

南海水色遥感的主因子分析^{*}

曹文熙 钟其英 杨跃忠

(中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

摘 要 分析了叶绿素、黄色物质和无机悬浮颗粒等要素对海水光谱反射率的贡献,并由这些要素的光学特性正演光谱反射率,与实测结果符合较好。在此基础上,利用主成分分析方法,通过对光谱反射率数据的特征向量变换和主因子回归,建立了反演南海海水叶绿素和溶解有机碳的遥感算法。与实测结果的比较表明,叶绿素和溶解有机碳的相对误差分别达 17.5% 和 37.4%。

关键词 水色, 遥感算法, 主因子分析, 南海

1 引 言

设 R 是由 n 个光谱通道测得的海水光谱反射率,它是海水中叶绿素、无机悬浮颗粒、黄色物质等水色要素的函数,可表示为:

$$R = f(c_i) \quad (1)$$

其中 $c_i (i=1, 2, 3)$ 分别为叶绿素、无机悬浮颗粒和黄色物质的浓度; $f(c_i)$ 是与海水光学特性有关的函数。通常采用最小二乘法由(1)式反演水色要素含量,2 个波段组合的生物-光学算法基本形式为

$$c_i = \sum A \cdot I_{xy}^B \quad (2)$$

其中 r_{xy} 为 x 波段和 y 波段光谱反射率的某种组合(如比值、和、差等); A, B 是由具体海区生物-光学特性决定的回归参数。

CZCS(海岸带水色扫描仪)遥感数据的应用经验表明,2 个波段算法存在较大的局限性。这主要是由于在海水中,各种物质成分的光谱信息叠加在一起,除浮游植物外,无机悬浮颗粒及黄色物质对离水辐射的作用同样重要。随着新一代水色遥感器如 SeaWiFS 及中分辨率成像光谱仪(MODIS)光谱通道的增加,研究新一代的生物-光学算法,充分利用各光谱通道的有效信息,便有了十分现实的意义^[1]。

利用主因子分析方法,探讨由高光谱信息反演水色要素含量的算法模式。

2 海水反射率光谱特征

2.1 理论分析

海水反射率定义为水中上行辐照度 $E_u(\lambda)$ 与下

行辐照度 $E_d(\lambda)$ 的比,即 $R(\lambda) = E_u(\lambda)/E_d(\lambda)$ 。对于给定的波长 λ , 海水反射率 $R(\lambda)$ 是水体吸收系数 $a(\lambda)$ 和后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 的函数,其函数形式可由辐射传输理论确定。在考虑水平均匀海水的情况下,式(1)可近似地表示为^[2]:

$$R(\lambda) = 0.33 \cdot \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (3)$$

海水光学参数 $a(\lambda)$ 及 $b_b(\lambda)$ 取各种物质贡献的总和:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + c \cdot a_c(\lambda) + X \cdot a_x(\lambda) + Y \cdot a_y(\lambda) \quad (4)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw} \cdot b_w(\lambda) + b_{bc} \cdot b_c(\lambda) + b_{bx} \cdot b_x(\lambda) \quad (5)$$

式中 c 是以叶绿素为表征的浮游植物浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), X 是悬浮颗粒浓度,以其相应的散射系数表示(m^{-1}), Y 是黄色物质浓度,以其相应的吸收系数表示(m^{-1}); a_w 为纯水的吸收系数(m^{-1}), a_c 为浮游植物的比吸收系数($\text{m}^{-1}(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$), a_x 为悬浮颗粒的比吸收系数(无量纲), a_y 为黄色物质的比吸收系数(无量纲); b_w 为海水的体散射系数(m^{-1}), b_c 为浮游植物的体散射系数(m^{-1}), b_x 为悬浮颗粒的体散射系数(m^{-1}); b_{bc} , b_{bw} 及 b_x 分别为浮游植物、海水和悬浮颗粒的后向散射与总散射之比。图 1 为各种水色要素的吸收系数^[3]。

2.2 海上试验

1993 年 12 月和 1994 年 9 月,对南海南部海区进行了 2 个航次的海上生物-光学试验,试验海区为

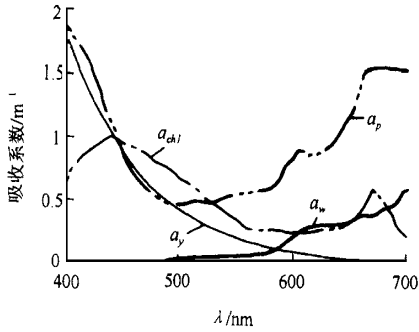


图 1 水色成分的光谱吸收系数

Fig. 1 Spectral absorption of the colored matters

4°30′-11°50′N, 108°00′-116°45′E, 共 53 个生物-光学同步测站。海水光学参数用 OMS-1 光学剖面仪测量, 测量深度为 200 m, 测量步距为 1 m; 用多瓶采水系统同步采集水样, 采样层次为 0, 10, 25, 50, 75, 100, 150 m; 用分光光度法分析叶绿素 a 含量, 用过硫酸法分析 DOC (溶解在海水的有机碳) 含量。

对实测数据的计算分析表明, 试验海区海水光谱反射率有 4 种类型^[4]。由式(3)正演所得的海水光谱反射率与实测结果均符合得很好, 结果如图 2, 其中(a)为实测结果, (b)为模型计算结果。

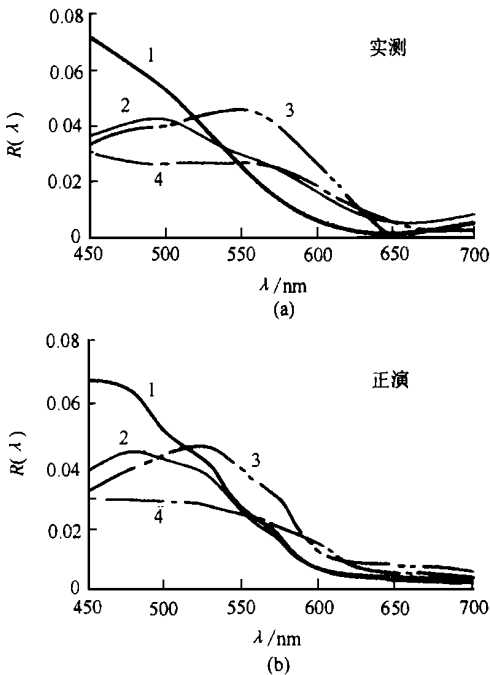


图 2 海水光谱反射率

Fig. 2 Spectral reflectance of sea water

3 基于主成分分析的反演算法

3.1 特征向量变换

由 n 个光谱通道测得的海水反射率构成一个 n 维向量 $R(r_1, r_2, \dots, r_n)$, 则 R 的协方差矩阵 S 可精确地表示为 $P^{-1}SP = \Phi$, 其中 P 是 $n \times n$ 的正交矩阵, 可通过正交变换构成新的向量:

$$Z = P^{-1}R \quad (6)$$

正交矩阵是待定的, 这可归结为求解下列本征方程:

$$|(S - \lambda E)| = 0 \quad (7)$$

一般地, n 阶矩阵有 n 个特征值和 n 个特征向量。分析表明, 对方差的贡献主要来自前若干个最大的特征值, 因此, 不必求解出所有的特征向量。可选择 k , 其中 $k < n$, 使得误差在均方差意义上达到最小。

3.2 主因子回归

通过(6)式的特征向量变换, 为此, 只要确定了各主成分的“权重因子”, 则可通过多元回归, 建立下列形式的由主成分反演水色要素的模式:

$$\log c = A_0 + A_1 \cdot Q_1 + \dots + A_k \cdot Q_k \quad (8)$$

式中 $Q_i (i=1, 2, \dots, k)$ 为第 i 个主成分的“权重因子”, 或称第 i 个主成分的标量算子。 $A_i (i=0, 1, 2, \dots, k)$ 为回归系数。文中设定对方差的贡献为 99.8%, 用幂法求模最大的特征值和特征向量。计算结果表明, 前 3 个最大的特征值对方差的贡献达 99.5%, 其相应的特征向量如图 3。对主因子特征向量谱的“权重因子”和水色要素含量做多元线性回归, 可得叶绿素、黄色物质和无机悬浮物的反演模式, 结果如表 1。

3.3 误差分析

海水中黄色物质的化学成分十分复杂, 其主要成分是溶解在海水的有机碳(DOC), 因此, 常用 DOC 代替黄色物质来做研究^[5]。调查期间, 我们对叶绿素 a 和 DOC 进行了同步测量。图 4 给出了模型反演结果和实测结果的比较。对于叶绿素, 反演结果与实测结果的相对误差为 17.5%; 对于 DOC, 反演结果与测结果的相对误差为 37.4%; 均得到了较好的结果。

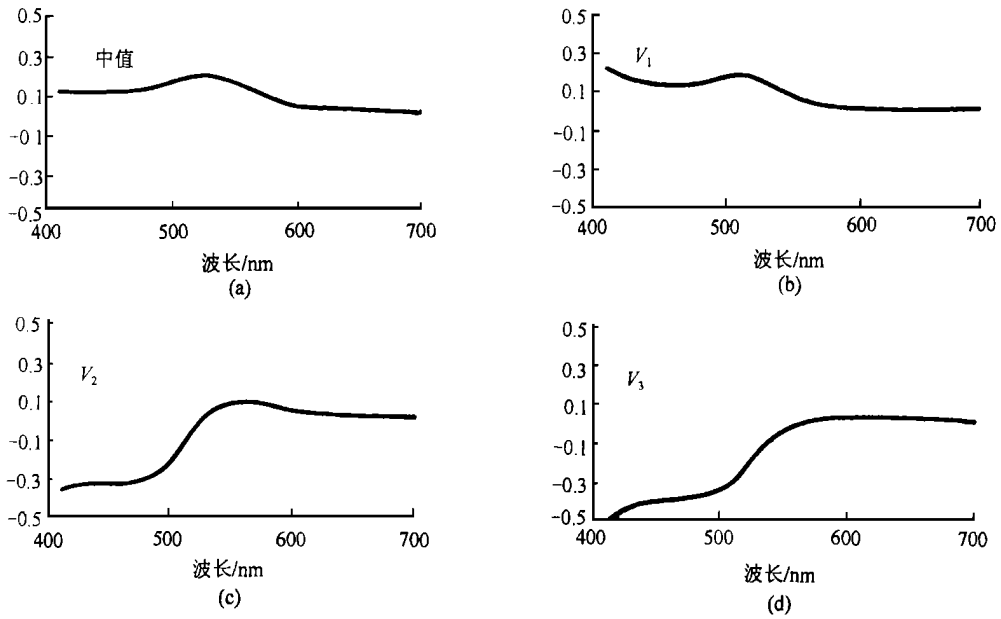


图 3 均值向量和前 3 个特征向量

Fig. 3 Mean and the first three characteristic vectors

表 1 主因子与叶绿素 (Chl)、黄色物质 (Y) 及悬浮颗粒 (D) 含量的相关系数

Table 1 The regression coefficients between principal component and the variables $\log(\text{Chl})$, $\log(Y)$ or $\log(D)$

水色要素含量	A_0	A_1	A_2	A_3	相关系数
$\log(\text{Chl})$	-1.023	-14.516	20.109	17.374	0.932
$\log(Y)$	-0.562	-0.143	2.249	-1.387	0.894
$\log(D)$	-0.689	4.973	11.552	3.571	0.910

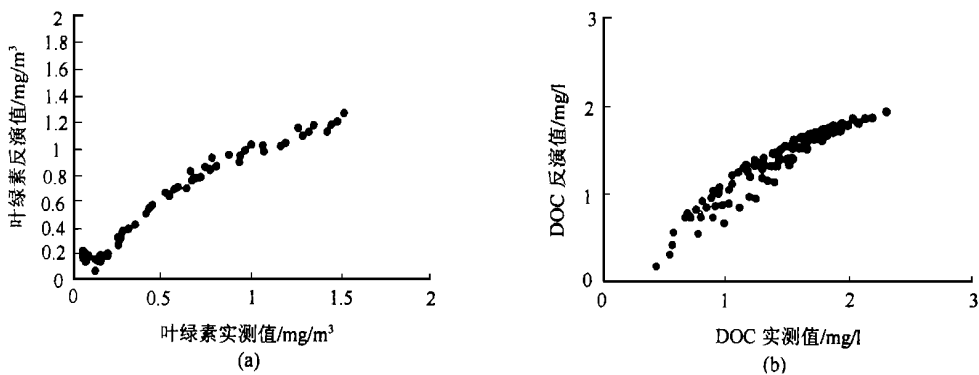


图 4 模型反演结果与实测结果的比较

Fig. 4 Comparison between the measured values of Chl and Y and their values calculated by algorithms

4 结 语

对南海海水反射率光谱特征进行了理论分析, 用叶绿素、黄色物质和无机悬浮颗粒等要素的光学

特性正演光谱反射率, 与实测结果符合较好。在此基础上, 利用主成分分析方法, 通过对光谱反射率数据的特征向量变换和主因子回归, 建立了反演南海海水叶绿素和溶解有机碳的遥感算法。与实测结果比较表明, 叶绿素和溶解有机碳的相对误差分别

达 17.5% 和 37.4%, 获得了较高的反演精度。该算法的特点是充分利用各光谱波段的有用信息, 而不是仅仅利用某一两个波段信息做简单的回归, 这对新一代水色遥感器(如 SeaWiFS, MODIS 等)在南海的应用及算法的开发展示了可喜的前景。

参 考 文 献 (References)

- 1 Gower J F, Lin S Borstad G A. The information content of different optical spectral ranges for remote chlorophyll estimation in coastal waters. *Int. J. Remote Sensing*, 1984, 5
- 2 Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Appl. Opt.*, 1975, 14: 417—427.
- 3 Prieur L, Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption of phytoplankton pigment, dissolved organic matter and other particulate materials. *Limnol.*

ol. Oceanogr. 1981, 26: 671—689.

- 4 Cao Wenxi, Yang Yuezhong, Lu Guixin, et al. A study on bio-optical models for euphotic layer of Nansha Islands sea area. edited by Huang Liangmin. In: A study on ecological processes of Nansha Islands sea area. Beijing: Science Press, 1997, 98.
- 5 Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (Yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnol. Oceanogr.*, 1981, 26: 43—53.

作 者 简 介

曹文熙,男,1963年3月生,副研究员。1992年在中国科学院长春光学精密机械研究所获硕士学位。主要从事海洋光学、光辐射测量和水色遥感技术研究,目前主要从事国家九五攻关“南沙海区声光场特性分布及应用研究”、海洋863计划“海面海水层光学测量系统”和“海洋光学遥感信息应用技术研究”等课题的研究工作。已发表论文10多篇,合作出版论文专著2本。

Principal Component Analysis for Ocean Color Remote Sensing in South China Sea

CAO Wen-Xi ZHONG Qi-Ying YANG Yue-Zhong
(South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301)

Abstract A three component ocean color model for South China Sea is presented, which takes into account the contributions of chlorophyll, yellow substance and inorganic particles. It is then used to simulate the spectral reflectance just below sea surface based on optical properties of these colored matters. The reflectance spectra are also calculated from in situ measured downwelling and upwelling irradiance. The simulated spectra are validated by the comparison with those measured in situ.

Principal component analysis is carried out on a large number of reflectance spectra, and it is used to develop the retrieval algorithms of chlorophyll and dissolved organic carbon. The results indicated that the retrieval accuracy of chlorophyll and dissolved organic carbon is 17% and 37.4% respectively. It appears possible that this full spectral method can improve ocean color remote sensing accuracy.

Key words Water color, Remote sensing, Principal component, South China Sea.