研究论文 · Linn ARTICLE

珠江口二类水体 MODIS 数据大气校正

刘大召

(广东海洋大学 信息学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 以珠江口海域为主要研究区域,针对近岸二类水体近红外波段离水辐射为 0 的假设不再成立, 导致 MODIS 标准大气校正算法中用于大气校正的两个近红外波段的气溶胶散射值的高估,引起可见 光波段离水辐射值较实际值偏小,甚至出现负值的问题,研究了 748,869 nm 波段的气溶胶散射及离水 辐射之间的关系,提出了珠江口二类水体 MODIS 数据的大气校正算法。通过与 MODIS 数据标准大气 校正算法、基于短波波段的二类水体 MODIS 数据大气校正算法相比,表明珠江口二类水体 MODIS 数 据的大气校正算法具有一定的优势。

关键词: MODIS; 珠江口; 大气校正 中图分类号: P47
文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)08-0086-06

在可见光、近红外及短波红外波段, 星载或机载 传感器所接收到的辐射主要是地面-大气系统反射 和散射的太阳辐射, 辐射信号中包含了地面和大气 的综合信息, 如何将遥感影像中的大气影响去除, 从而获取精确的地面反射率信息是遥感定量分析的 关键, 也是进行遥感影像预处理的一个重要环节, 该步骤也称之为遥感图像的大气校正。由于海水的 光谱信号很弱, 在卫星传感器所接收到的辐射量中, 来自海水的辐射量不足全部辐射量的 20%, 而超过 80%的辐射量是由大气等非海水辐射产生的。因此, 大气校正对海洋水色遥感显得尤为重要, 是海洋水 色遥感的关键技术之一^[1]。

对于水体较为浑浊的近岸二类水体,基于两个 近红外波段的离水辐亮度为0假设的 MODIS 标准大 气校正算法(NIR 算法)不再适用。如何消除离水辐射 对大气校正的影响,使 NIR 算法能够适用于二类水 体是众多学者研究的重点。假定 NIR 算法中用于大 气校正的两个近红外波段的气溶胶散射和离水辐射 满足一定的关系,结合大气校正的基本方程,计算 出两个用于大气校正的近红外波段的离水辐射 值^[2,3]。利用生物光学模型,通过迭代的方法来确定 近红外波段的离水辐射^[4]。利用二类水体短波波段离 水辐射为 0 的特点,采用短波波段计算气溶胶散射 (SWIR 算法)^[5]。

二类水体大气校正模型的建立往往需要通过一 些近似条件,借助于一些经验公式。由于二类水体海 洋水色成分复杂,对于不同地区的二类水体,这些 经验公式往往差异较大,短波波段主要用于陆地遥 感, 信噪比较低, 因此, 二类水体的大气校正问题并 没有得到真正的解决。建立本地化的生物光学模型 或不同波段之间离水辐射之间的关系, 加强水体水 色成分固有光学特性的研究, 精确计算近红外波段 的离水辐射, 提高大气校正的精度仍然是二类水体 大气校正值得研究的问题。

1 大气校正的基本原理

1.1 大气校正基本方程

来自大气外层的太阳光通过大气的瑞利散射和 气溶胶散射,其中一部分返回到卫星水色扫描仪, 另一部分朝前直射或漫散射到达海面。到达海面的 直射光中一部分由于镜面反射穿过大气到达卫星水 色扫描仪,另一部分经水面折射穿过水面时受到水 色因子,如叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等物质的散 射与吸收,后向散射部分经水面折射离开水面后穿 过大气到达卫星水色扫描仪。可能到达卫星水色扫 描仪的总辐射量可以表示为:^[6]

 $L_{t}(\lambda) = L_{r}(\lambda) + L_{a}(\lambda) + L_{ra}(\lambda) + t(\lambda)L_{f}(\lambda) + t(\lambda)L_{w}(\lambda) \quad (1)$

式中 $L_t(\lambda)$ 为水色传感器接收到的总辐射量, $L_r(\lambda)$ 为来自大气分子的瑞利散射, $L_a(\lambda)$ 为来自大 气的气溶胶散射, $L_{ra}(\lambda)$ 为来自瑞利与气溶胶之间

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 8 期

收稿日期: 2010-04-24; 修回日期: 2010-06-04

基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项(200805028); 广东海洋 大学自然科学基金(1012151)

作者简介:刘大召(1972-),男,河南平顶山人,讲师,主要研究方向 为海洋水色遥感, E-mail: llddz@163.com

的多次散射, $t(\lambda)$ 为大气漫射透过率, $L_w(\lambda)$ 为离水 辐亮度。气溶胶散射也可以表示为反射率的形式:^[6]

$$\rho_{\rm w}(\lambda) = \frac{\pi L_{\rm w}(\lambda)}{F_0(\lambda)\cos\theta_0} \tag{2}$$

则公式(1)又可以用反射率的形式表示:

$$\rho_{\rm t}(\lambda) = \rho_{\rm r}(\lambda) + \rho_{\rm a}(\lambda) + \rho_{\rm ra}(\lambda) + t(\lambda)\rho_{\rm w}(\lambda) \tag{3}$$

1.2 瑞利散射

由于大气的组成成分较为稳定、大气密度变化 较小、加之人们对瑞利散射规律的认识和掌握都很 成熟、目前已经可以很精确地得到 L_r、特别是对于 MODIS 数据的对应波段, Gordon 等^[7]已给出瑞利散 射计算查找表, 该数据表格可以随 MODIS 数据处理 软件 SeaDAS 一起免费下载。利用查找表可以显著 地提高瑞利散射计算的效率、与直接求解传输方程 相比计算的最大误差不超过 0.5%、可以满足水色遥 感大气校正的要求。本文中瑞利散射在 SeaDAS 系 统中直接计算。

1.3 气溶胶散射

假设气溶胶波长指数在所研究的区域是恒定 的、气溶胶单次散射、所研究的区域存在"清洁水 体"的前提下, 气溶胶的单次散射可表示为^[3]:

 $L_{\rm as}(\lambda) = \frac{1}{4\pi\cos\theta} \omega_{\rm a}(\lambda)\tau_{\rm a}(\lambda)F_0(\lambda)T_{\rm oz}(\lambda)P_{\rm a}(\theta,\theta_0,\lambda) \quad (4)$

式中, $P_{a}(\theta, \theta_{0}, \lambda)$ 为气溶胶单次散射相函数, $\omega_{a}(\lambda)$ 为气溶胶单次散射反照率, $F_{0}(\lambda)$ 为大气层外 垂直入射的太阳辐照度, $T_{ox}(\lambda)$ 为臭气透过率, θ_0 和 θ 分别是太阳和传感器的天顶角。Gordon 等^[6]已 给出适用于 MOIDS 数据的 16 种气溶胶类型的查找 表,该数据表格也可以随 SeaDAS 软件一起免费下 载,利用查找表中提供的相关参数,可以计算出气 溶胶单次散射的值。由于气溶胶的单次散射会引入 较大的误差,需要考虑气溶胶与大气分子之间的多 次散射。Gordon^[8]发现了多次散射和单次散射之间存 在较好的线性关系:

$$L_{\rm ma}(\lambda) = K[\lambda, L_{\rm as}(\lambda)]L_{\rm as}(\lambda)$$
(5)

式中 $K[\lambda, L_{as}(\lambda)]$ 为单次散射与多次散射的转换 系数、利用气溶胶类型查找表可以计算出 $K[\lambda, L_{as}(\lambda)]$ 的值。

方法和步骤 2

气溶胶散射计算的方法 2.1

图 1 是 2006 年 12 月 25 日 469 nm 波段的归一 化离水辅亮度,陆地部分掩膜为黑色,大气校正失 败部分掩膜为灰色, 其中 NIR 算法和 SWIR 算法的 结果由 SeaDAS 系统处理得到。由图 1 可以看到 NIR 算法与 SWIR 算法在珠江口内的二类水体区域是失 败的、没有能够得到合理的归一化离水辅亮度值。

为了对算法进行改进、我们对珠江口及其邻近海 域的用于大气校正的两个近红外波段的L_a和L_w进行了 研究。利用 SWIR 算法, 在 SeaDAS 系统中对 2005 年 12月22日、2006年12月25日及2007年11月23日 的 MODIS 数据进行处理,采用麻金继等^[9]提出的 MODIS 数据近岸二类水体的划分算法确定研究区域 的一类水体与二类水体区域,研究结果如图2所示。



NIR算法

图 1 3 种算法得到的珠江口海域 MODIS 数据 469 nm 波段归一化离水辅亮度分布图

Distribution of the normalized water-leaving radiance derived from three different algorithms for MODIS 469 nm band Fig. 1 in the Pearl River Estuary

由图 2 可以看出, 尽管 *L*_a 及 *L*_w 的变化范围较大 并且时间范围上跨越了 2005, 2006 及 2007 年 3 年, 748, 869 nm 波段的 L_a 及 L_w均保持了良好的线性相 关性, 确定系数 R^2 在 0.9 以上, 两个波段的 L_a 的比

值与 L_w 的比值保持了基本的恒定。由于气溶胶在许 多情况下水平分布比较均匀^[10],再者选择的研究区 域仅限于珠江口海域,对于邻近区域气溶胶各参数 的取值不会差别太大,因此,可以认为珠江口二类 水体的 L_a 也满足上述的线性关系,则可以得到 748, 869 nm 波段 L_a 之间的关系式:

$$L_{\rm a}(\lambda_{\rm s}) = k_1 L_{\rm a}(\lambda_{\rm l}) \tag{6}$$

式中 λ_s = 748 nm, λ_1 = 869 nm, k_1 =1.4153。 同理可以得到 748, 869 nm 波段 L_w 之间的关系式:

 $L_{\rm w}(\lambda_{\rm s}) = k_2 L_{\rm w}(\lambda_{\rm l}) \tag{7}$ 式中 k_2=2.0938。

设 $L_{t-r}(\lambda) = L_t(\lambda) - L_r(\lambda)$,结合式(1),则可以得

到式(8), (9):

$$L_{t-r}(\lambda_s) = L_a(\lambda_s) + t(\lambda_s)L_w(\lambda_s)$$
(8)

$$L_{t-r}(\lambda_1) = L_a(\lambda_1) + t(\lambda_1)L_w(\lambda_1)$$
(9)

对于近红外波段, *t*(λ)≈1, 联立上面式(6), (7), (8), (9)可以得到 869, 748 nm 波段气溶胶散射值:

$$L_{\rm a}(\lambda_{\rm l}) = \frac{L_{\rm t-r}(\lambda_{\rm s}) - k_2 L_{\rm t-r}(\lambda_{\rm l})}{k_{\rm l} - k_2}$$
(10)

$$L_{\rm a}(\lambda_{\rm s}) = k_{\rm l} L_{\rm a}(\lambda_{\rm l}) \tag{11}$$

式中 $L_{t-r}(\lambda_s)$, $L_{t-r}(\lambda_l)$ 分别为假设两个波段离水 辐射为 0 得到的气溶胶散射值,可以由 MODIS 数据 获得, $L_a(\lambda_s)$, $L_a(\lambda_l)$ 分别为修正后的两个波段的气 溶胶散射值。



图 2 MODIS 数据 748, 869 nm 波段 L_a , L_w 的关系图 Fig. 2 The relationship between MODIS 748 and 869 nm bands

2.2 气溶胶散射计算的步骤

根据以上的推导,珠江口及其邻近海域二类水 ^{雍.}

体大气校正区域性算法(Local 算法)概括为以下的步骤:

第一步,利用式(10)和 (11)求出 869,748 nm 波

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 8 期

段的 L_a。

第二步, 根据 16 种气溶胶查找表, 利用式(4)将 由 MODIS 图像得到的 $\lambda_s 与 \lambda_1$ 波段的气溶胶多次散 射转化为单次, 记为 $L_{asi}(\lambda_s)$, $L_{asi}(\lambda_1)$, a 代表气溶胶, s 表示气溶胶单次散射, *i*=1, 2, 16。

第三步,利用式(2)将 $L_{asi}(\lambda)$ 转换为 $\rho_{asi}(\lambda)$,计 算 $\rho_{asi}(\lambda_s)$ 与 $\rho_{asi}(\lambda)$ 的比值,记为 $\varepsilon_i = \frac{\rho_{as}(\lambda_s)}{\rho_{as}(\lambda_1)}$ 。 第四步,计算 16 个 ε_i 的均值,记为 $\overline{\varepsilon} = \sum_{i=1}^{16} \varepsilon_i$ 。

第五步, 根据 16 种气溶胶查找表, 利用式(3)及 (4)计算 748, 869 nm 波段气溶胶单次散射反射率的

比值, 记为 $\varepsilon_{\text{mod}i} = \frac{\rho_{\text{mod}i}(\lambda_s)}{\rho_{\text{mod}i}(\lambda_l)}$, mod 代表气溶胶类型。

第六步,设 $\varepsilon_{\text{errori}} = \left| \varepsilon_{\text{mod}i} - \overline{\epsilon} \right|$,计算每一种气溶 胶模型 $\varepsilon_{\text{errori}}$ 。

第七步, 对 $\varepsilon_{\text{errori}}$ 进行从小到大排列。

第八步,将 $\varepsilon_{\text{errori}}$ 最大的两种气溶胶模型舍弃。

第九步, 对剩余的气溶胶模型, 重复第四步, 第 五步, 第六步, 第七步, 第八步, 直到最后剩余两种 气溶模型为止。

第十步,将剩余的两种气溶胶模型记为 mod_{max}, mod_{min},由 mod_{min}计算的 748, 869 nm 波段的气溶 胶反射率的比值记为 ε_{min} ,由 mod_{max} 计算比值记为 ε_{max} ,其中 $\varepsilon_{max} > \varepsilon_{min}$,每一种模型占的比例记为 r, 可表示为:

$$r = \frac{\overline{\varepsilon} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}$$
(12)

第十一步,根据 mod_{max} 气溶胶模型的参数,由 式(4)计算出气溶胶散射值,记为 $L_{as_max}(\lambda)$,同理 计算出 $L_{as_min}(\lambda)$,最终的气溶胶散射值可表示为:

 $L_{as}(\lambda) = L_{as_min}(\lambda)(1.0-r) + L_{as_max}(\lambda)r$ (13) 第十二步、利用式(5)将气溶胶单次散射转换为

多次散射。 第十三步、结合在 SeaDAS 系统中求出的总辐

射,瑞利散射,利用式(1),即可求出离水辐射。

3 结果分析

由图 1 可以看到,相对于 NIR 算法与 SWIR 算法, Local 算法的近岸二类水体的大气校正得到了比

较明显的改进, NIR 算法与 SWIR 算法大气校正失败 的珠江口内以及珠江口西部沿岸的二类水体的归一 化离水辐亮度均取得了比较理想的值, 这为进一步 研究珠江口及其邻近海域的海洋生态环境, 提供了 有利的条件。另外, 从图 1 也可以看到, SWIR 算法 得到的归一化离水辐亮度的分布图有较多的条纹, 这可能与短波波段主要应用于陆地遥感, 其信噪比 较低有关。

为了进一步检验 Local 算法的有效性, 在珠江口 外选取了 6 个参考点(A, B, C, D, E, F)(如图 1 所示), 并分别对这 6 个参考点 3 种大气校正算法的结果进 行了比较,结果如图3所示。由图3可以看出,3种 算法中,由 NIR 算法得到的归一化离水辐亮度明显 低于另外两种算法、表明 NIR 算法高估了二类水体 气溶胶散射的值。所选择的6个参考点、除 F 参考点 外, 412, 443, 645, 667, 678 nm 波段处, Local 算法 与SWIR 算法的值比较接近,而469,488,531,551, 555 nm 波段处, Local 算法得到的离水辐亮度的值比 SWIR 算法高。二类水体中、悬浮物、叶绿素等物质含 量较高,往往会引起上述波长处离水辐射的增强, Local 算法更好地反映了这一变化。从图 2 可以看到, 由 SWIR 算法得到的 469 nm 波段的归一化离水辅亮度 有较多的负值、表明 SWIR 算法从一定程度上低估了 二类水体离水辅亮度的值, 而 Local 算法所得到的归一 化离水辅亮度高于 SWIR 算法, 表明由 Local 得到的结 果可能与实际的情况更接近,但由于缺少实测光谱数 据的验证、该结论还需要做进一步的验证。

4 结论

珠江口及其邻近海域的二类水体 748,869 nm 波 段的 $L_a \gtrsim L_w$ 均保持了良好的线性相关性,确定系数 R^2 在 0.9 以上,两个波段的 L_a 的比值与 L_w 的比值保 持了基本的恒定。通过与 NIR 算法及 SWIR 算法的 对比分析表明,本文所提出的 Local 算法较好地消除 了离水辐射对 748,869 nm 波段的 L_a 的影响,更适合 于珠江口及其邻近海域二类水体 MODIS 数据的大 气校正。由于缺少与 MODIS 数据同步的实测数据进 行精度检验,Local 算法的真实程度还有待于进一步 探讨,另外,本算法建立在珠江口及其邻近海域冬 季 MODIS 数据的基础上,该算法在其他海域和该海 域其他季节的适用性也需要做进一步的研究。 研究论文 • <u>┃ î IIII</u> ARTICLE



图 3 由 3 种算法得到的 MODIS 可见光及近红外波段归一化离水辐亮度

Fig. 3 Normalized water-leaving radiance derived from three different algorithms for MODIS visible and near infrared bands

参考文献:

- [1] 陈楚群.海洋水色遥感资料红光波段的大气纠正[J].热带海洋, 1998, 17(2): 81-87.
- [2] Ruddick k G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of WeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. Applied Optics, 2000, 39: 897-912.
- [3] 韦钓.珠江口二类水体大气校正方法研究[D].广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2001.
- [4] Siegel D A, Wang Menghua, Maritorena S, et al.Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3582-3591.
- [5] Wang Menghua, Shi Wei. Estimation of ocean contribution at the MODIS near-infrared wavelengths along the east coast of the U.S.: Two case studies[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(13): L13606.
- [6] Gordon H R, Wang Menghua. Retrieval of wa-

ter-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm[J]. **Applied Optics**, 1994, 33: 443-452.

- [7] Gordon H R, Brown J W, Evans R H. Exact rayleigh scattering calculations for use with the nimbus-7 coastal zone color scanner[J]. Applied Optics, 1988, 27: 862-871.
- [8] Gordon H R, Voss K J. MODIS normalized water-leaving radiance algorithm theoretical basis document (MOD 18), Version 4[EB/OL]. http://oceancolor. gsfc.nasa.gov/DOCS/atbd mod17.pdf, 1999-03-30.
- [9] 麻金继,陶安,王家成,等.基于MODIS图像海岸带 二类水体的提取[J].武汉大学学报(信息科学版), 2007, **32**(1): 78-80.
- [10] Hoppel W A, Fitzgerald J W, Frick G M, et al. Aerosol size distributions and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean[J]. Geophysical Research, 1990, 95: 3659-3686.

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 8 期

90



Atmospheric correction of MODIS data over case Π waters at the Pearl River Estuary

LIU Da-zhao

(Information College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China) Received: Apr., 24, 2010

Key words: MODIS; the Pearl River Estuary; atmospheric correction

Abstract: The hypothesis that the near infrared band water-leaving radiance is zero is no longer valid over case Π waters, leading to the MODIS standard atmospheric correction algorithm failure. The Pearl River Estuary is the main study area in this paper; the relationship between the aerosol scattering and water leaving-radiance at 748 and 869 nm bands were studied; and a regional atmospheric correction algorithm for MODIS over case Π waters in the Pearl River Estuary was proposed. Compared with the standard atmospheric correction algorithm and atmospheric correction algorithm for correction algorithm for case Π waters based on the short-wave band, the new one had some advantages.

(本文编辑: 刘珊珊)

《海洋科学》杂志 2010 年征订启事

《海洋科学》是由中国科学院海洋研究所主办、科学出版社出版的学术性期刊,是中国自然科学核心期 刊、华东地区优秀期刊、山东省优秀期刊。本刊以密切联系生产实际、服务于我国现代化建设为宗旨,及时、 快速报道海洋学及其分支学科的新成果、新理论、新观点、新工艺及新进展等,对重大科研和应用性研究成 果特别予以优先报道。主要刊载内容有:海洋生物、海洋水产生产、海洋活性物质提取、海洋环境保护、海 洋物理、物理海洋、海洋地质、海洋化学、海洋工程、海洋仪器研制等方面的学术论文、研究报告、研究简 报、专题综述、学术讨论和争鸣、学术动态以及新产品介绍(有偿刊登)等。

本刊为月刊,每月9日出版,大16开本,96页,每期定价30元,全年定价360元。本刊国内外公开发行(国际刊号:ISSN1000-3096;国内刊号:CN37-1151/P;国内邮发代码:2-655;国外发行代号:M6666)。 全国各地邮局均可订阅。欢迎各科研机构、高等院校、生产厂家和从事该领域研究的科技人员踊跃订阅。邮 局订阅不便者可直接向本刊编辑部订购。本刊发行量在同类期刊中名列前茅,订户遍及全国20多个省、市、 自治区,影响面广,宣传力大,欢迎广大的广告客户在本刊刊登广告,价格优惠。

欢迎订阅《海洋科学》 欢迎广告惠顾

《海洋科学》编辑部地址:山东省青岛市南海路7号,266071

电话及传真: 0532-82898755

E-mail: pxzhang@qdio.ac.cn