

## 水中石油类含量对后向散射系数光谱的影响

宋庆君<sup>1,2</sup>, 黄妙芬<sup>2</sup>, 唐军武<sup>1</sup>, 王晓梅<sup>1</sup>

1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

2. 大连海洋大学海洋工程学院, 辽宁 大连 116023

**摘要** 根据2008年5月和2009年8月在辽宁省盘锦市石油类污染水体配比试验和现场试验获取的光学特性数据及生物化学特性数据, 分析了石油类含量和后向散射系数数据的关系。结果表明: 河口区的后向散射系数幂律指数遵循随着悬浮物浓度增加而减小的对数变化规律; 440~856 nm 波长范围内单位后向散射系数在0.006~0.035 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>之间, 并且随波长增加而减小; 石油类含量对后向散射系数的影响集中反映在石油类单位后向散射系数(单位石油类含量的后向散射系数)上, 石油类单位后向散射系数与石油类含量呈乘幂变化规律, 且随波长的增加而减小; 石油类含量对后向散射系数幂律指数影响小。

**关键词** 海洋光学; 固有光学特性; 后向散射系数; 石油类含量

**中图分类号:** O433.5;p733.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)09-2438-05

### 引言

水色遥感半分析模型的核心思想是基于遥感反射比  $R_{rs}$  与固有光学参数吸收系数  $a$  和后向散射系数  $b_b$  的相互关系<sup>[1]</sup>

$$R_{rs} \propto \frac{b_b}{a + b_b} \quad (1)$$

吸收系数  $a$  和后向散射系数  $b_b$  含有水体中生物化学特性信息, 吸收系数是纯水、浮游植物颗粒物、非色素颗粒物、黄色物质吸收系数总和, 后向散射系数也可分为纯水和悬浮颗粒物(suspended particulate matter)的后向散射系数。

水体的后向散射特性主要受水中悬浮颗粒物的粒径分布和相对折射指数影响<sup>[2]</sup>, 研究表明水中悬浮物对溶解在水中的油及乳化油都有一种物理吸附作用, 因而从机理上讲, 只要水体中有石油类物质, 就会改变颗粒物的后向散射系数, 进而影响水体的后向散射系数<sup>[3]</sup>。

对于石油类含量对水体光学特性的影响国内外的关注不是很多, 并且主要集中在原油对水体表面光谱特征的影响<sup>[4]</sup>, 通常这时水面已经形成油膜, 该油膜对水体表面的反射特征影响很大。针对原油对水体的光学特征的影响, 国外也有人做过研究<sup>[5,6]</sup>, 然而针对未形成油膜的污染水体石油类含量对水体光学特征影响相关报道较少。

### 1 试验部分

#### 1.1 试验概述

2008年5月和2009年8月在辽宁省盘锦市开展了现场观测试验和石油类污染物配比试验。沿绕阳河与双台子河大约每1000m选一个站点, 2008年5月采集3个断面共24个站点的现场数据(a, b和c)。石油类含量配比试验地点选在绕阳河岸边, 利用一个大的U-PVC水槽做配比容器, 水槽内壁用聚丙烯酸乙酯涂黑, 水槽直径50cm, 高30cm, 所取水样透明度小于30cm, 配比用的样品分别为辽河油田的稀油(xy)和稠油(cy)以及污水处理厂的污水(ws)。针对石油类污染物与水体的相互作用, 2009年8月分别从辽宁省盘锦辽河油田三大污水处理厂(曙光特油污水处理厂、欢喜岭采油场污水处理厂、锦州采油场污水处理厂)的兼性池或厌氧池中取自然污水, 开展了在水中逐渐加石油类物质模拟水体污染过程(jc, hc, sc2, cd)和石油类污染物样品中逐渐加水模拟自然水体自净过程(sc1)的2种类型配比试验。为了避免大颗粒物对试验的影响, 石油类污染物样品在加入时利用医用纱布(4层)过滤掉大的悬浮颗粒, 为了进一步避免颗粒物的影响, 污水样品用0.2 μm聚碳酸酯滤膜过滤以去除颗粒物, 将滤液作为污染物样品做了一组配比试验(cd)。试验过程中测量了水体表面反射光谱  $R_{rs}$  和水体后向散射系数  $b_b$ , 同时采集水样测量了水体组分吸收系数和总悬浮物(to-

收稿日期: 2009-11-12, 修订日期: 2010-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771196, 40906090); 国家(863计划)项目(2006AA09A310, 2006AA09Z178, 2007AA092201)资助

作者简介: 宋庆君, 1975年生, 国家卫星海洋应用中心副研究员 e-mail: kingdream@mail.nsoas.gov.cn; kingdreams@btmail.net.cn

tal suspended matter, TSM)浓度  $c_{TSM}$ 、叶绿素浓度  $c_{chl}$ 、石油类含量  $C_{pe}$  等生物化学特征。

### 1.2 主要测量参数

水体后向散射系数利用美国 Hobi Labs 公司的 HydroScat-6 测量, 散射角为  $140^\circ$ , 配置 6 个通道, 分别为 442, 488, 532, 589, 676, 865 nm, 试验前仪器在实验室进行过定标。测量时将仪器前面板浸没水中约 20 cm, 配比试验时因为水面较平, 另外为了避免水槽底部对数据的影响, 仪器前面板浸没水中 5~10 cm, 取 1 min 的测量平均值作为测量值。

悬浮物浓度采用称重法测量。利用孔径 0.45  $\mu\text{m}$  的 GF/F 滤膜(英国 whatman 公司生产)过滤一定体积的水样, 再用 50 mL 纯水清洗样品 3 次去除盐分, 样品经铝箔纸包装后保存于液氮罐中, 带回实验室称重并计算悬浮物浓度。

石油类污染物浓度根据 GB/T16488-1996 标准, 用四氯化碳萃取现场采集水样中的油类物质, 测定总萃取物, 然后将萃取液用硅酸镁吸附, 经脱除动植物油等极性物质后, 测定石油类含量。测量仪器选用吉林省吉林市浮瑞得红外系统公司生产的 J2000 红外测油仪。

水体表面反射光谱利用美国 ASD 公司生产的 FildSpec 3 地物光谱仪获取, 颗粒物和黄色物质吸收系数利用日立 U-3010 双光路分光光度计测量, 以上参数在样品的制备、测量和分析过程都遵循 NASA 水色观测规范。

## 2 数据处理

### 2.1 后向散射系数

后向散射系数为体散射函数  $\beta(\theta)$  的后半球积分, 表示为  $b_b = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\theta) \sin(\theta) d\theta$ , 这一形式可以变成  $b_b = 2\pi \chi(\theta) \beta(\theta)$ , 本文  $\chi$  取 1.18<sup>[7]</sup>。

对于大角度体散射测量仪器, 在强烈衰减性的水体要做 sigma 校正, 校正过程如下

$$b_b = (k_0 \cdot e^{k_{exp} \cdot (a+0.46)}) b_{bu} \quad (2)$$

上式中散射系数  $b$  由后向散射概率  $b_b$  计算得到

$$b = b_{bu} / b_b \quad (3)$$

$k_0$  和  $k_{exp}$  为校正常数,  $b_{bu}$  为未校正量。

### 2.2 后向散射率

后向散射率是后向散射占总散射系数的比例, 由于颗粒物散射相函数形状有所差异, 后向散射率因不同水体而不同<sup>[8]</sup>。在本次试验中, 由于没有测量散射系数, 因此只能通过其他手段得到后向散射率。利用实际测量的遥感反射比与吸收系数光谱, 优化出后向散射率结果, 具体见马荣华等的相关文献<sup>[9]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 颗粒物单位后向散射系数

后向散射系数与总悬浮物的比值称为颗粒物单位后向散射系数(particulate mass-specific backscattering coefficients),

简称单位后向散射系数。图 1 给出了 2008 年所有站点数据的单位后向散射系数分布情况, 与其他人的研究结果比较接近或者类似<sup>[10-13]</sup>。Snyder 等对美国沿岸水体的分析结果显示, 442-671 nm 之间有机颗粒物的单位后向散射系数大约变化在 0.01~0.025  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  之间, 与本文的结果比较相近, 这可能因为两者水体中颗粒物的比例比较接近, Snyder 研究的水体有机颗粒大约占总颗粒物的 50%~70%, 而本研究中数据有机颗粒物约占总颗粒物的 60%~80%。

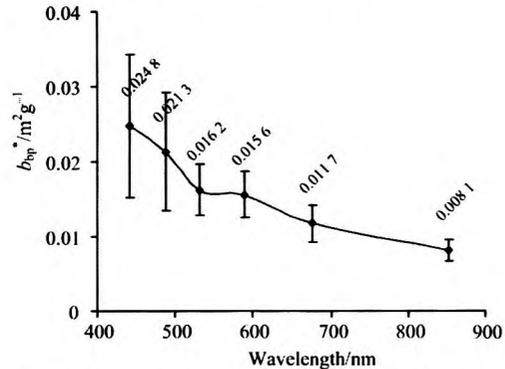


Fig. 1 Specific backscattering coefficient spectra

### 3.2 悬浮物浓度对后向散射光谱的影响

后向散射的光谱形式通常为如下的幂函数形式

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) (\lambda_0 / \lambda)^n \quad (4)$$

式中幂律指数(power-law exponent)  $n$  是个区域变量,  $n$  通常能间接反应出水体的粒径分布<sup>[14]</sup>。通过分析, 2008 年现场试验及配比试验中,  $n$  取值范围在 0.329~2.513 之间, 平均值为 1.572; 2009 年配比试验中,  $n$  取值范围在 0.689~3.763 之间, 平均值为 1.429。因为指数  $n$  由颗粒物的特征决定, 因此在一个较稳定的粒径分布函数下,  $n$  与悬浮物的浓度有一定关系, 经分析, 除  $xy$ ,  $cy$  和  $cd$  样品外, 其他的样品数据都显示出指数  $n$  随着悬浮物浓度的增加而减小的趋势, 这与很多研究的结果类似<sup>[10, 15]</sup>, 随着水体的浑浊程度加大(悬浮物浓度增加), 后向散射系数随波长的变化越来越不明显。

2008 年测量的 3 个断面和 2009 年的配比实验数据显示出非常好的对数关系

$$n = A \cdot \ln(c_{TSM}) + B \quad (5)$$

除过滤污水( $cd$ )样品以外的其他样品的数据统一分析, 确定(5)式中  $A = -0.4426$ ,  $B = 2.9864$ 。

### 3.3 石油类污染物对后向散射系数的影响

由(5)式可以看出, 只要参考波段的后向散射系数  $b_{bp}(\lambda_0)$  和幂律指数  $n$  任意一个参数与石油类污染物浓度相关, 则可确定后向散射系数受石油类污染物的影响。石油类污染物与  $b_{bp}(532)$  之间的关系总体表现为随石油污染物浓度的增加, 后向散射系数减小[图 2(a)], 这与通常情况下后向散射系数与总悬浮物的关系刚好相反; 石油类污染物浓度与后向散射幂律指数  $n$  之间的关系几乎无法看出有任何相关性[图 2(b)]。

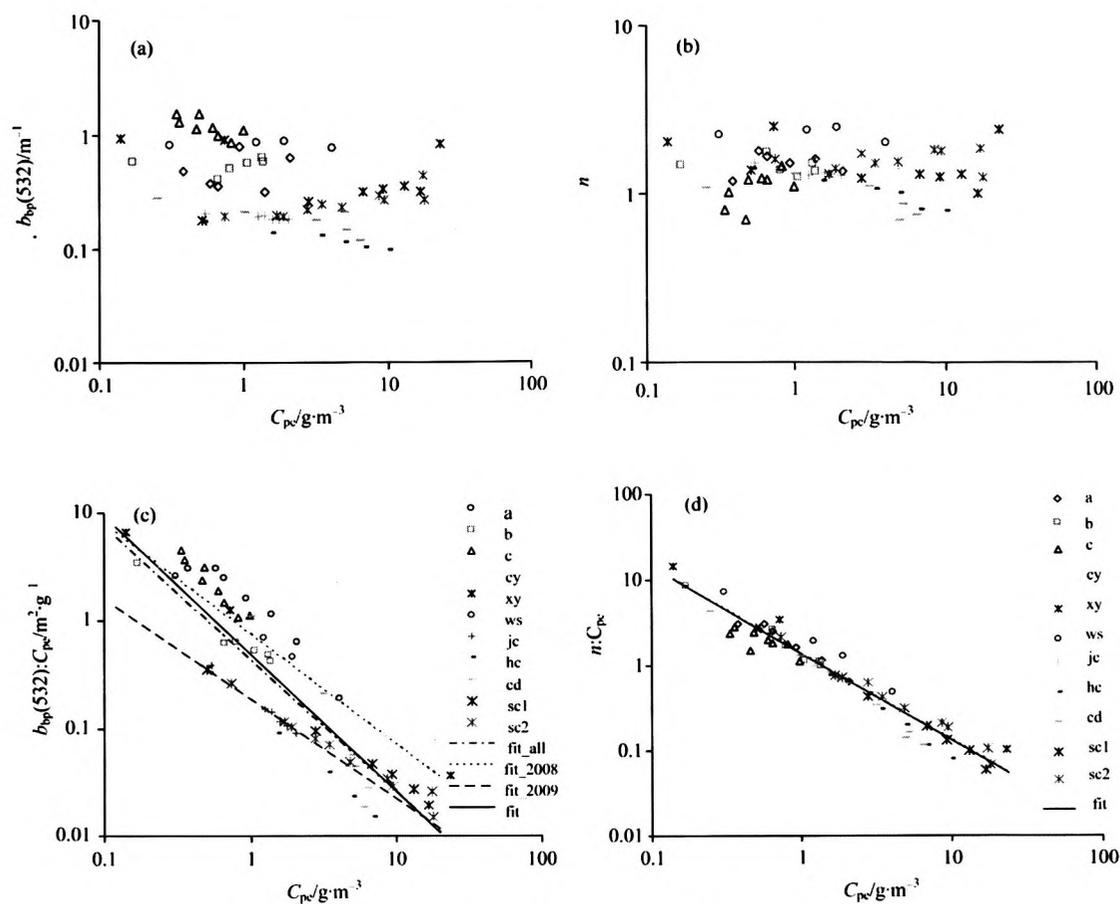


Fig. 2 Relationship of  $b_{bp}(532)$  and  $n$  vs petroleum concentration

但是依然有两组数据(sc1 和 sc2)表现与其他数据表现不一致,具体表现在随着石油污染物浓度的增加,后向散射系数也随之增加,这可能是由于该样品在配比过程中带进来的悬浮物的影响。该样品表现为样品呈黑色,透明度极低,并且有大量的黑色颗粒物悬浮,虽然在加入样品时采取了一定的颗粒物过滤措施,但是依然无法避免颗粒物的干扰。

通常情况下,与单位后向散射系数类似,希望有个能同时联系石油污染物浓度和后向散射系数的物理量,因此将后向散射系数与石油类含量做比,在本文中称为石油类单位后向散射系数(petroleum mass-specific backscattering coefficients)。经过分析发现,石油类单位后向散射系数以及幂率指数  $n$  与石油类含量的比值( $n/C_{pc}$ )与石油类含量都有非常好的相关性[图 2(c)],呈非常好的乘幂关系,这与叶绿素的单位吸收系数非常相似<sup>[16]</sup>。

石油类单位后向散射系数表现为随石油类污染物浓度的增加而减小,这与后向散射系数与石油类污染物浓度的变化类似,并且石油类单位后向散射系数随石油类污染物浓度的变化相比后向散射系数更稳定,在图 2(a)中表现比较异常的两组数据(sc1 和 sc2)与所有的数据一样表现为同样的变化形式。

图 2(c)中,2008 年实验数据(a, b, c, cy, xy, ws)整体的石油类单位后向散射系数较大,2009 年的试验数据(jc,

hc, cd, sc1, sc2)整体的石油类单位后向散射系数较小,这是由于试验条件造成的,但是最终结果两者却有很好的一致性。2008 年石油类单位后向散射系数与石油类污染物浓度之间的拟合关系(虚线, fit\_2008)与 2009 年石油类单位后向散射系数之间的拟合关系(长虚线, fit\_2009)几乎是平行的,但是应该注意到 2009 年试验数据中 sc1 和 sc2 的分布对结果的影响,只有这两个数据的分布比较特别,原因在前文已经说明。除 sc1 和 sc2 两组数据的其他数据有同样的分布情况,其拟合关系(实线, fit)与全部数据的拟合关系(点划线, fit\_all)非常接近,有非常强的一致性。综合以上分析,为了避免 sc1 和 sc2 数据对结果的影响,最终采用除 sc1 和 sc2 以外的其他数据的拟合关系作为石油类单位后向散射系数与石油类污染物浓度的关系。

$$b_{b,pc}^* = A \cdot C_{pc}^B \quad (6)$$

各波段石油类单位后向散射系数关系如表 1。通过表 1 可看出,石油类单位后向散射系数随波长的变化依然是随波长的增加而减小的趋势。

后向散射幂律指数与石油类含量的比值( $n/C_{pc}$ )和石油类含量也有较好的乘幂关系[图 2(d)]

$$n/C_{pc} = 1.395 \cdot C_{pc}^{-1.0223} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9452, N = 65.$$

Table 1 Petroleum mass-specific backscattering coefficient of different band

Wavelength/nm	442	488	532	589	676	852
A	0.626 9	0.538 2	0.456 6	0.430 1	0.338 8	0.238 1
B	-1.308 5	-1.296 2	-1.313 5	-1.324 7	-1.288 2	-1.301
R <sup>2</sup>	0.773	0.764 6	0.819 1	0.804 4	0.82	0.819 8

这说明石油类含量对后向散射系数光谱的形状有一定影响,但是影响不大,因为(7)式中指数-1.022 3太接近-1。结果表明石油类含量对后向散射系数的影响仍主要表现在对石油类单位后向散射系数上。

波兰人 Otremba 和 Krol 针对原油在水面扩散的情形,利用米散射理论计算了石油类含量对后向散射系数的影响,水面原油随时间变化油膜变薄,石油类单位后向散射系数逐渐减小<sup>[7]</sup>,油膜变薄会有更多的原油物质溶于水,水中的石油类含量增加,这与本文的随石油类含量增加石油类单位后向散射系数减小的结果一致。他们的结果也显示随时间而逐渐变薄的油膜对后向散射系数的影响主要集中在单位后向散射系数上,对光谱形状几乎无影响,各浓度下的后向散射系数光谱呈平行分布。

#### 4 结 论

通过对 2008 年 5 月和 2009 年 8 月的后向散射系数和悬

浮物浓度以及石油类含量数据进行分析,得出后向散射系数幂律指数  $n$  随悬浮物浓度的增加而减小的对数变化规律,并且这一指数  $n$  也受石油类含量影响,但是影响非常小。后向散射系数与悬浮物浓度和石油类含量呈不同的变化规律,悬浮物单位后向散射系数变化较稳定,并且随波长增加而减小,440~852 nm 波长范围内单位后向散射系数变化在 0.006~0.035 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> 之间,石油类单位后向散射系数随石油类含量的而变化,与叶绿素单位吸收系数非常类似呈乘幂规律,石油类单位后向散射系数光谱依然是蓝波段大,红波段小。

但是在研究中无法完全区分石油类物质和悬浮物的后向散射系数,并且也无法完全排除悬浮物对配比试验的影响,因此以上结果只是一个初步的结果,需要在后续的试验中同时测量粒径分布、相对折射指数以及石油类和悬浮物的体积浓度进行理论计算来验证。

#### 参 考 文 献

- [1] Mobley C D. Light and Water; Radiative Transfer in Natural Waters. San Diego; Academic Press, 1994. 592.
- [2] LIN Hong, DONG Tian-lin, MA Yong, et al(林宏,董天临,马泳,等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2008, 3(1): 65.
- [3] HUANG Miao-fen, SONG Qing-jun, TANG Jun-wu, et al(黄妙芬,宋庆君,唐军武,等). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 2009, 31(3): 12.
- [4] Otremba Z, Piskozub J. Optics Express, 2004, 12(8):1671.
- [5] Otremba Z, Piskozub J. Optica Applicata, 2003, 34(1): 93.
- [6] Otremba Z, Krol T. Polish Journal of Environmental Studies, 2002, 11(4): 407.
- [7] Boss E, Pegau W S. Applied Optics, 2001, 40(30): 5503.
- [8] Stramski D, Piskozub J. Applied Optics, 2003, 42(18): 3634.
- [9] Ma R, Pan D, Duan H, et al. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(9): 2321.
- [10] SONG Qing-jun, TANG Jun-wu(宋庆君,唐军武). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 2006, 28(4): 56.
- [11] Peng F, Effler S W, O'donnell D, et al. Applied Optics, 2007, 46(26): 6577.
- [12] LE Cheng-feng, LI Yun-mei, ZHA Yong, et al(乐成峰,李云梅,查勇,等). Advances in Water Science(水科学进展), 2009, 20(5): 703.
- [13] Snyder W A, Arnone R A, Davis C O, et al. Applied Optics, 2008, 47(5): 666.
- [14] Kostadinov T S, Siegel D A, Maritorena S. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2009, 114(9): c09015.
- [15] Blondeau-Patissier D, Brando V E, Oubelkheir K, et al. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2009, 114(5): c05003.
- [16] Bricaud A, Babin M, Morel A, et al. Journal of Geophysical Research-Oceans, 1995, 100(C7): 13321.

## Influence of Petroleum Concentration in Water on Spectral Backscattering Coefficient

SONG Qing-jun<sup>1,2</sup>, HUANG Miao-fen<sup>2</sup>, TANG Jun-wu<sup>1</sup>, WANG Xiao-mei<sup>1</sup>

1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

2. Ocean Engineering College, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

**Abstract** The petroleum pollutants mixing proportion experiment and in-situ experiment were carried out in the estuary of Pan-jin, Liaoning province in May 2008 and August 2009. The optical properties and biochemical properties were measured to get the effect of petroleum concentration in water on backscattering coefficients spectrum. The results show that the power-law index of backscattering coefficient decreases as TSM concentration increases and the relationship of these variables follows logarithm mode. Specific backscattering coefficient's value of 440 to 856 nm is between 0.006 and 0.035  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  and decreases as wavelength increases. The petroleum mass-specific backscattering coefficients (backscattering coefficients of unit petroleum concentration) decreases with the wavelength increasing and follows power law for petroleum concentration. Petroleum concentration has little effect on the power-law index of backscattering coefficient.

**Keywords** Oceanic optics; Inherent optical properties; Backscattering coefficients; Petroleum concentration

(Received Nov. 12, 2009; accepted Feb. 19, 2010)