

基于辐射传输优化模型的二类水体大气校正

周 莉 李云梅 郭宇龙 吕 恒 李 渊 王珊珊 王永波

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要 遥感影像的大气校正是水色参数反演的前提。以太湖为研究区,采用 6S 大气辐射传输模型以及近红外波段离水反射率模型相结合的方法。通过神经网络模拟大气辐射传输过程,并利用中分辨率成像光谱仪(MERIS) 754、779、865、885 nm 4 个近红外波段进行光谱优化,求算 550 nm 处气溶胶光学厚度等变量。通过外推,实现可见光波段的大气校正。将 2007 年 11 月 11 日、20 日、21 日,2008 年 11 月 20 日 MERIS Level 1p 影像以及野外实测水体遥感反射率数据集用于精度验证,结果表明,该方法能够较好地反演水体遥感反射率光谱,校正后的 13 个波段的平均相对误差大多分布在 20%~40%之间。与 6S 以及 Beam 4.9 软件自带的大气校正方法相比,具有较高的校正精度和较强的稳定性,在太湖有较好的适用性。

关键词 遥感;大气校正;辐射传输优化模型;二类水体;MERIS 数据

中图分类号 P407.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0201002

Atmospheric Correction for Case-2 Waters Using a Radiative Transfer Optimized Model

Zhou Li Li Yunmei Guo Yulong Lü Heng Li Yuan

Wang Shanshan Wang Yongbo

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract Atmospheric correction of remote sensing image is the precondition of inverting water color parameters. An atmospheric correction method for lake Taihu based on 6S the radiative transfer model and the NIR water-leaving reflectance model is proposed. Two neural networks are built to model radiative transfer, and thereafter, estimate parameters such as aerosol optical thickness in 550 nm with the optimization of four near infrared bands (i. e., 754, 779, 865 and 885 nm) of medium-resolution imaging spectrometer (MERIS) data. Then, the parameters are extrapolated to visible wavelength to fetch the parameters in those visible bands. This model by MERIS Level 1p data on November 11th, 20th, 21th, 2007 and November 20th, 2008 and the *in situ* date-sets is validated. The result indicates that the radiative transfer optimized model has a high precision in inverting the water remote sensing reflectance with an average relative error from 20% to 40% in the 13 bands. Comparing with the atmospheric correction methods of 6S and Beam 4.9, it has the highest correction precision and strongest stability, and is applicable in lake Taihu.

Key words remote sensing; atmospheric correction; radiative transfer optimized model; case-2 water; MERIS data

OCIS codes 010.1285; 010.1290; 010.5620; 010.7340

1 引 言

大气校正一直以来都是水色遥感的关键问题。

Morel 等^[1]将海水划分为一类水体和二类水体。一类水体大多是远离陆地,较少受到人类活动影响的

收稿日期: 2013-08-05; **收到修改稿日期**: 2013-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(41271343)、高分辨率对地观测系统重大专项(05-Y30B02-9001-13/15-6)、江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0397)、江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 周 莉(1989—),女,硕士研究生,主要从事水色遥感、遥感影像大气校正的理论和应用等方面的研究。

E-mail: zhoulizl@yeah.net

导师简介: 李云梅(1966—),女,博士,教授,主要从事水环境遥感方面的研究。E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

开阔大洋水体,水中叶绿素对其光学特性起决定性作用;二类水体大多是沿岸和内陆水体,受到人类活动的显著影响,水体的光学特性由有色可溶性有机物、悬浮无机物以及叶绿素共同决定。Gordon 等^[2]根据一类水体在近红外(NIR)波段离水辐射率近似为零的特征,假设近红外波段的信号值全部来自于瑞利散射和气溶胶散射,发展了基于暗像元的标准大气修正算法,在一类水体中有较高的精度。然而,由于二类水体中悬浮物在近红外的高反射现象,使得该假设不再成立,标准大气修正算法在二类水体不再适用。

针对二类水体,国内外学者在标准大气修正算法的基础上进行改进、发展,提出了新的大气校正方法。Wang 等^[3]将近红外波段为零的假设延伸到短波红外波段,认为浑浊水体在短波红外波段可视为暗像元,从而提出了短波红外(SWIR)大气校正算法,该方法提高了二类水体大气校正的精度,但是会出现可见光短波波段过校正的现象,产生离水反射率为负值的情况。Hu 等^[4]假设气溶胶类型在 50~100 km 空间范围内不变,提出了基于清洁水体的大气校正算法。根据研究区内的清洁水体推算气溶胶参数,进而将其传递给邻近的浑浊水体,完成浑浊水体上空的大气校正,该方法在墨西哥湾取得了较好的校正精度。然而清洁水体像元的选取是关键,若选取不恰当,将直接导致校正精度的降低,在一定程度上制约了该方法的使用。Doerffer 等^[5]使用神经网络模型,利用模拟的中分辨率成像光谱仪(MERIS)16 个波段经瑞利散射校正后的反射率数据集,反演气溶胶和水色三要素。之后, Brajard 等^[6]进一步提出了 NeuroVaria 法,利用除氧气和水汽吸收波段之外的其余 5 个近红外波段进行参数优化,实现大气校正。然而这两种方法均是针对欧洲的二类水体提出的,对于我国内陆的二类水体还需要进一步修正。

本文在 NeuroVaria 算法的基础之上进行改进,发展了针对我国内陆二类水体的大气校正算法。以太湖为研究区,利用 6S 辐射传输模型建立查找表,并依据查找表分别建立大气路径辐射神经网络和大气透射率神经网络模型。进而结合 MERIS 754、779、865、885 nm 四个近红外波段的离水反射率模型,模拟近红外大气顶层表观反射率,将其与影像获得的真实表观反射率进行优化匹配,查找最接近真实值的模拟表观反射率,进而估算气溶胶光学厚度,从而实现可见光波段的大气校正。

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 地面实测数据集

以太湖为研究区,太湖位于江苏省南部,与浙江省相连,是我国东部近海区最大的湖泊,也是我国五大淡水湖之一^[7]。太湖地处平原地区,湖泊面积为 2338.1 km²,平均水深 1.9 m,最大水深 2.6 m,是典型的大型浅水内陆湖泊^[8]。太湖受陆源物质排放影响严重,水体的光学特性由叶绿素、悬浮物以及有色可溶性有机物等共同影响,是典型的二类水体。近年来,随着社会的发展,太湖受城市工业发展、人类生活的影响越来越大,成为富营养化速度较快、藻类水华频发的湖区^[9]。

分别于 2007 年 11 月、2008 年 11 月在太湖进行了野外实验。从中挑选出与卫星数据准同步的样点数据构成本次研究的数据集,有 2007 年 11 月 11 日、20 日、21 日和 2008 年 11 月 20 日的共 22 个样点数据。采样点位分布如图 1 所示,其中 2008 年 11 月 20 日有三个点与 2007 年 11 月 20 日的重合。

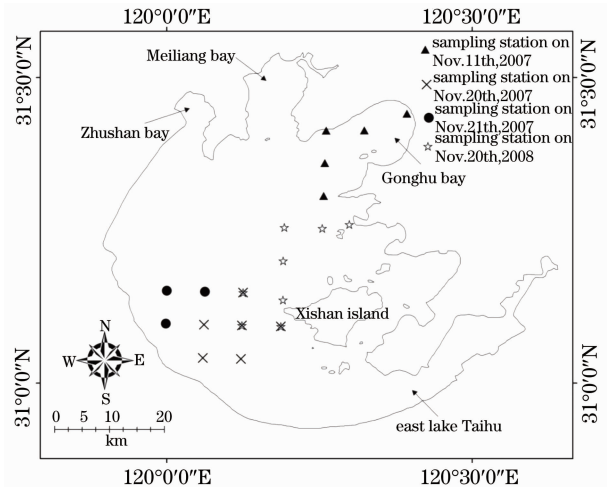


图 1 太湖采样点位分布图

Fig. 1 Sampling station in lake Taihu

野外采集的数据为水面反射率光谱,观测方法采用水表面以上光谱测量法,即利用便携式瞬态光谱仪和标准板,推导出遥感反射率等光谱参数^[10]。光谱仪是由美国分析光谱仪器公司制造的 ASD 野外光谱辐射仪,其光谱范围为 350~1050 nm,色散为 141 nm,采样间隔为 1.5819 nm,光谱分辨率是 3 nm,有 512 个波段,视场角为 7.5°^[11]。

水表面以上光谱测量严格按照美国航空航天局(NASA)的测量规范进行,该方法是目前唯一有效的二类水体光谱测量的方法^[12]。为了减少水体镜

面反射的影响以及船舶阴影对光场的破坏,一般避开太阳入射方向进行观测。设太阳入射方位角为 0° ,观测方位角 ϕ_v 在 135° 左右,观测天顶角 θ_v 为 40° 左右,如图2所示^[13]。在每一个观测点测量以下几个参数:仪器对着水面测量的辐亮度 L_{sw} 、仪器对着天空测量的辐亮度 L_{sky} 、仪器对着漫反射参考板测量的辐亮度 L_p 。仪器对着水面测量时,测量的积分时间设为172 ms,连续测量10条光谱曲线,不做任何平均。测量所用的标准板的反射率为30%^[14]。

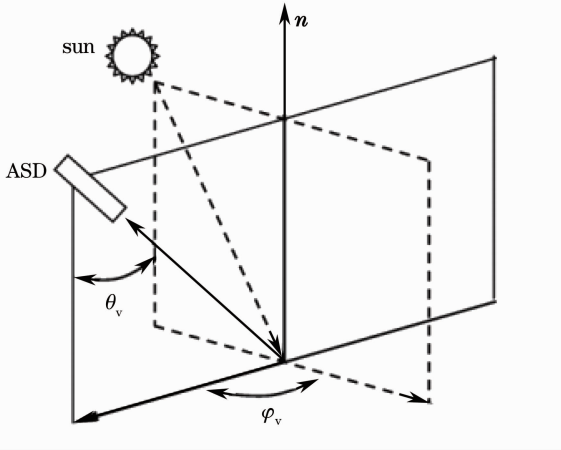


图2 水面以上测量法的观测几何

Fig. 2 Viewing geometry of the above-water measurement

水体反射率光谱是水体经气-水界面反射出的光谱信息,在避开太阳直射与水面白帽等干扰的情况下,光谱仪测得的离水辐亮度可以表示为

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky}, \quad (1)$$

式中 L_w 为水体离水辐亮度, L_{sw} 为总的水体信息, L_{sky} 为天空漫反射光, r 为气-水界面反射比,这取决于太阳位置、观测几何、风速风向和水面粗糙度等因素。一般情况下,平静水面可取0.022,在5 m/s左右风速的情况下可取0.025,在10 m/s左右风速的情况下可取0.026~0.028。

水体表面总的入射辐照度 E_d 为

$$E_d = \frac{L_p \pi}{\rho_p}, \quad (2)$$

式中 L_p 为标准灰板测量值, ρ_p 为标准灰板的反射比,本实验选用的是经过严格定标的30%的灰板。

经过上面的推导,表征水体离水辐亮度与水面总的入射辐照度比值的物理量遥感反射率 R_{rs} 可以定义为

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d(0^+)}. \quad (3)$$

借由以上的光谱测量法以及其处理过程,对

2007年11月、2008年11月的太湖实验数据进行筛选计算,最终得到水体遥感反射率。

2.1.2 MERIS 影像数据

MERIS是搭载在ENVISAT卫星上的传感器,主要用于监测海洋和海岸带的水质环境。MERIS在可见光到近红外(390~1040 nm),共设置了15个波段,带宽在3.75~20 nm之间。本研究收集了与地面实验同步的太湖地区2007年11月11日、20日、21日,2008年11月20日共4景MERIS Level 1p影像数据。

影像数据的预处理在Beam 4.9软件中进行。该软件是专门处理MERIS数据的软件。首先对MERIS原始数据做“微笑效应校正”,消除数据的重叠效应现象。然后进行臭氧吸收校正,由于臭氧主要集中在20 km以上的高空,因此可以在总信号上进行修正。最后用(4)式将辐亮度转换为表观反射率,

$$\rho_{toa} = \frac{\pi L}{F_0 \cos \theta_s}, \quad (4)$$

式中 $\rho_{toa}(\lambda)$ 为大气层外反射率, L 为大气层外辐亮度, F_0 为大气层外太阳辐照度, θ_s 为太阳天顶角。

2.2 方法

2.2.1 方法流程

根据Gordon等^[15]的理论,并且不考虑太阳耀斑以及水面白帽的影响^[16],卫星传感器接受到的某一波段 λ 处的表观反射率可表示为

$$\rho_{toa}(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda) + t(\lambda)\rho_w(\lambda), \quad (5)$$

式中 $\rho_{toa}(\lambda)$ 为大气层外反射率, $\rho_r(\lambda)$ 为大气分子瑞利散射, $\rho_a(\lambda)$ 为大气中气溶胶散射贡献, $\rho_{ra}(\lambda)$ 为大气分子和瑞利散射相互作用, $\rho_w(\lambda)$ 为离水反射率, $t(\lambda)$ 为大气漫射透射率。

令 $\rho_{path}(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)$,则(5)式可以简化为

$$\rho_{toa}(\lambda) = \rho_{path}(\lambda) + t(\lambda)\rho_w(\lambda). \quad (6)$$

根据Ruddick等^[17]的研究,在浑浊水体中,近红外波段的离水反射率可以用一个简单的模型表示:

$$\rho_w(\lambda) = R \frac{a_w(\lambda_0)}{a_w(\lambda)} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-n}, \quad (7)$$

式中 λ_0 为参考波段, R 为参考波长的离水反射率 $\rho_w(\lambda_0)$ 的简化表示形式, a_w 为纯水的吸收系数, n 为光谱形状指数,由水中颗粒物的类型和大小决定。设754 nm(MERIS第10波段)为参考波段 λ_0 ,则 R 代表

754 nm 处的水体离水反射率。 R 的值域范围设为 $0 \sim 0.09$, n 的值域范围在 $-0.2 \sim 2.2$ 之间变化^[18]。

由于 MERIS 的 761 nm 和 900 nm 波段分别位于氧气和水汽的吸收带,地面的向上辐射在这两个波段被严重削弱,若将他们参与校正,就必须单独考虑水汽和氧气的吸收。因此,这里只研究除这两个波段之外的其他 13 个波段。

本研究基于光谱匹配原理,利用多波段优化的方法同时解决多个参数的问题,进而外推到其他波段,得到可见光波段的离水反射率。即利用 MERIS 四个近红外波段优化求解 550 nm 处的气溶胶光学厚度 τ_{550} , 754 nm 处离水反射率 R , 光谱形状指数 n 。再根据优化后的 550 nm 处气溶胶光学厚度外推得到可见光波段的离水反射率。大气校正的流程如图 3 所示。

在图 3 中大气校正的关键步骤是利用神经网络模型和近红外离水反射率模型对三个未知参数 τ_{550}^{opt} 、 R^{opt} 、 n^{opt} 的优化过程。其中神经网络(BP)模型是对大气辐射传输过程的模拟,包括关于大气分子、气溶胶总贡献的神经网络 BP- ρ_{path} 以及关于大气漫

射透射率的神经网络 BP- t 。首先在神经网络模型中输入影像的几何信息,如太阳、卫星天顶角(θ_s, θ_v)、方位角(φ_s, φ_v), 13 个波段的波长 λ 以及 550 nm 处气溶胶光学厚度初值 τ_{550}^0 , 得到模拟的大气漫射透射率 t 以及大气分子和气溶胶的总贡献 ρ_{path} 。将 754 nm 处离水反射率初值 R^0 , 光谱指数初值 n^0 代入近红外离水反射率模型中, 估算出近红外波段的离水反射率 ρ_w , 再连同 t, ρ_{path} , 模拟出表观反射率 ρ_{toa}^{sim} 。将 ρ_{toa}^{sim} 与真实表观反射率 ρ_{toa}^{mes} 进行光谱优化, 不断调整参数 τ_{550}, R, n , 直到模拟值最接近真实值, 最终得到最优解 $\tau_{550}^{opt}, R^{opt}, n^{opt}$ 。其中, 通过对模型输入 $0 \sim 2$ 范围内的若干 τ_{550}^0 值, 观察发现该初值对最终结果的影响不大, 因此, 研究中取 τ_{550}^0 初值为 0.5。

参数优化结束后, 将 τ_{550}^{opt} 再次代入神经网络模型中, 得到 13 个波段的大气漫射透射率 t^{opt} 以及大气分子和气溶胶的总贡献 ρ_{path}^{opt} , 最终结合影像上真实表观反射率 ρ_{toa}^{mes} , 估算 MERIS 影像的离水反射率。

2.2.2 神经网络模型

为了提高算法计算的效率, 本研究用两个神经网络模型 BP- ρ_{path} 、BP- t 代替大气辐射传输模型模拟计算参数: 大气漫射透射率 t 以及大气分子和气溶胶的总贡献 ρ_{path} 。BP- ρ_{path} 、BP- t 的输入为太阳、卫星天顶角、方位角以及波长; 输出分别是大气分子和气溶胶的总贡献 ρ_{path} 以及大气漫射透射率 t 。首先利用 6S 辐射传输模型建立 ρ_{path} 、 t 以及 ρ_{toa} 的查找表, 进而构建两个神经网络模型 BP- ρ_{path} 和 BP- t 分别模拟输出 ρ_{path} 以及 t , 如图 4 所示。

2.2.2.1 查找表建立

利用 6S 辐射传输模型, 对 ρ_{path} 和 t 建立查找表, 为该算法的实现提供模拟数据集。 ρ_{path} 和 t 查找表包含除氧气和水汽吸收波段之外的 MERIS 13 个波段。

6S 模型是 Vermote 等^[19] 在 20 世纪 90 年代中后期在 5S 辐射传输模型基础上发展起来的。该模型不仅考虑了目标物的海拔高度、地表非均匀状况, 而且将大气中的一些气体对辐射的吸收影响加入模型之中, 使用近似和逐次散射算法计算分子和气溶胶的散射作用。同时用 9 种较为成熟的二向反射的核驱动模型对光线受大气影响进行描述, 然而在 2005 年之前的 6S 版本并没有考虑到极化作用的影响^[20]。因此, 为了弥补这一缺陷, 2005 年 5 月, 6SV1.0B 版即矢量版考虑极化作用, 同时在散射角度、气溶胶垂直廓线等方面也做了进一步的提高和

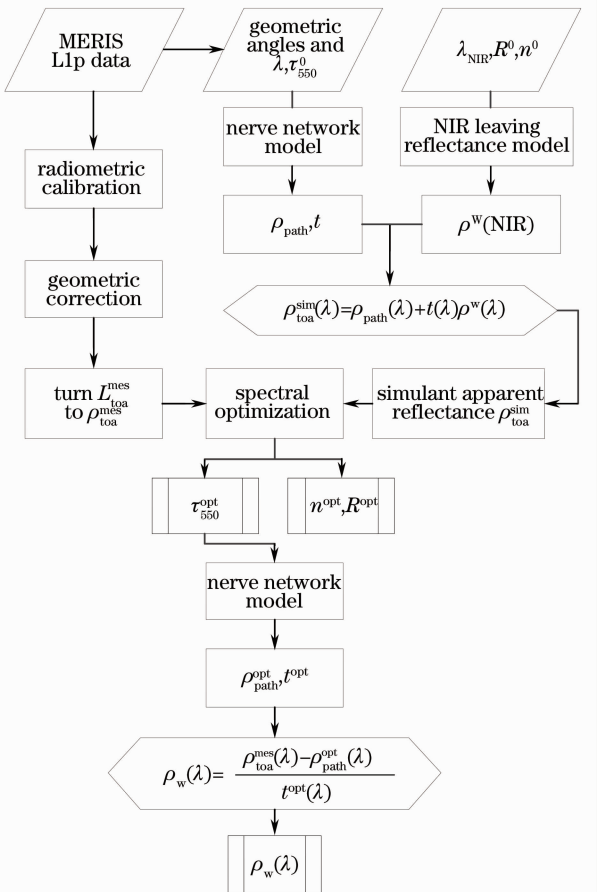


图 3 大气校正流程图

Fig. 3 Flow chart of atmospheric correction

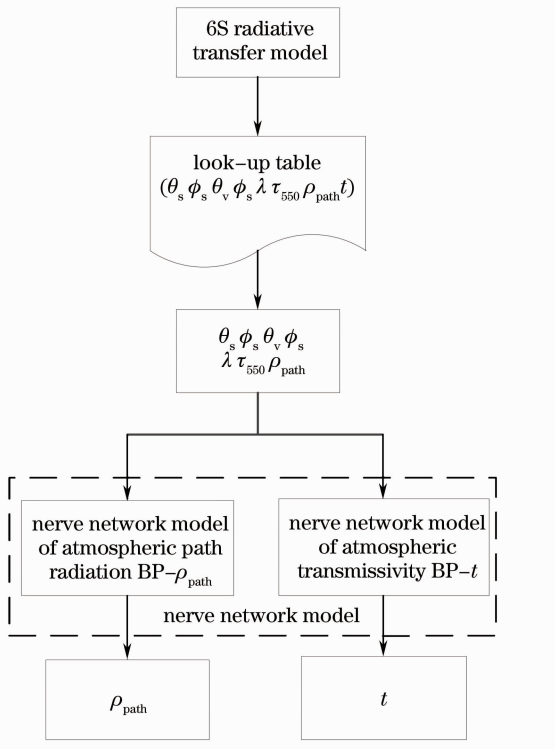


图4 神经网络构建流程图

Fig. 4 Flow chart of building two nerve networks

改进,使得其校正精度能够适用于水体光学参数的反演。

本研究在6SV1.0B矢量版下进行。在6S辐射传输模型中输入有关太阳和传感器的几何参数、大气模式、气溶胶类型等参数后,从输出的文件中查找有关瑞利散射和气溶胶的贡献值和大气漫射透射率数据。

由于四幅影像的成像时间均在11月份,因此选择大气模式为中纬度冬季。在没有实测气溶胶类型数据时,6S提供了三种气溶胶模型:大陆型、海洋型、城市型。三种模型中沙尘性、水溶性、海洋性以及煤烟性粒子所占比例如表1所示。

表1 6S辐射传输模型中三种气溶胶模型基本粒子的比例

Table 1 Basic components of the 3 aerosol models in the 6S model for radiative transfer

Aerosol model	Dust-like	Water-soluble	Oceanic	Soot
Continental	0.7	0.29		0.01
Maritime		0.05	0.95	
Urban	0.17	0.61		0.22

太湖距离东海约150 km,周围被城市包围。一般地,空气动力学直径大于 $1 \mu\text{m}$ 的海盐气溶胶粒子随海洋气团进入大陆的过程中,在重力和湍流的作用下其浓度会以指数形式衰减,从而迅速从大气中去除,其空间尺度为 $10 \text{ km}^{[21]}$ 。可以认为太湖上

空几乎没有海洋性粒子^[22]。因此,从表1可以看出太湖气溶胶类型为大陆型或城市型。潘一新等^[23]采用6S自定义的大陆型气溶胶对太湖的MODIS影像进行大气校正,拟合校正后和实测的水面反射率,发现其决定系数 R^2 达到0.8935,说明大陆型气溶胶基本符合太湖上空的气溶胶类型,在缺少实测数据时是适用的。吕恒等^[24-25]均采用大陆型气溶胶模型对太湖展开研究。因此,本研究采用大陆型作为太湖的气溶胶模型。

表2给出了建立查找表 $\text{LUT-}\rho_{\text{path}}$ 和 $\text{LUT-}t$ 所需的部分参数以及它们的阈值范围。

表2 $\text{LUT-}\rho_{\text{path}}$ 、 $\text{LUT-}t$ 主要参数统计Table 2 Statistics of main parameters in $\text{LUT-}\rho_{\text{path}}$ and $\text{LUT-}t$

Parameters	Data range
Sun zenith	$0^\circ \sim 60^\circ$
Sensor zenith	$0^\circ \sim 60^\circ$
Sun azimuth	$100^\circ \sim 300^\circ$
Sensor azimuth	$100^\circ \sim 300^\circ$
Atmospheric mode	3
Aerosol type	1
AOT τ at 550 nm	0~2
Bands	0.412~0.885

2.2.2.2 神经网络模型建立

分别从 $\text{LUT-}\rho_{\text{path}}$ 、 $\text{LUT-}t$ 中随机选取70%的数据用于训练,30%的数据用于验证,共使用22638条数据进行神经网络建模,9702条数据进行验证,建立有关 ρ_{path} 和 t 的两个BP神经网络模型。模型的输入输出参数及结构如表3所示,RMS表示均方根。

表3 $\text{BP-}\rho_{\text{path}}$ 与 $\text{BP-}t$ 神经网络参数及结构Table 3 Parameters and frame of $\text{BP-}\rho_{\text{path}}$ and $\text{BP-}t$

	$\text{BP-}\rho_{\text{path}}$	$\text{BP-}t$
Input	$\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda, \tau_{550}$	$\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda, \tau_{550}$
Output	ρ_{path}	t
Number of hidden layers	1	1
Size of hidden layers	30	30
RMS for $\lambda \geq 754 \text{ nm}$	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
Number of iteration	4000	4000
	754	754
	779	779
λ / nm	865	865
	885	885
	412~709(VIS)	412~709(VIS)

2.2.3 光谱优化

在光谱优化过程中,借助于罚函数判断模拟表观反射率与真实表观反射率的接近程度,使模型模

拟的值更加逼近真值。罚函数 P 定义为模拟表观反射率与真实表观反射率误差的平方和,并加入参数初始值进行约束:

$$P(\tau_{550}, R, n) = \sum_{i=1}^4 c_i [\rho_{\text{toa}}^{\text{mes}}(\lambda_i) - \rho_{\text{toa}}^{\text{sim}}(\lambda_i)]^2 + d^{\tau}(\tau_{550} - \tau_{550}^0)^2 + d^R(R - R^0)^2 + d^n(n - n^0)^2, (8)$$

式中 $\rho_{\text{toa}}^{\text{mes}}$ 为 MERIS 影像上计算得到的真实表观反射率, τ_{550}^0 、 R^0 、 n^0 为所求参数 τ_{550} 、 R 、 n 的初值, i 取值 1~4 分别代表近红外四个波段, c_i 是第 i 波段的权重, d^{τ} 、 d^R 、 d^n 分别是 τ_{550} 、 R 、 n 的权重。参考波段的离水反射率初始值 R^0 设为 0.001、光谱指数初始值 n^0 设为 1^[26]。再用非线性最小二乘法优化求解罚函数,得到 τ_{550} 、 R 、 n 。之后将影像几何信息以及 τ_{550}^{opt} 输

入到 $\text{BP-}\rho_{\text{path}}$ 、 $\text{BP-}t$ 中,通过(6)式反演各波段离水反射率。

3 结果与分析

3.1 MERIS 影像大气校正结果

以 2008 年 11 月 20 日的 MERIS Level 1p 影像为例,将经过微笑效应以及臭氧吸收校正的表观反射率输入该大气校正算法,得到校正后的影像。为了便于和实测水体遥感反射率进行对比,将大气校正得到的水体离水反射率转换为遥感反射率,结果如图 5 所示。

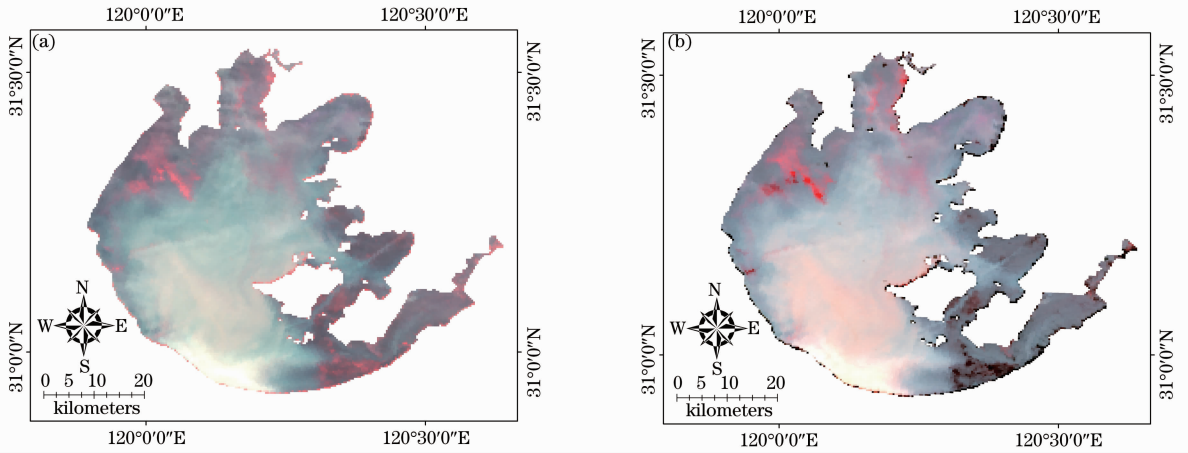


图 5 2008 年 11 月 20 日大气校正前后太湖 MERIS 影像假彩色合成对比图。(a)校正前的原始影像;(b)校正后的影像

Fig. 5 Comparison of the original MERIS false color image of November 20th, 2008 and the false color image after atmospheric correction. (a) Original MERIS false color image; (b) MERIS false color image after atmospheric correction

图 5(a)是 MERIS Level 1p 原始影像数据的假彩色影像,图 5(b)是使用本文算法校正后的太湖遥感反射率假彩色合成影像。从图 5(a)可以看出,在 2008 年 11 月 20 日,太湖竺山湾、梅梁湾附近水面有一定面积蓝藻(红色区域)出现,而在东太湖湖区,有水草集中分布,湖中央以及太湖西部颜色分布均匀,没有突变状况,只在南部湖区有沿岸分布的条带状亮色区域。对比图 5(b)可以看出,校正后的影像也有相同的特征分布,经过大气校正后的影像没有丢失原始影像的特征信息,并且图 5(b)中的水华较图 5(a)更明显。说明该算法能够较好地去除大气影响。

3.2 大气校正精度验证

为了评价本文大气校正方法的精度与适用性,对 4 期准同步的 22 个样点分别求取三种大气校正方法每个波段的平均相对误差以及标准差,如表 4 所示。

在表 4 中, R_{rs} 代表水体的遥感反射率。由于 Beam 4.9 的大气校正结果不包含 885 nm,因此只有 12 个波段的统计结果。从表中可以看出,本文的辐射传输优化模型平均相对误差最小出现在 681 nm 处,为 19.799%,最大出现在 865 nm 处,为 59.237%,其余波段的平均相对误差大多在 20%~40%之间;6S 模型的平均相对误差最小出现在 620 nm 处,为 24.753%,最大也出现在 865 nm 处,为 124.456%;Beam 4.9 校正方法的平均相对误差最小出现在 620 nm 处,为 72.251%,最大出现在 412 nm 处,为 86.183%。

随波长的增加,三种方法的平均相对误差均有先减小后增大的趋势。蓝光波段大气校正精度不高的原因可能是:二类水体中的叶绿素和黄质在蓝光波段有较强的吸收作用,再加上蓝光波段的强烈瑞利散射,导致蓝光波段的水体信号所占比重非常小,校正细微的误差都会对校正后的水体反射率产生很大的影响。近红外波段的校正误差较高可能是由于

该波段的反射率绝对值本身很小导致的。绿光到红 散射随波长逐渐减小,水体信号所占比例较大,因而
光波段的反射率较高,而且大气瑞利散射和气溶胶 大气校正精度也比较高^[27]。

表 4 三种大气校正方法精度对比

Table 4 Accuracy comparison of three atmospheric correction methods

Remote sensing reflectivity	Average relative error /%			Standard deviation		
	Radiative transfer optimized model	6S radiative transfer model	Beam 4.9	Radiative transfer optimized model	6S radiative transfer model	Beam 4.9
$R_{rs}(412)$	46.744	63.736	86.183	0.291	0.561	0.054
$R_{rs}(443)$	39.297	66.146	84.041	0.217	0.654	0.054
$R_{rs}(490)$	30.082	44.228	79.566	0.211	0.44	0.058
$R_{rs}(510)$	28.193	41.753	77.923	0.168	0.41	0.061
$R_{rs}(560)$	22.288	28.641	74.837	0.155	0.27	0.065
$R_{rs}(620)$	21.79	24.753	72.251	0.143	0.252	0.091
$R_{rs}(665)$	19.898	34.054	75.404	0.18	0.319	0.093
$R_{rs}(681)$	19.799	33.626	75.722	0.181	0.324	0.095
$R_{rs}(709)$	22.303	57.037	76.358	0.219	0.487	0.107
$R_{rs}(754)$	36.998	95.324	81.291	0.356	0.858	0.111
$R_{rs}(779)$	35.196	92.686	84.656	0.333	0.799	0.09
$R_{rs}(865)$	59.237	124.456	85.27	0.293	1.328	0.145
$R_{rs}(885)$	34.565	76.057	—	0.281	1.805	—

对比所有波段的平均相对误差,可以明显看出,本文方法有最小的平均相对误差,6S次之,Beam 4.9的最大。从标准差也可以看出,本文方法的标准差在0.15~0.35之间,校正的遥感反射率波动性不大,具有较好的稳定性。6S模型的波动性是这三种

方法中最大的,尤其是在400~500 nm以及近红外波段。Beam 4.9虽然有最小的标准差,但是由于校正的遥感反射率平均相对误差很大,因此该方法的校正效果比较差。综合考虑平均相对误差和标准差,可以得出,本文的大气校正方法具有最高的校正

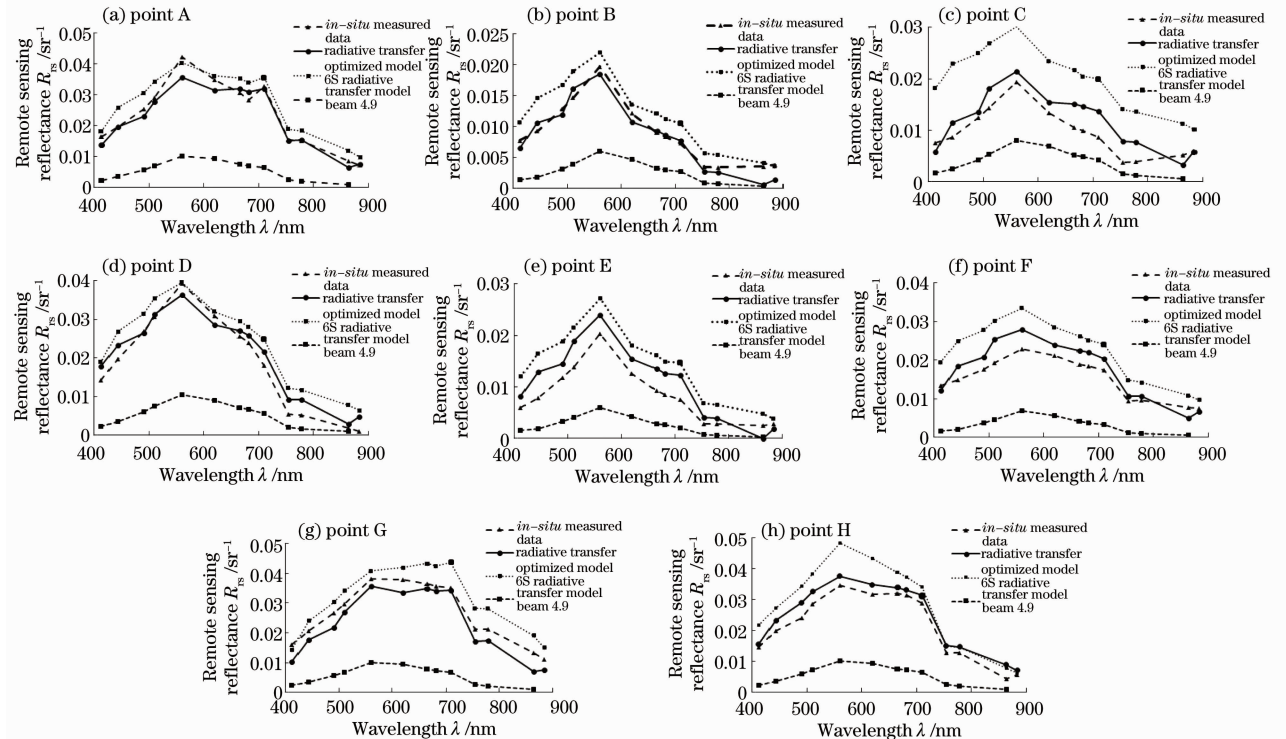


图 6 MERIS 数据三种大气校正方法结果比较

Fig. 6 Comparison of three atmospheric correction methods for MERIS data

精度和较强的稳定性,在太湖有良好的适用性。

此外,从 2007 年 11 月 11 日、20 日、21 日,2008 年 11 月 20 日的 22 个野外实测遥感反射率中随机抽取 8 个样点(A, B, C, D, E, F, G, H)对校正结果进行进一步检验,并与 6S 辐射传输模型以及 Beam 4.9 软件中自带的二类水体大气校正方法进行对比分析。其中 6S 辐射传输模型的输入参数主要使用模型中自带的参数:大气模式选择中纬度冬季、气溶胶模式选择大陆型,能见度为 15 km,转换成气溶胶光学厚度为 0.315。Beam 4.9 软件中自带的二类水体大气校正方法是 Doerffer 等^[28]采用蒙特-卡罗辐射传输模型构建的,并同时借助于生物光学模型反演出水体组份浓度。三种大气校正方法与野外实测样点的结果对比如图 6 所示。

如图 6 所示,在随机抽取的 8 个样点中,从整体趋势上看,本文方法校正的结果与实测值最为接近,在可见光短波波段基本没有出现低估的现象,尤其是 B、D 这两个点,几乎与实测光谱曲线重合,G、H 点次之。6S 大气校正方法的校正效果不稳定,在 C 点处,每个波段的校正值都比实测值大了 1 倍左右,而在 A、D 点,在 560~779 nm 波长范围内,校正后的光谱曲线效果比较好,与本文方法非常接近。在这三种方法中,Beam 4.9 的大气校正方法效果最差,遥感反射率的最大值在 0.01 sr^{-1} ,明显低于实测值。出现这种情况的原因可能是该方法是针对欧洲的水体提出的^[29],与太湖水体的光学特性,如悬浮物、黄质以及叶绿素等有很大差异。

4 结 论

基于光谱匹配原理,利用 MERIS 754、779、865、885 nm 四个近红外波段对二类水体进行大气校正。该方法将影像上的真实表现反射率带入到优化模型中,优化计算近红外波段的大气以及水体参量,进而外推到可见光波段,反演水体的离水反射率。校正后的水体遥感反射率光谱曲线与野外实测光谱具有较高的吻合度,大气校正的相对误差分布在 20%~40%之间。

Beam 4.9 软件中自带的大气校正方法在对太湖水体进行校正时精度很低,不适用于太湖。利用 6S 辐射传输模型进行太湖大气校正,在 560~681 nm 波段范围内校正的相对误差在 30%左右,其精度可以接受,而在可见光短波波段以及近红外波段,精度比较低。相比较而言,本文的大气校正方法在 MERIS 整个波段上的校正精度普遍较高,方法的稳定性强,

在太湖具有一定适用性。

参 考 文 献

- 1 A Morel, L Prieur. Analysis of variations in ocean color [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4): 709-722.
- 2 H R Gordon, M H Wang. Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors I: the Rayleigh-scattering component [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(21): 4247-4260.
- 3 M H Wang, W Shi. The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing [J]. *Opt Express*, 2007, 15(24): 15722-15733.
- 4 C M Hu, L C Kendall, E Frank, *et al.*. Atmospheric correction of seaWiFS imagery over turbid coastal waters: a practical method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 195-206.
- 5 R Doerffer, H Schiller. Determination of case 2 water constituents using radiative transfer simulation and its inversion by neural network. In: *ackles on SGed [C]*. *Proceedings of Ocean Optics XIV Conference*, 1998. 10-13.
- 6 J Brajard, R Santer, M Crepon, *et al.*. Atmospheric correction of MERIS data for case-2 waters using a neuro-variational inversion [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126: 51-61.
- 7 Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao, *et al.*. Study of scattering coefficients model in inland eutrophic lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2478-2485.
施 坤, 李云梅, 王 桥, 等. 内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2478-2485.
- 8 B Q Qin, P Z Xu, Q L Wu. Environmental issues of lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1): 3-14.
- 9 Sun Deyong, Li Yunmei, Wang Qiao, *et al.*. Differences of inherent optical properties of inland lake water body in typical seasons [J]. *Chinese J Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1117-1124.
孙德勇, 李云梅, 王 桥, 等. 内陆湖泊水体固有光学特性的典型季节差异[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1117-1124.
- 10 Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, *et al.*. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. *J Remote Sensing*, 2004, 8(1): 37-44.
唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37-44.
- 11 Li Yunmei, Huang Jiazhu, Wei Yuchun, *et al.*. Inversing chlorophyll concentration of Taihu lake by analytic model [J]. *J Remote Sensing*, 2006, 10(2): 169-175.
李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. *遥感学报*, 2006, 10(2): 169-175.
- 12 Ma Ronghua, Tang Junwu. Remote sensing parameters acquisition and algorithm analysis of lake color [J]. *Advances Inwater Science*, 2006, 17(5): 720-726.
马荣华, 唐军武. 湖泊水色遥感参数获取与算法分析[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 720-726.
- 13 C Le, Y Li, Y Zha, *et al.*. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: the case of Taihu lake, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1175-1182.
- 14 Li Yunmei, Huang Jiazhu, Lu Wanning, *et al.*. Model based remote sensing on the concentration of suspended sediments in taihu lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(2): 171-177.
李云梅, 黄家柱, 陆皖宁, 等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J]. *海洋与湖沼*, 2006, 37(2): 171-177.
- 15 H R Gordon, M H Wang. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a

- preliminary algorithm [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(3): 443–452.
- 16 C M Hu, F E Muller-Karger, S Andrefouet, *et al.*. Atmospheric correction and cross-calibration of LANDSAT-7/ETM+ imagery over aquatic environments: a multiplatform approach using SeaWiFS/MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1): 99–107.
- 17 K G Ruddick, V De Cauwer, Y J Park, *et al.*. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: the similarity spectrum for turbid waters [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(2): 1167–1179.
- 18 Ocean Color Algorithm Working Group. Models, Parameters, and Approaches that are Used to Generate Wide Range of Absorption and Backscattering Spectra [OL]. <http://www.ioccg.org/groups/lee-data.pdf>. [2013-12-18].
- 19 E F Vermote, D Tanré, J L Deuze, *et al.*. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675–686.
- 20 Wang Zhao. The analysis of 6S radiance transfer model and the application of 6S in atmospheric correction of MODIS data [J]. *Shaanxi Meteorology*, 2006, (5): 34–37.
王 钊. 6S 辐射模型算法解析及在 MODIS 大气校正中的应用 [J]. *陕西气象*, 2006, (5): 34–37.
- 21 Wang Min, Hu Min. Mutual transport between marine and continental aerosols and their impact on each other's environmental system [J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(2): 69–73.
王 珉, 胡 敏. 陆地与海洋气溶胶的相互输送及其对彼此环境的影响 [J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(2): 69–73.
- 22 Xu Jiliang, Zhang Lei, Lü Daren. Analyses on aerosol optical and microphysical properties over Taihu lake region [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(6): 1668–1675.
徐记亮, 张 镭, 吕达人. 太湖地区大气气溶胶光学及微物理特征分析 [J]. *高原气象*, 2011, 30(6): 1668–1675.
- 23 Pan Yixin, Hu Fangchao, Wang Lihong, *et al.*. Distribution of aerosol optical depth in Taihu lake and its application of atmospheric correction [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, 36(3): 361–366.
潘一新, 胡方超, 汪柳红, 等. 太湖地区气溶胶光学厚度的分布及其在大气校正中的应用 [J]. *大气科学学报*, 2013, 36(3): 361–366.
- 24 Lü Heng, Jiang Nan, Luo Liancong. Quantitative retrieval of chlorophyll-a by remote sensing in Taihu lake based on TM data [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 472–476.
吕 恒, 江 南, 罗激葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 A 浓度定量反演 [J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 472–476.
- 25 Li Yunliang, Zhang Yunlin. Quantitative estimation of total suspended matter and chlorophyll-a concentration of Taihu lake in summer using TM data [J]. *Remote Sensing Information*, 2008, 6(2): 21–27.
李云亮, 张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演 [J]. *遥感信息*, 2008, 6(2): 21–27.
- 26 M Sydor, B D Wolz, A M Thralow, *et al.*. Spectral analysis of bulk reflectance from coastal waters: deconvolution of diffuse spectra due to scattering and absorption by coastal water [J]. *J Coastal Research*, 2002, 18(2): 352–361.
- 27 R Doerffer, H Schiller. MERIS Regional Coastal and Lake Case 2 Water Project Atmospheric Correction ATBD [OL]. http://www.brockmann-consult.de/beam-wiki/download/attachments/1900548/meris_c2r_atbd_20080609_2.pdf. [2013-12-18].
- 28 R Doerffer, H Schiller. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) MERIS Lake Water Algorithm for BEAM [OL]. http://www.brockmann-consult.de/beam-wiki/download/attachments/1900548/ATBD_lake_water_RD_20080610.pdf. [2013-12-18].
- 29 Zhou Liguang, Ma Weichun, Gu Wanhua, *et al.*. Atmospheric correction of HJ-1 CCD data for water imagery based on dark object model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(8): 2238–2242.
周立国, 马蔚纯, 顾万花, 等. 基于清洁水体像元法的环境-1A 卫星 CCD 水体图像大气校正 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(8): 2238–2242.

栏目编辑：张 腾