

西沙群岛岛礁区域 WorldView-2 影像大气校正

陈启东¹, 邓孺孺¹, 陈蕾², 秦雁¹, 何颖清³, 田建林⁴

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广东 广州 510300;

3. 珠江水利科学研究所, 广东 广州 510611;

4. 吉首大学城乡资源与规划学院, 湖南 张家界 427000

摘要: 高空间分辨率 WorldView-2 多波段影像方法在岛礁遥感监测方面应用潜力很大, 但大气校正精度对其定量化应用有着重要影响。文章针对海洋遥感中 WorldView-2 影像大气校正的问题, 改进传统的暗目标校正方法, 以清、深海水和岛屿纯浓密植被作为暗目标, 对西沙群岛岛礁区域进行应用示范, 实现了各波段的大气校正。结果显示, 该方法得到的结果无论从光谱形状还是地物反射率值, 大气校正前后反射率值与现场实测值都能够较好吻合。

关键词: WorldView-2 影像; 大气校正; 西沙岛礁

中图分类号: P737.23; TP751 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)03-0088-07

Atmospheric correction of WorldView-2 data for the Xisha Islands and reefs imagery

CHEN Qi-dong¹, DENG Ru-ru¹, CHEN Lei², QIN Yan¹, HE Ying-qing³, TIAN Jian-lin⁴

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, South China Sea branch, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China;

3. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China;

4. College of Resources and Planning Science, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China

Abstract: The high-resolution multi-band data of WorldView-2 has a great potential in monitoring islands and underwater reefs using remote sensing technology. The precision of atmospheric correction is an important and necessary procedure for quantitative application of such data. This study illustrates an effective atmospheric correction method of WorldView-2 images for marine applications, which is based on the traditional dark-object subtraction technique. Atmospheric correction was performed by selecting and extracting the deep clear water and dense vegetation of islands, respectively, as dark target pixels. Using the Xisha Islands and reefs as a study area, the WorldView-2 eight-band imagery was applied to calculate aerosol parameters, and the actual surface reflectance was obtained. In order to verify the results, we compared the retrieved reflectance with the original reflectance and field measurement data. The comparison shows that the computed reflectance was close to the situ measurement data in terms of both spectral shape and reflectance value.

Key words: WorldView-2 imagery; atmospheric correction; Xisha Islands and reefs

在海洋遥感应用中, 传感器接收到的能量中大气信号占很大比例, 从遥感图像中定量提取水体及水下礁盘底质信息, 首先必须进行精确的大气校正。现已有

很多大气校正的方法与模型, 最著名的有 LOWTRAN、MORTAN、6S 和 ATCOR 模型等(吴北婴, 1998; Vermote, et al, 1997; 王建 等, 2002)。当输入的大气参

收稿日期: 2012-11-06; 修订日期: 2013-08-21。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071230、41301452); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201205040); 国家科技支撑计划项目(2012BAH32B00); 广东省科技计划项目(2011A011301001)

作者简介: 陈启东(1983~), 男, 安徽省庐江县人, 博士生, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: leqiao7@163.com

通信作者: 邓孺孺。E-mail: eesdr@mail.sysu.edu.cn

数准确时, 这些模型的校正精度较高, 然而实时测量大气气溶胶参数常难以实现, 事实上这是大气校正的难点之一。获得遥感图像成像时大气气溶胶参数的最简便途径是直接从图像上提取, 因此有人提出了暗目标减法(dark-object subtraction, DOS), 也称为暗像元法(Chavez, 1988)。最早的 DOS 法通过直接减去最小地表反射率实现大气校正(Chavez, 1996), 是一种统计的方法。很多学者对 DOS 法进行了改进(Liang, et al, 1997; Fallah-Adl, et al, 1997; 程伟 等, 2008; 何颖清等, 2010; 周立国 等, 2011; 陈蕾 等, 2012), 这些改进的方法可以较好地考虑成像时的大气状况。

很多学者对水色遥感的大气校正算法进行了研究。最广泛应用的是 Gordon 和 Wang 给出的针对 SeaWiFS 的大气校正算法, 美国宇航局 NASA 将其作为 SeaWiFS 资料大气校正的标准算法(Gordon and Wang, 1994)。Gordon 算法主要是针对 类水体建立的(张民伟等, 2009; 陈楚群, 2005)。Hu 等(2000)在 Gordon 算法的基础上提出了针对 类水体的大气校正算法。水色遥感大气校正算法早期基本上是针对 CZCS(coastal zone color scanner, 海岸带扫描仪)和 SeaWiFS(sea-viewing wide field-of-view sensor, 海洋宽视场扫描仪)水色卫星, 后来扩展到 MSS(multispectral scanner, 多光谱扫描仪)和 TM(thematic mapper, 专题制图仪)等(陈蕾 等, 2012; Zhang, et al, 1999)。上述方法一般是以 2 个近红外波段清洁水体的离水反射率为零为前提, 但目前的高分辨率卫星传感器尚没有类似的波段设置, 因此上述方法不能直接用于高分辨率卫星遥感数据。

WorldView-2 卫星提供独有的 8 波段高空间分辨率影像, 多光谱影像分辨率是 2m, 全色影像是 0.5m。其多光谱数据除了 4 个常见的波段即蓝光波段 Band 2(450~510nm)、绿光波段 Band 3(510~550nm)、红光波段 Band 5(630~690nm)和近红外波段 Band 7(770~895nm), 还提供了 4 个新的光谱波段, 分别为海岸波段 Band 1(400~450nm)、黄光波段 Band 4(585~625nm)、红边波段 Band 6(705~745nm)和近红外 2 波段 Band 8(860~1040nm)。WorldView-2 数据以其高空间分辨率及特设的海岸波段在岛礁遥感监测中有很大应用潜力, 但海岸波段受到大气散射影响强烈, 精确大气校正显得尤为重要。该影像虽有 2 个近红外波段但其中一个宽波段且中心波长位于水

汽吸收带, 影响因素复杂; 另一个可能会由于水中杂质或底质影响, 导致该波段的离水反射率不能认为是 0。文章主要针对 WorldView-2 影像在海洋应用时大气校正中存在的问题, 以清、深海水和岛屿纯浓密植被作为暗像元, 对传统暗目标校正方法进行改进, 实现西沙岛礁区 WorldView-2 影像大气校正, 研究成果可为精确定量提取岛礁信息奠定基础。

1 研究区概况及数据预处理

西沙群岛地处热带中部, 属热带季风气候, 终年炎热湿润, 地势平坦, 植被茂密。由于地处低纬, 正午太阳高度角较大、阴影像元很少, 难以使用传统植被阴影暗像元。针对研究区特点, 以清、深水体和浓密植被作为暗像元进行大气校正。文中采用 WorldView-2 8 波段遥感影像, 成像日期为 2010 年 2 月 7 日, 图幅中心坐标为北纬 16°59′、东经 112°16′。成像时太阳天顶角 40.5°, 方位角 141.3°; 卫星观测角 22.5°, 方位角 58.6°。

1.1 辐亮度转换

WorldView-2 影像像元值(digital number, DN)是 16bit 正整数, 将 DN 值转换成大气顶部的光谱辐射亮度值, 才方便进行定量计算。辐亮度转换分 2 步: 先将像元 DN 值转换为波段积分辐射亮度(band-integrated radiance) L_1 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); 然后计算光谱辐射亮度 L ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)(张国坤 等, 2008)。

$$L_1 = \text{DN} \cdot \text{absCalFactor} \quad (1)$$

$$L = L_1 / \Delta\lambda \quad (2)$$

式中, absCalFactor 是绝对定标因子, 记录在 *.IMD 文件中; $\Delta\lambda$ 是波段有效宽度(μm)。

1.2 行星反射率计算

假设地面是朗伯反射且天空辐照度各向同性, 卫星观测到的行星反射率可写为:

$$R(\lambda) = \frac{\pi d^2 L(\lambda)}{E_0(\lambda) \cos \theta} \quad (3)$$

其中, $R(\lambda)$ 表示行星反射率, 即未经大气校正的反射率; $L(\lambda)$ 为光谱辐射亮度; d 为成像时日地距离与平均日地距离之比, 可从天文年历中查到; $E_0(\lambda)$ 为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), 8 个波段参数见表 1; θ 为太阳天顶角($^\circ$), 可从 *.IMD 文件中读取。

表 1 WorldView-2 影像的太阳光谱辐照度

Tab. 1 The solar spectrum irradiance of WorldView-2 imagery

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
等效波段/nm	400~450	450~510	510~580	585~625	630~690	705~745	770~895	860~1040
$E_0/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	1758	1974	1856	1738	1559	1342	1070	861

2 研究方法

2.1 大气校正原理

对于光学波段, 卫星传感器接收到的辐亮度 L 包括经大气衰减后的地物表面反射辐亮度 L_r ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$) 以及大气路径辐射 L_p ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$), 可表示为:

$$L = L_r \exp(-\tau \sec \varphi) + L_p \quad (4)$$

式中, φ 为卫星传感器观测天顶角($^\circ$), τ 为整层大气光学厚度(m^{-1}) (何颖清 等, 2010)。

假设地面为朗伯反射, 天空晴朗无云, 忽略大气的折射、湍流, 则地物表面反射辐亮度为:

$$L_r = R_g \frac{[E_0 \cos \theta \exp(-\tau \sec \theta) + E_d]}{\pi} \quad (5)$$

式中, E_0 为大气层外太阳辐照度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$); R_g 为地物表面反射率; 天空光漫射到地表面的光谱辐照度 $E_d = k_m E_0 \omega_m + k_a E_0 \omega_a$, ω_m 、 ω_a 分别是大气分子和气溶胶散射系数; k_m 、 k_a 分别是大气分子和气溶胶的散射光下行分量的比例, 大气分子散射属于瑞利散射, k_m 为 0.5 (Slater, 1980)。

大气路径辐射 L_p 包括大气分子瑞利散射和气溶胶散射能量组成, 表达式为:

$$L_p = \frac{E_0 \omega_m}{4\pi} P_m(\vartheta) + \frac{E_0 \omega_a}{4\pi} P_a(\vartheta) \quad (6)$$

式中, ϑ 为散射角, 根据几何关系可计算, $\cos(\pi - \vartheta) = \cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi \cos \sigma$; σ 为观测方向与入射方向的方位角差; $P_m(\vartheta)$ 、 $P_a(\vartheta)$ 分别为大气分子和气溶胶的散射相函数, 大气分子瑞利散射相函数为 $P_m(\vartheta) = 3(1 + \cos^2 \vartheta)/4$ (盛裴轩 等, 2003)。对于海洋气溶胶, 后向散射远小于前向散射, 这里假设后向半球各个方向的散射强度相同, 也就是不考虑散射相函数, 只在 2π 半球空间内进行辐照度与辐亮度的换算:

$$L_p = \frac{E_0 \omega_m}{4\pi} P_m(\vartheta) + \frac{E_0 \omega_a}{2\pi} (1 - k_a) \quad (7)$$

表 2 瑞利散射光学厚度

Tab. 2 Rayleigh scattering optical thickness

WV-2	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
中心波长/nm	425	480	545	605	660	725	832	950
$\tau_a(\lambda)/(\text{m}^{-1})$	0.2801	0.170	0.101	0.066	0.046	0.032	0.018	0.0107

2.2.2 气溶胶光学参数

气溶胶光学厚度取决于大气中气溶胶的浓度及其粒度谱。文中借助影像暗像元求解气溶胶参数, 暗像元的选择方案为以下2种: 一是选择开阔的清、

大气光学厚度 $\tau = \omega + \alpha$, α 为整层大气吸收系数, ω 为整层大气散射系数, 有 $\omega = \omega_m + \omega_a$ 。卫星传感器的工作波段常位于大气窗口, 大气吸收作用很小, 忽略大气吸收有: $\omega = \tau$ 。

行星反射率 $R' = \frac{\pi L}{E_0 \cos \theta}$, 结合(4)~(6)式得 R' :

$$R' = R_g e^{-\tau(\sec \varphi + \sec \theta)} + R_g l_m + k_a R_g \sec \theta \tau_a e^{-\tau_a \sec \varphi} + \rho_m + \frac{\tau_a (1 - k_a)}{2} \sec \theta \quad (8)$$

式中, $l_m = k_m \sec \theta \tau_m e^{-\tau_m \sec \varphi}$, $\rho_m = \frac{\tau_m P_m(\vartheta)}{4} \sec \theta$, 这 2 项有关大气分子散射参数, 已经可以通过成熟的算法得到, 其中 τ_m 是大气分子光学厚度(m^{-1}); τ_a 是气溶胶光学厚度(m^{-1})。式(8)是构建的大气校正方程, 可简化表达为:

$$R_g = A \cdot R' + B \quad (9)$$

式(9)中, A 、 B 是大气校正系数。求出 A 、 B 的关键是获得气溶胶光学厚度 τ_a 和散射下行比例 k_a 。因此大气校正可分以下 2 个步骤实现: 1) 选取图像中清、深海水和浓密植被且已知其反射率的特殊像元, 利用(8)式求取气溶胶参数 τ_a 和 k_a ; 2) 根据已知 τ_a 和 k_a , 代入(9)式中求得大气校正系数 A 、 B , 从而求得地面反射率 R_g 。

2.2 大气光学参数计算

2.2.1 大气分子光学参数

大气分子瑞利散射光学厚度在全球范围内是比较稳定的, 主要依赖于海拔高度, 可以写成波长和海拔高度的函数。这里认为海面上压强为标准大气压, 由Hansen和Travis(1974)给出的瑞利散射光学厚度计算式为:

$$\tau_m(\lambda) = 0.008569 \lambda^{-4} (1 + 0.0113 \lambda^{-2} + 0.00013 \lambda^{-4}) \quad (10)$$

式中, λ 为波长(μm)。WorldView-2 卫星影像给出等效波段宽度, 采用各波段中心波长计算其瑞利散射光学厚度, 如表 2。

深水体作为暗像元。清、深水体组成成分稳定, 反射率可以通过地物光谱仪直接测量得到, 也可以通过水色遥感模型模拟。由于清、深水体反射率均较低, 该方法对所有光学波段均适用。二是以纯浓密

植被作为暗像元。浓密植被在可见光波段反射率低, 可以作为暗像元, 但不适合红外波段。暗像元地物反射率可在标准地物光谱库中查找或现场测量。文中采用实地测量这2种暗像元反射率数据, 采集仪器是ASD公司的Fieldspec 3光谱仪, 水体光谱采集地点水深约200m, 悬浮物浓度是 $7.7\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 叶绿素a浓度是 $0.04\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 浓密植被采集地点位于赵述岛。下面分别针对这2种暗像元特点简化大气方程求解气溶胶光学参数。

清、深水体强吸收导致反射率值较低, 避开太阳耀斑各波段反射率一般不超过 5%, 在红光波段以后反射率接近 0。WorldView-2 卫星成像时, 与太阳成一定角度的方位差, 可认为传感器避开了大部分太阳耀斑, 即认为选择的清、深水体暗像元值没有太阳直射光的反射。所以针对清、深水体暗像元, 式(8)改写为:

$$R'_w = R_w I_m + \rho_m + k_a R_w \sec \theta \tau_a e^{-\tau_a \sec \theta} + \frac{\tau_a (1 - k_a)}{2} \sec \theta \quad (11)$$

式中, R'_w 、 R_w 分别为清、深水体暗像元行星反射率和水表面反射率。为了计算方便在首次计算时忽略相对低值的水面对天空光的反射, 计算初步的气溶胶光学厚度, 然后通过多次迭代运算方法来不断修正。忽略水面对天空光反射, 式(11)简化为:

$$R'_w = \rho_m + \frac{\tau_a (1 - k_a)}{2} \sec \theta$$

$$\text{即 } \tau_a = \frac{2(R'_w - \rho_m)}{(1 - k_a) \sec \theta} \quad (12)$$

浓密植被像元具有典型植被特征: 归一化植被指数(NDVI)值较大、近红外反射率高。同时 NDVI 受大气影响较小, 可针对 NDVI 和红外波段行星反射率大于某一阈值作为提取浓密植被像元的依据。对于纯浓密植被像元, 式(8)改写为:

$$R'_v = R_v I_m + \rho_m + R_v e^{-\tau(\sec \theta + \sec \varphi)} + k_a R_v \sec \theta \tau_a e^{-\tau_a \sec \theta} + \frac{\tau_a (1 - k_a)}{2} \sec \theta \quad (13)$$

式中, R'_v 、 R_v 分别为纯浓密植被像元行星反射率和地

表反射率。令 $u = \sec \theta + \sec \varphi$ 。当 $\tau \cdot u$ 和 τ_a 都远小于 1 时, $\exp(-\tau \cdot u) \approx 1 - \tau \cdot u$, $\tau_a \exp(-\tau_a \sec \varphi) \approx \tau_a$, 首次计算时利用这 2 个近似式, 在短波段会出现一定误差, 但在后面迭代计算中得到修正。公式(13)可简化为:

$$R'_v = R_v I_m + \rho_m + R_v [1 - (\tau_m + \tau_a) \cdot u] + k_a R_v \sec \theta \tau_a + \frac{\tau_a (1 - k_a)}{2} \sec \theta$$

$$\text{即 } \tau_a = \frac{2(R'_v - R_v - R_v I_m - \rho_m + R_v u \tau_m)}{-2R_v \cdot u + 2k_a R_v \sec \theta + (1 - k_a) \sec \theta} \quad (14)$$

在(12)和(14)式中, R'_w 和 R'_v 值可在行星反射率图像上读取, 未知数有气溶胶散射下行比例系数 k_a 和气溶胶光学厚度 τ_a 。WorldView-2 影像 Band 5(红光波段)得到的清、深水体和浓密植被反射率都很低 ($<5\%$), 所以该波段 2 种暗像元计算得到的光学厚度精度都比较高, 且认为是相等的。故式(12)和(14)联立方程组, 以 Band 5 数据计算出 k_a 和 τ_a 值, 这是第一次计算得到较粗略的 k_a 和 τ_a , 为便于与后面再次计算区别, 将它们分别记作 k_{a1} 和 τ_{a1} 。

对于清、深水体像元, 将首次计算的 k_{a1} 和 τ_{a1} 代入(11)式中的天空光项中, 式(11)较精确地表示为:

$$\tau_a = \frac{2(R'_w - R_w I_m - \rho_m - k_{a1} R_w \sec \theta \tau_{a1} e^{-\tau_{a1} \sec \theta})}{(1 - k_a) \sec \theta} \quad (15)$$

同样, 对于纯浓密植被像元, 将首次计算的 k_{a1} 和 τ_{a1} 代入(13)式中指数项中, 式(13)较精确地表示为:

$$\tau_a = \frac{2(R'_v - R_v I_m - \rho_m - R_v e^{-(\tau_m + \tau_{a1})u})}{2k_a R_v \sec \theta e^{-\tau_{a1} \sec \theta} + (1 - k_a) \sec \theta} \quad (16)$$

将(15)、(16)式联立方程组, 再次以 Band 5 数据计算出较精确的 k_a 和 τ_a 。同样的方法进行多次迭代运算, 获得更为精确的结果。本次实验前 5 次迭代求得 k_a 值分别为 0.932、0.898、0.853、0.839 和 0.837, 在 5 次以后计算的结果差异很小, 迭代趋向收敛。最终确定 k_a 值是 0.837。将 k_a 值代入(11)式, 以清、深水体暗像元求解其他波段光学厚度, 在短波波段有一定误差, 可通过 Ångström 公式进行修正, 结果如表 3。最终通过式(9)求得大气校正参数, 如表 4。

表 3 气溶胶光学厚度

Tab. 3 Aerosol optical thickness

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
$\tau_a(\lambda) / (\text{m}^{-1})$	0.2282	0.1882	0.1539	0.1305	0.1137	0.098	0.0789	0.0639

表 4 大气校正参数

Tab. 4 Parameters of atmospheric correction

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
A	2.4337	1.995	1.6366	1.4214	1.3269	1.2314	1.1465	1.121
B	-0.3307	-0.1888	-0.096	-0.0539	-0.0387	-0.0253	-0.0149	-0.012

3 结果分析

应用上述方法, 利用 PCI Geomatica v9.0 图像处理软件, 对赵述岛及附近礁盘的 WorldView-2 影像进行大气校正, 处理结果如图 1(a、b)所示。其中 (a) 为大气校正前的影像(Band 3、2、1 合成), (b) 为同一区域大气校正后的影像(Band 3、2、1 合成)。大气校正前, 由于 Band 1 受大气散射影响最严重, 合成后的影像呈现蓝色调, 模糊不清晰。大气校正后, 消除了大气的影响, 明显恢复了下垫面的原貌, 图像的对比度加强, 水下礁盘层次更清晰可见。

为了更好地检验大气校正的精度, 对校正前后纯像元反射率和实测地物反射率进行对比。受大气影响最严重的是短波波段, 在影像上选取可见光波段反射率较低水体和植被 2 种典型地物样本, 分别读取校正前后的反射率像元值, 并与实测值比较(图 2)。从图中看出, 大气校正前, 短波 Band 1 和 Band 2 受

到大气程辐射影响, 反射率值明显偏高, 同时曲线的形状也相差很远。大气校正后, 2 种样本反射率值都明显接近实测值。对于水体样本, 各个波段的反射率和校正前相比, 有明显的下降, 如前面 4 个波段(中心波长 425、480、545 和 605nm)分别下降了 73.2%、61.1%、49.6% 和 55.8%。同时表明传感器接收到的水体光谱信号中, 很大部分是大气分子和气溶胶散射造成的, 大气校正后突显了水下地物细节特征, 为下一步的参数反演提供保障。对于植被样本, 各个波段的反射率和校正前相比, 前面 5 个波段下降而后面 3 个上升, 变化最明显的是 Band 1、2、6、7, 校正后各波段与实测值更接近。从上述比较中看出, 消除大气影响后, 低反射率的地物如水体在各个波段反射率都降低, 而在高反射率地物如植被在红外波段反射率升高。说明大气对传感器接收到的能量影响不是简单单调的, 一方面大气的散射、吸收作用会削弱到达地表的能量; 另一方面大气的路径辐射又会增加

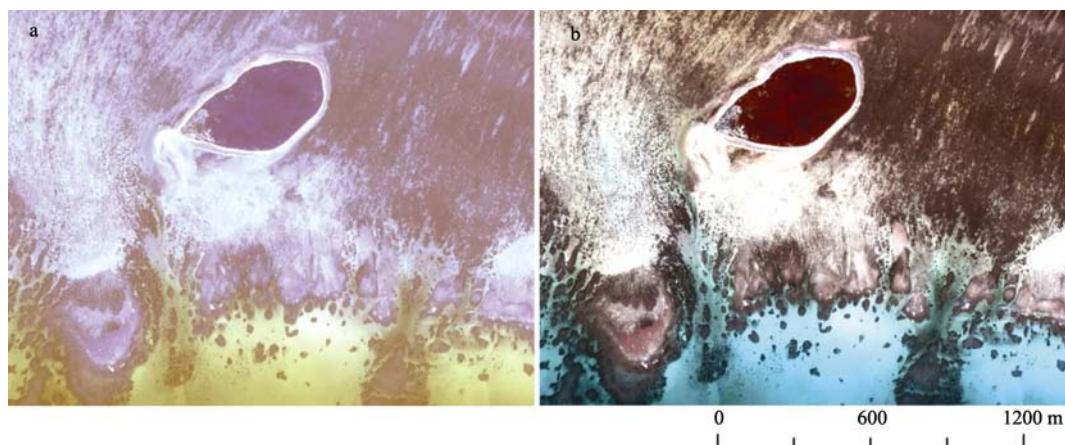


图 1 大气校正前后对比图

a. 大气校正前局部影像; b. 大气校正后局部影像

Fig. 1 Comparison between the imagery with and without atmospheric correction. (a) part of the imagery before atmospheric correction; (b) part of the same imagery after atmospheric correction

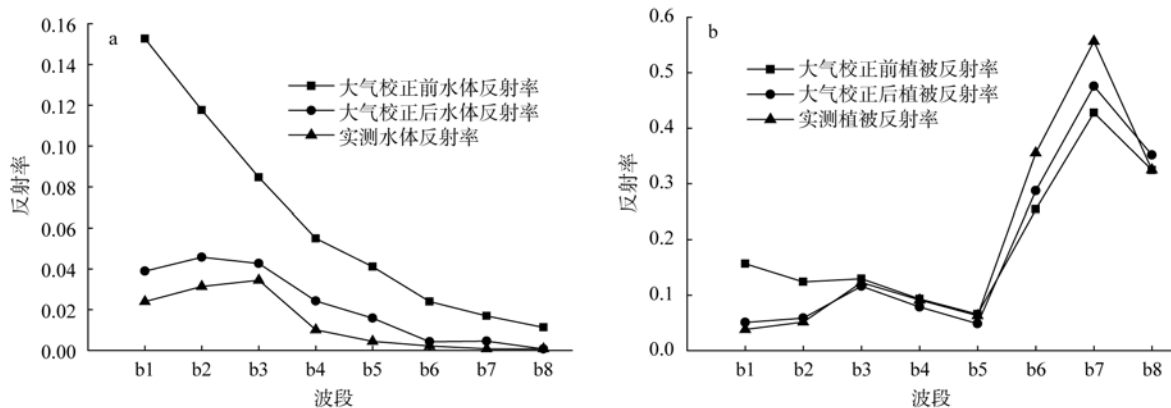


图 2 大气校正前后反射率同实测值的比较图

Fig. 2 The reflectivity before and after the atmospheric correction, and measured values of vegetation and water

传感器接收到的能量。两者对不同反射率地物有不同的主导作用。

针对水体像元, 我们对各波段的校正效果进行评价, 将校正后样本的反射率和实测反射率数据进行相对误差分析。蓝绿波段校正精度较高, 海岸波段次之, 红光和近红外相对误差较大。究其原因, 海岸波段大气散射强烈, 模型计算中难以完全消除大气影响; 水体在蓝绿波段的反射率较高, 大气散射影响不如海岸波段, 水体信号所占比例增大, 故大气校正精度也比较高; 红光和近红外波段的反射率值较小, 大气校正细微的差异都会对校正后的水体反射率产生较大的影响, 是相对误差较大的主要原因。Band 8位于水汽吸收峰, 在这里可能有一定误差。从整体上看, 各波段都得到很好的校正效果, 与实测值光谱形状基本相符。需要注意的是, 由于遥感影像每个像元和实测视场的范围不一致, 影像获取时间和实测时间也不是完全同步等原因, 导致图2中大气校正后像元值并不能和实测值完全一致。

4 结论

针对海洋遥感中 WorldView-2 影像大气校正的问题, 本文在传统暗像元方法基础上, 以清、深海水和岛屿纯浓密植被像元作为暗目标, 建立了 WorldView-2 影像在海洋应用中的大气校正算法。该方法考虑了海域上空气溶胶的特点, 对大气程辐射的确定方法进行改进, 具有以下特点:

1) WorldView-2 多光谱数据以其高空间分辨率和独特的海岸波段等设置, 在岛礁遥感监测应用中具有巨大潜力, 但目前常用的水色大气校正方法如 Gordon 等算法不能直接使用。本文通过对大气辐射表达式进行改进, 从影像中直接提取大气校正参考点, 提取卫星成像时刻的大气状态参数, 通过运用迭代法逼近真值, 同时克服了通常 DOS 法获取程辐射误差较大的不足, 减轻了大气参数难获取的瓶颈。

2) 气溶胶散射下行散射比例系数 k_a 的计算。海洋气溶胶主要以海水飞溅和蒸发产生的海盐粒子为主, 而海盐主要是大颗粒物, 故一般不能简单地认为天空光的下行散射比例为0.5, 即只考虑瑞利散射。通常选择植被阴影区作为暗像元, 但在热带太阳高度角较大的平坦地区难以找到, 文中借助清、深海水和纯浓密植被暗像元, 它们在Band 5(红)波段反射率均较低, 此波段计算的光学厚度精度较高。由于岛礁一般面积很小, 可认为2种暗像元计算的气溶胶参数相等, 通过迭代计算得到下行散射系数的真值。

本文采用的方法较好地去除了大气散射的影响, 具有相对较高的校正精度。与实测光谱的对比结果也预示了文中方法对下一步地物参数反演的有效性。文中方法针对海洋岛礁研究区的特点, 适合于地形平坦并有清、深水体的区域, 对水体和岛屿地物都可适用。另外文中方法的目的是对遥感影像进行大气校正, 水面镜面反射影响及离水反射率计算不在文章研究范围之内, 需要专门研究。

参考文献

- 陈楚群. 2005. 珠江口黄色物质及其遥感探测初步研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所: 1-165.
- 陈蕾, 邓孺孺, 何颖清, 等. 2012. 基于海岛阴坡植被和短波红外水体的遥感水色大气校正——以 ETM 影像为例[J]. 海洋学报, 34(5): 183-190.
- 程伟, 王黎明, 田庆久. 2008. 一种基于阴影像元的光学遥感大气校正方法[J]. 测绘学报, 37(4): 469-475.
- 何颖清, 邓孺孺, 陈蕾, 等. 2010. 复杂地形下自动提取多暗像元的 TM 影像大气纠正方法[J]. 遥感技术与应用, 25(4): 532-539.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社: 429.
- 王建, 潘竟虎, 王丽红, 等. 2002. 基于遥感卫星图像的 ATCOR2 快速大气纠正模型及应用[J]. 遥感技术与应用, 17(4): 193-197.
- 吴北婴. 1998. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社: 21-40.
- 张国坤, 陈春, 邢福, 等. 2008. QuickBird 数字遥感图像光谱辐射定标[J]. 光谱学与光谱分析, 28(3): 494-498.
- 张民伟, 唐军武, 丁静. 2009. 类水体遥感反演中的大气校正算法研究进展[J]. 海洋科学进展, 27(2): 266-274.
- 周立国, 马蔚纯, 顾万花, 等. 2011. 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, 31(8): 2238-2242.
- CHAVEZ P S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 24(5): 459-479.
- CHAVEZ P S. 1996. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62(9): 1025-1036.

- FALLAH-ADL H, JOSEPH JÁJÁ, LIANG SHUNLIN. 1997. Fast algorithms for estimating aerosol optical depth and correcting Thematic Mapper Imagery[J]. The Journal of Supercomputing, 10(4): 315–329.
- GORDON H R, WANG MENGHUA. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 33(3): 443–452.
- HANSEN J E, TRAVIS L D. 1974. Light scattering in planetary atmospheres[J]. Space Science Review, 16: 527–610.
- HU CHUANMIN, CARDER K L, FRANK E M. 2000. Atmospheric correction of seaWiFS imagery over turbid coastal waters: a practical method[J]. Remote Sensing of Environment, 74(2): 195–206.
- LIANG SHUNLIN, FALLAH-ADL H, KALLURI S, et al. 1997. An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land[J]. Journal of Geophysical Research, 102(D14): 17173–17186.
- SLATER P N. 1980. Remote sensing: optics and optical systems[M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company: 567–575.
- VERMOTE E F, TANRE D, DEUZE J L, et al. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(3): 675–686.
- ZHANG M, CARDER K, MULLER-KARGER F E, et al. 1999. Noise reduction and atmospheric correction for coastal applications of Landsat Thematic Mapper Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 70(2): 167–180.