. The K_d in 400–600nm showed an exponential decay trend, but K_d from 600nm to 700nm didn't correlate with wavelength. Due to the higher concentration of phytoplankton in some locations, peak values of K_d appeared at 675nm; but K_d showed a feature that was similar to that of pure water in 700–900nm. The dominant factor of diffuse attenuation coefficient was inorganic particles in Lake Chaohu, organic particles took the second place, and CDOM held a minimal impact. In general, $K_d(490)$ in the eastern part of the Lake Chaohu was higher than that in the western part. In the central part, the contour lines of $K_d(490)$ were denser than those in other parts of the lake. $K_d(490)$ was inverted by multivariate linear regression model established with $R_{rs}(591)$, $R_{rs}(702)$ and $R_{rs}(842)$. And the average relative error between measured and inverted $K_d(490)$ was 7.85%. At the same time, the relationship between $K_d(\lambda, \lambda \neq$

* 国家水环境遥感技术体系研究与示范项目(2009ZX07527-006)、国家自然科学基金项目“面向湖泊水色遥感的多元数据融合与生成研究”(40971215)和南京师范大学优秀硕士论文培育计划(2010ss012)联合资助. 2010-03-15 收稿; 2010-06-28 收修改稿. 金鑫, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: jinxinking1986@163.com.

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

490nm) and $K_d(490)$ could be parameterized with wavelength by linear formula in 400–550nm. From 550nm to 700nm $K_d(\lambda, \lambda \neq 490\text{nm})$ was obtained from multiplying $K_d(490)$ by a constant. The relative error between the observed K_d and the $K_d(\lambda)$, which was calculated by $K_d(490)$ by inverting of the R_{rs} , was 6.14%.

Keywords: Diffuse attenuation coefficient; multivariate linear regression; spatial variability; parametrization; Lake Chaohu

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^[1-2],因此 K_d 是水生态系统的重要影响因素^[3-4]. Gallegoes等^[5]研究表明,Chesapeake湾和Rhode河的 K_d 在 $1-10\text{m}^{-1}$ 之间变化, K_d 的主要影响因素是水体组分的吸收和散射;Deepak等^[6]得出Roatan岛附近水域蓝光、绿光、红光波段的 K_d 分别为 $0.138、0.158、0.503\text{m}^{-1}$;Kirk等^[7]分析了 K_d 从清洁海水到浑浊河湖及入海口的变化;张运林等^[8-9]认为太湖 K_d 存在较大的时空差异,并建立了太湖 K_d 与悬浮物、叶绿素等的关系模型;黄昌春等^[10-11]研究了秋季太湖以及梅梁湾等二类水体中,不同水体组分吸收、散射对 K_d 的贡献率.这些研究表明,不同水域的 K_d 值具有较大差异.

对于特定水体而言,漫衰减系数是水面遥感反射率的重要影响因素^[12],建立 K_d 与遥感反射率之间的关系,利用遥感技术实现对 K_d 的反演,实现对大面积水域的水下光场和光学特性的研究^[13].在此方面做出开创性工作的是Austin^[14]和Mueller^[15]等,他们分别针对CZCS和SeaWiFS等传感器提出了不同的反演算法;王晓梅等^[16]则针对中国黄、东海海区二类水体建立了 K_d 与透明度之间的关系;崔廷伟等^[17]利用MERIS数据反演了渤海的 $K_d(490)$;乐成峰等^[18]分析了秋季太湖水体 K_d 的光谱特性及其影响因子,并建立其遥感反演模型;李云亮等^[19]计算了太湖PAR漫衰减系数,并基于两景TM数据反演冬、夏两季真光层深度.以上研究表明,不同水体具有不同固有光学特性,对 K_d 的影响存在较大的差异,导致 K_d 与遥感反射率之间的关系也存在着较大的差异.目前国内该领域的研究热点主要集中在黄东海、太湖等二类水体,而巢湖水体的光学特性与黄东海、太湖等水体存在地区差异,导致该水体中的 K_d 可能与其他水体也存在较大的差异, K_d 与遥感反射率之间的模型关系也不一样^[20].但是,目前国内针对巢湖水体 K_d 的空间差异以及其遥感反演方面的研究还鲜有发表.

巢湖地处江淮之间,是我国五大淡水湖之一,面积约 760km^2 .巢湖地处温带,水深较浅,是典型的富营养化湖泊.水体富营养化破坏了生态系统的平衡状态,严重降低了巢湖的使用功能,影响并制约了周边城市的经济发展,被国家列为重点治理水域.因此,本文基于2009年6月13–16日巢湖32个样点的实测光谱数据和水质参数,分析了巢湖夏季水体 K_d 以及不同湖区 K_d 的差异,并建立了 K_d 与水面以上遥感反射率之间的关系模型,为进一步利用遥感影像评价巢湖水体光场结构提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 数据采集

于2009年6月13–16日在巢湖进行采样,共布设32个采样点(图1),采样时间为每天9:00–16:00,测量时天空基本无云,天气晴朗,平均风速 2m/s 以下,水面基本平静,且各采样点的外界环境基本变化不大.使用标准采样器从水面至水下30cm处采集水样,为避免水样变质,采集的水样在 $0-4^\circ\text{C}$ 下避光保存并于当天送至实验室进行分析.

水面反射光谱测量采用ASD FieldSpec Pro便携式光谱辐射计,其波段范围是350–1050nm,光谱分辨率是 2nm ^[21].水面以下光谱数据用Trios水下光谱仪采集,该仪器具有两个探头,位于同一深度,可同时测量上行辐亮度 $L_u(\lambda, z)$ 和下行辐照度 $E_d(\lambda, z)$,波段测量范围为320–950nm,光谱分辨率 3.3nm ,测量深度取 $0.2、0.4、0.6、0.8、1\text{m}$ ^[10].

1.2 水质参数测定

采用烘干称重法测定悬浮物的浓度,使用 $0.70\mu\text{m}$ 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

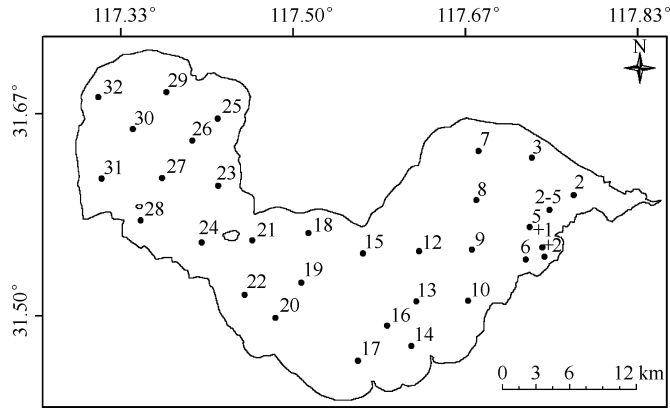


图1 巢湖采样点位

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Chaohu

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℃ 高温烘烤载有总悬浮物的膜,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.叶绿素通过热乙醇法进行处理.采用 0.22 μm 的 millipore 滤膜过滤已经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 750nm 的吸光度作散射校正^[22].

1.3 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^[23]:

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

式中, $K_d(\lambda)$ 为波长 λ 处的漫衰减系数; z 为从参考水层到测量处的深度; $E_d(\lambda, z)$ 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,本研究选择 0.2m 作为参考水层. $K_d(\lambda)$ 通过对 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1m 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.

1.4 精度分析

使用相对误差 (RE) 作为检验反演值与实测值是否一致的评判标准.表达式如下:

$$RE = \frac{|K_d(\lambda)_{\text{mod}} - K_d(\lambda)_{\text{obs}}|}{K_d(\lambda)_{\text{obs}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $K_d(\lambda)_{\text{mod}}$ 表示漫衰减系数反演值, $K_d(\lambda)_{\text{obs}}$ 表示漫衰减系数实测值.

2 巢湖水体漫衰减系数空间差异分析

2.1 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 440nm 处的 K_d 最大值为 13.49 m^{-1} ,最小值也达到 3.94 m^{-1} ;在绿光波段 532nm 处的 K_d 为 1.56 - 8.13 m^{-1} ,平均值为 4.49 m^{-1} ;在红光波段 676nm 处, K_d 为 1.74 - 6.79 m^{-1} .巢湖水体 K_d 具有一致的光谱特征,绝大多数采样点的 K_d 在 400 - 550nm 之间随波段的变化呈指数衰减趋势,由于悬浮物、CDOM 在这个波段范围内的吸收较强,另外还有部分采样点的叶绿素浓度较高,此时 K_d 则是先上升,到了 440nm 以后再呈现下降趋势,主要是由于叶绿素浓度较高时在 440nm 处形成强吸收峰, K_d 随着波长的变化逐渐衰减,并在 550nm 附近出现拐点;在 550 - 650nm 之间 K_d 的变化很小,几乎没产生任何变化;但到了 675nm 附近由于色素的吸收也产生一个小的峰值;675nm 以后, K_d 的值也呈现下降的趋势,且在 700nm 处产生最小值;而在 700 - 900nm 波段范围内 K_d 呈现出与纯水吸收相似的光谱特征(图 2),这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,悬浮颗粒物的散射系数也较小,因此该波段范

围内 K_d 的变化主要由纯水吸收所致。

2.2 漫衰减系数主导因子分析

水体中漫衰减系数是由水体各组分的吸收和散射等固有光学特性决定的,其中纯水的吸收和散射是一切水体所共有的,一般认为是水体 K_d 的本底,因此水体中 K_d 主要受到悬浮物、浮游藻类和 CDOM 的影响^[8],但是由于不同水体组分的差异,对水体吸收散射等固有光学特性产生不同影响,直接导致 K_d 的主导影响因子存在着较大的差异:在悬浮物、浮游植物浓度低而 CDOM 浓度高的腐殖酸湖泊,CDOM 对 K_d 的贡献较为显著的,而在一些浑浊的浮游植物浓度高的水体,则主要受制于悬浮物和浮游藻类。在 400 - 900nm 范围内, K_d 与总悬浮物、无机悬浮物之间都具有很好的相关性,相关系数较稳定,均在 0.95 左右,由此说明悬浮物是引起巢湖水体漫衰减的主导因子,且 K_d 与总悬浮物、无机悬浮物的相关系数较为接近,这主要是由于巢湖悬浮物中无机悬浮物占主导,无机悬浮物对总悬浮物影响较大,使得两者的相关系数相近;同时有机悬浮物与 K_d 的相关系数则相对较小,但其值也在 0.6 以上;而与叶绿素 a 的相关性相对较差(相关系数都在 0.5 以下),只在 675nm 处由于色素的强吸收在该处形成一个峰值,说明叶绿素 a 不是影响水下光照衰减和分布的首要因子;而在该波段范围内 CDOM 与 K_d 之间的相关系数一直低于 0.2,因此巢湖中 CDOM 对于漫衰减的影响最小(图 3)。综上所述可以看出,悬浮物是巢湖水体漫衰减的主要贡献者,其组成及浓度大小是影响 K_d 的一个重要因素。这与张运林^[8]、乐成峰^[18] 等对太湖的研究结论一致,张运林等^[8] 分析认为,太湖水体 K_d 与悬浮物之间存在良好的线性关系;乐成峰等^[18] 研究表明,太湖水体中无机悬浮物是影响 K_d 的主要影响因子。因此,巢湖水体的光学特性主要由悬浮物所决定,悬浮物的吸收散射是水体中 K_d 变化的主要影响因子,其中,无机悬浮物是主要的衰减因子。

2.3 漫衰减系数的空间变化特征

由悬浮物浓度与漫衰减系数的相关关系可知,水体中悬浮物含量低,水体清澈, K_d 就小,但是在风浪较大以及上游来水量增大时,风浪及水流的扰动作用容易引起底部悬浮泥沙的再悬浮,导致 K_d 的增大。利用实测 $K_d(490)$ 进行插值拟合得到的空间分布等值线格局表明,巢湖不同区域 $K_d(490)$ 总体上差异较大,湖区东半部分 $K_d(490)$ 的值普遍高于西半部分, $K_d(490)$ 的最大值(12 号点),达到了 7.87m^{-1} ,20 号采样点的 $K_d(490)$ 为最小值,只有 1.9m^{-1} ,整个湖区 $K_d(490)$ 的平均值为 4.73m^{-1} , $K_d(490)$ 的高值区(约为 $5 - 7\text{m}^{-1}$) 主要分布在湖区东半部分,尤其是巢湖中部偏东湖区,其中 12、13、15 号点的 $K_d(490)$ 都超过了 7.7m^{-1} ,巢湖西北部湖区的 $K_d(490)$ 也相对较大, $K_d(490)$ 均大于 4m^{-1} ,悬浮颗粒物含量高所导致的水体浑浊是上述区域 K_d 较大的主要原因; $K_d(490)$ 的低值区(约为 $2 - 4\text{m}^{-1}$) 则主要分布在湖区西半部分,大部分点的 $K_d(490)$ 都小于 4m^{-1} ,20 号点的 $K_d(490)$ 甚至小于 2m^{-1} (图 4)。由于不同湖区测量时的天气状况存在差异,西半湖区测量时间是 6 月 13 日至 14 日,当时湖面风平浪静,且悬浮物浓度相对较小,水体较清澈,使得 $K_d(490)$ 较小,而对东半湖区的测量是在 6 月 15 日,观测时的天气记录显示,6 月 14 日晚间巢湖上游地区普降大雨,河流上游大量雨水汇入带来大量悬浮泥沙,并冲刷着湖体底部的悬浮物,出现湖内悬浮沉积物再悬

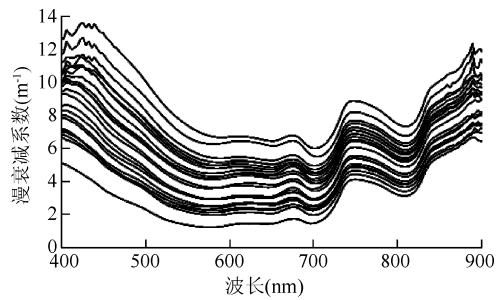


图 2 水体漫衰减系数

Fig. 2 Diffuse attenuation coefficient in Lake Chaohu

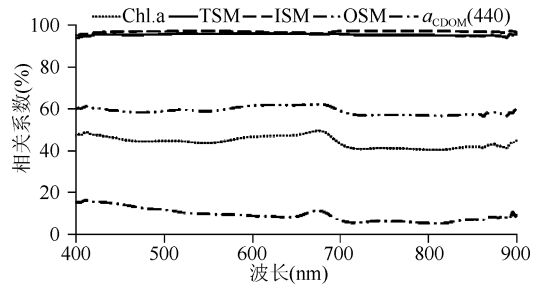


图 3 $K_d(\lambda)$ 与 TSM、OSM、ISM、Chl. a 和 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 的相关性

Fig. 3 The correlation between $K_d(\lambda)$ with TSM, OSM, ISM, Chl. a and $a_{\text{CDOM}}(440)$

浮现象,且当天测量时风速较大,风浪的扰动作用导致悬浮物浓度增大,水体变得浑浊,因此 $K_d(490)$ 偏大. $K_d(490)$ 分布的等值线在巢湖中部分布比较密集,而在其他湖区分布则相对稀疏,说明 $K_d(490)$ 在中部变化较大,湖中部区域水流以及风浪的复杂作用成为该区域等值线密集的主要原因,巢湖湖中区域水深较浅也影响了 $K_d(490)$ 的变化趋势.

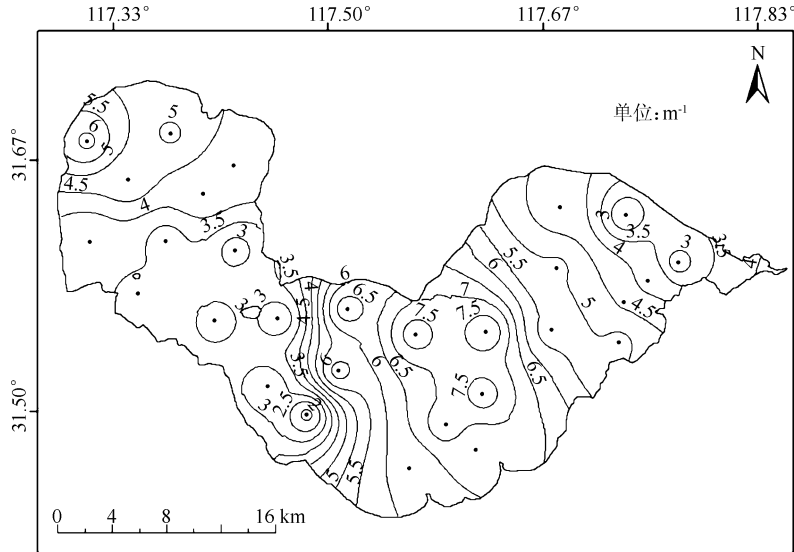


图4 巢湖 $K_d(490)$ 分布等值线

Fig. 4 Contour line of $K_d(490)$ in Lake Chaohu

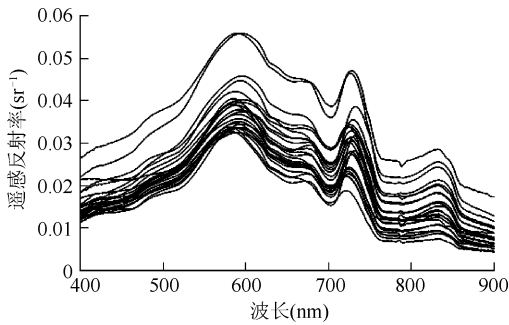


图5 实测巢湖水体遥感反射率

Fig. 5 *In situ* measured remote sensing reflectance in Lake Chaohu

3 漫衰减系数的遥感反演

3.1 $K_d(490)$ 与遥感反射率的关系

太湖水体水面以上遥感反射率光谱曲线具有典型的内陆二类水体的光谱特征,在波长 590nm 和 720nm 附近具有明显的反射峰,675nm 附近出现一个小的峰值,在波长 700nm 附近则具有明显的反射谷(图 5). 590nm 附近的反射峰是由藻类光合色素的弱吸收和无机悬浮物以及浮游植物的细胞壁的散射共同形成的^[24], 720nm 附近的反射峰则主要是由于浮游植物的荧光和纯水的吸收所致;而水体浮游藻类细胞中含有的光合作用色素在 700nm 处的强烈吸收导致反射率形成明显的反射谷值,该波长附近通常被认为是判定水体是否含有叶绿素的依据. 但是当叶绿素 a 浓度达到一定程度后,此处的反射率几乎与叶绿素无关,主要与无机悬浮物浓度相关^[25]; 500 - 700nm 波段范围的反射率都较高,这主要是由于太湖水体的悬浮物浓度较大,而悬浮物浓度对反射率的响应波段较宽,导致该波段范围内反射率整体抬升; 750nm 之后,纯水的吸收是导致反射率变化的主要因素.

漫衰减系数主要是由水体各组分的吸收和散射等固有光学特性决定的,但同时也受到观测时天空状况、太阳高度角等表观光学参数的影响,与遥感反射率都属于表观光学参数,两者都与水体吸收、散射等固有光学特性以及采样期间的天空状况等密切相关,都是水体组分光学特性的综合反映,因此两者之间存在一定的函数关系. 本文以 $K_d(490)$ 作为变量,利用遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 建立了 $K_d(490)$ 与遥感反射率之间的

关系模型. 对 $R_{rs}(\lambda)$ 与 $K_d(490)$ 进行相关分析, 找出 $K_d(490)$ 变化响应的敏感波段, 再利用敏感波段与 $K_d(490)$ 建立遥感反演模型. 结果表明, $K_d(490)$ 与遥感反射率具有较好的相关性(图 6), 400 - 900nm 波段范围内, 两者均呈正相关关系, 且随着波长的增加, 其相关性逐渐增强. 在 450 - 700nm 波段范围内, 两者的相关性相对较低, 相关系数在 0.2 - 0.6 之间变动; 在 700nm 以后, 两者的相关性明显增强, 相关系数最大到 0.83, 最大相关系数出现在 842nm 波段处. 这主要是由于 K_d 受水体组分吸收和散射共同影响所致: 在 400 - 700nm 波段范围内, K_d 主要由水体中多种组分的吸收和散射共同主导; 而大于 700nm 波段范围内, 除了纯水的吸收较大以外, 其他组分的吸收相对较小, K_d 主要受悬浮物后向散射和纯水吸收的双重影响, 而遥感反射率主要是由水体组分的后向散射所形成, 从而导致该波段范围内两者的相关性较好.

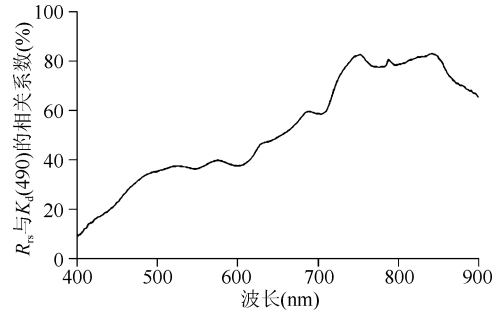


图 6 巢湖水体 $K_d(490)$ 与遥感反射率的相关系数

Fig. 6 The correlation of R_{rs} and $K_d(490)$ in Lake Chaohu

3.2 $K_d(490)$ 反演模型的建立

前人研究表明, 利用遥感反射率反演漫衰减系数时, 采用多元回归方法可得到较好的反演效果. 如 Austin 等^[26] 针对 CZCS 传感器提出了反演 K_d 的算法, 认为 K_d 与波长 443nm 和 550nm 处的离水辐亮度比值具有很好的线性关系; Mueller 等^[15] 针对 SeaWiFS 传感器提出的一类水体 K_d 的反演算法, 则采用 490nm 和 555nm 处的归一化离水辐亮度; 王晓梅等^[16] 则在黄、东海对 K_d 的反演模型进行研究, 并结合水体光谱特征, 经过不同波段的组合试验, 发现利用 $R_{rs}(555) + R_{rs}(670)$ 和 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 的形式反演 K_d , 与实测值最接近; 崔廷伟等^[17] 改进了王晓梅的算法, 并将该算法应用于渤海近岸水体; 乐成峰等^[18] 对太湖水体中 490nm 处 K_d 采用 550nm、675nm 以及 731nm 处的遥感反射率, 建立了多元线性回归模型.

因此, 在分析前人建模经验的基础上, 从 32 个采样点中任意抽取 25 个样点, 选择受无机悬浮物影响较大的 590nm 和 700nm 附近的两个波段(这两个波段无机悬浮物与 $K_d(490)$ 的相关关系分别为 0.387 和 0.689), 并结合与 $K_d(490)$ 相关系数最高的 842nm 处的遥感反射率建立夏季巢湖 K_d 的遥感反演模型, 得到:

$$K_d(490) = -3.305 \times \frac{R_{rs}(702)}{R_{rs}(842)} + 17.481 \times \frac{R_{rs}(702)}{R_{rs}(591)} + 1.823 (R^2 = 0.911) \quad (3)$$

式中, $K_d(490)$ 为 490nm 处的漫衰减系数, $R_{rs}(591)$ 、 $R_{rs}(702)$ 、 $R_{rs}(842)$ 分别为 591nm、702nm、842nm 处的遥感反射率.

为了比较多元回归模型与单波段模型的差别, 选择相关系数最大的 842nm 处的遥感反射率与 $K_d(490)$, 建立单波段模型. 以 $K_d(490)$ 作为因变量, $R_{rs}(842)$ 作为自变量, 建立 $K_d(490)$ 的单波段遥感反演模型(图 7a).

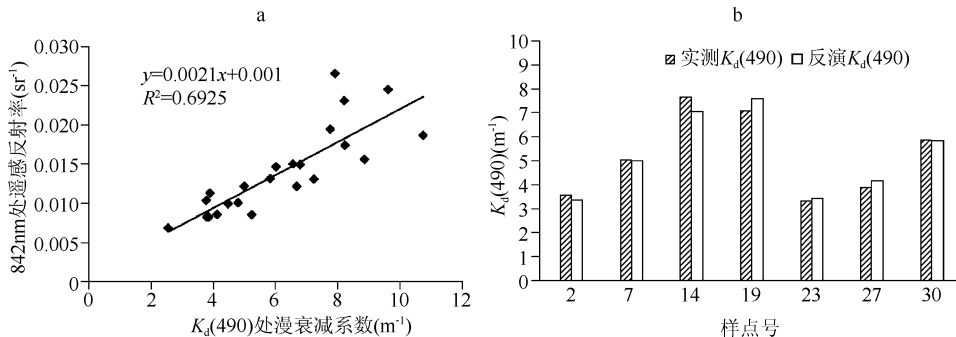


图 7 实测 $K_d(490)$ 与 $R_{rs}(842)$ (a) 和反演得到的 $K_d(490)$ (b) 之间的关系

Fig. 7 Relationship between $R_{rs}(842)$ (a), modeled $K_d(490)$ (b) and measured $K_d(490)$

由图 7a 结合式(3)表明,利用多元遥感反射率组合与实测的 490nm 处的 K_d 具有很好的线性关系,相对于单波段算法而言,利用多元线性回归模型对 K_d 进行遥感反演的效果更好.

为验证该遥感反演模型的反演精度,利用剩余采样点 $K_d(490)$ 进行模型的验证(图 7b),利用式(3)反演得到的 $K_d(490)$ 与实测的 $K_d(490)$ 之间的最大相对误差为 25.1%,最小相对误差仅为 1.03%,9 个点的平均相对误差为 7.85%,总体反演效果较好.

3.3 K_d 的参数化

对现场实测数据分析表明,不同波长处的水体漫衰减系数之间存在一定的关系,因此,建立巢湖各波段 K_d 之间的关系模型,可以从一个已知波段的 K_d 模拟任何一个波段的 K_d ,这就在水色反演中大大减少了未知因子的个数.目前,490nm 处的漫衰减系数已成为水色遥感的标准产品之一,许多研究者针对 $K_d(490)$ 的反演进行了研究,Austin 等^[26]根据 1969 - 1979 年海洋光学调查数据,比较分析了 410、440、520、550、632 和 670nm 波长的 K_d 与 $K_d(490)$ 的关系,拟合得到了较好的线性关系,并利用 1985、1987 年的实测数据对该关系进行了验证;王晓梅等^[16]针对黄、东海水体的 K_d 与 490nm 特征波段处的 K_d 建立了线性关系,并针对 670nm 单独建立了一个补充模型;唐世林等^[27]对南海的研究发现, K_d 与 $K_d(490)$ 也可以通过一个定值来表示.但是,对于巢湖而言,这种关系到底如何,还需要实验数据的检验.由前文分析可知,700nm 之后, K_d 的光学特性主要呈现纯水的吸收特性,其他衰减因子对 K_d 几乎没有影响,不适合 K_d 的参数化反演,因此本文仅对 400 - 700nm 波长范围进行研究,从 32 个采样点中任意抽取 25 个采样点的 K_d 用于建模,所建立的 $K_d(490)$ 与 400 - 700nm 之间其他波长处的 $K_d(\lambda)$ 的关系可表示为:

$$K_d(\lambda) = K \times K_d(490) \tag{4}$$

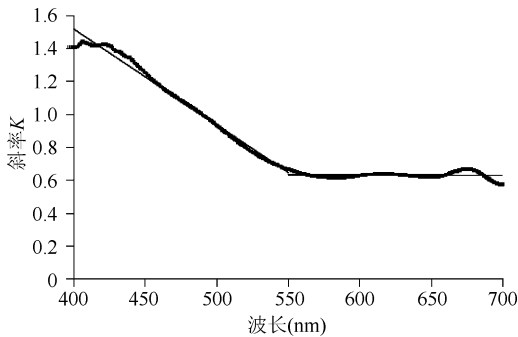


图 8 直线斜率 K 与波长 λ 的散点图

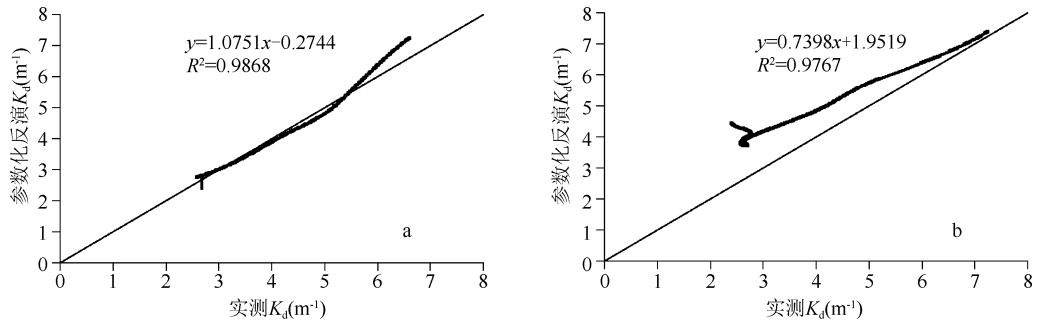
Fig. 8 Scatter plot of wavelength and slope of diffuse attenuation coefficient

式中, K 为任意波段处 K_d 与 $K_d(490)$ 关系的斜率, λ 为波长 (nm). 经计算可得,400 - 700nm 的 K_d 与 $K_d(490)$ 之间的 R^2 都超过了 0.98,该决定系数与王晓梅等^[16]的研究结论相同,由此表明,该波段范围内的 K_d 可以使用 $K_d(490)$ 进行参数化.唐世林等^[27]研究南海水体 K_d 关系时,拟合得到的 K 值为一个定值;王晓梅等^[16]则认为斜率 K 与波段之间是二次函数的关系.因此本研究对不同波长处的直线斜率与波长进行回归分析,建立斜率与波长之间的关系.400 - 550nm、550 - 700nm 之间,波长与斜率之间可分别拟合为一次线性以及定值的关系(图 8),其关系式分别为:

$$K = -0.0059\lambda + 3.871, 400 - 550\text{nm} \tag{5}$$

$$K = 0.6591, 550 - 700\text{nm} \tag{6}$$

为了验证分段函数模型的适用性,利用另外 7 个采样点的数据进行模型精度的验证.使用分段函数模型式(5)和式(6),并根据已知的 $K_d(490)$,计算出 400 - 700nm 其他波段处的 K_d ,所有样点的相对误差都在 30% 以内,最大相对误差为 28.61%,平均相对误差为 6.14%;同时为了比较分段函数模型与王晓梅等^[19]得出的二次函数模型的精度,二次函数模型也同时被用于进行 K_d 的参数化反演.8 号点分段函数模型(图 9a)和二次函数模型(图 9b)反演的 K_d 与实测 K_d 之间的散点图可以看出,两种算法反演得到的 K_d 与实测值之间都具有较好的线性关系,但是分段函数模型的效果要明显好于二次函数模型.其中分段函数模型的拟合效果 R^2 为 0.99,而二次函数模型的拟合效果 R^2 为 0.98;对于方程的系数而言,分段函数模型的拟合方程的系数为 1.08,要比二次函数模型更接近于 1,而截距为 0.27,要小于二次函数模型的 1.95.由此可见,从方程拟合效果、系数与 1 的接近程度以及截距上都可以看出,分段函数模型得到的 K_d 与实测值的关系要明显好于二次函数模型的效果.

图9 8号点分段函数模型(a)与二次函数模型(b)反演 K_d 对比Fig.9 The contrast diagram of discontinuance function(a) and quadratic function(b) model of K_d on 8th sample site

4 结论

本文利用巢湖夏季实测水下光谱数据和遥感反射率数据,分析了夏季巢湖水体漫衰减系数的光谱特性及其空间分布,认为巢湖水体 K_d 具有一致的光谱特征,400-600nm之间 K_d 随波段的变化呈指数衰减趋势,在600-700nm之间的变化不大,700-900nm之间的 K_d 呈现出纯水吸收的光谱曲线,由于色素的强吸收,使得部分点位在波长675nm附近出现峰值;夏季巢湖漫衰减系数的主导因子为无机悬浮物,有机悬浮物与叶绿素a对漫衰减系数的影响较小,巢湖中CDOM几乎未对水体中漫衰减系数产生影响;巢湖夏季 $K_d(490)$ 的空间分布特征为:巢湖东半湖区 $K_d(490)$ 高于西半湖区,巢湖中部 $K_d(490)$ 等值线分布较密集,其他湖区则相对稀疏;利用591、702、842nm处的遥感反射率建立了巢湖夏季 $K_d(490)$ 的多元线性回归反演算法,反演得到的 $K_d(490)$ 与实测的 $K_d(490)$ 之间平均相对误差为7.85%,反演效果较好;利用 $K_d(490)$ 建立 $K_d(\lambda)$ 的线性回归参数化模型,其中400-550nm处的斜率与波长的关系可以表示为线性关系,550-700nm处的斜率与波长则直接表示为定值,通过参数化模型得到的 K_d 与实测 K_d 之间的平均相对误差为6.14%。

由于本文的采样点数量相对较少,且研究方法为统计方法,因此,本研究结果的普适性和推广性还需大量的数据进行验证.影响巢湖水体漫衰减系数的因素较复杂,受到风力、湖流等环境因子的影响较大,要更好地了解巢湖水体的光学特性和光学类型、掌握水下光场的分布和变化规律,还要对巢湖水体的水动力模型进行更深入的研究;要更精确地利用遥感方法进行巢湖水体光学特性的研究,还需对太湖水体生物光学模型和光照在水体中的传输过程进行深入的探讨和研究。

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。

5 参考文献

- [1] Jerlov NG. Marine Optics. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [2] 胡连波. 黄东海水体漫衰减特性研究[学位论文]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
- [3] Lee ZP, Carder KL, Mobley CD. Hyperspectral remote sensing for shallow waters; 1. A semi-analytical model. *Applied Optics*, 1998, **37**(27): 6329-6338.
- [4] Lee ZP, Carder KL, Mobley CD. Hyperspectral remote sensing for shallow waters; 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 1999, **38**: 3831-3843.
- [5] Gallegos LC, Correll LD, Pierce JW. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption and scattering coefficients in a turbid estuary. *Limnology & Oceanography*, 1990, **35**(7): 1486-1502.
- [6] Deepak R, Sunil N, Narumalani S et al. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data. *Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 2005, **60**(1): 48-64.

- [7] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Britain: Cambridge University Press, 1994:129-144.
- [8] 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. 海洋与湖沼, 2004, 35(3):209-213.
- [9] 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. 水科学进展, 2003, 14(4):447-453.
- [10] 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. 环境科学, 2009, 30(2):348-355.
- [11] 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. 生态学报, 2009, 29(6):3295-3306.
- [12] Zheng XB, Dickey T, Chang G. Variability of the downwelling diffuse attenuation coefficient with consideration of inelastic scattering. *Applied Optics*, 2002, 41:6477-6488.
- [13] Lee ZP, Du KP, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C02016) (doi:10.1029/2004JC002573).
- [14] Austin RW, Petzold T. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner. *Oceanography from Space*. New York: Plenum Press, 1981:239-256.
- [15] Mueller JL. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum, 2000, 11:24-27.
- [16] 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. 海洋学报, 2005, 27(5):38-45.
- [17] 崔廷伟,张杰,马毅等. 渤海近岸水体漫衰减系数 $K_d(490)$ 遥感反射模型. 遥感学报, 2009, 13(3):417-422.
- [18] 乐成峰,李云梅,查勇等. 太湖水体漫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.
- [19] 李云亮,张运林,刘明亮. 太湖真光层深度的计算及遥感反演. 湖泊科学, 2009, 21(2):165-172.
- [20] Lee ZP, Darecki M, Carder KL *et al.* Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: A evaluation of remote sensing methods. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C02017) (doi:10.1029/2004JC002275).
- [21] 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, 2005, 8(1):37-44.
- [22] Sun DY, Li YM, Wang Q *et al.* Parameterization of water component absorption in an inland eutrophic lake and its seasonal variability: a case study in Lake Taihu. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(13):3549-3571.
- [23] Huovinen PS, Penttö H, Soimasuo MR. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lake in Central Finland. *Chemosphere*, 2003, 51(3):205-214.
- [24] Schalles JF, Gitelson A, Yacobi YZ *et al.* Chlorophyll estimation using whole seasonal, remotely sensed high spectral-resolution data for an eutrophic lake. *Journal of Phycology*, 1998, 34:383-390.
- [25] 吴传庆,杨志峰,王桥等. 叶绿素 a 浓度的动态峰反演方法. 湖泊科学, 2009, 21(2):223-227.
- [26] Austin RW, Petzold TJ. Spectral dependence of the diffuse attenuation coefficient of light in ocean waters a reexamination using new data. *SPIE:Ocean Optics VII*, 1990, 1302.
- [27] 唐世林,陈楚群,詹海刚等. 南海真光层深度的遥感反演. 热带海洋学报, 2007, 26(1):9-15.