

文章编号: 1007-4619(2007)03-0398-08

# 基于神经网络的二类水体大气修正

孙 凌<sup>1</sup>, 张 杰<sup>2</sup>, 郭茂华<sup>3</sup>

(1. 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 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 国家海洋局 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 国家海洋局 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

**摘 要:** 大气修正是海洋水色遥感中的关键技术之一。近海二类水体大气修正面临两个挑战: 浑浊水体造成 NIR 大气修正波段的离水辐射明显大于零; 近海上空存在较强吸收性的气溶胶。本文针对 HY-1A CZI 在辐射传输模拟的基础上建立了基于神经网络技术的二类水体大气修正算法, 可以由波段 1—4 的 TOA 反射率和三个角度反演得到离水反射率、气溶胶光学厚度等参数。利用模拟数据进行了算法的性能评估, 并开展了卫星数据处理试验。结果表明, 除了在非常浑浊的水体, 反演结果基本合理。

**关键词:** 大气修正; 二类水体; 神经网络; HY-1A CZI 6S

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Atmospheric Correction over Case<sub>2</sub> Waters Using Neural Network

SUN Ling, ZHANG Jie, GUO Mao-hua

(1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration (IRCVES/MA), National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

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

3. National Satellite Oceanic Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract** Atmospheric correction is one of the key techniques in ocean color remote sensing. Over case<sub>2</sub> waters near shore, atmospheric correction meets two challenges: the nonzero water leaving radiances in NIR atmospheric correction bands caused by turbid water, aerosol with strong absorption over nearshore regions. In this paper, based on radiative transfer simulations and neural network techniques, an atmospheric correction algorithm is established for HY-1A CZI in case<sub>2</sub> waters. Water leaving reflectance and aerosol optical depths can be retrieved from TOA reflectance of band 1 to 4. The algorithm performance is evaluated using simulated data. Satellite data processing experiment shows that the retrieved result seems reasonable except for very turbid waters. **Key words:** atmospheric correction, case<sub>2</sub> waters, neural network, HY-1A CZI 6S

## 1 引 言

海洋上空的可见光波段大气顶 (TOA) 信号中约有 80%—100% 是大气散射的贡献, 提取自水体后向散射出的信号 (水色) 需要精确的去除大气的干扰, 这一处理过程称之为大气修正<sup>[1]</sup>。

在大洋一类水体, 基于暗像元假设的大气修正算法已基本成熟<sup>[2-5]</sup>。但是, 在近海二类水体, 大气修正面临两个挑战: 浑浊水体造成大气修正波段的离水辐射明显大于零; 近岸海域上空存在吸收性较强的气溶胶。

神经网络技术作为一种多参数非线性回归方法在大气修正方面具有良好的应用潜力<sup>[6-8]</sup>。

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 国家计委“HY-1 卫星地面应用系统”资助。

作者简介: 孙 凌 (1977—), 女, 博士, 助研。2005 年毕业于中国科学院海洋研究所物理海洋专业。现主要从事海洋水色、气溶胶遥感研究, 已发表论文 10 余篇。E-mail: sunling@nsmc.cma.gov.cn

本文针对 HY-1 A CZI 利用模拟数据和神经网络模型建立了一个二类水体大气修正算法, 并在中国近海进行了初步应用。

### 2 模拟数据集

对于朗伯均匀表面, 忽略大气与水体间的连续反射和散射效应, 以及海面白帽和耀斑反射等因素, 在大气窗区  $\lambda$  波长上传感器测量的总反射率  $\rho_t^{TOA}$  可简化为 (省略了角度):

$$\rho_t^{TOA}(\lambda) = \rho_w(\lambda) \times T_{ra}^{\uparrow}(\lambda) \times T_{ra}^{\downarrow}(\lambda) + \rho_{am}^{TOA}(\lambda) \quad (1)$$

$$\rho_{am}^{TOA}(\lambda) = [\rho_{mix}(\lambda) - \rho_r(\lambda)] \times T_g^{\uparrow}(\lambda) + \rho_r(\lambda) \times T_{g\_nH_2O}^{\uparrow}(\lambda) \quad (2)$$

由公式 (1) 和 (2) 可得:

$$\begin{aligned} & [\rho_t^{TOA}(\lambda) - \rho_r(\lambda) \times T_{ra}^{\uparrow}(\lambda) \times T_{ra}^{\downarrow}(\lambda)] / T_g^{\uparrow}(\lambda) \\ &= \rho_w(\lambda) \times T_{ra}^{\uparrow}(\lambda) + [\rho_{mix}(\lambda) - \rho_r(\lambda)] \\ &\equiv \rho_w(\lambda) \times T_{ra}^{\uparrow}(\lambda) + \rho_A(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\rho_w$  为由于水体后向散射而自海面出射的离水反射率 (离水辐亮度与水面上下行辐亮度的比值);  $\rho_{am}^{TOA}$  为到达传感器的大气固有反射率;  $T_{ra}$  为瑞利 + 气溶胶混合大气的散射透过率;  $T_g^{\uparrow}$  为总气体吸收透过率;  $T_{g\_nH_2O}^{\uparrow}$  为不考虑水汽时的总气体吸收透过率;  $\rho_r$  为不考虑吸收气体时纯瑞利大气的反射率;  $\rho_{mix}$  为不考虑吸收气体时瑞利 + 气溶胶混合大气的反射率;  $\rho_A = \rho_{mix} - \rho_r$  为混合大气反射率去除纯瑞利散射后的部分 (主要是气溶胶的贡献)。由公式 (3), 从总信号  $\rho_t^{TOA}$  中去除瑞利散射和气体吸收的影响可得进行气溶胶修正处理的量:  $\rho_w \times T_{ra} + \rho_A$ 。神经网络方法大气修正试验只需模拟经过瑞利和气体吸收修正的 TOA 反射率  $\rho_w \times T_{ra} + \rho_A$  即可。为了记述简便, 将  $\rho_w \times T_{ra} + \rho_A$  用  $\rho_{ir}$  表示。

#### 2.1 大气辐射传输模拟

采用 6 S 模型计算用以构造模拟数据集的  $\rho_A$ ,  $T_{ra}$  和气溶胶光学厚度  $\tau_a$  等。计算参数如下:

- 550 nm 气溶胶光学厚度  $\tau_a(550)$ : 0.05 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 和 0.6
- 观测几何: 卫星天顶角  $\theta_v$  为  $0^\circ - 40^\circ$  (8° 间隔), 太阳天顶角  $\theta_0$  为  $0^\circ - 64^\circ$  (8° 间隔), 相对方位角  $\Delta\phi$  为  $0^\circ - 180^\circ$  (20° 间隔)。
- 波段: 波段 1-4 的波长范围分别取 403-557 nm, 510-628 nm, 589-724 nm 和 700-1000 nm。
- 大气: 1962 美国标准大气。
- 气溶胶: MARS, BDM, OCEA, MAR1, MAR2 和

MAR4。表 1 列出了气溶胶模型的相关信息。图 1-图 3 分别给出了 1 波段的气溶胶散射相函数、归一化的气溶胶光学厚度和单次散射反照率。

表 1 研究中采用的 6 种气溶胶模型  
Table 1 Aerosol models used in the research

模型简称	标准辐射大气中 4 种成分的容积百分比				说明
	沙尘性	水溶性	海洋性	煤烟	
MARS	0	0.05	0.95	0	6S 中的海洋气溶胶
OCEA	0	0	1	0	自定义
MAR1	0	0.02	0.98	0	自定义
MAR2	0	0.1	0.9	0	自定义
MAR4	0.12	0.28	0.6	0	自定义
BDM	/	/	/	/	6S 中的 Shettle 的背景沙漠气溶胶

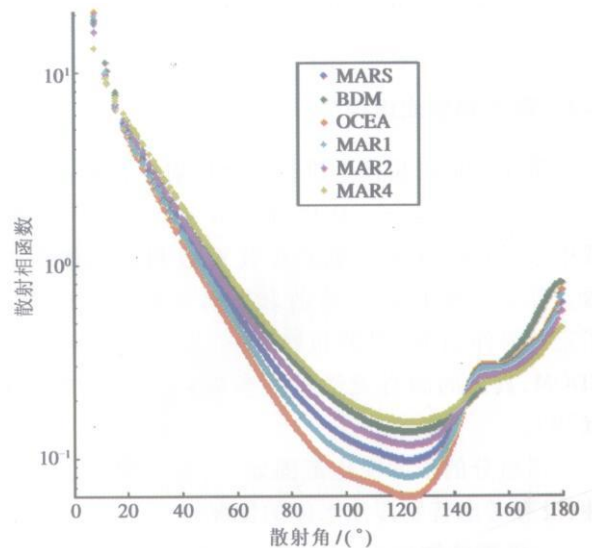


图 1 气溶胶散射相函数

Fig 1 Aerosol scattering phase function

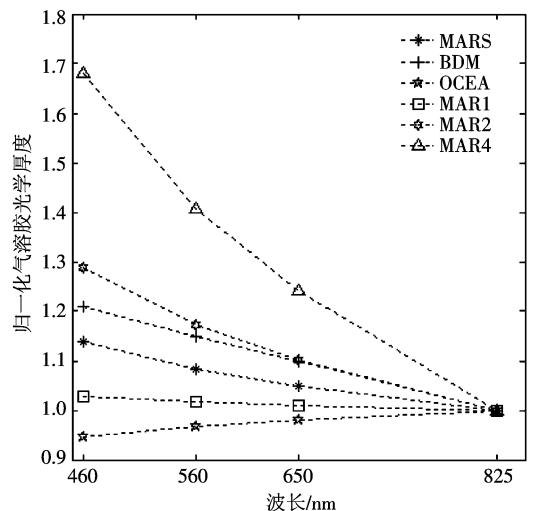


图 2 归一化气溶胶光学厚度

Fig 2 Normalized aerosol optical thickness

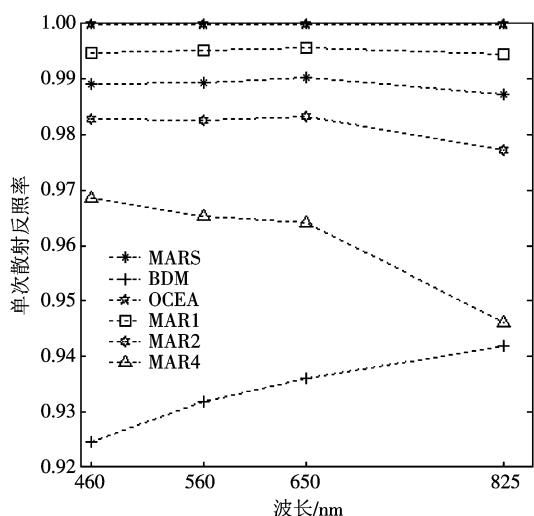


图 3 气溶胶单次散射反照率

Fig 3 Aerosol single scattering albedo

## 2.2 离水辐射光谱模拟

采用近似解析模型进行离水反射率计算:

$$\rho_w = \pi \times 0.052 b_b / (a + b_b) \quad (4)$$

式中,  $a$  和  $b_b$  分别为总的吸收系数和后向散射系数。除了纯水以外, 吸收和散射系数计算时考虑了三种海洋组分: 浮游植物色素、总悬浮颗粒物和 CDOM, 具体的固有光学特性参数化方案可参见文献 [9]。

三分组的浓度变化范围如下 (鉴于模型的适用性, 没有考虑特别浑浊水体的情况):

- 浮游植物色素  $CHL_2$ : 0.05—50 mg/m<sup>3</sup>
- 总悬浮颗粒物  $SPM_1$ : 0.05—50 g/m<sup>3</sup>
- 黄色物质浓度  $a_y(400)$ : 0.005—1 m<sup>-1</sup>

对于三个浓度变量, 在自然对数范围内进行 4 等分, 得 5<sup>3</sup> 个浓度组合, 针对 125 个浓度组合模拟得到海表面出射的反射率  $\rho_w$  (波段光谱范围同节 2.1)。

## 2.3 三类模拟数据集

• 从 6 种气溶胶模型中选择几种, 在模拟数据中对角度进行随机抽样, 选出约 80% 的样本构成训练数据。

• 其他约 20% 的样本构成检验数据, 用以监视网络性能, 防止发生“过训练”。

• 从剩余气溶胶模型中进行选择, 构成独立测试数据。

每个样本数据具有 7 个输入元素 ( $\rho_{in}(\lambda_1)$ ,

$\rho_{in}(\lambda_2)$ ,  $\rho_{in}(\lambda_3)$ ,  $\rho_{in}(\lambda_4)$ ,  $\theta_v$ ,  $\theta_0$ ,  $\Delta\phi$ ) 和 10 个输出元素 ( $\rho_w(\lambda_1)$ ,  $\rho_w(\lambda_2)$ ,  $\rho_w(\lambda_3)$ ,  $\rho_w(\lambda_4)$ ,  $\delta(\lambda_1)$ ,  $\delta(\lambda_2)$ ,  $\tau_a(\lambda_1)$ ,  $\tau_a(\lambda_2)$ ,  $\tau_a(\lambda_3)$ ,  $\tau_a(\lambda_4)$ )。

## 3 大气修正网络构建

采用 Stuttgart Neural Network Simulator (SNN) V4.2 软件进行网络设计与训练。

### 3.1 网络结构

采用具有 2 个隐含层的全连接前馈后向传递网络。与数据集中样本的维数相对应, 输入层为 7 个单元, 输出层为 10 个单元。第一隐含层为 30 个单元, 第二隐含层为 20 个单元。隐含层和输出层的传递函数都采用逻辑函数。

### 3.2 网络训练

以预设循环次数 (Epoch) 作为训练截止条件。在训练过程中用检验数据监视网络性能, 保证训练截止时检验数据与训练数据的误差水平相当且较小。

采用 5 种气溶胶模型 (MARS, BDM, OCEA, MAR1 和 MAR2) 的数据在 Epoch=200 时训练得到大气修正网络模型。

## 4 大气修正网络性能评估

采用 3 个指标反映网络模型的反演值与真实值的差异: 相关系数  $R^2$ , RMSE, 相对误差在  $\pm 15\%$  范围内的数据占总数据量的比重。

### 4.1 训练和检验数据的反演结果

模拟训练数据集与模拟检验数据集的反演效果相当。以训练数据为例, 图 4 给出了同时处理 5 种气溶胶模型 (MARS, BDM, OCEA, MAR1 和 MAR2) 时模型反演的部分参量与对应的辐射传输模拟输入参量的散点图。可以看出, 网络模型的反演是成功的。

### 4.2 独立测试数据的反演结果

采用 MAR4 气溶胶模型的模拟数据 ( $N=472500$ ) 作为测试数据。图 5 为模型反演的各参量与对应的辐射传输模拟输入参量的散点图。尽管测试数据未参与网络模型的建立过程, 也可以得到基

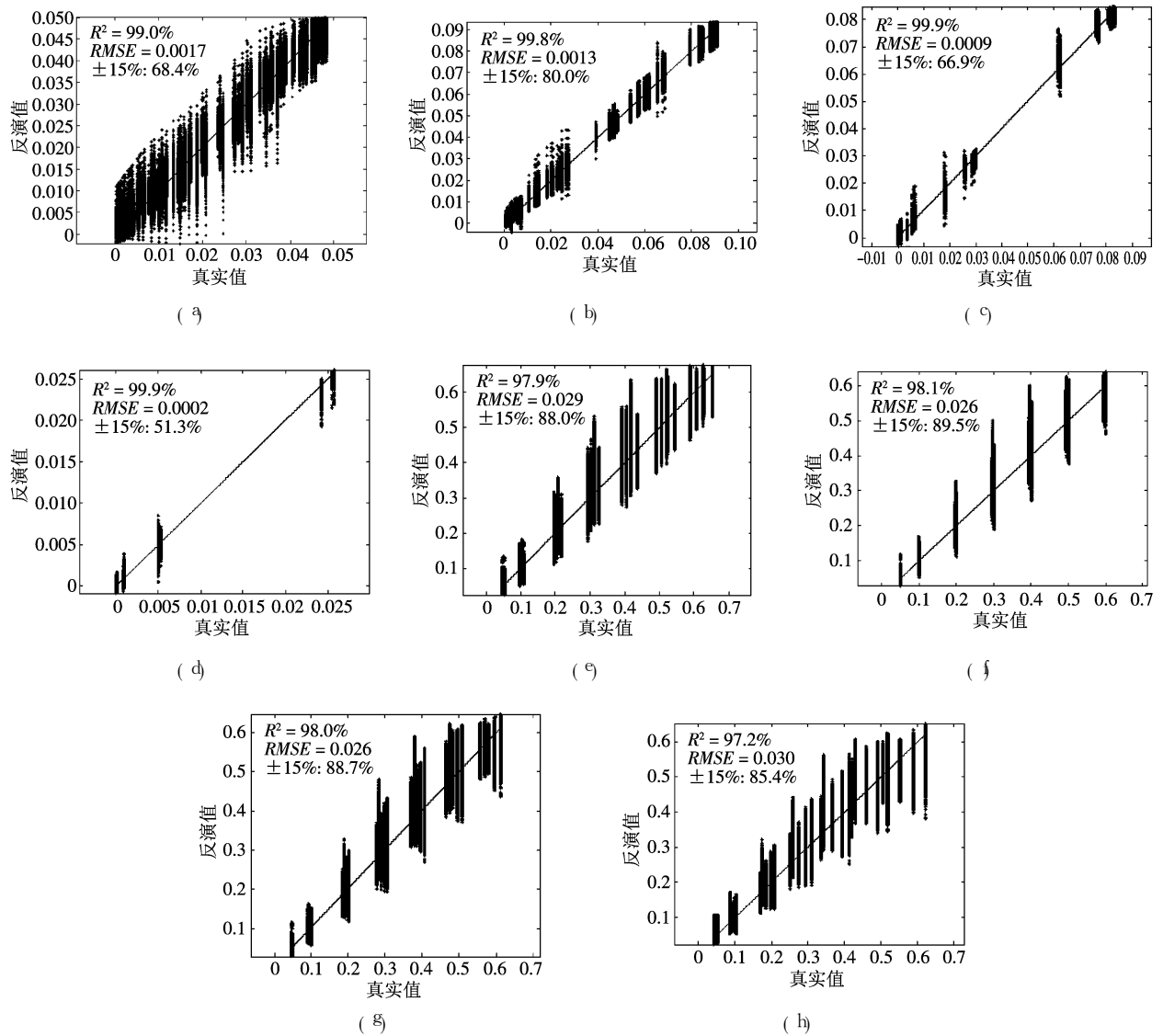


图 4 采用训练数据时 NN模型反演结果与对应的辐射传输模拟输入参量的比较 (N= 1281875)

(a)–(d) 为 4 个波段的  $\rho_w$ , (e)–(h) 为 4 个波段的  $\tau_a$

Fig 4 Scatter plot between NN model retrieved variables and input values of radiative transfer simulation using training data (N= 1281875)

(a)–(d) are  $\rho_w$  of 4 bands, (e)–(h) are  $\tau_a$  of 4 bands

本满意的反演结果, 部分参量的反演与网络训练时的差别不大, 表明网络模型具有较好的泛化能力。MAR4气溶胶模型的吸收性较强可能是导致反演结果出现较多偏离期望值较大的数据的原因之一。

### 4.3 对输入数据误差的敏感性

卫星数据不可避免的存在定标、定位等误差。取一条样本 (MAR4气溶胶模型,  $\theta_v = 8^\circ$ ,  $\theta_0 = 24^\circ$ ,  $\Delta\phi = 90^\circ$ ,  $\tau_a(550) = 0.2$ ,  $CHL = 1.59$ ,  $SPM = 8.89$ ,  $a(400) = 0.07$ ), 在输入元素上增加  $\pm 5\%$

的独立随机噪声并重复 5000 次。图 6 为采用添加噪声后的数据时模型反演的各参量的相对误差直方图。其中“\*”对应无噪声时的结果, 线对应有噪声数据的结果。可以看出, 有噪声数据的反演值的相对误差基本上以无噪声的为中心而变化,  $\rho_w(\lambda_1) - \rho_w(\lambda_4)$  的变化范围分别约为  $\pm 35\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  和  $\pm 10\%$ 。

## 5 HY-1 A CZ数据处理结果

卫星数据选择 2002-09-06 和 2003-02-05 的

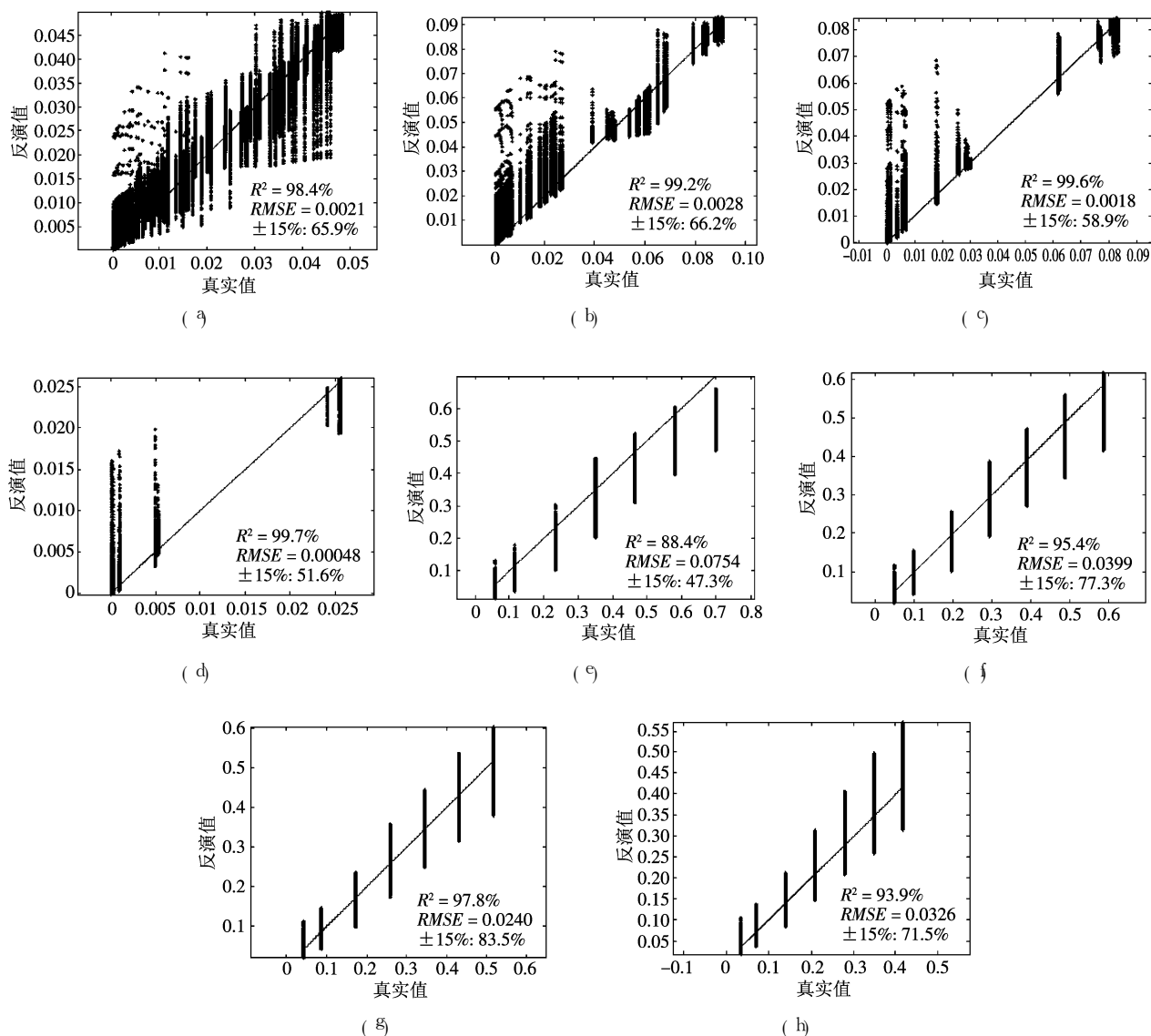


图 5 采用测试数据时 NN 模型反演结果与对应的辐射传输模拟输入参数的比较 ( $N=472500$ )

(a)–(d) 为 4 个波段的  $\rho_w$  (e)–(h) 为 4 个波段的  $\tau_a$

Fig 5 Scatter plot between NN model retrieved variables and input values of radiative transfer simulation using test data ( $N=472500$ )

(a)–(d) are  $\rho_w$  of 4 bands (e)–(h) are  $\tau_a$  of 4 bands

2 景 HY-1A CZI1B 产品, 如图 7 所示。

图 8 为 2002-09-06 数据反演的  $\rho_w$  彩色合成图与  $\tau_a(\lambda_2)$  伪彩色分割图。刁龙咀至青岛一带有薄云覆盖, 表现在  $\tau_a(\lambda_2)$  上为两个地区海域上空的气溶胶光学厚度较大。图 9 为各波段  $\rho_w$  的伪彩色分割图。图 10 为反演参量的一个断面分布, 以及 6 个取样点的  $\rho_w$  光谱 (断面和取样点位置见图 7), 经分析知,  $\rho_w$  光谱形状的变化与对应位置的悬浮物浓度基本一致。

图 11 为 2003-02-05 数据反演的  $\rho_w$  彩色合成图与  $\tau_a(\lambda_4)$  伪彩色分割图。图 12 为各波段  $\rho_w$  的伪

彩色分割图。沉积物的再悬浮导致冬季的  $\rho_w$  比夏季偏高, 特别是辽东浅滩地区。

除了水体和气溶胶模型的适用性问题之外, 传感器的绝对定标误差 (波段 1 定标后数值可能偏小, 波段 4 随着时间的推移可能存在退化现象<sup>[10]</sup>) 会影响模型的反演结果, 2048 个探测器间的响应差异 (相对定标问题) 会导致反演结果中存在纵向条带, 特别是在较清洁的水体。由于缺乏与卫星数据同步的现场测量数据, 主要根据两点判定结果的合理性。(1) 气溶胶光学厚度和离水反射率的分布相关性低; 除了苏北浅滩地区, 离水反射率的分布结构

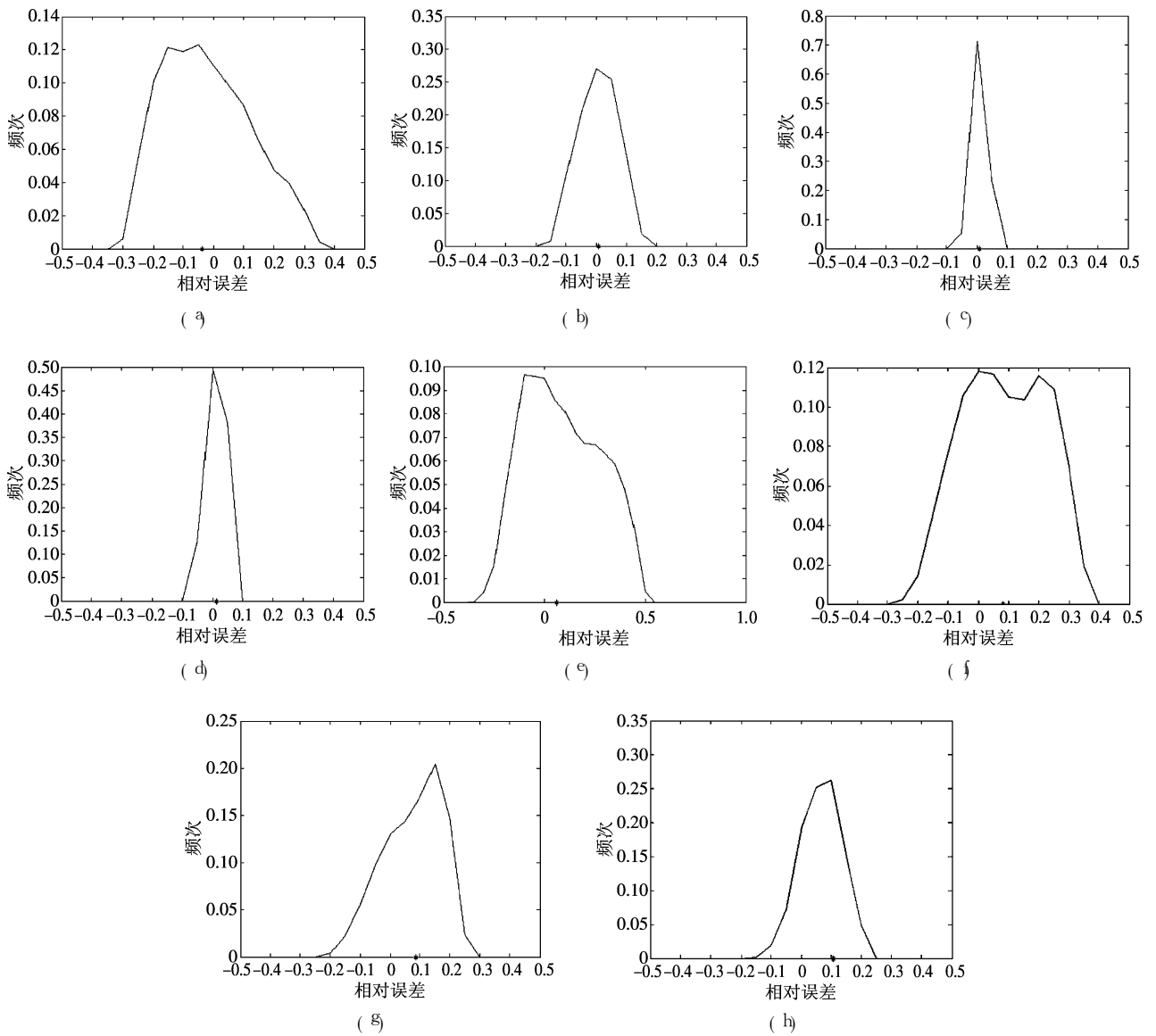


图 6 采用有噪声数据时 NN模型反演各参量的相对误差直方图

(a)–(d) 为 4 个波段的  $\rho_w$  (e)–(h) 为 4 个波段的  $\tau_a$

Fig 6 Relative error histograms of NN model retrieved variables using noise added data

(a)–(d) are  $\rho_w$  of 4 bands (e)–(h) are  $\tau_a$  of 4 bands

与气溶胶光学厚度的不同。由于苏北浅滩等海域的悬浮物浓度相当高, 辐射传输模拟所采用的水体光学模型和浓度范围并不适用, 因此, 该地区的气溶胶光学厚度与反射率的分布有一定程度的相似。  
 (2)与海区特点吻合: 夏季, 较为清澈的黄海水自渤海海峡进入渤海, 莱州湾内的沿岸流沿山东半岛北岸流出并绕过成山角向南黄海延伸; 苏北浅滩水域受沉积物再悬浮的影响导致水体反射率很高。黄海中部海水相对清澈 (悬浮颗粒物浓度通常小于  $0.5 \text{ g/m}^3$ ) 对应的波段 2 和 3 的离水反射率较低。冬季, 风浪引起的沉积物再悬浮导致黄渤海地区水

体反射率增高, 位于石岛 (山东半岛东北角) 南部的水下高地附近呈现高反射特征。可以认为, 除了在不非常浑浊的水体, 反演结果基本是合理的。

## 6 结 论

利用辐射传输计算的模拟数据建立的 HY-1A CZII 类水体神经网络大气修正算法采用 4 层 BP 网络结构 (7/30/20/10), 可以由波段 1–4 的 TOA 反射率和 3 个角度反演得到  $\rho_w$  和  $\tau_a$  等参数。

采用模拟的训练与检验数据时网络模型的反演

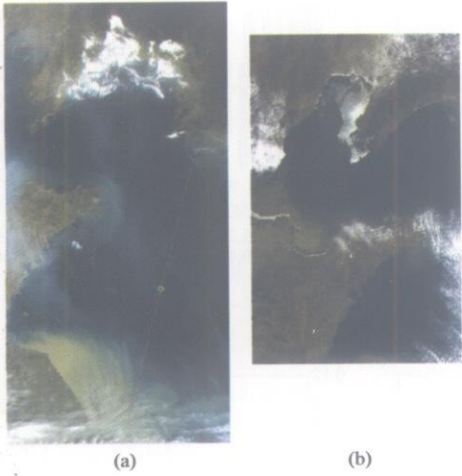


图 7 L1B 产品彩色合成图( $R/G/B$  为  $B_3/B_2/B_1$ )

(a) 2002-09-06; (b) 2003-02-05

Fig.7 Images of L1B products( $B_3/B_2/B_1$ )

(a) 2002-09-06; (b) 2003-02-05

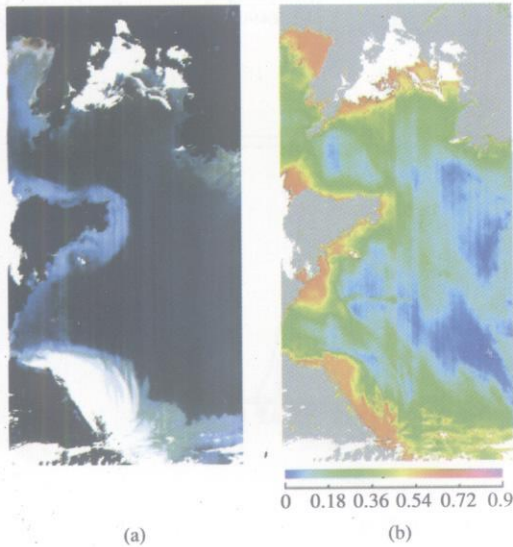


图 8 2002-09-06 数据的反演结果

(a)  $\rho_w(B_3/B_2/B_1)$ ; (b)  $\tau_s(\lambda_2)$

Fig.8 Results of 2002-09-06 data

(a)  $\rho_w(B_3/B_2/B_1)$ ; (b)  $\tau_s(\lambda_2)$

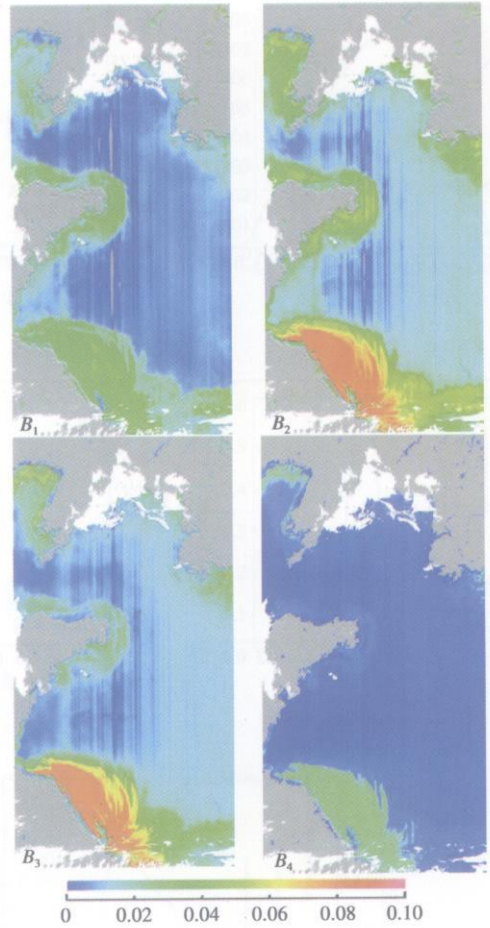


图 9 单个波段的  $\rho_w$ (2002-09-06)

Fig.9  $\rho_w$  of four bands(2002-09-06)

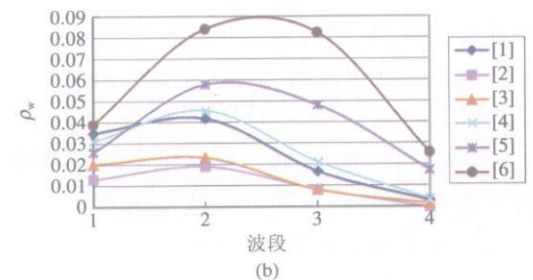
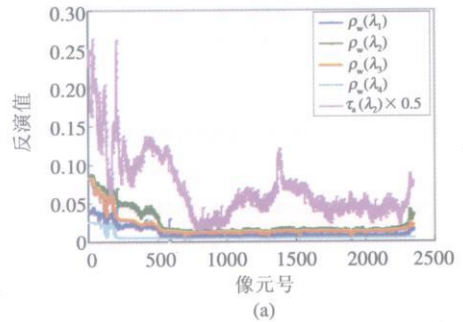


图 10 2002-09-06 数据的反演结果取样

(a) 断面分布; (b) 6 个取样点的  $\rho_w$  光谱

Fig.10 Result sampling of 2002-09-06 data

(a) a profile; (b)  $\rho_w$  spectrums of 6 sampling points

效果相当。尽管测试数据未参与网络模型的建立过程,但是除了部分参量的反演结果有明显退化之外,与采用检验数据时的平均效果相差较小,表明模型具有良好的泛化能力。

网络模型对数据噪声较为敏感,有噪声数据的反演值的相对误差基本以无噪声时的为中心,但各参量的变化范围不等。

HY-1A CZ的数据处理结果表明,除了在非常浑浊的水体,网络模型的反演结果基本合理。由于所处理的卫星影像较少,且无法对 L1B 数据本身的

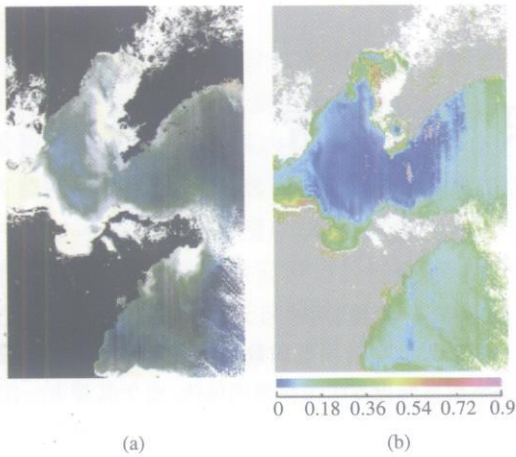
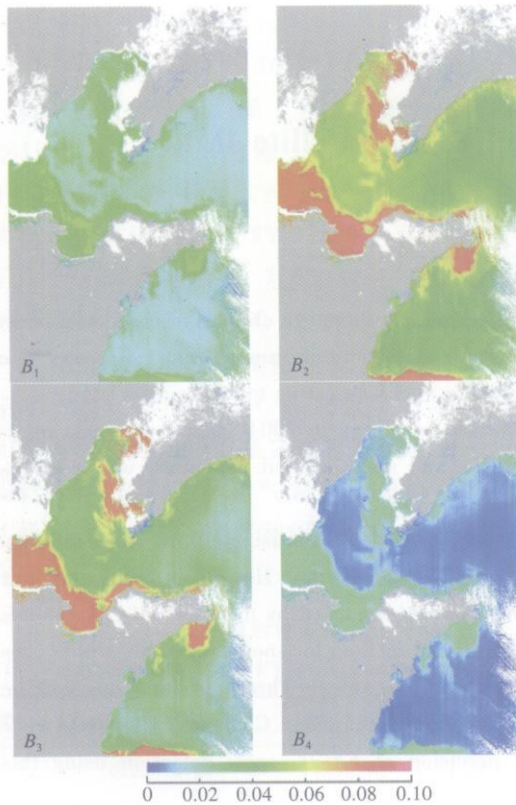


图 11 2003-02-05 数据的反演结果

(a)  $\rho_w(B_3/B_2/B_1)$ ; (b)  $\tau_a(\lambda_4)$ 

Fig.11 Results of 2003-02-05 data

(a)  $\rho_w(B_3/B_2/B_1)$ ; (b)  $\tau_a(\lambda_4)$ 图 12 单个波段的  $\rho_w$ (2003-02-05)Fig.12  $\rho_w$  of four bands(2003-02-05)

质量(定标、定位等)进行可靠的评估,更详尽的算法验证还有待开展。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Gordon H R, Wang M. Influence of Oceanic Whitecaps on Atmospheric Correction of SeaWiFS. *J. Applied Optics*, 1994, **33**(33): 7754-7763.
- [ 2 ] Gordon H R, Wang M. Retrieval of Water Leaving Radiance and Aerosol Optical Thickness over the Oceans with SeaWiFS: A Preliminary Algorithm. *J. Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443-452.
- [ 3 ] Gordon H R. Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery in the Earth Observing System Era. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D14): 17081-17106.
- [ 4 ] Antoine D, Morel A. A Multiple Scattering Algorithm for Atmospheric Correction of Remotely Sensed Ocean Color (MERIS Instrument): Principle and Implementation for Atmospheres Carrying Various Aerosols Including Absorbing Ones. *J. International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(9): 1875-1916.
- [ 5 ] Fukushima H, Higurashi A, Mitomi Y, et al. Correction of Atmosphere Effect on ADEOS/OCTS Ocean Color Data: Algorithm Description and Evaluation of Its Performance. *Journal of Oceanography*, 1998, **54**: 417-430.
- [ 6 ] Sch€oder Th, Fischer J, Schaale M, et al. Artificial Neural Network Based Atmospheric Correction Algorithm: Application to MERIS Data. *Proceedings of SPIE*. Office of Naval Research, Washington, DC, 2002, **4892**.
- [ 7 ] Sch€oder Th, Fischer J. Atmospheric Correction of MERIS Imagery above Case2 Waters. *Presented at the MERIS User Workshop*, ESA/ESRN, Frascati, Italy, 2003.
- [ 8 ] Zhang T L. Retrieval of Oceanic Constituents with Artificial Neural Network Based on Radiative Transfer Simulation Techniques. *Beijing*. PhD thesis of Free University, 2002.
- [ 9 ] Sun L. Atmospheric Correction and Water Components Retrieval for HY-1A CCD. *Qingdao*. PhD thesis of Institute of Oceanology, CAS, 2005 [孙凌. 针对 HY-1A CCD 的大气修正与水体组分反演. *青岛: 中国科学院海洋研究所(博士学位论文)*, 2005.]
- [ 10 ] Sun L, Zhang J, Guo M H. Rayleigh Lookup Tables for HY-1A CCD Data Processing. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(3): 306-311 [孙凌, 张杰, 郭茂华. 针对 HY-1A CCD 数据处理的瑞利查找表. *遥感学报*, 2006, **10**(3): 306-311.]