文章编号: 1008-830X(2011)05-0443-07

·综述·

二类水体悬浮泥沙遥感反演算法综述

孟　灵[1,2], 屈凡柱[1,2], 毕晓丽[1]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台　264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京　100049)

摘　要: 鉴于二类水体本身光学性质的复杂性及其与人类生产活动的密切关系, 利用遥感数据监测二类水体水质受到了国内外学者的普遍关注,成为海洋学领域的热点问题。悬浮泥沙含量是表征水质优劣的一个重要参数,众多研究致力于建立悬浮泥沙反演模型的研究,定量反演二类水体悬浮泥沙浓度。该文总结了近年来二类水体悬浮泥沙遥感反演算法的研究进展。悬浮泥沙定量反演模型大致可分为以下三类: 1) 利用水体光学特性和水体组分之间关系建立的经验模型; 2) 综合经验模型和物理模型构建的半分析模型; 3) 基于辐射传输模型和生物光学模型建立的物理模型。针对目前反演算法存在的主要问题,提出未来的研究需加强反射率光谱曲线研究、开发高光谱遥感数据以及综合多源数据信息等方面的内容。

关键词: 海洋二类水体; 悬浮泥沙; 遥感; 反演模型

中图分类号: TP75　　**文献标识码**: A

A Review of Retrieval Algorithms for Suspended Sediment Concentration by Remote Sensing

MENG Ling[1,2], QU Fan-zhu[1,2], BI Xiao-li[1]

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai　264003;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing　100049, China)

Abstract: The case Ⅱ waters has complicated optical characteristic and is closely related to human activities in coastal areas. Using remote sensing to monitor water quality of the case Ⅱ waters has attracted widespread attention, becoming a popular topic in the field of oceanography. Due to the importance of suspended sediment concentration (SSC) in indicating water quality, many studies have been focused on the quantitative retrieval of SSC. The inversion algorithms can be summarized as the following three categories: 1) the empirical models established by the relationship between water optical properties and water components, 2) the semi-analytic models combining the empirical models and the physical models, and 3) the physical models based on the radiative transfer theory and the biological optical theory. According to the major problems in the retrieval models, future researches should highlight the application of spectral curves, address the development

收稿日期: 2011-03-04

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-224)

作者简介: 孟灵(1987-), 女, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋遥感. E-mail: lmeng@yic.ac.cn

通讯作者: 毕晓丽. E-mail: xlbi@yic.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

of hyperspectral remote sensing data and the combination of multiple sources.

Key words: case Ⅱ waters; suspended sediment concentration(SSC); remote sensing; retrieval model

在海洋水色遥感领域中,为了研究方便,通常将海洋水体分为Ⅰ类水体和Ⅱ类水体[1]。Ⅰ类水体的光学性质主要由浮游植物及其伴生物决定的,即大洋开阔水体。Ⅱ类水体的光学性质主要由浮游植物、悬浮物质和可溶性有机物决定,既海岸带水体和受陆源排放物质影响十分强烈的河口水体[2]。Ⅱ类水体位于与人类关系最亲切、受人类活动影响最强烈的海域,其水色因子——悬浮泥沙、叶绿素和黄色物质等是影响海水水质的关键因素,也是影响海水光学特性的重要参数。其中,悬浮泥沙含量的多少直接影响水体中光照分布、水体透明度、浑浊度等光学性质,进而影响水生生态过程。悬浮泥沙也会影响河口海岸带冲淤变化过程。对于悬浮泥沙的浓度、空间变化和运移状况的研究,便于了解Ⅱ类水体生态环境变化和海岸带冲淤变化过程,对近岸工程、港口建设和岸线变迁研究等都具有重要的意义[3]。

传统的海水悬浮泥沙监测主要是依赖海上实测数据和实地水样处理,这种手段只能做到对特定时间段、某一有限区域的观测。通过这种方法获取的悬浮泥沙浓度值相对精确,但采样点的局限性难以反映整个海域的水质情况,同时这种方法也难以实现海洋水质的同步、动态监测[4]。

遥感数据本身具有周期短、空间分辨率高和覆盖范围广的优势。随着国内外多种海洋水色传感器的发射和多次海上实测活动的进行,获取的大量海洋遥感影像数据和海洋同步实测数据为悬浮泥沙浓度反演提供了可能。基于遥感数据的海洋悬浮泥沙监测能够反映不同时空尺度的浓度动态变化。因此,利用常规遥感数据、海洋水色卫星数据、高光谱数据和实测数据的悬浮泥沙浓度反演引起了众多学者的普遍关注,对于悬浮泥沙浓度定量反演方法的研究成为海洋学领域研究的热点问题[5]。

1 悬浮泥沙反演算法

国内外学者利用 MSS、TM、SPOT、SeaWiFS、CZCS、MODIS、MERIS 和 AVHRR 等影像数据并结合现场同步或准同步采样数据和实测光谱数据,针对所研究水体本身的特点,建立了很多悬浮泥沙定量反演模型。根据这些模型建立所依据的理论基础及其实测数据量的大小,将悬浮泥沙反演模型分为以下三类:经验模型、半分析模型、理论模型[5]。

1.1 经验模型

经验模型是建立在实测数据基础上的,利用实验数据集,建立悬浮泥沙浓度和水体光学性质之间的定量关系[6]。此类模型的构建通常需要海量遥感同步或准同步实测数据。海量数据包括现场用海洋水色光谱仪获取的多通道海水光谱曲线、海水表观光学特性数据(遥感反射率、离水辐亮度)、海水固有光学特性数据(吸收系数、透射系数和后向散射系数等)和大气光学特性数据(臭氧浓度、气溶胶光学厚度等)[7],以及实验室获取的由同步采样水样提取的悬浮泥沙浓度。通过测量的水体表面的光谱辐射特征和水体悬浮泥沙浓度,经验算法表达式为:

$$R_{re}=A+B*F(S) \tag{1}$$

式(1)中 R_{re} 代表某一波段处的离水辐射率或者某几个波段离水辐射率组合的某种函数关系,函数关系一般包括波度的差值、比值、以及差比混合等。A、B 为常系数,可根据实验数据得出的离水辐亮度和悬浮泥沙浓度数据求得。S 为实测水体悬浮泥沙浓度或悬浮泥沙浓度自然对数变换值,经验算法关系 F 一般包括线性关系和对数、指数、倒数、复合、幂、S 曲线等非线性函数关系[8]。

在经验模型建立过程中,将所选择的遥感参数与悬浮泥沙浓度进行回归分析,分别采用线性函数、二次多项式函数、三次多项式函数、指数函数、幂函数等对悬浮泥沙浓度和遥感参数进行拟合[8],根据实测值与反演值的拟合效果选择最优的回归函数,建立悬浮泥沙定量反演模型。

经验模型算法简单,操作起来简单便捷,适用于任何便于获取实测数据的水域。国内外很多学者都致

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力于建立经验模型反演悬浮泥沙浓度。但是经验算法本质上是区域性算法，对水体时空变化反应敏感，有区域性、阶段性和有限统计区间的限制[9]。

国外学者对于悬浮泥沙浓度反演建立的经验模型中，比较有代表性的有 GORDON 等[11-12]利用可见光波段建立的对数模型，TASSAN[13-14]建立的基于 TM 数据的三组分模型和 MILLER[15]利用北墨西哥湾的实测数据构建的线性回归模型。国内见有胡嘉敏利用 NOAA 数据建立了渤海湾海域的指数模型[4]，潘德炉等[15]利用 SeaWiFS 中 443 nm 和 555 nm 波段比建立的指数模型。WANG 等[16]利用 ETM+第四波段建立了线性关系模型。HAN 等[17]利用 CMODIS 数据反演长江悬浮泥沙浓度建立的线性关系模型。ZHOU 等[18]基于 landsat-5 TM 数据建立的多元回归模型在太湖悬砂反演中取得了较高反演精度。

1.2 半分析模型

半分析模型通过结合辐射传输模型、生物光学模型和经验方程实现水体组分的反演。半分析方法需要实测的光谱数据来建立海洋水色模型，然后通过近似关系对模型化简，减少未知量的个数和相互依赖关系，利用多波段数据获取代数方程组，求解方程组，得到水体组分浓度[10]。

半分析模型对于水体组分浓度的反演基于 Gordon 离水反射率和水体光学特性之间的关系[19]：

$$R_{rs}(\lambda) \approx \gamma \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)} \tag{2}$$

总吸收系数 a 的表达式：$a=a_w+a_g+a_d+a_{ph}$

总后向散射系数 b_b 的表达式：$b_b=b_{bw}+b_{bp}$

式(2)中：R_{rs} 为遥感反射率，λ 为波长，γ 依赖太阳角，a_w 为海水分子吸收系数，a_g 为黄色物质或可溶性有色有机物的吸收系数，a_d 为浮游植物碎屑的吸收系数，a_{ph} 为浮游植物叶绿素的吸收系数。b_b 为总后向散射系数，b_{bw} 为海水分子的后向散射系数，b_{bp} 为悬浮颗粒物的后向散射系数[20]。

根据上面的关系，建立了现在应用较广的半分析模型，主要有 Gordon 模型、负指数模型、对数模型、幂指数模型和综合模式等[21]。

1.2.1 Gordon 模型

$$R_{rs}=C\frac{S}{A+B.S} \tag{3}$$

式(3)中：R_{rs} 为光谱反射率，S 为悬浮泥沙浓度，A、B、C 均为常数。通过实测数据计算相应的 A、B、C 值。

Gordon 模型的建立经过了两层近似，并假设悬浮泥沙水体的辐射率和 $\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}$ 之间的关系是线性的而且水体光学性质完全均一，所以 Gordon 模型反演精度很低。仅适合于一些低含沙和高含沙量水体[22]。

1.2.2 负指数模型

$$R_{rs}=A+B(1-e^{-D.S}) \tag{4}$$

式(4)中：A、B、D 均为无量纲常数。

负指数模型在模型简化过程中考虑了水体光学性质的垂向变化，更接近遥感反射率随悬浮泥沙的变化趋势。负指数模型适用于各种含沙浓度水体，应用范围较广。代表性负指数模式为李京等利用 NOAA/AVHRR 像元亮度 L 建立的杭州湾模式，建立的定量反演模型为：$L=0.479-e^{-0.0126S-1.1904}$[23]。

1.2.3 对数模型

$$R_{rs}=A+B\log S \tag{5}$$

式(5)中 A、B 为与水体光学性质、太阳与传感器几何关系有关的经验参数。对数模型在低浓度含沙水体悬浮泥沙定量反演中反演精度较高，能很好反映悬浮泥沙和卫星数据之间的关系。但对于浓度较高水体，反演误差则相对较大。该模型的代表应用为利用对悬沙浓度敏感的 MSS5 和 TM3 波段建立的闽江口模型[24]：

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

MSS5 (0.6~0.7 μm): $R=0.050\ 578\ 8+0.042\ 1\times\log S$

TM3 (0.63~0.69 μm): $R=0.050\ 608\ 1+0.081\ 163\ 7\times\log S$

1.2.4 幂指数模型

$$S=[R_{rs}/(a_0-b_0\cdot R_{rs})]^d \tag{6}$$

式(6)中:a_0、b_0、d 为由经验关系得到的常数。该模型在河口海域定量反演中能取得较好的效果[21]。

1.2.5 综合模式

黎夏[25]推导出了悬浮颗粒物定量遥感的统一模式:

$$R_{rs}=Gordon(S)\cdot Index(S)=A+B[S/(G+S)]+C[S/(G+S)]e-D \tag{7}$$

式(7)中:A、B、C、G、D 为待定系数。综合模式将 Gordon 模型和负指数模型统一到一个表达式中。此模型在珠江口悬浮泥沙反演中取得了较好的效果。

半分析模型在悬浮泥沙浓度反演中精度较高。但建立半分析模型往往存在以下问题:建立算法需要更多的一致性较好且光谱逼真度高的数据集;在减少算法中的未知量中存在过多的不合理的假设;在模型参数的确定过程中需要将生物光学差异考虑在内;半分析算法不适合叶绿素浓度较高海域[21]。

1.3 理论模型

理论模型是模拟可见光在水中的传输特性建立悬浮泥沙浓度的相关关系式。理论基础为辐射传输模型和生物光学模型。

目前在悬浮泥沙浓度反演中常见的理论模型为神经网络模型、主成分分析模型和光谱混合分析模型(SMA)。

1.3.1 神经网络模型

神经网络模型是一个多元非线性的回归模型[26]。神经网络模型提供了纠正误差的逆向反馈模型,逆向反馈模型的工作原理在于函数逼近。神经网络模型最少包括三层:输入层、隐含层、输出层。输入层通常为各波段辐射值,输入层的值分发到各个节点,并在此基础上进行运算,隐含层的输出作为下一个隐含层的输入,最后输出节点即为海水组分浓度或光学变量。

神经网络模型算法主要包括两个过程:第一阶段:正向传播过程,由学习样本、网络权值 W 经过神经网络各层的输出,各个神经元的输入和输出之间的关系函数为:

$$V_i^k=f(u_i^k) \tag{8}$$

$$u_i^k=\sum_j W_{ij}V_j^{k-1} \tag{8'}$$

式(8)中:u_i^k 为第 k 层第 i 单元的输入,V_i^k 为第 k 层第 i 单元的输出,W_{ij} 为第 $k-1$ 层的第 j 的神经元到第 k 层的第 i 个神经元的权重。

第二阶段:误差反向传播过程,逐层递归计算当前输出与期望输出的差值,根据差值调整权重[27]。

平均误差函数为:$E(W_k)=\frac{1}{2}\sum_j(V_j^m-y_j)^2$ (9)

式(9)中:y_j、V_j^m 分别为第 j 个训练样本对应的期望输出值和网络输出值。

采用梯度下降法调节网络权值,$W_{k+1}=W_k+\eta\left(-\frac{\partial E}{\partial W_k}\right)$

以上两个过程不断迭代,最后使信号误差达到设定的范围之内。即可实现悬浮泥沙浓度的反演。

神经网络模型非线性迭代算法反演悬浮泥沙的精度较高,易于区域化。但神经网络的训练过程较为复杂,方法设计和训练过程需要广泛的经验。KEINER 最早将神经网络方法应用到悬浮泥沙浓度反演中,在 DELAWARE BAY 取得了较好的反演效果,其反演效果远远好于经验模型[28]。后来,国内学者也先后利用神将网络方法反演水质因子浓度,如詹海刚等[29]利用 SeaWiFS 数据和神经网络模型对于二类水体悬浮泥

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

沙浓度的反演，WANG 等[30]利用 MODIS 250 m 数据基于神经网络模型的杭州湾悬沙浓度的反演。

1.3.2 主成分分析模型

主成分分析法通过确定反演所需的光谱波段数及每一个光谱波段在反演水色组分浓度时所占的权重，通过多元回归，反演水色因子的浓度。主成分分析模型光谱维度及权重的确定主要经过以下过程：

由 n 个光谱通道测得的海水反射率值构成一个 n 维向量 $R(r_1,r_2,\cdots,r_n)$。R 的协方差矩阵可表示为 $V^{-1}SV=\phi$，其中 V 为 $n\times n$ 的正交矩阵，通过正交变换构成新向量：$Z=V'R$。对于 V 的求解归结为求解样本原变量 R 的协方差矩阵 S 的特征问题，即为求解方程：$(S-\lambda I)V=0$。

利用 Jacobi 法可求 S 的的特征值以及对应的特征向量。根据式 $Z=V'R$ 即可求得主因子权重。然后通过多元回归，建立由主成分反演水色要素的模式：

$$\log c=A_0+A_1Q_1+\cdots+A_k\cdot Q_k \tag{10}$$

式(10)中：Q_i 为权重因子，A_i 为回归系数。

主成分模型是一种线性算法，运算简单、稳定、快捷，且无需进行大气校正，但主成分分析法依赖于先验模拟数据系列的训练，建模。曹文熙等[31]利用主成分分析法提取南海海域水色因子，悬浮泥沙的反演精度高达 0.91。

1.3.3 光谱混合分析模型(SMA)

光谱混合分析(Spectral mixture analysis，SMA)是一种基于模拟影像波谱为线性端元组合的技术。遥感图像、现场实测或实验室测量获取的反射率数据作为 SMA 端元值。该模型利用虚拟端元，采用最小二乘法计算像元分解优化因子，根据一定的先验知识，有效地选择亚像端元进行光谱分解[32]。优化因子的计算如下：

$$R_b=\sum_{i=1}^{n}F_iR_{i,b}+E_b \tag{11}$$

$$\sum_{i=1}^{n}F_i=1 \tag{11'}$$

式(11)中：R_b 为遥感影像 b 波段反射率，F_i 为端元优化因子，$R_{i,b}$ 为第 i 个端元 b 波段遥感反射率，n 为端元数，E_b 为遥感影像 b 波段反射率误差值。单一像元均方根误差为：

$$\varepsilon=\left[N^{-1}\sum_{b=1}^{n}E_b^2\right]^{1/2}$$

MERTES 等[33]最早将 SMA 应用在悬浮泥沙浓度反演中，基于 TM 数据反演了 Amazon River 悬沙浓度。现 SMA 模型以被越来越多的学者采用和发展。WARRICK 等[32]针对 SeaWiFS 多波段遥感数据，利用 SMA 模型反演 Santa Barbara Channel 悬沙浓度，获取了较高精度的悬浮泥沙分布图。KAMEYAMA 等[34]利用 WTI 数据基于 SMA 模型反演日本北海道 Kushiro Mire 悬浮泥沙浓度。但 SMA 模型在我国悬浮泥沙反演研究中尚未应用。

2 悬浮泥沙浓度反演算法的问题与改进建议

悬浮泥沙浓度的定量反演具有重要意义，但是由于受到二类水体本身复杂性和含沙水体光谱响应不仅取决于悬沙浓度，而且还与泥沙的颜色、类型、颗粒大小和矿物组成以及水体中叶绿素和有色可溶性有机物等有着密切关系[35]的限制，导致悬沙浓度定量反演精度较低，而且所建立的模型只能限定在某一特定海域。近几年，在悬沙浓度反演研究中，众多学者大多采用基于实测数据的经验模型，模型创新不足。为了提高模型反演精度和普适性，对未来悬沙浓度反演模型的发展，有如下建议：

1) 对于大气校正算法的深入研究。一幅遥感影像中获取的水体辐射信息仅占 10%左右。因此探寻更为精确地大气校正模型，尽可能的消除大气作用对反演精度的影响[36]。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2) 含沙水体的光谱发射特征是建立遥感信息和悬浮泥沙浓度之间定量化模型的基础。加强光谱实验方面的分析,了解不同水体环境、泥沙条件下的水体光谱规律。实验表明不同含沙量水体光谱曲线存在较大差异。悬浮泥沙浓度较小时,遥感反射率光谱仅存在一个位于黄光波段(560~590 μm)的峰值。当悬沙浓度较高时,遥感反射率光谱出现两峰值,位于黄光波段(560~590 μm)的主峰和位于近红外波段(760~1 100 um)的次主峰[35]。且随着悬沙浓度的增加,光谱曲线会出现"红移现象"。因此,对于反射率光谱曲线深入的研究,对于模型反演波段选择和波段之间的组合关系的选取具有重要意义。

3) 开发挖掘高光谱遥感数据,连续的高光谱曲线为光谱的导数分析提供了可能,利用导数光谱技术构建悬浮泥沙浓度反演模型[37],为未来悬浮泥沙模型构建的一个创新点。

4) 充分利用多种遥感数据源,多源遥感数据分析和实地同步实验数据相结合,对悬浮泥沙定量化提取模式和定量估算模型进行研究,可以综合多元数据的空间信息和波谱信息[38],提高模型反演的精度。

参考文献:

[1] MOREL A, PRIEUR L. Analysis of variations in ocean color[J]. Limnology and oceanography, 1977, 22: 709-722.

[2] 巩彩兰, 樊 伟. 海洋水色卫星遥感二类水体反演算法的国际研究进展[J]. 海洋通报, 1977, 21(2): 77-83.

[3] 高中灵. 台湾海峡 MERIS 数据悬浮泥沙与叶绿素浓度遥感分析[D]. 福州: 福州大学, 2006.

[4] JIANG X W, TANG J W, ZHANG M W el al. Application of MODIS data in monitoring suspended sediment of Taihu Lake, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(3): 614-620.

[5] ZHANG M W, TANG J W, DONG Q, el al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. Remote sensing of Environment, 2010, 114: 392-403.

[6] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 363-370.

[7] 修 鹏. 渤海海域水色遥感的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

[8] 邬国锋, 崔丽娟, 纪伟涛. 基于时间序列 MODIS 影像的鄱阳湖丰水期悬浮泥沙浓度反演及变化[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 288-297.

[9] 张彦喆, 郑小慎, 张 波. 渤海海域叶绿素浓度的遥感反演研究[J]. 天津科技大学学报, 2010, 25(1): 51-53.

[10] 陈 淼. 海洋水色卫星遥感算法综述[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.

[11] GORDON H R, BROWN O B, EVANS R H, el al. A semi-analytical radiance model of ocean color[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 10 909-10 924.

[12] GORDON H R, MOREL A. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review[J]. New York: Springer Verlag, 1983.

[13] TASSAN S. An improved in-water algorithm for the determination of chlorophyll and suspended sediment concentration from Thematic Mapper data in coastal waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14: 1 221-1 229.

[14] TASSAN S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. Applied Optics, 1994, 33(12): 2 369-2 378.

[15] 潘德炉, 毛天明, 李淑菁, 等. 卫星遥感监测我国沿海水色环境的研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 240-246.

[16] WANG J J, LU X X, ZHOU Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52: 273-280.

[17] HAN Z, JIN Y Q, YUN C X. Suspended sediment concentrations in the Yangtze River estuary retrieved from the CMODIS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27: 4 329-4 336.

[18] ZHOU W, WANG S, ZHOU Y, et al. Mapping the concentrations of total suspended matter in Lake Taihu, China, using Landsat-5 TM data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27: 1 177-1 191.

[19] DOXARAN D, FROIDEFOND J-M, LAVENDER S, el al. Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 149-161.

[20] 万幼川, 黄家洁, 刘良明. 基于 MODIS 数据的二类水体叶绿素反演算法理论与实现[J]. 武汉大学学报, 2007, 32(7): 572-575.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[21] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.

[22] 刘志国, 周云轩, 蒋雪中, 等. 近岸II类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 321–326.

[23] 李　京. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 数据监测杭州湾海域的悬浮泥沙含量[J]. 海洋学报, 1987, 9(1): 132–135.

[24] 李四海, 恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J]. 遥感学报, 2000, 5(2): 154–160.

[25] 黎　夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用[J]. 环境遥感, 1992, 7(2): 106–114.

[26] 唐军武, 丁　静, 田纪伟, 等. 黄东海二类水体三要素浓度反演的神经网络模型[J]. 高技术通讯, 2005, 15(3): 83–88.

[27] 黄海清, 何贤强, 王迪锋, 等. 神经网络法反演海水叶绿素浓度的分析[J]. 地球信息科学, 2004, 6(2): 31–36.

[28] KEINER L E, YAN X–H. A Neural Network Model for Estimating Sea Surface Chlorophyll and Sediments from Thematic Mapper Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66: 153–165.

[29] 詹海刚, 施　平, 陈楚群. 利用神经网络反演海水叶绿素浓度[J]. 科学通报, 2000, 45(17): 1 879–1 884.

[30] WANG F, ZHOU B, XU J M, el al. Application of neural network and MODIS 250m imagery for estimating suspended sediments concentration in Hangzhou Bay, China[J]. Environmental Geology, 2007, 56: 1 093–1 101.

[31] 曹文熙, 钟其英, 杨越忠. 南海水色遥感的主因子分析[J]. 遥感学报, 1999, 3(2): 112–115.

[32] WARRICK J A, MERTES L A K, SIEGEL D A. Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25: 1 995–2 002.

[33] MILTON L A K, SMITH M O, ADAMS J B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43: 281–301.

[34] KAMEYAMA S, YAMAGATA Y, NAKAMUR A F, el al. Development of WTI and turbidity estimation model using SMA––application to Kushiro Mire, eastern Hokkaido, Japan[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77: 1–9.

[35] 樊　辉, 黄海军, 唐军武. 黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测[J]. 武汉大学学报, 2007, 32(7): 601–604.

[36] 丛丕福. 海洋叶绿素遥感反演及海洋初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.

[37] 史合印, 邢前国, 陈楚群, 等. 基于导数光谱的混浊河口水体叶绿素浓度反演[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(4): 575–578.

[38] NECHAD B, RUDDICK K G, PARK Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 854–866.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net