

文章编号: 0253-2239(2008)11-2041-06

渤海近岸水体后向散射系数反演模型

崔廷伟¹ 张杰^{1,2} 马毅^{1,2} 孙凌^{3,4} 赵文静¹

(¹ 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; ² 海洋环境和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061
³ 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081; ⁴ 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要 水体后向散射系数 b_b 是重要的海洋光学参数, 在以悬浮物为主要组分的浑浊二类水体中, 其对于水体光学性质起着决定性的作用, 该参数的遥感反演对于海洋光学与水色遥感研究具有重要意义。利用 2005 年渤海近岸水体实测数据集, 建立了基于水体遥感反射率光谱数据的后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 经验反演模型 ($\lambda=442\text{ nm}, 488\text{ nm}, 532\text{ nm}, 589\text{ nm}, 676\text{ nm}$), 经实测数据检验, $b_b(442)$ 和 $b_b(589)$ 反演平均相对误差约为 30%; $b_b(488)$ 和 $b_b(676)$ 反演平均相对误差优于 40%; $b_b(532)$ 反演平均相对误差约为 57%。通过分析模型对于输入误差的敏感性发现, 当输入端引入 $\pm 5\%$ 的误差时, 模型反演值的误差波动在绝大多数情形下可控制在 $\pm 10\%$ 以内, 模型是稳定可靠的。模型适用于渤海近岸浑浊水体, 可用于水体光学参数的时空分布特征分析以及基于固有光学参数的水色组分遥感反演。

关键词 海洋光学; 后向散射系数反演; 统计回归; 渤海; 遥感

中图分类号 P733.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2041

Backscattering Coefficient Retrieval Model for Nearshore Area of Bohai Sea

Cui Tingwei¹ Zhang Jie^{1,2} Ma Yi^{1,2} Sun Ling^{3,4} Zhao Wenjing¹

¹ First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

² Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

³ Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

⁴ National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Backscattering coefficient is an important parameter in ocean optics and determines to a large extent ocean optical properties of coastal case II water, whose dominant constituent is suspended material. The remote sensing retrieval of the backscattering coefficient is important for the research of ocean optics and ocean color remote sensing. Based on in situ data acquired in nearshore area of the Bohai Sea in 2005, the empirical retrieval model for backscattering coefficient $b_b(\lambda)$ ($\lambda=442\text{ nm}, 488\text{ nm}, 532\text{ nm}, 589\text{ nm}, 676\text{ nm}$) based on remote sensing reflectance is developed. The model is validated by in situ data with mean relative errors for $b_b(442)$ and $b_b(589)$ retrievals about 30%, those for $b_b(488)$ and $b_b(676)$ better than 40% and that for $b_b(532) \sim 57\%$. Model's sensitivity to the input error is analyzed by introducing $\pm 5\%$ error of remote sensing reflectance artificially. It's found that for the majority of different cases of input error, the model is stable and reliable with the output error fluctuation less than $\pm 10\%$. The model is applicable to the turbid coastal water of the Bohai Sea and could be utilized in the spatio-temporal variation analysis of ocean optical properties as well as optically significant constituents retrievals based on inherent optical properties.

Key words ocean optics; backscattering coefficient retrieval; statistical regression; Bohai Sea; remote sensing

收稿日期: 2008-01-09; **收到修改稿日期**: 2008-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(40706060, 40606043)、国家 863 计划(2006AA09A310)、Dragon Project (ID2566, 3362)、海洋公益性行业科研专项经费项目(200705027)、我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ST11)、国家海洋局青年科学基金(2008401)和国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(2007B05)资助课题。

作者简介: 崔廷伟(1979-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋光学与水色遥感等方面的研究。

E-mail: cuitingwei@fio.org.cn

1 引 言

进入水体的自然光受到水体吸收、散射的共同影响。其中,在水体内部被后向散射的一部分光重新穿过水气界面离开水体,并最终被水色遥感器所接收。从遥感器接收的总信号中剔除来自大气的贡献后^[1,2],得到了反映水体自身光学性质及其水色组分信息的离水辐射信号。理论研究建立了离水辐射信号等表观光学量与水体吸收系数、后向散射系数等固有光学量之间的定量关系^[3~6],同时也为水体光学性质以及水色组分浓度的遥感反演奠定了基础。水体后向散射性质及其遥感反演^[7~10]对于海洋光学研究^[11,12]、水色组分遥感研究^[13~15]以及海洋生物地球化学研究^[16,17]等均具有重要意义,尤其是近年来从后向散射信号中提取颗粒粒径信息的研究引起了广泛的关注^[18~24]。水体后向散射系数的遥感反演方法大致可分为基于统计回归的经验算法和基于物理模型的半分析算法两大类。

中国近岸水体大都属于光学性质复杂的二类水体;与吸收相比,水体的后向散射是决定水体光学性质的主导因素,并强烈影响水体的光学性质。利用黄海、东海生物光学实验数据^[25],宋庆君等^[26]研究发现,水体后向散射系数与水体散射系数的关系为乘幂关系,颗粒物后向散射系数随光谱变化的指数在高低浑浊度水体有很大差异,并初步建立了后向散射系数与总悬浮物浓度的关系;李铜基等^[27]利用其中春季的实验数据集,开发了基于水面下遥感反射率 $r_{rs}(\lambda)$ 的后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 统计反演模型,该模型可使73%样本的反演相对误差优于30%。对于中国渤海水体后向散射性质的研究,目前尚未见文献报道。

本文试图利用渤海近岸水体实测数据集,建立水体后向散射系数的遥感反演模型,为后向散射系

数的大范围、同步、实时遥感监测提供基础,并进而为近海浑浊水体光学性质的时空分布特征分析以及基于固有光学参数的水色组分遥感反演提供可能。

2 数 据

水体光学数据获取自2005年6月,8月和9月的渤海生物光学实验,共获得13条断面144个站位,站位分布在莱州湾、黄河口北部海域、渤海湾、秦皇岛外海以及辽东湾等不同海区。

2.1 后向散射系数

水体后向散射系数 $b_b(\lambda)$,采用美国Hobilabs公司6通道后向散射系数测量仪HS-6(HydroScat-6 Spectral Backscattering Sensor)现场测量得到。该仪器拥有442 nm, 488 nm, 532 nm, 589 nm, 676 nm和852 nm等分立波段,除676 nm波段带宽为20 nm外,其余波段的带宽均为10 nm,测量和数据处理方法参见文献^[26]。经数据质量控制,得到115个站位 $b_b(\lambda)$ 数据如图1(a)所示(全部144个站位中的28个站位未进行 b_b 观测)。

2.2 遥感反射率

采用海面之上法,利用美国ASD便携式双通道可见光-近红外光谱辐射计进行表观光谱数据获取,测量与数据处理方法参见文献^[28]。通过数据质量控制(剔除光谱形态异常的数据4组,蓝光和红光特定水色波段辐射为零或为负的数据7组)的水体遥感反射率光谱数据 $R_{rs}(\lambda)$ 共计133个站位,如图1(b)所示。

同时具备 $b_b(\lambda)$ 和 $R_{rs}(\lambda)$ 数据的观测站位共有108个,将上述108组数据分为2部分:其中70%(76组)数据用于反演模型的建立,剩余30%(32组)的数据用于模型的精度检验。

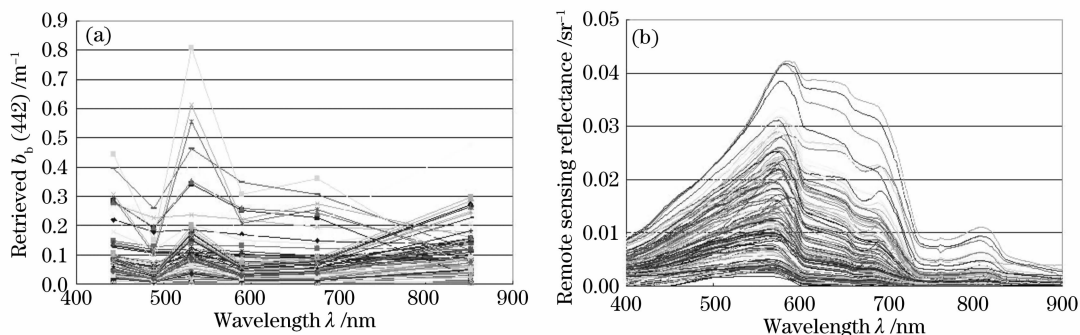


图1 渤海后向散射系数光谱(a)和遥感反射率光谱(b)

Fig. 1 Spectra of backscattering coefficient (a) and remote sensing reflectance (b) in the Bohai Sea

3 模型建立

3.1 由 $R_{rs}(\lambda)$ 反演 $b_b(442)$

由遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 反演后向散射系数 $b_b(442)$ 的模型如下：

$$\lg[b_b(442)] = a \lg \{ [R_{rs}(555)/R_{rs}(490)] [R_{rs}(670) + R_{rs}(555)]^c [R_{rs}(670)/R_{rs}(555)]^d \} + b, \quad (1)$$

式中 $a = 1.416$, $b = 1.106$, $c = 0.809$, $d = 0.519$ 。相关系数 $R^2 = 0.933$, 样本数 $N = 76$ 。

3.2 $b_b(\lambda)$ 与 $b_b(442)$ 的相关关系 ($\lambda = 488 \text{ nm}, 532 \text{ nm}, 589 \text{ nm}, 676 \text{ nm}$)

$b_b(\lambda)$ 与 $b_b(442)$ 的波段相关关系 ($\lambda = 488 \text{ nm}, 532 \text{ nm}, 589 \text{ nm}, 676 \text{ nm}$) 如下：

$$b_b(488) = 10^{[-0.385 + 0.881 \lg b_b(442)]} \quad (R^2 = 0.919, N = 76), \quad (2)$$

$$b_b(532) = 10^{[0.241 + 1.112 \lg b_b(442)]} \quad (R^2 = 0.940, N = 76), \quad (3)$$

$$b_b(589) = 10^{[-0.104 + 1.036 \lg b_b(442)]} \quad (R^2 = 0.960, N = 76), \quad (4)$$

$$b_b(676) = 10^{[0.019 + 1.133 \lg b_b(442)]} \quad (R^2 = 0.985, N = 76), \quad (5)$$

利用(1)式~(5)式,即可实现基于遥感反射率光谱的 $b_b(\lambda)$ 反演 ($\lambda = 488 \text{ nm}, 532 \text{ nm}, 589 \text{ nm}, 676 \text{ nm}$)。

4 模型精度检验与误差敏感性分析

4.1 模型精度检验

利用预留的 32 组数据进行模型的精度检验,结果如图 2 所示,其中 D_{AP} 为平均相对误差, R_{MSE} 为均方根误差。

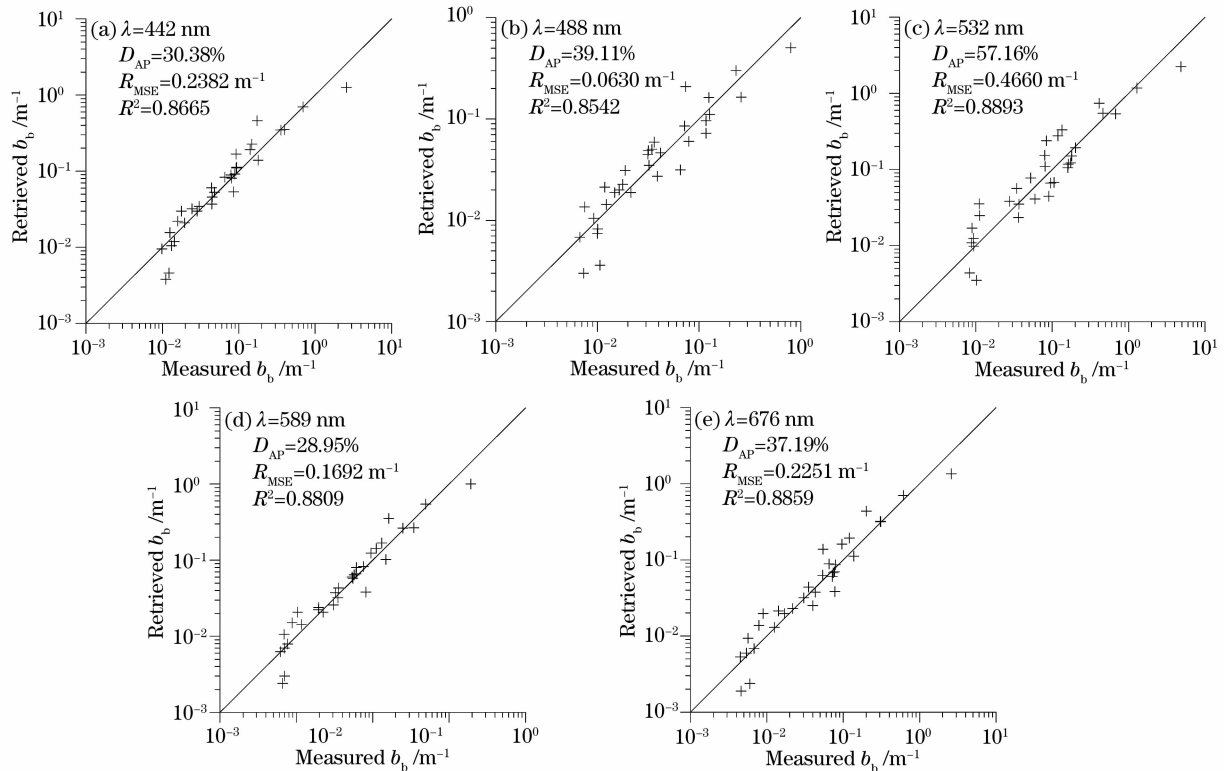


图 2 $b_b(\lambda)$ 实测值与模型反演值的散点图

Fig. 2 Scatter plot of measured and retrieved $b_b(\lambda)$

由图 2 可见, $b_b(442)$ 和 $b_b(589)$ 反演结果相对最优, 平均相对误差约为 30%; $b_b(488)$ 和 $b_b(676)$ 次之, 平均相对误差优于 40%; $b_b(532)$ 反演结果相对较差, 平均相对误差为 57%。

4.2 模型误差敏感性分析

通过将模型输入的 32 组遥感反射率数据中引入 $\pm 5\%$ 的误差, 检查模型反演结果的误差波动情况, 以辨别模型对于误差的敏感性^[29], 测试结果如表 1 所示。

表 1 误差敏感性测试结果——不同误差引入方式下的模型反演误差

Table 1 Error sensitivity test result——model retrieval error in the condition of different cases of input noise

	$b_b(442) / \%$	$b_b(488) / \%$	$b_b(532) / \%$	$b_b(589) / \%$	$b_b(676) / \%$
Without error input	30.38	39.11	57.16	28.95	37.19
Case 1	34.26	42.03	61.10	33.29	42.05
Case 2	28.32	36.79	54.31	25.93	34.13
Case 3	27.31	34.97	51.88	24.56	32.67
Case 4	26.78	32.11	47.13	24.63	32.21
Case 5	46.81	50.66	74.72	47.33	58.60
Case 6	37.35	44.13	64.52	36.76	45.80
Case 7	33.57	41.53	60.17	32.57	41.22
Case 8	27.98	36.38	53.72	25.60	33.69

对比分析八种情形：

情形一： $R_{rs}(490) + 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) + 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) + 5\% R_{rs}(670)$

情形二： $R_{rs}(490) + 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) + 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) - 5\% R_{rs}(670)$

情形三： $R_{rs}(490) + 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) - 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) + 5\% R_{rs}(670)$

情形四： $R_{rs}(490) + 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) - 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) - 5\% R_{rs}(670)$

情形五： $R_{rs}(490) - 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) + 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) + 5\% R_{rs}(670)$

情形六： $R_{rs}(490) - 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) + 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) - 5\% R_{rs}(670)$

情形七： $R_{rs}(490) - 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) - 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) + 5\% R_{rs}(670)$

情形八： $R_{rs}(490) - 5\% R_{rs}(490)$,

$R_{rs}(555) - 5\% R_{rs}(555)$,

$R_{rs}(670) - 5\% R_{rs}(670)$.

由表 1 可见,对于除情形五之外的其他情形,在人为将模型输入端引入 $\pm 5\%$ 的误差时,模型输出的误差波动基本控制在 $\pm 10\%$ 以内,其中,绝大部分情形下误差的波动在 $\pm 5\%$ 范围内。对于情形五, $b_b(\lambda)$ 反演误差的波动在 $12\% \sim 22\%$ 。

5 讨 论

比较不同水色波段后向散射系数反演精度可见, $b_b(532)$ 相对略差。为此,尝试直接利用模型发展数

据集(样本数 $N=76$)建立基于 $R_{rs}(\lambda)$ 的 $b_b(532)$ 反演模型。该模型沿用(1)式的算法形式,优化确定的模型参数为, $a=0.411, b=1.947, c=3.688, d=1.217$, 相关系数 $R^2=0.878$, 进一步利用检验数据集($N=32$)进行检验,结果 $D_{AP}=51.71\%$, $R_{MSE}=0.5254 \text{ m}^{-1}$, $R^2=0.8307$ 。该模型与由(1)式和(3)式建立的反演模型精度基本相当,没有明显改进。

此外,在黄海、东海水体后向散射系数反演模型的研究中,李铜基等^[27]采用幂函数进行 HS-6 六个波段 b_b 数据的光谱拟合,取得了较好的效果。利用该幂函数,可以由任意已知波段处的 b_b , 通过光谱外推和内插,得到主流水色波段处的后向散射系数。借鉴该方法,本文在渤海 $b_b(\lambda)$ 数据分析中也进行了类似的尝试,但发现绝大部分站位的 b_b 数据不能利用某种单调的函数进行准确的光谱拟合,故转而建立不同波段 b_b 的相关关系;这从一个侧面说明了与黄海、东海相比,渤海的后向散射性质更为复杂,且时空变异性特征明显。

需要指出的是,水体遥感反射率等表观光学参数除由吸收、散射、后向散射等水体固有光学性质决定外,还在一定程度上受到太阳高度、观测几何等环境因素的影响。反演模型的建立采用了基于统计回归的经验算法,未对上述环境因素以及水体吸收的影响充分考虑并加以修正,这可能是该模型反演误差的主要来源。

6 结 论

利用 2005 年渤海生物光学数据集,建立了基于水体遥感反射率光谱数据的后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 反演模型($\lambda=442 \text{ nm}, 488 \text{ nm}, 532 \text{ nm}, 589 \text{ nm}, 676 \text{ nm}$);利用实测数据进行了模型精度检验;通过分析模型对于输入误差的敏感性,认为模型是稳定可靠的。

该模型适用于渤海近岸浑浊水体,为研究区后向散射系数的大范围、同步、实时遥感监测提供了可能,

并可进一步服务于水体光学参数的时空分布特征分析,以及基于固有光学参数的水色组分的遥感反演。

致谢 赵冬至研究员组织实施了2005年渤海生物光学实验,为本文工作提供了良好的数据平台;在该平台下,唐军武研究员和宋庆君工程师等提供了海水后向散射系数数据以及相应的数据说明文档;刘玉光教授及其研究小组提供了表观光谱数据及相应的数据说明文档。对于参加现场实验以及为本文研究工作提供数据支持的研究机构和同仁表示感谢!

参 考 文 献

- Gordon H. R., Wang M. H.. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 443~452
- He Xianqiang, Pan Delu, Zhu Qiankun *et al.*. Exact Rayleigh scattering calculation for Chinese ocean color and temperature scanner[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 145~151
何贤强, 潘德炉, 朱乾坤等. 海洋水色及水温扫描仪精确瑞利散射计算[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 145~151
- Gordon H. R., Brown O. B., Jacobs M. M.. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2): 417~427
- Kirk J. T. O.. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 1984, **29**(2): 350~356
- Kirk J. T. O.. Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field [J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, **36**(3): 455~467
- Zaneveld J. R. V.. A theoretical derivation of the dependence of the remotely sensed reflectance of the ocean on the inherent optical properties [J]. *J. Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13135~13142
- Zaneveld J. R. V.. An asymptotic closure theory for irradiance in the sea and its inversion to obtain the inherent optical properties [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(8): 1442~1452
- Hoge E. F., C. Wright W., Lyon P. E. *et al.*. Satellite retrieval of inherent optical properties by inversion of an oceanic radiance model: a preliminary algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 495~504
- Stramska M., Stramski D., Mitchell B. G. *et al.*. Estimation of the absorption and backscattering coefficients from in-water radiometric measurements [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(3): 628~641
- McKee D., Cunningham A., Craig S.. Estimation of absorption and backscattering coefficients from in situ radiometric measurements theory and validation in case II waters [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(15): 2804~2810
- Stramski D., Boss E., Bogucki D. *et al.*. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 2004, **61**(1): 27~56
- Zhao Qiaohua, Qin Boqiang, Zhang Yunlin. Characteristic analysis of the fluctuation of light field under water in meiliang bay of taihu lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 760~765
赵巧华, 秦伯强, 张运林. 太湖梅梁湾水下光场扰动的特征分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 760~765
- Maritorena S., Siegel D. A., Peterson A. R.. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15): 2705~2714
- 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]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- Smyth T. J., Moore G. F., Hirata T. *et al.*. Semianalytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties-description, implementation, and performance assessment [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 8116~8131
- Hoge E. F., Wright C. W., Lyon P. E. *et al.*. Inherent optical properties imagery of the western North Atlantic Ocean: Horizontal spatial variability of the upper mixed layer [J]. *J. Geophysical Research*, 2001, **106**(C12): 31129~31140
- Oubelkheir K., Clementson L. A., Webster I. T. *et al.*. Using inherent optical properties to investigate biogeochemical dynamics in a tropical macrotidal coastal system [J]. *J. Geophysical Research*, 2006, **111**: C07021-1~15
- Twardowski M. S., Boss E., Macdonald J. B. *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. Geophysical Research*, 2001, **106**(C7): 14129~14142
- Risovic D.. Effect of suspended particulate-size distribution on the backscattering ratio in the remote sensing of seawater [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7092~7101
- Xu Feng, Cai Xiaoshu, Su Mingxu *et al.*. Study of independent model algorithm for determination of particle size distribution [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 223~228
徐峰, 蔡小舒, 苏明旭等. 独立模式算法求解颗粒粒径分布的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 223~228
- Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 647~651
李微, 杨克成, 张晓晖等. 水中气泡上的体散射函数的模拟和计算 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 647~651
- Tang Hong, Sun Xiaogang, Yuan Guibin. Application on circular cylinder particle size distribution based on anomalous diffraction approximation [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 411~416
唐红, 孙晓刚, 原桂彬. 反常衍射近似在测量圆柱形粒子粒径分布中的应用 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 411~416
- Tang Hong, Sun Xiaogang, Yuan Guibin. Calculation method for particle mean diameter and particle size distribution function under dependent model algorithm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 31~33
- Deng Yong, Lu Qiang, Luo Qingming. Determining particle size distribution and refractive index in a two-layer tissue phantom by linearly polarized light [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 45~48
- Tang Junwu, Wang Xiaomei, Song Qingjun *et al.*. The statistic inversion algorithms of water constituent s for the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **23**(4): 617~626
- Song Qingjun, Tang Junwu. The study on the scattering properties in the Huanghai Sea and East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, **28**(4): 56~63
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
- Li Tongji, Chen Qinglian, Yang Anan *et al.*. Study of the spring empirical model for back scattering coefficient in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Ocean Technology*, 2004, **23**(3): 10~14
李铜基, 陈清莲, 杨安安等. 黄东海春季水体后向散射系数的经验模型研究 [J]. *海洋技术*, 2004, **23**(3): 10~14
- 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 I: 水面以上测量法 [J]. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 37~44
- Wang Xiaomei, Tang Junwu, Song Qingjun *et al.*. The statistic inversion algorithms and spectral relations of total absorption coefficients for the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2006, **37**(3): 256~263
王晓梅, 唐军武, 宋庆君等. 黄海、东海水体总吸收系数光谱特性及其统计反演模式研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2006, **37**(3): 256~263