

黄东海及珠江口附近海域水体漫衰减系数反演

吴婷婷^{1,3} 丘仲锋² 何宜军² 申辉¹

¹ 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071
² 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044
³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 根据黄东海及珠江口附近海域 17 个航次的实测水下光谱剖面数据,建立了基于水体遥感反射比光谱数据与 490 nm 波段水体漫衰减系数 K_d 的遥感反演算法。经实测数据检验,经验算法反演结果的平均相对误差为 28.27%,均方根误差为 0.35,相关系数为 0.91;半分析算法反演结果的平均相对误差为 31.53%,均方根误差为 0.48,相关系数为 0.83。通过采用实测数据对新算法和现有算法的比较,发现新建立的算法能取得更好的反演效果,新建立的模型中经验算法能取得比半分析算法更高的精度。考虑到半分析算法建立过程独立于实测的水体漫衰减数据,因此可以认为半分析算法比经验算法有更大的适用性。

关键词 海洋光学;反演算法;漫衰减系数;遥感反射比;半分析算法

中图分类号 P733.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0701001

Retrieval Algorithms of Diffuse Attenuation Coefficient in the Yellow Sea, the East China Sea and the Pearl River Estuary

Wu Tingting^{1,3} Qiu Zhongfeng² He Yijun² Shen Hui¹

¹ Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China
² School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Optical data collected in the 17 cruise surveys in the Yellow Sea, the East China Sea and the Pearl River Estuary are used to establish new retrieval algorithms to evaluate diffuse attenuation coefficient K_d at 490 nm by using the relationship between remote sensing reflectance and K_d . Compared with in situ observation, the retrieval from the empirical algorithm shows that the correlation coefficient is 0.91, the root mean square error is 0.35 and the average relative error is 28.27%. And comparison between retrieval from the semi-analytical method and in situ observation shows that the correlation coefficient, root-mean-square error, average relative error of the results obtained are 0.83, 0.48, 31.53% respectively. Furthermore, both the empirical algorithm and the semi-analytical method can attain better performance than the existing algorithms by comparing retrieval with in situ observation. Although the empirical algorithm shows more precise than the semi-analytical method, the semi-analytical method is more independent to the in situ observation than the empirical algorithm during the process of algorithm establishment. Therefore, the semi-analytical method is more suitable in retrieving K_d in the Yellow Sea, the East China Sea and the Pearl River Estuary.

Key words ocean optics; retrieval algorithm; diffuse attenuation coefficient; remote sensing reflectance; semi-analytical algorithm

OCIS codes 010.0280; 010.4450; 280.4788; 290.1990

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41276186)、国家 973 计划(2013CB956503)、海洋公益性行业科研专项经费(201005030)

作者简介: 吴婷婷(1988—),女,硕士研究生,主要从事水色遥感方面的研究。E-mail: wutingting_1019@126.com

导师简介: 申辉(1978—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事物理海洋及海洋遥感数值模拟等方面的研究。

E-mail: shenhui@qdio.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

光谱漫衰减系数是一种重要的海洋光学参量,下行漫衰减系数 K_d 为下行辐照度随深度增加而指数衰减的系数^[1],是估算水下光场的重要参数^[2],是研究赤潮^[3-4]、水色要素垂直分布^[5]、浮游植物光合作用^[6-8]的重要参数。下行漫衰减系数为表观光学参量^[9],由于其性质主要由水体的固有光学特性决定,受环境光场影响较小,又常常被称为“准固有光学特性”。研究表明漫衰减系数与叶绿素含量、悬浮物浓度、黄色物质等有很强的相关性^[10-11]。

估算 490 nm 处的漫衰减系数的算法大体分为两种:经验算法和半分析算法。

经验算法直接从表观光学性质(AOPs)反演漫衰减系数。Austin等^[12]率先建立在蓝绿两个波段的离水辐亮度比值和漫衰减系数 $K_d(490)$ 之间的经验关系;目前中分辨率成像光谱仪(MODIS)等传感器数据采用较多的是Mueller根据 490 nm 和 555 nm 处的标准化离水辐亮度比值提出的经验算法^[13];王晓梅等^[11]针对黄东海二类水体利用海洋遥感反射比 $R_{rs}(555)+R_{rs}(670)$ 并结合 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 建立漫衰减系数反演经验算法;Zhang等^[14]利用 NOMAD 与 COASTLOOC 数据集建立了漫衰减系数 $K_d(490)$ 的经验算法。

半分析算法以辐射传输理论为基础,由遥感反射比反演吸收系数和后向散射系数,然后由吸收系

数和后向散射系数以及边界条件计算漫衰减系数,在此过程中仅对少数参数采用经验方法确定。最具代表意义的为 Lee 等^[15-18]根据辐射辐射提出的反演 $K_d(490)$ 的半分析算法。Doron 等^[19]尝试进行半分析算法的简化,其假定颗粒后向散射仅存在弱的光谱依赖性,利用 490 nm 和 709 nm 的辐照度反射率反演,并借助 Lee 等建立的半分析关系来实现反演。Wang 等^[20]在对 Lee 等算法进一步改进,对清洁水体和浑浊水体采用不同算法,加入权重,建立联合算法。

由于黄东海及珠江口海域水体的复杂性,上述算法反演精度存在偏差,本文根据黄东海及珠江口附近海域 17 个航次的水体下行辐照度剖面和上行辐亮度剖面,分别建立经验算法和半分析算法,采用实测数据对算法的反演精度做了验证,并将算法与现有的代表性算法进行比较。

2 数据和方法

2.1 实验数据

数据采集范围主要在黄东海及珠江口附近海域,如图 1 所示,经纬度跨越范围 $113^\circ \sim 125^\circ \text{E}$, $21^\circ \sim 36^\circ \text{N}$,悬浮物质量浓度范围为 $0.6 \sim 182.3 \text{ mg/L}$,叶绿素 a 质量浓度范围为 $0.01 \sim 40.19 \text{ mg/L}$ 。数据采集具体情况如表 1 所示,共 17 航次,238 组数据,表中 L_u 为上行辐亮度。

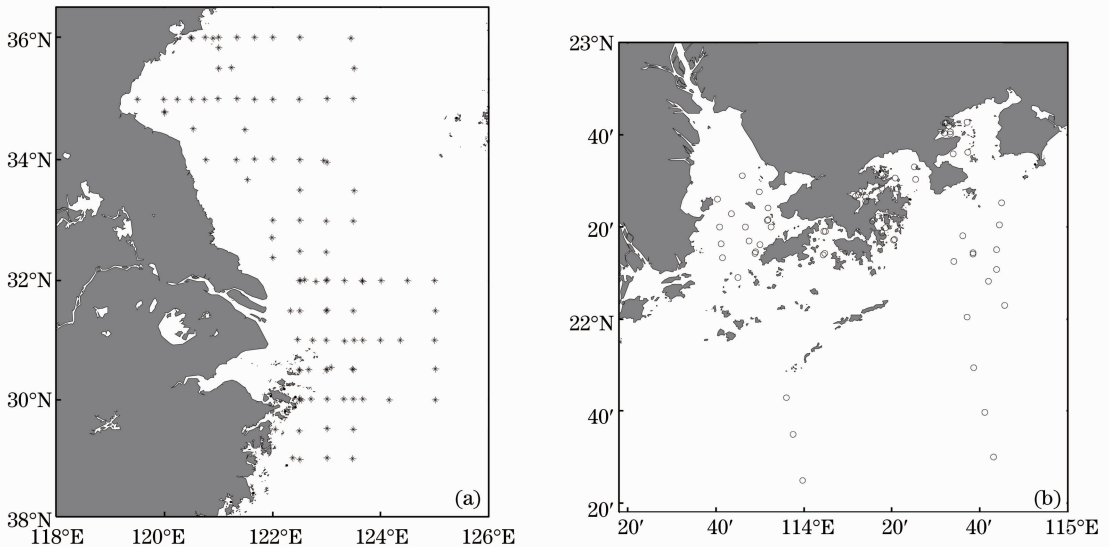


图 1 数据采集区域

Fig. 1 Station locations in situ observation

表 1 实测数据获取时间及区域情况

Table 1 Locations and times of the 17 cruise surveys

Time	Location	L_u/E_d
2000/7/23~2000/7/28	Pearl River Estuary	22 group
2001/2/8~2001/2/11		
2001/3~2001/5	Port Shelter, Lamma Channel and the Pearl River Estuary	49 group
2002/4, 2002/8, 2002/9, 2002/11	East China Sea	46 group
Spring and autumn 2003	Yellow Sea and East China Sea	100 group
2004/1~2004/2	Region east of the Daya Bay and Mirs Bay	21 group

水下光谱采用剖面法测量,参考唐军武等^[21-23]水体光谱测量方法,严格按照美国宇航局(NASA)海洋光学规范^[24]的要求,通过 PRR800 剖面仪的自由垂直下落采集海水剖面的水中下行辐照度 E_d 剖面 and 上行辐亮度 L_u 剖面等光学参量,共测量 340~765 nm 之间 18 个波段光谱数据。仅关注下行漫衰减系数,计算漫衰减系数时只选用下行辐照度数据,测量的辐照度剖面图(见图 2)可分为四种类型:

1) 下行辐照度 E_d 随深度变化显著减小,到达一定深度后辐照度无明显变化,如图 2(a)所示。

2) 下行辐照度 E_d 随深度变化呈指数衰减,如图 2(b)所示。

3) 下行辐照度 E_d 随深度变化缓慢衰减,到达一定深度后衰减增大,如图 2(c)所示。

4) 下行辐照度 E_d 随深度变化衰减,到达一定深度后衰减减慢,如图 2(d)所示。

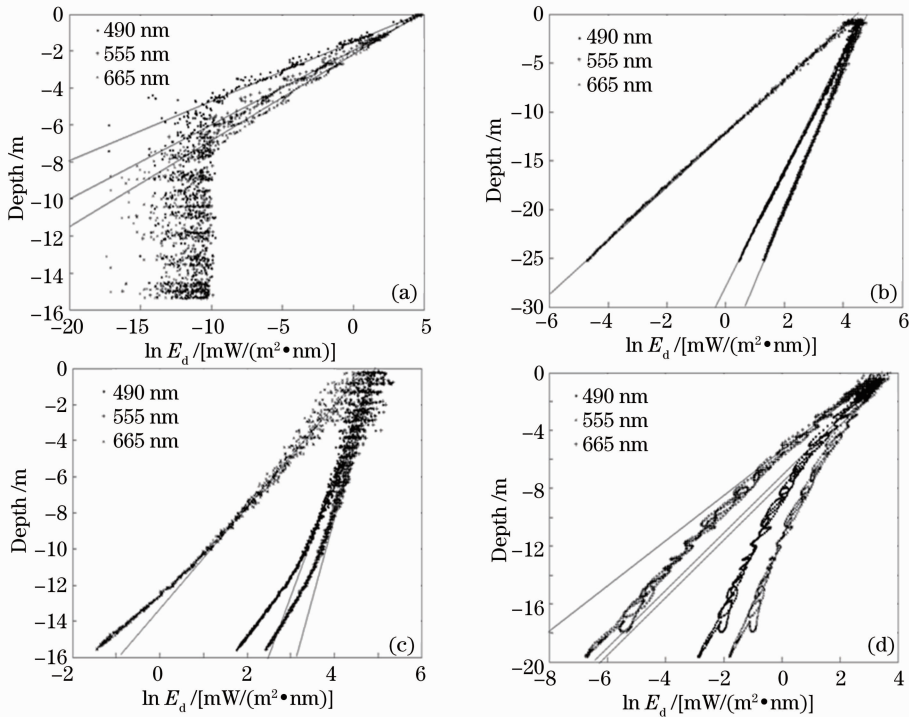


图 2 水体下行辐照度随深度衰减变化曲线

Fig. 2 Underwater downwelling irradiance versus depth

对上述四种辐照度变化类型统计,如图 3 所示。类型 2) 数据有 116 组,占比例最大,为 49%,即近一半的站点光谱如图 2(b)所示,这类数据一般离岸较远,人为影响相对较少,叶绿素、悬浮泥沙浓度偏低。

2.2 漫衰减系数提取方法

航次中采用 PRR800 剖面仪测量得到水中向下辐照度剖面、向上辐亮度剖面数据,由于船体及海面波动的影响,不能简单采用固定深度的辐照度获得

K_d 。为了减少误差,根据实测数据,采用上层水体的 $\ln E_d(z)$ 和深度 z 之间线性拟合,拟合曲线的斜率得到 K_d 。2.1 节分析发现,不同的水体下行辐照度随深度衰减不同,因此根据几种不同类型,采用不同的 K_d 计算方法。

1) E_d 一般随深度衰减很快,到 $E_d < e^{-10}$ 时不再衰减,基本保持恒定,此时选取 $\max(E_d)$ 到 $\max(E_d)$ 的 1/10 处的数据做线性拟合,可得到一直

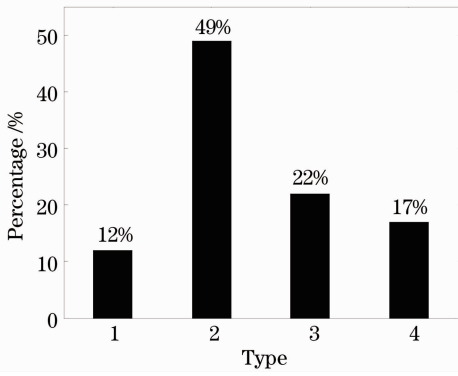


图 3 下行辐照度变化类型比例

Fig. 3 Percentage of four types of underwater downwelling irradiances

线,其中该直线的斜率即 K_d ,若此时数据较少,也可适当扩大数据取值范围,以增强结果的准确度。

2) 下行辐照度 E_d 随深度变化呈指数衰减,衰减速度缓慢,测量至水深 20~30 m, E_d 仍然大于 e^{-10} ,此时选取 $\max(E_d)$ 到 $\max(E_d)$ 的 1/10 处的数据做线性拟合,可得到一直线,其中该直线的斜率即 K_d 。

3) 下行辐照度 E_d 随深度变化缓慢衰减,到达一定深度后衰减加速,若在此发生变化的深度处, $E_d > \max(E_d)/10$,若想获得表层 K_d ,只能通过画图找出下行辐照度 E_d 衰减一致的深度 z ,对 $0 \sim z$ 之间的数据进行线性拟合,获得 K_d ;若此时 $E_d < \max(E_d)/10$,仍然选取 $\max(E_d)$ 到 $\max(E_d)$ 的 1/10 处的数据做线性拟合,得到一直线,其中该直线的斜率即 K_d 。

4) 下行辐照度 E_d 随深度变化衰减,到达一定深度后衰减减小,若在此发生变化的深度处, $E_d > \max(E_d)/10$,若想获得表层 K_d ,只能通过画图找出下行辐照度 E_d 衰减一致的深度 z ,对 $0 \sim z$ 之间的数据进行线性拟合,获得 K_d ;若此时 $E_d < \max(E_d)/10$,仍然选取 $\max(E_d)$ 到 $\max(E_d)$ 的 1/10 处的数据做线性拟合,得到一直线,其中该直线的斜率即 K_d 。

2.3 遥感反射比、标准化离水辐亮度计算

根据剖面法测量原理,在假设观测深度水域内水体光学特性均匀的条件下,由于海浪波动的影响,刚好处于水表面(0^-)的值无法直接测量,通过测量的下行辐照度和上行辐亮度,在计算出 K_d 和 K_L 之后,根据 Lambert-Beer 定律把其外推到恰好水面以下得到 $E_d(0^-)$ 和 $L_u(0^-)$ 。

恰好水面下遥感反射比表示为恰好水面以下得到下行辐照度 $E_d(0^-)$ 与上行辐亮度 $L_u(0^-)$ 之比。根据(1)式可计算出恰好水面下遥感反射比 r_{rs} 为

$$r_{rs} = L_u(0^-)/E_d(0^-), \quad (1)$$

研究区域的恰好水面下遥感反射比光谱如图 4(a) 所示。

Lee 等^[15]用 Hydrolight 数值模拟结果和公式计算结果通过最小均方差拟合得到 $\zeta = 0.518$, $\Gamma = 1.562$ 。则计算海面遥感反射比 R_{rs} 为

$$R_{rs} \approx \frac{0.518r_{rs}}{1 - 1.562r_{rs}}, \quad (2)$$

计算得到的 R_{rs} 如图 4(b) 所示。

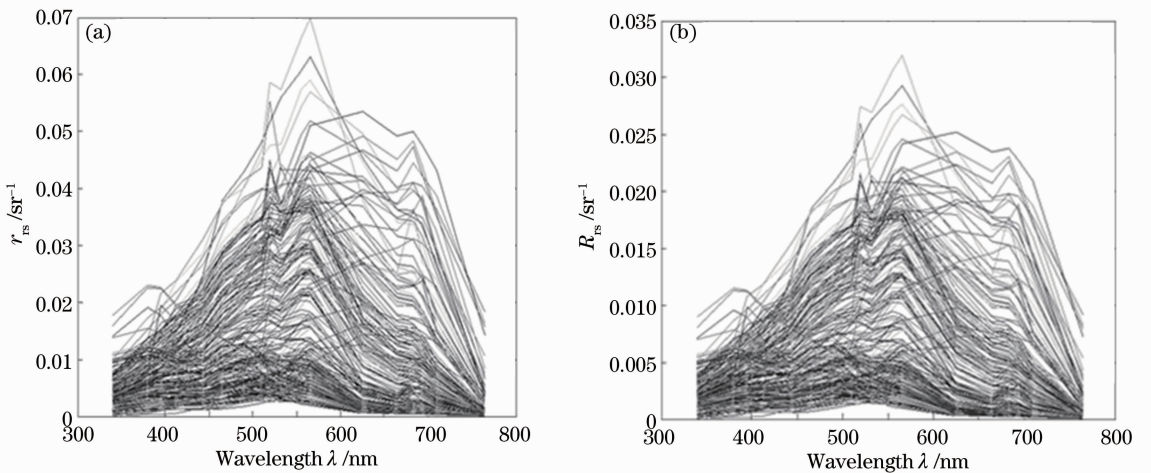


图 4 (a)恰好水表面下遥感反射比 r_{rs} 光谱; (b)海面遥感反射比 R_{rs} 光谱

Fig. 4 (a) Remote sensing reflectance r_{rs} just beneath the surface; (b) remote sensing reflectance R_{rs} over the surface

标准化离水辐亮度 $L_w(\lambda)$ 可根据(3)式计算：

$$L_w(\lambda) = F_0(\lambda)R_{rs}(\lambda), \quad (3)$$

式中 $F_0(\lambda)$ 为分谱太阳常数, λ 为波长。

2.4 漫衰减系数反演算法

2.4.1 经验算法

漫衰减系数与光谱比值存在分段线性关系, 图 5 给出了漫衰减系数与不同波段比值的分布关系图。

从图 5(a)可以看出当 $R_{rs}(555)/R_{rs}(490) < 1$ 时, $R_{rs}(555)/R_{rs}(490)$ 与 $K_d(490)$ 有很好的线性相关, 而 $R_{rs}(555)/R_{rs}(490) > 1$ 时, $K_d(490)$ 与 $R_{rs}(555)/R_{rs}(490)$ 关系较为离散; 而图 5(b)中, $R_{rs}(555)/R_{rs}(490) > 1$ 时, $R_{rs}(665)/R_{rs}(490)$ 与 $K_d(490)$ 有很好的线性相关。因此可以分波段建立 $K_d(490)$ 的反演算法。

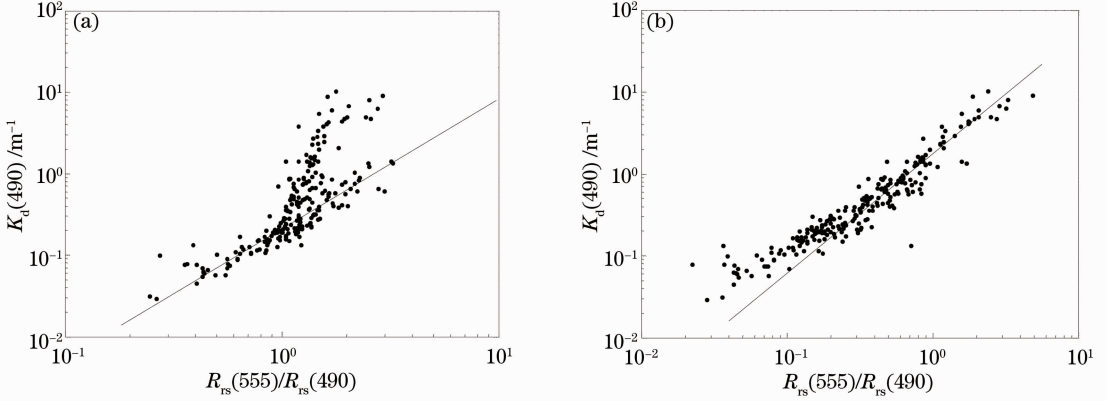


图 5 $K_d(490)$ 与 R_{rs} 波段比值分布关系图。(a) $K_d(490)$ 与 $R_{rs}(555)/R_{rs}(490)$; (b) $K_d(490)$ 与 $R_{rs}(665)/R_{rs}(490)$

Fig. 5 Relationship between $K_d(490)$ and R_{rs} . (a) $K_d(490)$ and $R_{rs}(555)/R_{rs}(490)$; (b) $K_d(490)$ and $R_{rs}(665)/R_{rs}(490)$

将 238 组数据按照 $K_d(490)$ 的大小排序, 近似按照等 $K_d(490)$ 间隔的原则, 从中选取 70% 的数据 (160 组) 用于反演算法的建立, 剩余 30% 的数据用于算法的检验。最终建立经验反演算法如下:

$$\begin{cases} K_d(490) = 0.1999R_{rs}(555)/R_{rs}(490) - 0.01538, & [R_{rs}(555)/R_{rs}(490) \leq 1] \\ K_d(490) = 1.6425R_{rs}(665)/R_{rs}(490)^{1.284}, & [R_{rs}(555)/R_{rs}(490) > 1] \end{cases} \quad (4)$$

2.4.2 半分析算法

根据 Babin 等^[25]的研究, 在 709 nm 波段有

$$a(709) = a_w(709), \quad (5)$$

Twardowski 等^[26]研究发现颗粒后向散射 b_b 在 490 nm 与 709 nm 处光谱变化很小:

$$b_b(490) = B_{490-709}b_b(709), \quad (6)$$

式中 $B_{490-709}$ 为常值, 取 1.13。从而可得到

$$r_{rs} = f'(\lambda) \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (7)$$

式中 $f'(\lambda) = f(\lambda)/Q$, Q 为光场分布参数, 受水体、太阳角度等的影响, 范围为 3 ~ 6, 本文取 4, f 取值 0.335。

由于 $b_b(\lambda) \ll a(\lambda)$, 近似认为 $a(\lambda) = a(\lambda) + b_b(\lambda)$ 。(5)~(7)式联立得

$$b_b(490) = B_{490-709} \left[\frac{a_w(709) \times r_{rs}(709)}{f(709)} - b_{bw}(709) \right] + b_{bw}(490), \quad (8)$$

$a_w(\lambda)$ 与 $b_{bw}(\lambda)$ 值参考文献^[27]。

根据(8)式可得后向散射系数 $b_b(490)$ 与遥感反射率 $r_{rs}(709)$ 呈线性关系^[19], 假定 665 nm 与 709 nm 波段具有相同特性。则可设

$$b_b(490) = C_0 + C_1 r_{rs}(665), \quad (9)$$

计算得到系数 $C_0 = -0.0016$, $C_1 = 5.494$ 。 $a(490)$ 可计算如下:

$$a(490) = \frac{f'(490)b_b(490)}{r_{rs}(490)}. \quad (10)$$

Lee 等^[15-18]根据辐射传输模型提出的 $K_d(\lambda)$ 的反演算法:

$$K_d(\lambda) = (1 + 0.005\theta_0)a(\lambda) + 4.18\{1 - 0.52\exp[-10.8a(\lambda)]\}b_b(\lambda), \quad (11)$$

式中 θ_0 为太阳天顶角。

根据(9)~(11)式,可进一步得到

$$K_d(490) = 1.786 \times \frac{r_{rs}(665)}{r_{rs}(490)} - \frac{12.67 \times 10^{-4}}{r_{rs}(490)} + 4.18 \left\{ 1 - 0.52 \exp \left[\frac{11.90 \times 10^{-3}}{r_{rs}(490)} - 16.77 \frac{r_{rs}(665)}{r_{rs}(490)} \right] \right\} \times [5.498 \times r_{rs}(665) - 0.0039]. \quad (12)$$

3 结果与讨论

3.1 实测漫衰减系数

通过上述方法计算拟合得到漫衰减系数 K_d 值(见图6),粗线为 K_d 各波段平均值。从图中可看出,随着波长的增加,漫衰减系数逐渐减小,在 550 nm 有最小值,在 550~765 nm,漫衰减系数随波长的增加逐渐上升。

3.2 反演结果

为了验证算法的精度,本文采用反演值与实测值的均方根误差 E_{RMS} 、平均相对误差 D_{AP} 和相关系数 R^2 来表征。

3.2.1 新建立算法

经验算法建立时采用的实测数据与反演结果,精度为 $R^2 = 0.9110$, $E_{RMS} = 0.3547$, $D_{AP} = 0.2965$ 。

对建立的经验算法利用预留的 78 组数据进行检验,精度为 $R^2 = 0.9205$; $E_{RMS} = 0.3109$, $D_{AP} = 0.2414$,实测值与反演值相近。

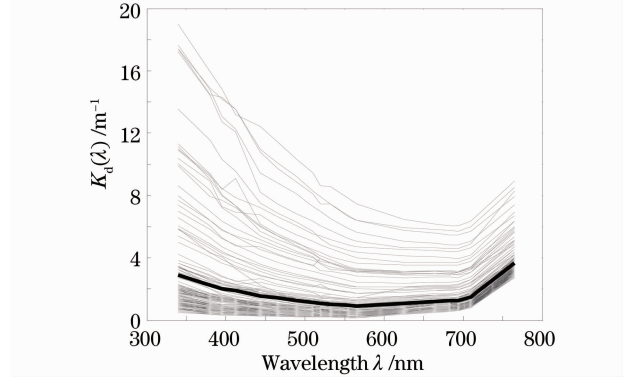


图6 漫衰减系数 K_d 光谱图

Fig. 6 Spectra of the diffuse attenuation coefficient K_d

图7给出了经验算法反演的结果与实验数据比较散点图,从图中可以看出,不论是建模数据还是检验数据与反演结果的比较,都有较好的一致性,反演结果与实测数据很好地分布在 1:1 对角线上,这种一致性体现在 $K_d(490)$ 整个范围内。

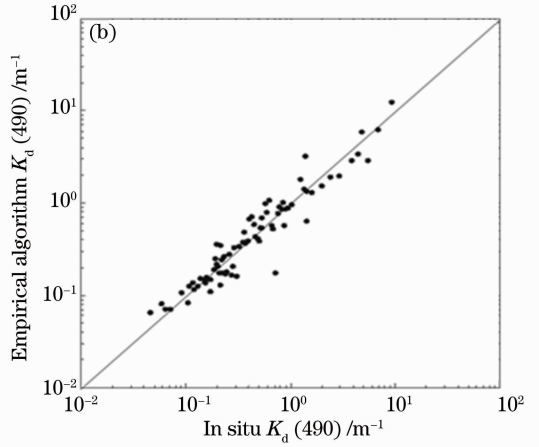
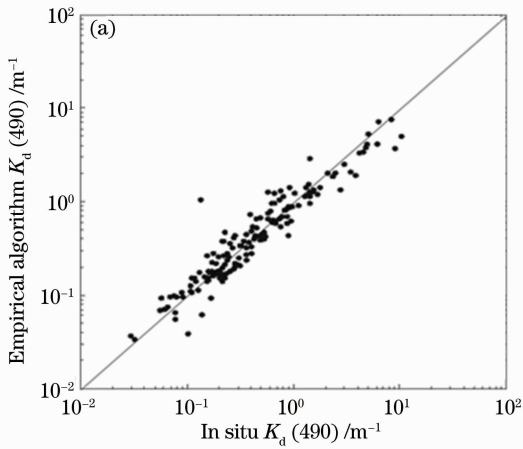


图7 经验算法反演结果与实测数据对比。(a)建模数据;(b)检验数据

Fig. 7 Comparisons between retrieval of $K_d(490)$ from the empirical algorithm and in situ observed $K_d(490)$.

(a) Data used to establish model; (b) data used to validate algorithm

将实测数据对半分析算法反演结果进行精度为 $R^2 = 0.8335$, $E_{RMS} = 0.4839$, $D_{AP} = 0.3153$,相关比较散点图见图8。从图中可以看出,反演结果与实测数据有较好的一致性, $K_d(490)$ 值小于 1 m^{-1} 的情

况下,反演结果与实测数据很好地分布在 1:1 对角线上,当 $K_d(490)$ 值小于 1 m^{-1} 的情况,反演结果比实测数据偏小,表现出低估的现象。

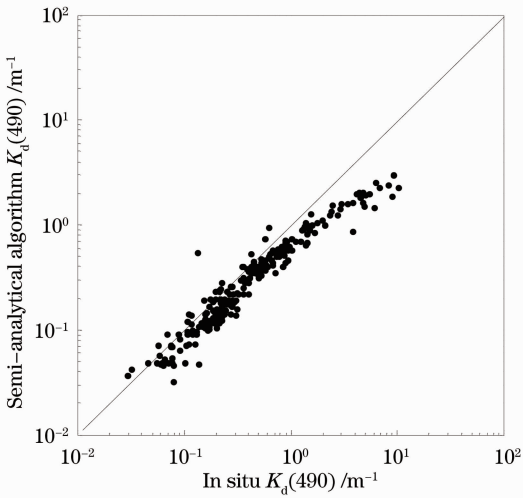


图 8 半分析算法反演结果与实测数据对比

Fig. 8 Comparison between retrieval of $K_d(490)$ from the semi-analytical method and in situ observed $K_d(490)$

3.2.2 与现有算法比较

为了验证新建立反演算法的精度,选取了 5 种有代表性的现有算法,与本文新建立算法做了比较。5 种算法里,经验算法选取 Mueller^[13]、王晓梅等^[11]

和 Zhang 等^[14] 的反演算法;半分析算法采用 Lee 等^[16] 和 Wang 等^[20] 的反演算法。采用 238 组实测数据进行对比分析,5 种算法反演结果与实测数据对比见图 9[按照顺序对应(a)~(e)]。从图中可以看出,Mueller 的算法在 $K_d(490)$ 值大于 1 m^{-1} 的情况明显低估,整体上呈现出低估的现象;王晓梅等的算法反演结果与实测数据有较好的一致性,但在 $K_d(490)$ 值较大(比如大于 1 m^{-1})时,反演结果变得离散;Zhang 等的算法反演结果偏离实测数据很多;Lee 等的算法的情况与王晓梅等的相似,但反演结果在 $K_d(490)$ 值大于 1 m^{-1} 开始有比较明显的离散;Wang 等的算法在 $K_d(490)$ 值较大和较小时均能取得较好的反演效果,然而在 $K_d(490)$ 值处于 $0.3 \sim 1 \text{ m}^{-1}$ 范围内出现明显的偏离。

与 5 种代表性算法比较,新建的不论经验算法(见图 7)还是半分析算法(见图 8),反演结果与实测数据对比,均能取得更好的一致性,其中经验算法能取得最好的效果。表 2 列出了主要算法形式及其相应反演结果的精度评估,从表上也反映出和图中相似的结果。

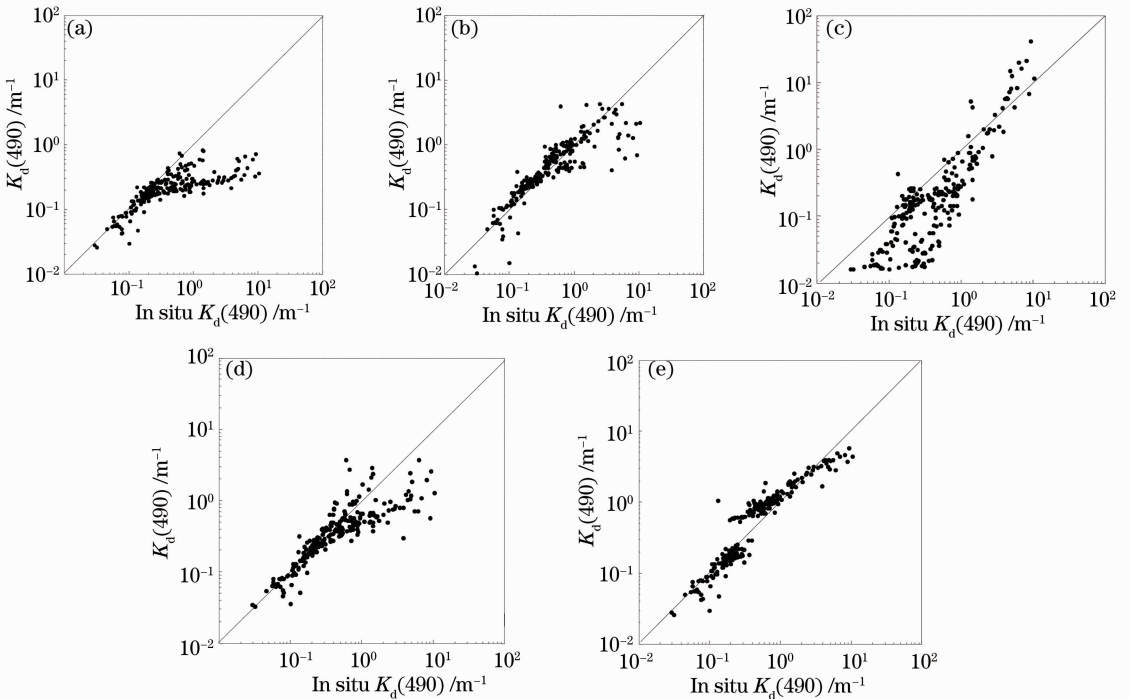


图 9 代表性算法反演结果比较。(a) Mueller; (b) 王晓梅等; (c) Zhang 等; (d) Lee 等; (e) Wang 等

Fig. 9 Comparisons of different algorithms. (a) Mueller; (b) Wang Xiaomei et al. ; (c) Zhang et al. ;

(d) Lee et al. ; (e) Wang et al.

3.3 分析与讨论

自然光在水中传输是一个吸收和散射的综合过程。光辐射传输理论证明光穿透海面到深处,光

辐射率随深度增加并呈指数衰减。由于水体垂直深度上并不是完全一致均匀的,且不同水体会不同的变化,通过对实测数据的统计,对上文下行辐射度

表 2 不同算法反演精度比较
Table 2 Comparisons of different algorithms

Mueller ^[13]	$K_d(490) = A \left[\frac{L_w(490)}{L_w(555)} \right]^B$	$R^2 = 0.1652$ $E_{RMS} = 1.0837$ $D_{AP} = 0.4182$
Wang Xiaomei et al. ^[11]	$\lg K_d(490) = s_0 + s_1 [R_{rs}(555) + R_{rs}(670)] + s_2 [R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]$	$R^2 = 0.7785$ $E_{RMS} = 0.5582$ $D_{AP} = 0.3613$
Zhang et al. ^[14]	$K_d(490) = 10^{a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3} + K_w(490)$	$R^2 = -0.0687$ $E_{RMS} = 1.2262$ $D_{AP} = 0.6029$
Lee et al. ^[16]	$K_d(\lambda) = (1 + 0.005\theta_0)a(\lambda) + 4.18\{1 - 0.52\exp[-10.8a(\lambda)]\}b_0(\lambda)$	$R^2 = 0.6970$ $E_{RMS} = 0.6925$ $D_{AP} = 0.3561$
Wang et al. ^[20]	$K_d^{comb}(490) = (1 - \tau_w)K_d^{clear}(490) + K_d^{turbid}(490)$	$R^2 = 0.8133$ $E_{RMS} = 0.5125$ $D_{AP} = 0.5291$
New empirical algorithm	$R_{rs}(555)/R_{rs}(490) \leq 1, K_d(490) = 0.1999R_{rs}(555)/R_{rs}(490) - 0.01538$ $R_{rs}(555)/R_{rs}(490) > 1, K_d(490) = 1.6425[R_{rs}(665)/R_{rs}(490)]^{1.284}$	$R^2 = 0.9125$ $E_{RMS} = 0.3508$ $D_{AP} = 0.2827$
New semi-analytical method	$K_d(490) = 1.786 \times \frac{r_{rs}(665)}{r_{rs}(490)} - \frac{12.67 \times 10^{-4}}{r_{rs}(490)} +$ $4.18 \left\{ 1 - 0.52 \exp \left[\frac{11.90 \times 10^{-3}}{r_{rs}(490)} - 16.77 \frac{r_{rs}(665)}{r_{rs}(490)} \right] \right\} \times$ $[5.498 \times r_{rs}(665) - 0.0039]$	$R^2 = 0.8335$ $E_{RMS} = 0.4839$ $D_{AP} = 0.3153$

E_d 随深度不同变化情况的分类,发现在类型 1) 中悬浮物质量浓度较大,均大于 20 mg/L,或者叶绿素质量浓度较高,这也是导致 E_d 快速衰减的主要因素,这使得在较浅的水深就可以通过 PRR800 测量下行辐照度 E_d 的最小值,之后数据不再具有参考性。类型 2) 主要离岸较远,悬浮物质量浓度较小,一般小于 10 mg/L,且叶绿素质量浓度也偏低,通过对已有数据分析,悬浮物上下水层质量浓度差异很小,这使得下行辐照度 E_d 在测量深度内完全呈指数衰减。类型 3)、4) 则是由于水体分层的结果,选取典型站点水域样本比较水体悬浮物质量浓度的垂直变化,发现表层水体的质量浓度明显异于深层水体,而类型 3) 中表层水体的质量浓度明显小于深层水体,类型 4) 类表层水体的质量浓度明显大于深层水体。

随着波长的增加,漫衰减系数逐渐减小,在 490~555 nm 有最小值,在 555~765 nm,漫衰减系数随波长的增加逐渐上升,主要是由于海水选择性的吸收和散射,海水在蓝绿波段散射强,导致此处光谱辐照度衰减减缓,漫衰减系数随之变小。漫衰减系数在紫光波段变化范围明显大于红光波段,在红光波段漫衰减系数变化基本保持一致。

4 结 论

利用实测的水下光谱剖面数据,分别建立经验算法和半分析算法,经验算法加入 665 nm,并且采用分情况反演,相关系数 $R^2 = 0.9125$,半分析算法采用 665 nm,反演结果比实测值偏小,主要由于对水体固有光学性质与漫衰减系数之间关系研究不够充分,导致反演结果偏小,相关系数 $R^2 = 0.8335$,反演结果均优于其他反演算法。尽管半分析算法反演结果与经验算法相比,反演结果略有不如,然而考虑到半分析算法建立过程独立于实测的水体漫衰减数据,因此可以认为半分析算法比经验算法有更大的适用性。

参 考 文 献

- 1 H R Gordon, R C Smith, J R V Zaneveld. Introduction to ocean optics [C]. SPIE, 1980, 208: 14-55.
- 2 J J Simpson, T D Dickey. Alternative parameterizations of downward irradiance and their dynamic significance [J]. J Physical Oceanography, 1981, 11(6): 876-882.
- 3 Hao Yanling, Cao Wenxi, Ma Yi, et al.. Analysis of inherent optical properties in the occurrence and declination of a red tide [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101004.
- 郝艳玲,曹文熙,马毅,等. 赤潮生消过程中的水体固有光学性质分析[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101004.
- 4 Mou Bing, Cui Tingwei, Cao Wenxi, et al.. A semi-analytical

- monitoring method during the process of red tide based on optical buoy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0201001.
- 牟冰, 崔廷伟, 曹文熙, 等. 基于光学浮标的赤潮生消过程半分析监测方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0201001.
- 5 Huang Changyun, Li Yunmei, Xu Liangjiang, *et al.*. Influence of vertical distribution of water consistent to precision of remote sensing retrieval algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101002.
- 黄昌云, 李云梅, 徐良将, 等. 水色要素垂直分布对其遥感反演算法精度的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101002.
- 6 J Marra, C Langdon, C A Knudson. Primary production, water column changes, and the demise of a phaeocystis bloom at the marine light-mixed layers site (59°N, 21°W) in the northeast atlantic ocean [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(4): 6633–6644.
- 7 T Platt, S Sathyendranath, C M Caverhill, *et al.*. Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing [J]. *Deep Sea Research*, 1988, 35(6): 855–879.
- 8 S Sathyendranath, T Platt, C M Caverhill, *et al.*. Remote sensing of oceanic primary production: computations using a spectral model [J]. *Deep Sea Research*, 1989, 36(3): 431–453.
- 9 R W Preisendorfer. *Hydrologic Optics* [M]. Office of Naval Research, 1976.
- 10 Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Chen Weimin, *et al.*. Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water [J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(4): 447–453.
- 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.
- 11 Wang Xiaomei, Tang Junwu, Ding Jing, *et al.*. The retrieval algorithms of diffuse attenuation and transparency for the case-II waters of the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(5): 38–45.
- 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.
- 12 R W Austin, T J Petzold. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner [J]. *Oceanography From Space*, 1984, 13: 239–256.
- 13 J L Mueller. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, $K(490)$, using water-leaving radiances at 490 and 555 nm [C]. NASA Goddard Space Flight Center, 2000, 11: 24–27.
- 14 Zhang Tinglu, F Fell. An empirical algorithm for determining the diffuse attenuation coefficient K_d in clear and turbid waters from spectral remote sensing reflectance [J]. *Limnol Oceanogr Methods*, 2007, 5: 457–462.
- 15 Z P Lee, K L Carder, R A Arnone. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(27): 5755–5772.
- 16 Z P Lee, M Darecki, K L Carder, *et al.*. Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods [J]. *J Geophys Res C*, 2005, 110(C2): C02017.
- 17 Z P Lee, K P Du, R Arnone, *et al.*. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. *J Geophys Res C*, 2005, 110(C2): C02016.
- 18 Z P Lee, A Weideman, J Kindle, *et al.*. Euphoric zone depth: its derivation and implication to ocean-color remote sensing [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(C3): C03009.
- 19 M Doron, M Babin, A Mangin, *et al.*. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(C6): C06003.
- 20 M H Wang, S Son, L W Harding. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications [J]. *J Geophys Res*, 114(C10): C10011.
- 21 Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, *et al.*. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. *J Remote Sensing*, 2004, 8(1): 37–44.
- 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析: 水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37–44.
- 22 Li Tongji, Chen Qinglian. The profiling method to measure the AOP in case-II waters [J]. *Ocean Technology*, 2003, 22(3): 1–5.
- 李铜基, 陈清莲. II类水体光谱特性的剖面测量方法 [J]. *海洋技术*, 2003, 22(3): 1–5.
- 23 Li Tongji, Chen Qinglian, Wang Xiaoyong, *et al.*. A new method of profiling remote-sensing reflectance of coastal water [J]. *Ocean Technology*, 2004, 23(3): 1–4.
- 李铜基, 陈清莲, 汪小勇, 等. 剖面法测量近岸水体遥感反射率的新方法 [J]. *海洋技术*, 2004, 23(3): 1–4.
- 24 J L Mueller, G S Fargion, C R McClain. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 3* [Z]. NASA Tech Memo, 2002.
- 25 M Babin, D Stramski. Light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region [J]. *Limnol Oceanogr*, 2002, 47(3): 911–915.
- 26 M S Twardowski, E Boss, J B Macdonald, *et al.*. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters [J]. *J Geophys Res C*, 2001, 106(C7): 14129–14142.
- 27 H Buiteveld, J H M Hakvoort, M Donze. The optical properties of pure water [C]. *SPIE*, 1994, 2258: 174–183.