

基于极化 SAR 的河流有机物污染监测研究

陈炯¹, 贾海峰^{2*}, 杨健¹, 陈玉荣²

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:选择我国南方水质变化梯度较为明显的典型河流为对象, 分析基于 C 波段极化合成孔径雷达(极化 SAR)的河流水污染监测评估技术. 引入了随机粗糙面电磁散射理论对污染水域的散射特性进行了建模, 研究了水体污染可能对散射模型及参数的影响, 分析了同步得到的极化 SAR 数据与水体常用污染指标的监测数据. 通过比较 19 个采样点的后向散射系数与同步监测的水质指标, 发现化学需氧量(COD)与 *HH* 和 *VV* 通道的后向散射系数比成正相关性, 这与由电磁理论建立的散射模型及水体污染对散射模型参数影响的分析相符. 利用最小二乘法, 拟合得到了利用 *HH* 与 *VV* 通道后向散射系数比来反演化学需氧量的公式, 拟合结果的相关系数达到 0.90. 本研究建立了利用极化 SAR 的 *HH* 与 *VV* 通道后向散射系数比监测水体有机物污染的模型, 该模型主要通过分析同步监测数据获得, 基于电磁散射理论的分析支持了该模型的有效性.

关键词:极化合成孔径雷达(极化 SAR); 有机物污染; 化学需氧量(COD); 后向散射系数; 微波遥感

中图分类号: X832; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2017-06

Monitoring of Organic Pollutants in River Based on Polarimetric SAR

CHEN Jiong¹, JIA Hai-feng², YANG Jian¹, CHEN Yu-rong²

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The rivers with the distinct gradient of water quality in the southern region of China were selected as a case study. The objective of this study was to develop the monitoring and evaluating technology of the water quality based on C-band polarimetric synthetic aperture radar (POL SAR). The random rough surface scattering model to describe the electromagnetic scattering characteristics of polluted water was briefly introduced. The potential effect of organic pollutants to the scattering model and backscattering coefficient were explored. The simultaneously obtained POL SAR data and the measured water quality indexes were analyzed. By comparing the POL SAR data and the water quality indexes, it could be observed that the chemical oxygen demand (COD) was in proportional to the ratio between *HH* and *VV* backscattering coefficients, which matched the analysis based on electromagnetic scattering theory. A fitting model was proposed to retrieve the chemical oxygen demand by ratio between *HH* and *VV* channel backscattering coefficients using least square method, with the fit coefficient of 0.90. In this study, the model using the ratio between *HH* and *VV* backscattering coefficients was established, which was mainly based on the analysis of experimental results, and was also supported by theoretical interpretation.

Key words: polarimetric synthetic aperture radar (POL SAR); organic pollutants; chemical oxygen demand (COD); backscattering coefficient; microwave remote sensing

由于工业废水、生活污水等排入江河湖泊, 使得水体受到污染, 直接危害人体健康, 并给经济生产造成巨大损失, 对社会生活产生巨大的负面影响. 我国是人口众多的发展中国家, 随着工农业的发展, 水体污染问题尤为突出. 实时、快速、宏观、准确地监测水质变化, 对于我国相关部门及时掌握水体污染状况, 建立预警和评估机制具有重要的意义. 尤其是在水污染事故频发的今天, 这种需求更加紧迫. 然而由于水域分布广泛, 实地监测网点分散, 仅依靠现有的监测站台和传统监测技术很难满足这一要求.

遥感技术是一种利用物体反射或辐射电磁波的固有特性, 远距离测量和分析目标物特性的技术. 由于遥感技术监测范围广、实时性强、成本低, 便于

长期动态监测, 并且不同机制下的被观测对象会呈现出不同的性质, 因此近年来, 国内外许多研究人员探索了多种利用遥感技术监测水污染的技术和方法^[1]. 如悬浮物作为一个重要的水质指标, 早在 30 多年前就有研究人员利用陆地卫星数据进行监测^[2], 之后陆续有利用多种遥感手段进行悬浮物监测的研究^[3-6]. 而利用遥感手段对水色、叶绿素 a、浮游植物等指标的监测也有相应的研究^[7-10]. 近年来, 世界各国都对遥感技术越来越重视, 基于不同遥感平台数据的水污染监测的研究得以广泛开

收稿日期: 2009-10-25; 修订日期: 2010-03-03

基金项目: 清华大学信息科学与技术国家实验室(筹)学科交叉基金项目

作者简介: 陈炯(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为极化 SAR 理论及应用, E-mail: jiongce@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn

展^[11-16],先进的数据处理与分析方法也被引入^[7,9,17],使监测结果更加准确。

以往利用遥感技术监测和评估河流水质的研究多集中于可见光波段和多光谱分析。但是在我国南方地区,被观测区域很多时候会被云雾覆盖,加之很多监测活动需要在夜间进行,这时可见光和光谱分析遥感技术的应用就会受到限制。微波遥感具有全天时、全天候、穿透云层等特点,它为沿海及南方被云层覆盖较多地区提供利用遥感技术进行实时、全天候的水环境污染监测的可能。SAR 是微波遥感中一种非常重要的观测工具,极化 SAR 通过 2 个通道分别发射和接收电磁波,可以反映更多地表散射特性信息,也为部分地表参数的定量反演提供了基础。对于土壤、积雪、植被等典型目标和典型地物的电磁散射特性,各国科研人员已经有了广泛深入的研究,建立起了介电常数、形态特性等实际物理参数与雷达观测到的后向散射系数之间的关系^[18,19]。极化 SAR 与极化微波辐射计等微波遥感手段已被成功地应用于海面油污监测及海水盐度反演等研究中^[20-23]。本研究选择我国南方水质变化梯度明显的典型河流为对象,分析基于 C 波段极化 SAR 的河流水污染监测评估技术。

1 水面后向散射系数建模

1.1 随机粗糙面参数

当电磁波入射到粗糙表面的分界面上时,在镜向的一部分称为反射,其余方向均为散射。对于成像雷达,接收到的只是散射能量中的一部分,即后向散射部分。

自然界的大多数地物,如有波浪的水面、土壤等,都可以认为是粗糙表面,只是粗糙程度不同。表面粗糙度通常用 2 个参数表示:表面高程的均方根高度 s 和表面相关长度 l 这 2 个统计变量。这 2 个参数分别从垂直和水平 2 个方向描述了表面粗糙度。

以一维为例,假设第 i 个采样点的高度为 z_i , s 的定义为:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N (z_i)^2 - N(\bar{z})^2 \right)} \quad (1)$$

式中 N 为总的采样点数。 l 的定义由表面高程的自相关函数 $\rho(x)$ 引出, $\rho(x)$ 定义为:

$$\rho(x) = \frac{\sum_{i=j}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (2)$$

式中 $x = (j-1)x'$, x' 为离散采样间隔。 $\rho(x) = 1/e$

时的 x 值定义为表面相关长度 l 。

1.2 随机粗糙面反演模型

水面可以建模成随机粗糙面,描述随机粗糙面中各极化方式后向散射系数与粗糙面各种参数关系的模型很多,其中经典的理论模型有几何光学模型(GOM)、物理光学模型(POM)和小扰动模型(SPM)等^[18,19]。以 SPM 模型为例,SPM 模型后向散射系数的一阶表达式为:

$$\sigma_{pq} = 8k^4 s^2 \cos^4 \theta |\alpha_{pq}|^2 W(2k \sin \theta, 0) \quad (3)$$

α_{pq} 为极化幅度系数,其中 p, q 分别表示接收和发射的极化方式, p, q 均可以为水平(H)和垂直(V)极化。极化幅度系数表示介质表面反射不同极化方式的电磁波的能力。共极化方式下的极化幅度系数为:

$$\alpha_{HH} = \frac{(\varepsilon - 1)}{(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad (4)$$

$$\alpha_{VV} = \frac{(\varepsilon - 1) [\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta)]}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad (5)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为雷达电磁波波长, θ 为雷达入射角, ε 为介电常数, $W(2k \sin \theta, 0)$ 为表面一阶粗糙度功率谱。

除了这些理论模型外,在利用雷达后向散射系数反演土壤参数的研究领域,还有研究人员通过大量实验,提出了一些经验-半经验模型,这些模型虽然不是理论上严格推导得到的,但是因为其与实际数据吻合很好,在实践中也得到了广泛的应用。比较常用的经验-半经验模型有 Oh 模型^[24]和 Shi 模型^[25]等,Oh 模型为:

$$p = \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} = \left[1 - \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{\frac{1}{3\Gamma_0}} \cdot \exp(-ks) \right]^2 \quad (6)$$

$$q = \frac{\sigma_{HV}}{\sigma_{VV}} = 0.23 \sqrt{\Gamma_0} [1 - \exp(-ks)] \quad (7)$$

其中:

$$\Gamma_0 = |(1 - \sqrt{\varepsilon}) / (1 + \sqrt{\varepsilon})|^2 \quad (8)$$

对于 SPM 模型,为了抵消表面粗糙度的影响,求得 HH 和 VV 通道后向散射系数之比 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 为:

$$\left| \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} \right| = \left[\frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} + \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta)} \right]^2 \quad (9)$$

式中, θ 为雷达入射角, ε 为介电常数。

假定入射角为 28° , 以 ε 为横坐标, 对 SPM 模型和 Oh 模型, 以 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 为纵坐标得到曲线如图 1 所示。

由上面的分析可知,这些模型虽然表达式不同,但是一定入射角和粗糙度下介电常数 ε 与 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 之间还是有定性的一致规律: $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$

随着介电常数 ε 增大而变小。

2 水体污染物对后向散射系数的影响

地表的雷达后向散射系数主要受到被照射单元介电特性和几何特性的影响。水环境主要指标有化学需氧量 (COD)、氨氮、石油类、五日生化需氧量、浊度、色度等。在本研究中,主要分析水体有机物污染情况对后向散射系数的影响,以及由此得到的反映水体有机物污染情况的水质指标与后向散射系数

之间可能存在的关系。

对于水体的介电常数,在标准状态下,对于 2.45GHz 的微波,纯水的介电常数为 78.5,但是随着波长的减小而迅速下降,在高频段纯水介电常数的上限为 4.9^[18]。而常见有机物的介电常数都比纯水小,如乙醇的介电常数为 24.5,凡士林为 2.16,聚四氟乙烯为 2.1^[26]等。因此当水中的有机物含量变大时,整个水体的介电常数会变小,这一变化可以体现在雷达后向散射系数中。

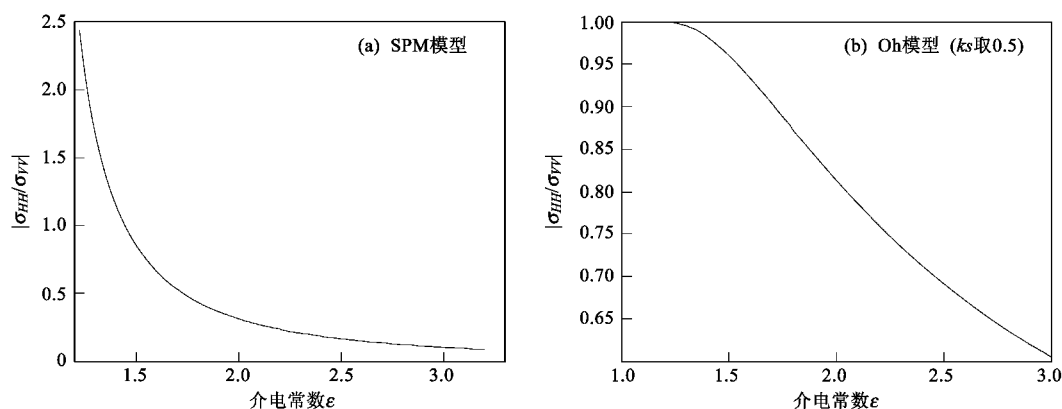


图1 SPM 和 Oh 模型 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 与介电常数 ε 的关系

Fig. 1 Relationship between $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ and relative dielectric constant ε in SPM and Oh model

化学需氧量是指水体中易被强氧化剂氧化的还原性物质在氧化过程中所需要消耗的氧化剂的量,是评价水体污染程度的重要指标之一,在一定程度上表征水体受有机物污染的状况。

由上一节的讨论可知, $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 随着介电常数 ε 增大而变小。而水中的有机物污染又会降低水的介电常数,因此 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 与反应水体还原性有机物污染的指标,如化学需氧量 (COD) 等之间可能存在同样的增减性,即随着 COD 的增大, $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 也增大。基于该认识,就有可能利用 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 来监测水质的有机物污染。在下两节中,本研究通过对比同步获得的雷达数据和河流水质指标监测数据对此进行分析和验证。

3 实验数据

3.1 实验要素概述

实验时间为 2008 年 12 月 10 日凌晨,星载全极化 SAR 照射的中心为东经 113°13',北纬 23°04',得到一幅数据的范围约为 25 km × 25 km,分辨率约为 3 m × 3 m,该区域主要为广东省佛山市佛山水道和平洲水道交汇的区域,该区域分布有多家污染企业,

有部分工业废水直接排入河道,同时该区域是密集的居民生活区,生活污水也是重要的污染源。

3.2 监测水质指标数据

根据当地的水质状况,本实验在佛山水道和平洲水道共选取了 9 个河流断面作为观测点 (如图 2),其中采样断面 2、8、9 分别取河流左、中、右 3 个点,断面 1、7 仅取河流中央的点,其余 4 个断面分别取河流左和中 2 个点,最终的采样点为 19 个。在卫星过境的同时,由当地环保部门和水文部门安排实验人员在观测点同步取样。取样时,由实验人员搭乘小船行至河道中央及距离两岸 25 m 左右的水域定点采样,同时用手持 GPS 定位仪进行空间定位测量,确定采样点空间位置。采样时正是涨潮退潮间歇期,河水流速较低,小船的雷达横截面积较小,对周围像素的反射强度基本没有影响。

3.3 极化 SAR 数据

本实验采用的星载 SAR 是由加拿大航天局和 MDA 公司联合研制的大功率雷达成像卫星 RADARSAT-2 卫星,该卫星波段工作于 C 波段,波长约为 5.6 cm,在获得实验区域场景时的入射角为 28°,极化方式为全极化 HH、HV、VH、VV 四通道,选

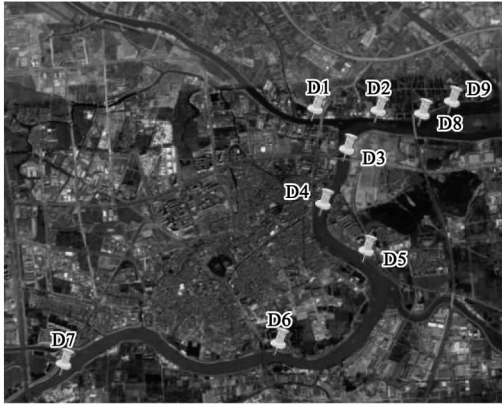


图2 采样点的光学遥感图

Fig. 2 Optic remote-sensing scene of sampling spots

用数据为 SAR 地理编码精校正 (SPG) 产品数据. 得到的全极化 SAR 图像及对应采样点如图 3 所示.

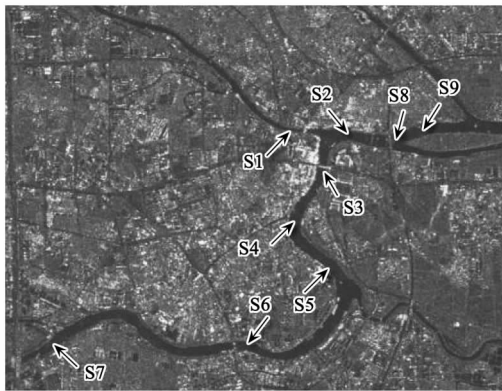


图3 采样点的极化 SAR 图

Fig. 3 POLSAR remote-sensing scene of sampling spots

4 结果与分析

根据第 2 节的分析, 19 个采样点的 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 值与测量到得多个水质指标, 发现采样点的化学需氧量与对应的 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 存在明显的相关关系, 如图 4 中所示. 实验结果验证了第 2 节的分析.

由于水质污染对介电常数的影响机制比较复杂, 本研究从实测数据出发, 推求 COD 与 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 的统计相关模型. 假定化学需氧量 (用 V_{COD} 表示, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 与 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 存在线性关系:

$$V_{\text{COD}} = a |\sigma_{HH}/\sigma_{VV}| + b \quad (8)$$

由本组测量数据, 根据最小二乘法可以求得系数 a, b , 可得: $a = 13.41, b = -4.54$.

在此模型下, 本次实验实测的 19 组数据计算得到的 $x^i = a |\sigma_{HH}^i/\sigma_{VV}^i| + b$ 和实测的 $y^i = \text{COD}^i$ 的关系如图 5 所示.

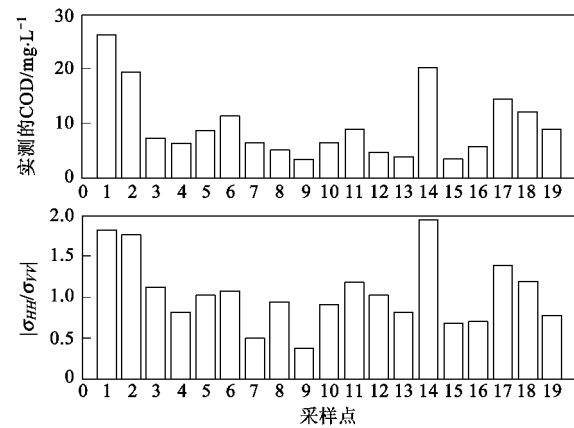
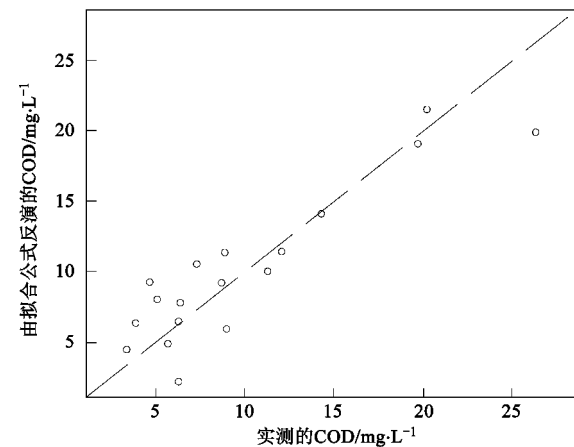
图4 实测的 COD 与 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 比较Fig. 4 Comparison between measured COD and $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 

图5 全部采样点的拟合结果比较

Fig. 5 Fitting result of all samples

求得相关系数为 $\gamma = 0.90$, 平均相对误差为 32%. 可以看出虽然式 (8) 能够定性的反映出 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 与 COD 的关系, 但是定量反演时相对误差还比较大.

为了进一步说明 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 与水质指标 COD 的关系, 选取了 2、8、9 这 3 个河流断面进行分析. 这 3 个断面均在佛山水道和平洲水道交汇的河流中, 其中佛山水道由于汇入了大量的生活污水和工业废水, 水质较差, 而平洲水道流经的区域主要是农业区和郊区, 水质较好, 因此在交汇的断面有 1 明显的水质梯度差. 这一梯度差从光学遥感图像和实际测量指标中都可以看出. 图 6 是该交汇处的光学遥感图, 虽然不是同步测量的, 但是可以明显看出佛山水道和平洲水道的交汇处水质有明显差异. 表 1 是对 2、8、9 采样点北、中、南 3 个采样点的 COD 值对比, 从中也可以看出, 靠北岸的采样点 COD 值要明

显高于南岸。



图 6 河流断面 2、8、9 放大图

Fig. 6 Higher resolution scene of profiles 2, 8 and 9

表 1 采样断面 2、8、9 各采样点实测 COD

Table 1 In-situ measurements of COD in the sampling profiles of 2, 8, 9

采样断面	COD/mg·L ⁻¹		
	北	中	南
2	20	7	6
8	20	<5	6
9	14	12	9

在极化 SAR 数据上,在每个采样点断面由北往南等间隔的选取了 12 个点,做出其 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 如图 7 所示,可以发现 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 呈现从北岸(左岸)往南岸(右岸)下降的基本趋势,说明水质从北往南逐渐转好,与这些断面的实际水质状况相符,这也说明了用 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 可以有效地反映出水质的有机物污染。

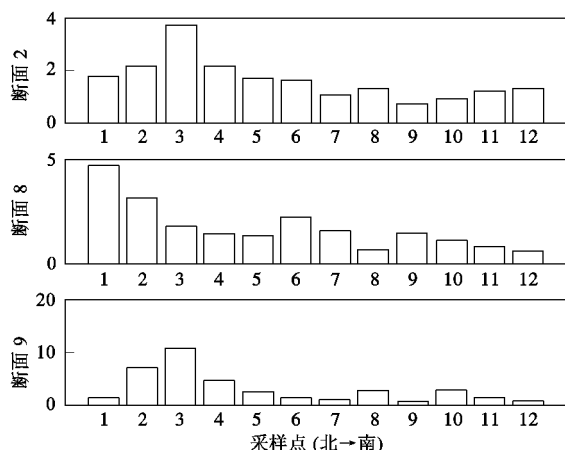


图 7 河流断面 2、8、9 的 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$

Fig. 7 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ in the river profiles 2, 8 and 9

5 结论

(1) 选择我国南方水质变化梯度明显的典型河

流为对象,分析了基于 C 波段极化 SAR 的河流水有机物污染监测技术。通过同步监测实验,观察到监测点的 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 与 COD 存在明显的正相关性,由数据拟合得到了用 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 反演 COD 的关系,由此来监测水质有机物的污染状况。

(2) 水体物理性质的变化直接导致极化 SAR 各通道后向散射系数的不同。通过微波散射理论和后向散射系数建模,得到 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 与介电常数的负相关关系,而水体的有机物含量的增加会降低水体的介电常数,这为用 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 反演 COD,监测水质有机物污染的方法提供了一定的理论支持。

(3) 针对 19 个监测点的数据,用 $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 反演 COD 的公式得到了较好的拟合结果,拟合系数高达 0.90。在水质梯度变化明显的 3 个断面, $|\sigma_{HH}/\sigma_{VV}|$ 的变化也定性地反映了水质状况。但应当指出的是,监测的样本点还比较少,方法的普适性需要进一步验证。

致谢:本研究在实地同步监测的过程中,得到了广东省佛山市南海区环境保护局和广东省水文局佛山分局的大力帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 贾海峰,刘雪华. 环境遥感原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [2] Kritikos H, Yorinks L, Smith H. Suspended solids analysis using ERTS-A data [J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3: 69-80.
- [3] 李京. 水域悬浮固体含量的遥感定量研究[J]. 环境科学学报, 1986, 6(2): 166-173.
- [4] 李洪灵,张鹰,姜杰. 基于遥感方法反演悬浮泥沙分布[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 242-245.
- [5] 温小乐,徐涵秋. 基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2441-2447.
- [6] 王繁,周斌,徐建明,等. 基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度遥感反演模式[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3022-3026.
- [7] 张玉超,钱新,钱瑜,等. 基于机器学习方法的太湖叶绿素 a 定量遥感研究[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1321-1328.
- [8] Sathyendranath S, Cota G, Stuart V, et al. Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(2-3): 249-273.
- [9] 王建平,程声通,贾海峰,等. 用 TM 影像进行湖泊水色反演研究的人工神经网络模型[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 73-76.
- [10] El-Raey M, Ahmed S, Korany E. Marine pollution assessment near Alexandria, Egypt by Thematic Principal Components (TPC) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(7): 1395-1414.

- [11] 许珺,傅肅性,黄绚. 遥感与 GIS 在河流水质环境背景分析中的应用——以台湾基隆河为例[J]. 环境科学,2000,**21**(4): 1-5.
- [12] 王学军,马廷. 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况[J]. 环境科学,2000,**21**(6):65-68.
- [13] 邓孺孺,何执兼,陈晓翔,等. 珠江口水域水污染遥感定量分析[J]. 中山大学学报(自然科学版),2002,**41**(3): 99-103.
- [14] 汪小钦,王钦敏,高刘焕,等. 水污染遥感监测[J]. 遥感技术与应用,2002,**17**(2): 74-78.
- [15] 雷坤,郑丙辉,王桥. 基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表面水体水质遥感[J]. 环境科学学报,2004,**24**(3): 376-380.
- [16] Xu H Q. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,2006,**27**(14): 3025-3033.
- [17] 王建平,程声通,贾海峰. 基于 MCMC 法的水质模型参数不确定性研究[J]. 环境科学,2006,**27**(1): 24-30.
- [18] Fung A K. Microwave scattering and emission models and their applications[M]. Norwood,MA: Artech House,1994.
- [19] Ulaby F T,Moore R K,Fung A K. Microwave remote sensing: active and passive, vol. 2 [M]. Norwood,MA: Artech House, 1981.
- [20] Migliaccio M, Gambardella A, Nunziata F, *et al.* The PALSAR polarimetric mode for sea oil slick observation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2009,**47**(12): 4032-4041.
- [21] Migliaccio M, Nunziata F, Gambardella A. On the copolarised phase difference for oil spill observation[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,**30**(6): 1587-1602.
- [22] Font J, Lagerloef G S E, Le Vine D M, *et al.* The determination of surface salinity with the European SMOS space mission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2004,**42**(10): 2196-2205.
- [23] Barre H M J, Duesmann B, Kerr Y H. SMOS: The Mission and the System[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,**46**(3): 587-593.
- [24] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An empirical model and a inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992,**30**(2): 370-381.
- [25] Shi J, Wang J, Hsu A Y, *et al.* Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameters using L-band SAR image data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1997,**35**(5): 1254-1266.
- [26] Staelin D H, Morgenthaler A W, Kong J A. Electromagnetic Waves[M]. New Jersey: Prentice-Hall,1994.