

海岸带地区 SPOT 卫星影像大气校正 方法比较及精度验证

韩晓庆¹, 苏 艺², 李 静³, 张 芸⁴, 刘 佳², 高伟明²

(1. 河北省国土资源利用规划院, 石家庄 050051; 2. 河北师范大学资源与环境科学学院
河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024; 3. 河北交通职业技术学院交通工程系,
石家庄 050035; 4. 河北省地理科学研究所, 石家庄 050011)

摘要: 为获得反演海岸带地区地表真实反射率的最佳大气校正方法, 分别利用 DOS、6S 及 FLAASH 三种模型对 SPOT 卫星影像进行大气校正, 对比分析校正前后影像的典型地物光谱曲线及 NDVI 指数的变化情况, 并对结果进行精度验证。研究表明: 三种大气校正模型均能有效去除大气对遥感影像的影响, 获取较为准确的地表反射率信息; 对比河流、水库、海水、植被、城镇、裸地等六种典型地物校正前后的光谱曲线, 与 DOS 及 6S 模型相比, FLAASH 模型校正结果中各地物反射率差别较大、特征明显, 能较好的还原地表真实情况; NDVI 指数检验显示, FLAASH 模型对地物 NDVI 响应更强烈, 在地物光谱响应特征分析等方面具有更强的优势, 是三种模型中最适宜海岸带地区 SPOT 影像的大气反演方法。研究方法 & 结论可为同类研究提供参考与借鉴。

关键词: 海岸带; SPOT 影像; DOS 模型; 6S 模型; FLAASH 模型; 大气校正; 精度验证
文章编号: 1000-0585(2012)11-2007-10

1 引言

卫星遥感图像的大气校正, 一直是定量遥感研究的主要难点之一。近年来, 随着定量遥感技术迅速发展, 特别是利用多传感器、多时相遥感数据进行多行业的技术支持, 使得遥感图像大气校正方法研究越来越受到重视。

目前, 国内外研究学者已提出诸多大气校正模型及方法, 大致可以分为基于图像特征的相对校正法、基于地面线性回归模型法、基于大气辐射传输模型法和复合模型法四种^[1]。其中, 基于图像特征的相对校正法, 不需要同步测量地面光谱及大气参数, 仅利用遥感图像自身的信息对遥感数据进行定标, 如 DOS 模型、FF 模型、IARR 模型、LRC 模型及 EL 模型等^[2]; 基于地面线性回归模型法, 是假设地面目标的反射率与传感器探测的信号之间具有线性关系, 通过获取遥感影像上特定地物的灰度值及其成像时相应的地面目标反射光谱的测量值, 建立两者之间的线性回归方程式, 在此基础上对整幅遥感影像进行

收稿日期: 2011-11-05; 修订日期: 2012-04-15

基金项目: 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目 (09966719D); 国家海洋局“908”专项河北省海岸带及海岛调查 (HE908-01-03-04)

作者简介: 韩晓庆 (1981-), 男, 山东莱州人, 硕士, 工程师, 主要从事基于“3S”的环境演变研究。
E-mail: xqhan312@126.com

通讯作者: 高伟明 (1962-), 男, 河北滦县人, 教授, 主要从事海洋资源环境评价与可持续利用研究。
E-mail: gaowmd@263.net

辐射校正^[3, 4]；基于大气辐射传输模型，是利用电磁波在大气中的辐射传输原理建立起来的模型对遥感图像进行大气校正。如 LOWTRAN 模型、5S 模型、MODTRAN 模型、6S 模型、ACORN 及 FLAASH 模型等^[5]；复合模型法，即将两种或多种大气校正法组合使用，如将 Rahman 地表二向反射模型与基于地面 BRDF 反射率的大气校正方法结合^[6]，采用多变量回归、类神经网络及判别分析方式，比较多种不同大气校正程序^[7]，以及利用基于传感器辐射定标参数和大气辐射传输模型计算的方法进行大气订正等^[8]。

目前，许多学者使用一种或多种大气校正方法，针对多种传感器遥感数据，涉及多个研究领域，但对于陆海交接的海岸带地区，研究则较少^[9~12]。本研究采用大气校正中较为经典的 DOS、6S 及 FLAASH 模型，利用大气数据对海岸带地区的 SPOT 多光谱遥感影像进行大气校正，并根据研究区的实际情况，结合现有数据，利用大气校正前后典型地物光谱曲线及 NDVI 指数等指标的变化进行精度检验，以期获得适用于海岸带区域的最佳大气校正方案。

2 大气校正原理与方法

由于遥感影像成像过程极其复杂，传感器输出的能量包含了因太阳角度、成像大气条件、地表形态及传感器本身等因素所引起的影像失真，所以利用传感器观测目标的反射率时，传感器所得到的测量值，并非目标真实的光谱反射率^[13~17]。为准确评价目标地物的反射率特征，必须消除这些因失真带来的误差，将图像的数字量化值（DN）转化为辐射亮度值或反射率或表面温度等物理量，该过程即为辐射定标^[18]。

2.1 DOS 大气校正

黑暗像元法是一种简单且经典的大气校正方法，其原理是在假定待校正的遥感图像上存在黑暗像元区域，且地表朗伯面反射、大气性质均一，忽略大气多次散射辐射作用和邻近像元漫反射作用的前提下，反射率很小的黑暗像元由于大气的影射，反射率相对增加，可以认为增加的部分是由于大气程辐射的影响产生的^[19~28]。利用黑暗像元值计算出程辐射值，并代入适当的大气校正模型，获得相应的参数后，通过计算即得到地物真实的反射率，整个过程的关键是寻找黑暗像元并计算其增加的像元值^[5]。该大气校正方法的遥感模型为^[29]：

$$R = \frac{\pi(L - L_p)}{T_\varphi(T_\theta E_o \cos\theta + E_D)} \quad (1)$$

式中， R 为地物表面反射率， L 为卫星接收到的表观辐亮度， L_p 是大气程辐射， φ 为卫星传感器天顶角， T_φ 是从地物到传感器的反射方向的大气透射率， θ 为太阳天顶角， T_θ 为在太阳辐射入射方向上的大气透射率， E_o 为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度， E_D 为由天空光漫射到地表面的光谱辐照度。

2.2 6S 大气校正模型

1986 年，法国里尔科技大学大气光学实验室 Tanré 等为了简化大气辐射传输方程，开发了太阳光谱波段卫星信号模拟程序 5S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)，用来模拟地气系统中太阳辐射的传输过程并计算卫星入瞳处辐射亮度。1997 年，Eric Vermote 对 5S 进行了改进，发展到 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 模型^[30]。

该模型是在假定无云大气情况下，考虑了水汽、CO₂、O₃ 和 O₂ 的吸收、分子和气溶

胶的散射以及非均一地面和双向反射率的问题。与 5S 相比, 6S 的光谱积分步长从 5 nm 改进到 2.5 nm, 可以模拟机载观测、设置目标高程、解释 BRDF 作用和临近效应, 增加了两种吸收气体的计算 (CO、N₂O), 采用 SA (State of the Art) 和 SOS (Successive Order of Scattering) 算法, 大大提高了太阳光谱波段的散射计算精度^[31~34]。

6S 模型考虑到地球表面并非为均一的朗伯面, 通过对目标与背景间临近效应的校正, 消除了环境反射问题。对于反射率为 ρ_t 的非均一目标, 传感器所接收到的大气反射率为^[35]:

$$\rho_{ma}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - (\rho_t)S} [\rho_t e^{-\omega_v} + (\rho_t) t_d(\theta_v)] \right\} \quad (2)$$

式中, $\rho_{ma}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ 为大气顶层表现反射率; θ_s 为太阳天顶角; θ_v 为观测天顶角; φ_v 为观测方位角; $t_g(\theta_s, \theta_v)$ 为大气中 O₃、H₂O 等气体对可见光、近红外波段的吸收率; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ 为瑞利散射和气溶胶散射引起的程辐射; $T(\theta_s)$ 为下行辐射总透射率; ρ_t 为平均环境反射率; S 为大气底层向下的球面反射率; $e^{-\omega_v}$ 为上行直接辐射; $t_d(\theta_v)$ 为上行交叉辐射透射率因子。

2.3 FLAASH 大气校正模型

FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) 是由 SSI (Spectral Sciences Inc.)、AFRL (U. S. Air Force Research Laboratory) 及 SITAC (Spectral Information Technology Application Center) 共同研发, ITT VIS 公司负责集成和 GUI 设计的大气校正模型。该模型采用算法精度很高的 MODTRAN 4+ 辐射传输模型, 使用图像像素光谱上的特征取代遥感成像时同步测量的大气参数数据来估算大气的属性, 可有效去除水蒸气、气溶胶散射效应; 基于像素级的校正, 消除目标像元和邻近像元交叉辐射的“邻近效应”^[36~39]。此外, 该模型还能够对由于人为抑制而导致波谱噪声进行光谱平滑处理, 获得较为准确的地物反射率、辐射率、地表温度等真实物理模型参数。

FLAASH 模型对于太阳波谱范围内 (不包括热辐射) 的平面朗伯体 (或近似平面朗伯体), 在传感器处接受的像元光谱辐射亮度为^[5]:

$$L = \left(\frac{A \times \rho}{1 - \rho_e \times S} \right) + \left(\frac{B \times \rho}{1 - \rho_e \times S} \right) + (L_a) \quad (3)$$

式中, L 为传感器处像元接收到的总辐射量度; ρ 为像素表面反射率; ρ_e 为像素周围平均表面反射率; S 为大气球面反照率; L_a 为大气后向散射辐射率 (大气程辐射); A 、 B 为取决于大气条件和几何条件的两个系数。等号右边第一个括号部分代表太阳辐射经大气入射到地表后, 反射直接进入传感器的辐射亮度; 第二个括号部分为经大气散射后进入传感器的辐射量度; 第三个括号部分为大气后向散射辐射率 (大气程辐射)。

3 试验数据及结果验证

3.1 试验数据

3.1.1 试验区概况 试验区主要包括天津市滨海新区南部及河北省黄骅市北部, 东临渤海湾, 西接静海县, 位于 38°27'N ~ 38°58'N、117°6'E ~ 117°48'E 之间; 属冲积、海积平原, 平均海拔 5 m; 地貌类型复杂, 包括海洋、河流、水库、植被、居民点、养殖池塘、盐田等; 属于大陆性季风气候, 兼具海洋性气候特点。

3.1.2 试验数据 试验采用 SPOT 多光谱遥感影像的 B1~B4 波段数据, 轨道号为 283/

272, 成像时间为 2009 年 9 月 23 日, 数据质量良好, 平均云量低于 5%, 主要试验区无云。本试验所用 SPOT 遥感数据已经过传感器定标、正射校正等预处理, 获得地表辐射率数据, 故影像预处理过程从略。

3.1.3 模型参数 在遥感处理软件 ENVI 中, 黑暗像元法的大气校正功能由 Dark Subtract 工具实现。通过选择波段最小值、ROI 平均值、自定义值三种方法, 确定影像中黑暗像元的 DN 值。由于影像所在区域的地势起伏较低, 人为开发活动较强, 不存在大片阴影区域; 且成像时间为 9 月份, 农作物已收割完毕, 不存在浓密植被区。本研究最终选择渤海湾的深水区作为暗黑像元的感兴趣区, 统计得出 B1 ~ B4 波段的均值分别为: 59.67、37.26、13.06、1.65。

6S 及 FLAASH 大气校正模型相关输入参数 (表 1、表 2), 在影像的 METADATA.DIM 文件中获取。为使校正结果具有可比性, 上述两个模型中的相同指标采用相同参数。

表 1 6S 大气校正模型输入参数

Tab 1 The parameters of the 6S model

参数名称	含义	参数值
Geometrical Conditions	成像日期	09/ 23
	成像时间	3. 1625
Scene Center Location	图像中心经度	117. 6919
	图像中心纬度	39. 30306
Atmospheric Model	大气模型	2 (Middlatitude Summer)
Aerosols Model	气溶胶模型	2 (Maritime Model)
Aerosols Model Concentration	大气能见度	40
Target Alitude Sensor Platform	目标高度	-0. 007
	传感器平台	-1000 (Satellite)
Sensor Band	传感器波段	SPOT (Pre-defined)
	非均质下垫面	1 (Non-homogeneous)
Ground Reflectance	植被	1 (IGROU 1)
	水体	4 (IGROU 2)
	水体半径	5
Atmospheric Correction Model	反向输出反射率	-0. 1 (RAPP)

表 2 FLAASH 大气校正模型输入参数

Tab 2 The parameters of the FLAASH model

参数名称	含义	参数值
Radiance Scale Factors	转换系数	10
Data Type	数据类型	BIL
Scene Center Location	图像中心纬度	39. 30306
	图像中心经度	117. 6919
Sensor Type	传感器类型	SPOT
Sensor Altitude	传感器飞行高度	800
Ground Elevation	平均海拔	0. 007
Flight Data	成像日期	Sep/ 23/ 2009
Flight Time GMT	成像时间	03: 09: 54. 3
Atmospheric Model	大气模型	Mid-Latitude Summer
Aerosol Model	气溶胶反演模型	Maritime
Aerosol Retrieval	气溶胶反演方法	2-Band (K-T)
Initial Visibility	初始能见度	40

3.2 结果验证

为评价 DOS、6S 和 FLAASH 模型对 SPOT 遥感影像大气辐射校正的效果, 分别对

三种模型校正后的影像与辐射定标得到表观反射率图像 (Apparent Reflection, AR) 进行典型地物光谱曲线和 NDVI 分析检验。

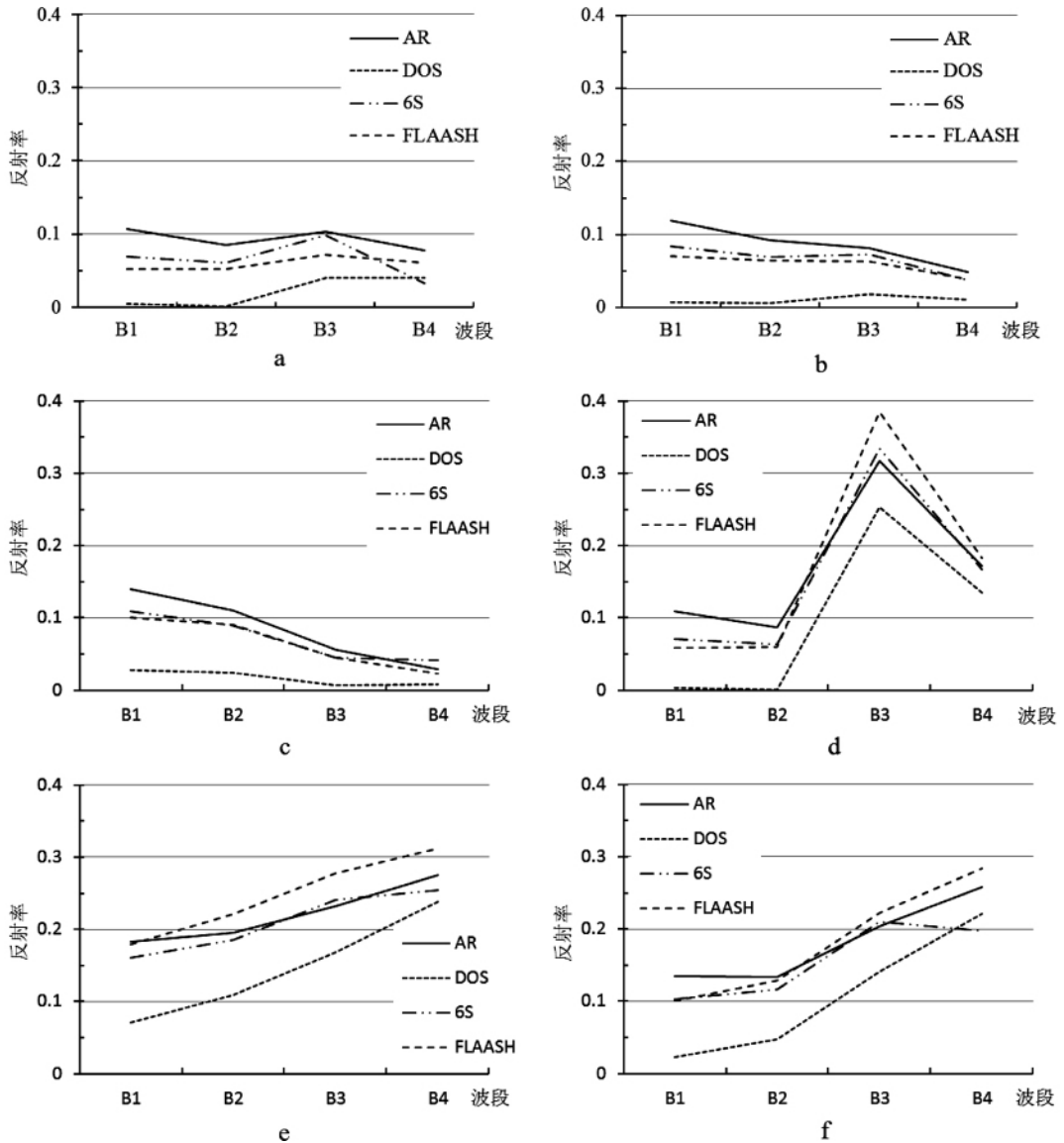
3.2.1 典型地物光谱曲线检验 选取三种模型校正前后的河流、水库、海水、植被、城镇、裸地等六种典型地物, 对比分析其反射率光谱曲线, 以期获得适合研究区最佳大气反演模型。

3.2.1.1 水体光谱曲线验证 水体的光谱曲线特征除受水体自身影响外, 还受水体表面反射、水体底部物质的反射及水中悬浮物质反射的影响。其中, 悬浮泥沙含量、水体深度、叶绿素浓度等指标对其影响较大^[40]。

在本研究的三种水体中, 河流 (图 1 a) 的深度最小, 泥沙含量较大, 因其为流动水体, 不含或基本不含叶绿素; 水库 (图 1 b) 为静水水体, 水深较大, 杂质含量较少, 其生境适合藻类生长, 叶绿素含量较大; 海洋水体 (图 1 c) 的水深最大, 叶绿素含量较少, 由于是近岸水体, 受陆源污染物影响, 水中杂质含量较多。在蓝绿光波段, 水体中叶绿素含量的增多会直接导致蓝光部分反射率的显著下降, 而绿光部分反射率上升, 在 B1 波段 (545 nm) 附近表现最为强烈^[41], 表现在三类水体中, 即为 $R_{\text{河流}} > R_{\text{海水}} > R_{\text{水库}}$ 。但面积巨大的海洋水体可形成镜面反射, 海水反射率升高, 导致最终的地物反射率大小为 $R_{\text{海水}} > R_{\text{河流}} > R_{\text{水库}}$; 在近红外及短波红外附近, 水体几乎可以吸收光谱全部能量, 纯净水体的反射率很低, 几乎趋近于零。由于悬浮杂质的影响, 散射和吸收部分入射能, 导致透射辐射能发生较大变化, 最终表现为反射率与悬浮泥沙含量呈正相关关系^[42], 即 $R_{\text{河流}} > R_{\text{海水}} > R_{\text{水库}}$ 。但海洋水体面积巨大, 能够吸收此波长的大部分入射能, 最终致使 $R_{\text{河流}} > R_{\text{水库}} > R_{\text{海水}}$ 。三种大气校正模型均能较好的反演水体光谱曲线, 即在蓝绿光波段和近红外、短波红外波段分别符合 $R_{\text{海水}} > R_{\text{河流}} > R_{\text{水库}}$ 和 $R_{\text{河流}} > R_{\text{水库}} > R_{\text{海水}}$ 的理论值, 与 DOS 及 6S 模型相比, FLAASH 校正结果整体反射率较高, 各水体间反射率差别较大, 特征明显, 整体效果最佳。

3.2.1.2 植被光谱曲线验证 与其他地物相比, 绿色植物的光谱反射特征明显, 从可见光到短波红外表现为: 红光吸收特征、近红外反射及短波红外吸收。可见光波段内, 叶绿素是影响植物光谱响应最主要的因素, 在红光波段, 叶绿素能吸收大部分的入射能, 使 B2 波段 (645 nm) 附近形成吸收谷^[43, 44]; 在光谱的近红外波段, 植被的光谱特征主要由植物叶子内部构造控制, 反射率急剧上升, 形成所谓的“红边”^[45], 成为植物反射率光谱曲线最典型的特征; 在短波红外波段附近, 绿色植物的反射率光谱响应为水的强吸收带, 表现为反射率降低^[46], 但与红光波段相比, 吸收强度减弱。红光波段吸收谷大小可依据两侧夹角判断, 夹角越小, 反演结果越准确, 该角度可通过读取中心波段及相邻两侧波段的中心波长和反射率值, 利用三角函数关系确定。本研究所采用的三种方法中, 特征最明显的是 6S 模型, 其夹角为 115.97° , FLAASH 次之, 为 116.05° , DOS 达 125.20° , 效果较差 (图 1 d); 与红光波段判断方法相近, 可利用近红外波段附近的夹角大小判断“红边”效应的反演效果, 角度越小, 效果越佳, 反之效果越差。三种方法中, 最典型的是 FLAASH 模型, 为 99.31° , 其次为 6S 模型, 夹角为 104.10° , DOS 模型最差, 达 116.29° ; 短波红外波段附近, 三种模型的反演效果均符合理论情况, 即在此波段反射率小于近红外波段, 高于红色波段。从整体效果来看, 与 DOS、6S 模型相比, FLAASH 模型反演植被反射率数据的数值较大, 对比明显, 效果较优。

3.2.1.3 城镇光谱曲线验证 城镇环境是人工环境与自然环境的综合体, 人类活动使得



a. 河流 b. 水库 c. 海水 d. 植被 e. 城镇 f. 裸地

图 1 典型地物光谱曲线对比图

a. River b. Reservoir c. Sea d. Vegetation e. City f. Bare soil

Fig. 1 The contrast chart of spectrum curves of typical surface features

城市下垫面组成多样，光谱特性复杂，在已有研究中主要涉及建筑物和道路等人工目标，本研究即采用道路作为城镇研究对象。由于道路的路面沾染较多灰尘，反射率较高，光谱曲线呈整体上升趋势，在可见光波段内上升较慢，进入近红外波段反射率上升较快，在 B3 波段（835 nm）附近形成较小的反射峰，随后反射率缓慢减小，这与前人的研究基本吻合^[47]。DOS、6S、FLAASH 三种大气校正模型，在可见光及近红外波段模拟效果均较好（图 1 e），表现为蓝绿波段的斜率小于红光波段的斜率。在短波红外波段附近，DOS 反射率的变化速率持续增加，与研究结果有所不符；6S 和 FLAASH 模型反演效果较好，表现出斜率的明显变化，前者变化特征优于后者，但后者在整体反射率方面表现出一定优

势。故城镇环境的反射率光谱曲线模拟中，6S 和 FLAASH 模型各有特色。

3.2.1.4 裸地光谱曲线验证 裸地的光谱特征受成土矿物、含水量、有机物和质地等因素的影响较大，其中，土壤水分和质地影响最为强烈^[48]。土壤含水量增加，土壤反射率降低，反之，反射率升高；土壤质地对光谱反射特征的影响表现在两个方面^[47]：其一，影响土壤持水性，进而影响土壤光谱反射率；其二，土壤颗粒大小也对土壤反射率影响较大，粒径较小的粘土颗粒由于具有较强的吸湿能力，与粒径较大的颗粒相比，反射率较小。本研究采用无植被耕地为样本，由于表层土壤水分蒸发强烈，光谱反射率较高，各波段相差较小，整体呈上升趋势^[49]。研究采用的三种大气校正模型均能较好的模拟裸地反射率光谱特征，相邻波段间的拐点较为明显（图 1 f）。但在短波红外波段附近，6S 模型反射率值小于近红外波段，略呈下降趋势，与实际情况不符；DOS 与 FLAASH 模型相比，后者整体反射率高于前者，更能突出裸地光谱特征，效果最优。

利用 DOS、6S、FLAASH 三种模型，对海岸带地区 SPOT 影像进行大气校正，对比分析六种典型地物（河流、水库、海水、植被、城镇和裸地）的反射率光谱曲线。结果表明，除城镇区域 6S 与 FLAASH 模型各有优势外，其他地物，尤其是水体的光谱曲线，较之 DOS 和 6S 模型，FLAASH 模型反演效果尤佳。整体而言，FLAASH 模型能更好的反演海岸带地区 SPOT 影像的大气情况，与理论值吻合度最高。

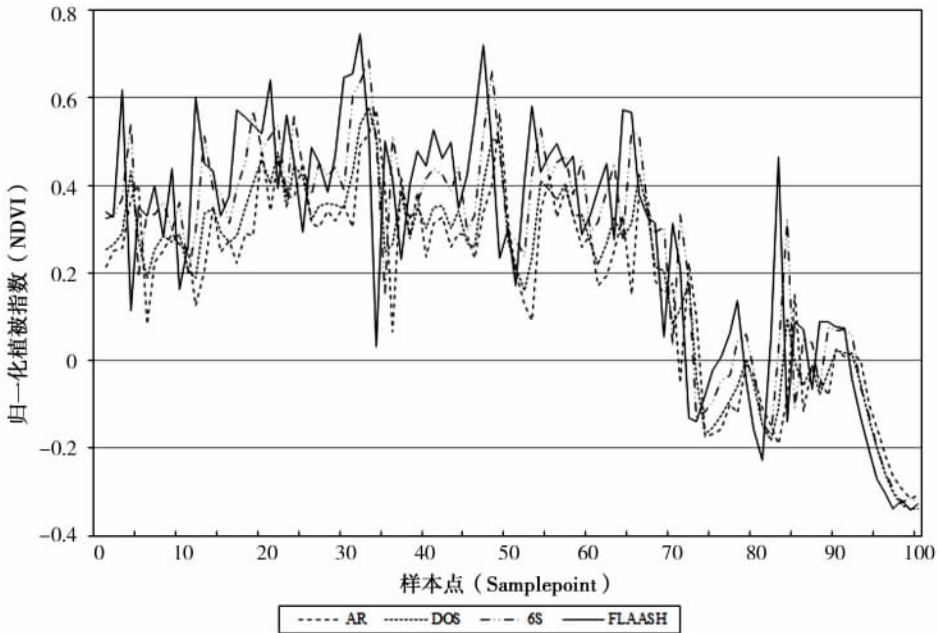


图 2 不同大气模型校正后 DNVI 对比

Fig. 2 Comparison of NDVI after different atmospheric corrections

3.2.2 NDVI 检验 分别从辐射校正的表观反射率影像、DOS、6S 及 FLAASH 大气校正后经过 NDVI 处理的影像，沿纬线方向，自西向东每隔 500m 提取一个样本点，共提取 100 个样本点，涉及植被、河流、水库、城镇、海洋等多种地貌类型（图 2）。其中，第 1~72 样本点之间，地貌主要以植被、城镇为主；第 73~91 样本点之间，以滨海养殖池塘及光滩为主；92 样本点之后为海洋。

对表观反射率影像及三种大气校正模型进行统计分析，结果显示：第 1~72 样本点的

NDVI 值均大于 0, 最大值为 0.745, 样本点号为 32, 地貌类型为城镇人工植被; NDVI 最小值为 0.031, 样本点号为 34, 地貌类型为城镇建筑物。第 73~91 样本点, 因滩涂含水量不同, NDVI 值分布于 0 上下; 第 92 后的样本点是水体, NDVI 值小于 0。上述各点位 NDVI 值均符合样本点特征, 且经过大气校正后的 NDVI 数据明显增大, 表观反射率数据、DOS、6S、FLAASH 校正数据的 NDVI 数值整体逐渐变大, 其平均值分别为: 0.1841、0.2023、0.2672、0.2766, 标准差分别为: 0.2123、0.2207、0.2466、0.2713, 说明与表观反射率影像数据相比, 三种大气校正模型中, FLAASH 模型对地物光谱响应更为强烈, 能够检测出更细微地物的差别。在海岸带地区遥感量化研究中, FLAASH 大气校正模型的反演结果能较好的还原地表真实情况, 在地物光谱响应特征分析等方面具有更强的优势。

4 结论

本研究在分析 DOS、6S 及 FLAASH 三种模型对海岸带地区 SPOT 影像进行大气校正的基础上, 使用典型地物光谱曲线及 NDVI 指数等方法对校正结果进行精度验证, 通过对比分析得出主要结论如下:

(1) DOS、6S、FLAASH 三种模型均能较好的对海岸带地区 SPOT 影像进行大气校正, 消除大气对遥感影像的影响、还原地物本身特征, 获取较为准确的地表反射率信息, 反演结果与理论值较为吻合。

(2) 在河流、水库、海水、植被、城镇和裸地等六种典型地物反射率光谱曲线匹配检验中, FLAASH 校正模型的整体反射率较高, 各地物反射率差别较大, 特征明显, 整体效果最佳。

(3) 在 NDVI 检验中, DOS、6S 及 FLAASH 三种大气校正数据的 NDVI 平均值及标准差依次增大, FLAASH 模型的 NDVI 值增幅最为明显, 对地物光谱响应更为强烈, 能较好的还原地表真实情况, 在地物光谱响应特征分析等方面具有更强的优势。

由于条件限制, 无法获取与卫星影像同步的野外地面光谱观测数据, 反演结果使用理论值代替真实值进行检验分析, 在今后的研究中应采用实测值对大气反演数据进行误差估算。

参考文献:

- [1] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述. 遥感信息, 2004, (4): 66~67.
- [2] 徐春燕, 冯学智. TM 图像大气校正及其对地物光谱响应特征的影响分析. 南京大学学报, 2007, 43(3): 309~317.
- [3] Zhao Y S. Principle and Methods of Remote Sensing Application Analysis. Beijing: Science Press, 2003, 20~30.
- [4] Zhao Xiang, Liang Shunlin, Liu Suhong, *et al.* Improvement of dark object method in atmospheric correction of hyperspectral remotely sensed data. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2008, 51(3): 349~356.
- [5] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理. 北京: 科学出版社, 2010. 289~316.
- [6] 龙飞, 赵英时. 多角度 NOAA 卫星数据地面 BRDF 反射率的大气校正. 遥感学报, 2002, 6(3): 173~178.
- [7] 施明伦, 游保杉, 万腾州, 等. 大气校正对 SPOT 卫星遥测水质的影响. 遥感学报, 2006, 10(4): 549~558.
- [8] 易维宁, 何超兰, 乔延利, 等. CBERS-02 卫星 CCD 图像的大气订正. 遥感学报, 2006, 10(5): 703~708.
- [9] He Xianqiang, Pan Delu, Mao Zhihua. Atmospheric correction of Sea WIFS imagery for turbid coastal and inland waters. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(4): 609~615.
- [10] Tian L Q, Lu J Z, Chen X L, *et al.* Atmospheric correction of HJ-1A/B CCD images over Chinese coastal waters using MODIS-Terra aerosol data. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(1): 191~195.
- [11] 刘大召. 珠江口二类水体 MODIS 数据大气校正. 海洋科学, 2010, 34(8): 86~91.

- [12] Xing Qianguo, Chen Chuqun, Shi Ping, *et al.*. Atmospheric correction of Landsat data for the retrieval of sea surface temperature in coastal waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(3): 25~34.
- [13] 沈焕峰, 钟燕飞, 王毅, 等. ENVI 遥感影像处理方法. 武汉: 武汉大学出版社, 2009. 171~195.
- [14] 黄妙芬, 邢旭峰, 朱启疆, 等. 定量遥感地表净辐射通量所需大气下行长波辐射估算模型改进. *地理研究*, 2005, 24(5): 757~766.
- [15] 王继燕, 罗格平, 鲁蕾. 利用 TM 影像分析天山北坡三工河流域地表反照率的时空变化. *地理研究*, 2010, 29(10): 1899~1908.
- [16] 杨秀春, 曹云刚, 徐斌, 等. 多源遥感数据协同的我国草原积雪范围全天候实时监测. *地理研究*, 2009, 28(6): 1704~1712.
- [17] 亓雪勇, 田庆久. 光学遥感大气校正研究进展. *国土资源遥感*, 2005, 66(4): 1~6.
- [18] 袁金国. 遥感图像数字处理. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 122~131.
- [19] Gordon H R, Clark D K. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. *Applied Optics*, 1981, 20: 4175~4180.
- [20] Rudolf Richter. A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11: 159~166.
- [21] Bartolucci A, Mao Chang, Paul E Anuta, *et al.*. Atmospheric effects on Landsat TM Thermal IR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(2): 171~176.
- [22] 田庆久, 郑兰芬, 童庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 456~461.
- [23] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正的黑暗像元法. *国土资源遥感*, 2005, 63(1): 8~11.
- [24] 刘小平, 邓孺孺, 彭晓鹏. 基于 TM 影像的快速大气校正方法. *地理科学*, 2005, 25(1): 87~92.
- [25] 郑求根, 权文婷. 基于暗像元的 Hyperion 高光谱影像大气校正. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2710~2713.
- [26] 陈蕾, 邓孺孺, 柯锐鹏, 等. 基于地面耦合的 TM 影像的大气校正. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(2): 34~37.
- [27] 刘小平, 余前, 蔡瑾. 一种实用大气校正法及其在 TM 影像中的应用. *中山大学学报论丛*, 2004, 24(3): 297~300.
- [28] 张玉贵. 以气象记录为辅助数据的 TM 影像大气校正方法. *国土资源遥感*, 1994, 22(4): 54~62.
- [29] Chavez P S Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multi-spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 1988, (24): 459~479.
- [30] 杨静学, 王云鹏, 杨勇. 基于高程或气溶胶厚度与 6S 模型校正参数回归方程的遥感图像大气校正模型. *遥感技术与应用*, 2009, 24(3): 331~339.
- [31] Vermote E F, Tanre D, Deuze J M, *et al.*. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum 6s: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997: 675~685.
- [32] 徐萌, 郁凡, 李亚春, 等. 6S 模式对 EOS/MODIS 数据进行大气校正的方法. *南京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 582~589.
- [33] 彭妮娜, 易维宁, 麻金继, 等. 利用 MODIS 数据进行 Quick Bird-2 卫星海岸带图像大气校正研究. *光学学报*, 2008, 28(5): 817~821.
- [34] Li Junsheng, Zhang Bing, Chen Zhengchao, *et al.*. Atmospheric correction of CBERS CCD images with MODIS data. *Science in China (Series E): Technological Science*, 2006, 49(2): 149~158.
- [35] 买买提依明·买买提, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提沙吾提, 等. 基于 6S 模型的遥感数据大气校正应用研究. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 15~18.
- [36] 郝建亭, 杨武年, 李玉霞, 等. 基于 FLAASH 的多光谱影像大气校正应用研究. *遥感信息*, 2008, (1): 78~81.
- [37] 张婷媛, 林文鹏, 陈家治, 等. 基于 FLAASH 和 6S 模型的 SPOT 5 大气校正比较研究. *光电子·激光*, 2009, 20(11): 1471~1473.
- [38] 杨杭, 张霞, 帅通, 等. OM IS-II 图像大气校正之 FLAASH 法与经验线性法的比较. *测绘通报*, 2010, (8): 4~6.
- [39] 马灵玲, 王新鸿, 唐伶俐. HJ-1A 高光谱数据高效大气校正及应用潜力初探. *遥感技术与应用*, 2010, 25(4): 525~531.
- [40] Philip H S, Shirley M D. *Remote sensing: The quantitative approach*. Berkshire: McGraw-Hill International Book Company, 1978. 147~168.
- [41] Bartolucci L A, Robinson B F, Sliva L F. Field measurements of the spectral response of natural waters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(5): 585~598.
- [42] Weisblatt E A, Zaitzeff J B, Reeves C A. Classification of turbidity levels in the Texas marine coastal zone. *Labora-*

- tory for Applications of Remote Sensing, 1973, 10(1):42~59.
- [43] Gates D M, Keegan H J, Schleter J C, *et al.* Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 1965, 4(1):11~22.
- [44] 梁顺林. 定量遥感. 北京: 科学出版社, 2009. 54~104.
- [45] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance I. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11:121~127.
- [46] Knipling E B. Physical and physiological basis for difference in reflectance of healthy and diseased plants. Washington D. C: Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, 1967, 652~679.
- [47] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用. 北京: 高等教育出版社, 2006. 19~37.
- [48] Baumgardner N F, Kristof S J, Johannsen C J, *et al.* Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *Proceedings of the Indiana Academy of Science*, 79:413~422.
- [49] Bedidi A, Cervelle B, Madeira J, *et al.* Moisture effects on spectral characteristic of lateritic soils. *Soil Science*, 1970, 153:129~141.

Atmospheric correction and verification of the SPOT remote sensing image in coastal zones

HAN Xiao-qing¹, SU Yi², LI Jing³, ZHANG Yun⁴, LIU Jia², GAO Wei-ming²

- (1. Hebei Utilization and Planning Institute of Land Resources, Shijiazhuang 050051, China;
2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Resources and Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 3. Department of Traffic Engineering, Hebei Vocational and Technical College of Communications, Shijiazhuang 050035, China;
4. Hebei Institute of Geographical Sciences, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: In order to obtain the best atmospheric correction about true surface reflectance in the coastal zones, three models, i. e., DOS, 6S and FLAASH, were used to correct the atmospheric condition of SPOT image. In comparison of the change conditions by different index factors, including spectrum curves of typical surface features and NDVI, the accuracy of results were verified. The results are shown as follows. Firstly, three atmospheric correction models could be used to obtain surface reflectance information correctly, and to remove the effect of the atmosphere on remote sensing images, which is caused by different atmospheric conditions. Secondly, the paper took spectral curves of six typical objects as an example to compare correction effects, such as river, reservoir, sea, vegetation, urban and bare soil. FLAASH model, compared with DOS and 6S model, showed greater differences and more obvious characteristics in the reflectivity of surface features. Except that, it was better in coinciding with spectrum curves of real typical surface features than the others. Thirdly, FLAASH model responded to NDVI index of surface features more strongly. Furthermore, it was the best one about atmospheric correction of SPOT satellite images in coastal zones. The study methods and results could provide the reference for similar studies.

Key words: coastal zone; SPOT image; DOS model; 6S model; FLAASH model; atmospheric correction; verification