

基于光谱匹配的大气校正方法

胡新凯^{1,2}, 高海亮^{2*}, 程天海²

¹桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006;

²中国科学院遥感与数字地球研究所遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100012

摘要 大气校正是遥感定量化的一个重要环节,其常用方法是暗目标法。该方法适用于浓密植被地区,但在植被覆盖度较低的地区,暗目标法的适用性较差。提出了一种基于光谱匹配的大气校正方法,以城市地区的不变目标为切入点,针对高分一号(GF-1)卫星全色和多光谱(PMS2)传感器相机开展大气校正方法的研究。该方法利用 6S 辐射传输模型构建大气校正参数查找表,得到了影像上的水泥路面在不同大气条件下的反演光谱;同时,利用水泥路面的平均实测光谱作为参考光谱,通过参考光谱与测试光谱的光谱角度匹配,找到最相近的光谱曲线,用以确定大气校正参数,并对影像进行大气校正。实验结果表明:该大气校正方法效果良好,反演得到的地表反射率与典型地物的光谱数据比较吻合,更好地还原了地表的真实情况,为植被稀疏地区的大气校正工作提供了新思路。

关键词 大气光学; 光谱匹配法; 气溶胶光学厚度; 大气校正; 高分一号卫星

中图分类号 P407.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0801003

Atmospheric Correction Method Based on Spectral Matching

Hu Xinkai^{1,2}, Gao Hailiang^{2*}, Cheng Tianhai²

¹College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China;

²National Engineering Laboratory for Remote Sensing Satellite Applications, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Atmospheric correction is an important part of remote sensing quantification. The commonly used atmospheric correction method is the dark target method, which is suitable for application in dense vegetation areas but is less suitable in areas with low coverage of vegetation. In this study, an atmospheric correction method is proposed based on spectral matching. Herein, an invariable target in urban areas is used as the entry point. Further, we develop an atmospheric correction method for the Gao Fen-1 (GF-1) satellite panchromatic and multispectral sensor (PMS) camera. This method uses the 6S radiation transmission model to construct an atmospheric correction parameter lookup table for obtaining the inversion spectra of cement pavements from different images under different atmospheric conditions, and the average measured spectrum of the cement pavement is considered to be the reference spectrum. By the angle matching between the test spectrum and the reference spectrum, the closest spectral curve is estimated, the atmospheric correction parameters are determined, and the image is atmospherically corrected. The experimental results denote that this method works well, and the surface reflectivity obtained based on the inversion is consistent with the typical ground spectral data, which restores the surface to its actual situation and provides a novel atmospheric correction method that can be applied in areas having sparse vegetation.

Key words atmospheric optics; sensing; spectral matching method; aerosol optical depth; atmospheric correction; Gao Fen-1 satellite

OCIS codes 010.0280; 010.5620; 010.1110; 010.1285

1 引言

随着遥感理论和技术的不断发展,遥感已从最初的定性分析逐步走向量化分析。遥感量化分

析的前提是传感器的定标和遥感数据的大气校正^[1]。很多情况下,对影像进行高精度的大气校正,是影像使用的关键步骤^[2]。因此,对遥感影像的大气校正进行研究具有重要意义。

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-03-27; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504800、2018YFB0504803)

* E-mail: gaohl@radi.ac.cn

目前,已有较多针对国产高分辨率陆地卫星的大气校正研究:王爱春等^[3]利用暗目标法对环境一号(HJ-1)A/B卫星的电荷耦合器件(CCD)影像进行了大气校正,校正效果理想,并在HJ-1A/B卫星处理系统中试运行;孙长奎等^[4]基于辐射传输模型构建了大气校正系数查找表,实现了HJ-1 CCD数据的大气校正,并进行了不确定性分析;王中挺等^[5]利用查找表,完成了CBERS02B卫星CCD数据的大气校正,并利用核驱动模型对地表进行双向反射分布函数(BRDF)校正;刘佳等^[6]基于6S模型对高分一号(GF-1)卫星影像进行了大气校正,实现了大气校正过程中的批处理,并与ENVI中的FLAASH模块进行对比评估;郑尧等^[1]采用暗目标法反演了太湖地区的气溶胶,对HJ-1卫星CCD数据进行大气校正实验,较好地恢复了地物的真实光谱信息。

在现有的方法中,暗目标法是比较常用的一种方法,在很多情况下可取得较好的大气校正效果。但暗目标法也存在一定的不足,例如:暗目标法对不同波段的地表反射率关系没有统一的标准;而且,暗目标法更适用于植被茂密的地区,当地表的植被覆盖度较低时,暗目标法的反演效果较差。为了实现植被稀疏地区的大气校正,本文提出了一种适用于地面目标稳定不变的大气校正方法,通过光谱匹配技术,实现了多光谱遥感影像的气溶胶反演和大气校正,为植被稀疏地区的大气校正提供了新思路。

2 基于光谱匹配的大气校正原理

大气校正的本质是去除大气吸收和散射的影响,使卫星测量的信号能够客观地表征地表的反射特性。因此,理想的大气校正就是利用大气校正参数得到地表反射光谱,并确保反演的地表光谱与地面实测光谱具有高度一致性。基于光谱匹配的大气校正方法的核心是通过多组反演地表光谱与参考光谱的匹配,确定出最佳的大气校正参数,以实现整个图像的大气校正。

该方法的关键在于参考光谱的选取。通常情况下,选择全年稳定不变的地面目标(如水泥路面)的光谱作为参考光谱,并假设不同时间、不同地点的光谱曲线变化趋势一致,具有较高的相似度。利用地面多点测量的光谱平均值作为参考光谱,水泥路面的测量时间为2018年12月15日,地点位于广州市华南农业大学增城教学科研基地,在水泥路面共测量15个样点的光谱数据,对每个样点测量5条光谱。光谱测量仪器为PSR+3500便携式地物光谱仪,具体参数如表1所示。分别将15个样点的光谱数据与GF-1卫星全色和多光谱(PMS2)传感器的光谱响应函数(如图1所示,band 1为蓝波段,band 2为绿波段,band 3为红波段,band 4为近红外波段)进行卷积,得到15条等效光谱曲线(如图2所示),取其均值作为大气校正的参考光谱,参考光谱各波段的反射率如表2所示。

表1 PSR+3500 便携式地物光谱仪的指标参数

Table 1 Index parameters of PSR+3500 portable ground spectrometer

Parameter	Value
Spectral range /nm	350-2500
Spectral resolution	≤3 nm@700 nm; ≤8 nm@1500 nm; ≤6 nm@2100 nm
Sampling interval	output one data every 1 nm, a total of 2151 spectral channels
Fastest scanning speed /ms	100
Wavelength repeatability /nm	0.1
Wavelength accuracy /nm	±0.5
Size /(cm×cm×cm)	22×29×8
Weight /kg	3.2

对多光谱影像进行大气校正时,将表观反射率转换为地表反射率。假设地表为均一的朗伯面,大气水平均匀,传感器接收的大气顶部的反射率为^[7]

$$\rho_{\text{toa}}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{[1 - \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)S]}, \quad (1)$$

式中: ρ_{toa} 为大气顶部的反射率; ρ_0 为大气路径辐射项的等效反射率; $T(\mu_s)$ 为下行辐射总透过率; $T(\mu_v)$ 为上行辐射总透过率; $\mu_s = \cos \theta_s, \mu_v = \cos \theta_v, \theta_s, \theta_v, \phi$ 分别为太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角; ρ_s 为地表反射率; S 为大气下界的半球反射率。 $\rho_{\text{toa}}(\mu_s, \mu_v, \phi)$ 可根据表观辐亮度计算得到,即

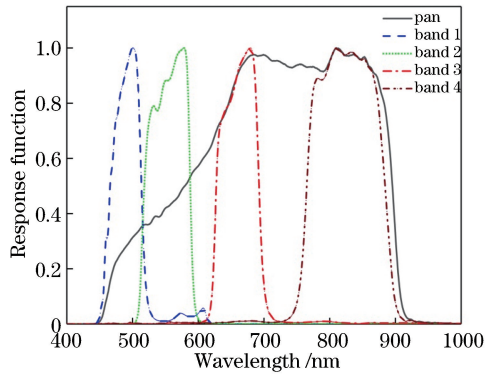


图 1 GF-1 卫星 PMS2 传感器的光谱响应函数

Fig. 1 Spectral response function of GF-1 satellite PMS2 sensor

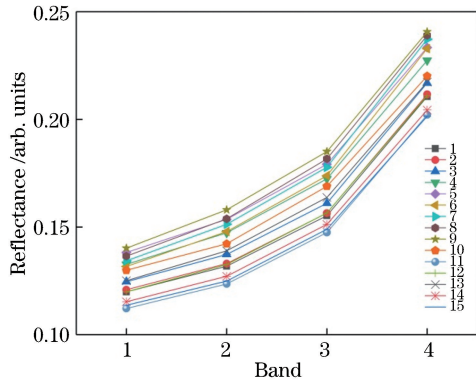


图 2 15 条等效光谱曲线

Fig. 2 Fifteen equivalent spectral curves

表 2 参考光谱各波段的反射率

Table 2 Reflectance of each band of reference spectrum

Wave band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Reflectance	0.1263	0.1402	0.1653	0.2204

$$\rho_{\text{toa}}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \frac{\pi L(\mu_s, \mu_v, \phi) d^2}{E_\lambda \cos(\theta_s)}, \quad (2)$$

式中: L 为转换后的辐亮度; E_λ 为波段 λ 处的平均太阳辐照度(如表 3 所示), 可在中国资源卫星应用中心下载得到; d 为日地天文单位距离, 其值约为 1。

表 3 GF-1 卫星 PMS2 传感器各波段的平均太阳辐照度

Table 3 Average solar irradiance of each band of GF-1 satellite PMS2 sensor

GF-1 PMS2	Pan	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
E_λ	1363.57	1967.31	1822.16	1524.13	1067.82

$$\text{设 } M = \frac{\rho_{\text{toa}}(\mu_s, \mu_v, \phi) - \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)}{T(\mu_s)T(\mu_v)} = \frac{\pi d^2}{E_\lambda \cos(\theta_s) T(\mu_s) T(\mu_v)} L(\mu_s, \mu_v, \phi) - \frac{\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)}{T(\mu_s) T(\mu_v)}, \text{ 则有}$$

$$\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) = \frac{M}{1 + MS}. \quad (3)$$

(3) 式即为大气校正的公式。其中, 设 $x_a =$

$\frac{\pi d^2}{E_\lambda \cos(\theta_s) \cdot T(\mu_s) T(\mu_v)}$, $x_b = \frac{\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)}{T(\mu_s) T(\mu_v)}$, $x_c = S$, 则大气校正公式可表示为

$$\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) = \frac{x_a L(\mu_s, \mu_v, \phi) - x_b}{1 + [x_a L(\mu_s, \mu_v, \phi) - x_b] x_c}, \quad (4)$$

式中: x_a, x_b, x_c 可根据辐射传输模型 6S 计算得到。因此, 大气校正的关键在于获取 x_a, x_b, x_c 这三个大气校正参数。

光谱角度匹配(SAM)又称光谱角度填图法, 即以实验室测量的标准光谱或从图像上提取的已知点的平均光谱作为参考, 求解图像中每个像元矢量与参考光谱矢量之间的广义夹角, 即

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_b} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{n_b} t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^{n_b} r_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right], \quad (5)$$

式中: n_b 为波段数; t_i 为测试光谱, 即不同大气条件下反演得到的水泥路面的光谱曲线, 下标 $i=1, 2, \dots, n_b$; r_i 为参考光谱; α 为像元矢量与参考光谱矢量之间的广义夹角, 其值越小, 表示与参考光谱越匹配。

基于光谱角度匹配的大气校正方法的核心是利用查找表获取不同气溶胶光学厚度下的大气校正参数, 通过比较不同大气校正参数下的地表光谱与参考光谱之间的光谱夹角, 将光谱匹配度最高的地表光谱对应的大气校正参数作为最终的大气校正参数, 最后实现整个图像的大气校正。

3 实例分析

为了验证本算法的有效性, 采用 2014 年 11 月 18 日北京地区的 GF-1 卫星 PMS2 传感器的 8 m 分辨率影像进行大气校正。该景影像的中心经纬度为 116.5098°E、39.8963°N, 平均海拔高度为 35 m。成像时段为 11 月, 无浓密植被覆盖地表。影像中有大面积的水泥路面, 可采用光谱匹配法进行大气校正, 其假彩色图像如图 3 所示。

基于光谱匹配法的大气校正具体步骤如下:

1) 在影像上裁剪一块均匀的水泥路面, 求出其在各波段下的平均灰度值, 并将其作为实验数据, 如表 4 所示。

2) 表观辐亮度的计算。对 GF-1 卫星 PMS2 影像数据进行辐射定标, 根据各波段辐射定标系数可

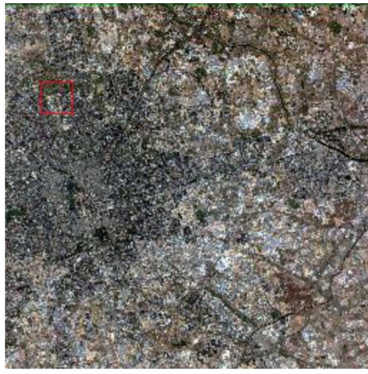


图 3 波段 4、波段 3 和波段 2 的假彩色图像

Fig. 3 False color images of band 4, band 3, and band 2

表 4 在影像上裁剪得到的均匀水泥路面在各波段下的平均灰度值

Table 4 Average gray value of each band of uniform cement pavement obtained by cutting on image

Wave band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Digital number(DN)	225	218	187	142

将 DN 值(R_{DN})转换为表观辐亮度^[8],即

$$L = G \cdot R_{DN}, \quad (6)$$

式中: L 为转换后的辐亮度; R_{DN} 为卫星载荷的观测值; G 为定标系数。GF-1 卫星影像各波段辐射定标系数如表 5 所示。

表 5 GF-1 卫星 PMS2 传感器各波段的绝对定标系数

Table 5 Absolute scaling factor of each band of GF-1 PMS2

Band	Pan	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Factor	0.2147	0.2419	0.2047	0.2009	0.2058

3) 查找表的建立。大气校正效果依赖于大气参数的精度,而大气参数中对大气校正效果影响最大的是气溶胶光学厚度(AOD)。气溶胶光学厚度的精确计算是大气校正精度的保障^[9-10]。通过建立查找表来反演气溶胶光学厚度,使用 6S 软件,设定相应的参数进行辐射传输计算可以得到查找表。需要设定不同的几何参数、大气模式、气溶胶参数、地表参数等^[11],几何参数包括太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角和卫星方位角,这些参数可以从影像文件中的 xml 文件中获取;大气模式包括中纬度夏和中纬度冬;气溶胶参数可默认为大陆型气溶胶,550 nm 处的气溶胶光学厚度为 20 个(从 0.05~1.00,间隔 0.05);地表参数为影像中心位置的海拔高度。由于 6S 模型自身并未附带 GF-1 卫星的光谱响应函数,因此,需要将 GF-1 卫星的光谱响应函数重采样为 2.5 nm 分辨率的光谱响应曲线,然后再将其输入到 6S 模型中^[6]。由此得到一景影像在不同气溶胶光学厚度下,每一波段所对应的大气校正

参数 x_a 、 x_b 、 x_c ,从而可以建立一个 20 行 13 列(AOD 和 4 个波段的 x_a 、 x_b 、 x_c)的查找表。

4) 利用查找表,将第一步中得到的水泥路面在各波段下的平均灰度值,用不同的大气校正参数进行计算,得到不同气溶胶光学厚度下水泥路面在各波段的反射率,即 20 条测试光谱,如图 4 所示。

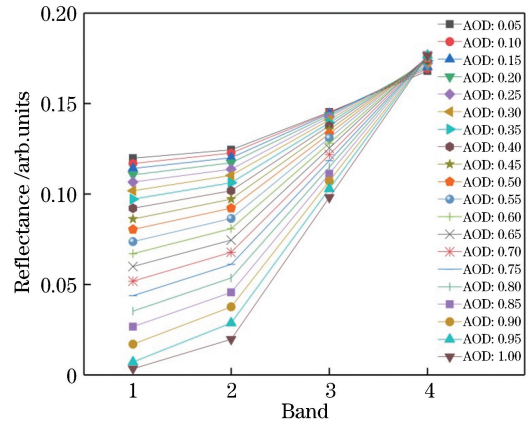


图 4 不同 AOD 下的测试光谱

Fig. 4 Test spectra at different AOD

5) 将上述 20 条测试光谱分别与地面测量得到的参考光谱按(5)式进行光谱角度匹配,找到与参考光谱最相近的光谱曲线,即 α 最小时所对应的测试光谱,然后确定该测试光谱在查找表中所对应的气溶胶光学厚度和各波段的大气校正参数(x_a 、 x_b 、 x_c)。光谱匹配结果与大气校正参数如表 6 和表 7

表 6 光谱匹配数据列表

Table 6 Spectral matching data list

AOD	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	$\alpha / (^\circ)$
0.05	0.1198	0.1244	0.1453	0.1680	0.0847
0.10	0.1169	0.1226	0.1449	0.1692	0.0739
0.15	0.1142	0.1201	0.1444	0.1702	0.0639
0.20	0.1106	0.1173	0.1435	0.1712	0.0521
0.25	0.1066	0.1137	0.1424	0.1722	0.0416
0.30	0.1018	0.1103	0.1410	0.1729	0.0351
0.35	0.0972	0.1062	0.1394	0.1736	0.0384
0.40	0.0921	0.1018	0.1377	0.1741	0.0513
0.45	0.0862	0.0972	0.1356	0.1747	0.0710
0.50	0.0804	0.0922	0.1334	0.1751	0.0939
0.55	0.0737	0.0865	0.1310	0.1756	0.1231
0.60	0.0670	0.0809	0.1281	0.1759	0.1527
0.65	0.0599	0.0745	0.1254	0.1762	0.1873
0.70	0.0519	0.0678	0.1218	0.1764	0.2273
0.75	0.0438	0.0611	0.1184	0.1764	0.2688
0.80	0.0353	0.0536	0.1149	0.1766	0.3169
0.85	0.0267	0.0456	0.1112	0.1768	0.3684
0.90	0.0170	0.0377	0.1072	0.1766	0.4260
0.95	0.0071	0.0287	0.1029	0.1767	0.4898
1.00	0.0034	0.0197	0.0981	0.1765	0.5589

表 7 AOD 为 0.3 时的大气校正参数

Table 7 Atmospheric correction parameters when AOD is 0.3

Band	x_a	x_b	x_c
Band 1	0.0052	0.1769	0.1722
Band 2	0.0053	0.1228	0.1368
Band 3	0.0056	0.0669	0.0990
Band 4	0.0072	0.0354	0.0676

所示。由表 6 可以看出：当 α 最小时（即 $\alpha =$

0.0351），得到了相似度最高的测试光谱，其对应的气溶胶光学厚度为 0.30。

6) 利用得到的大气校正参数和(4)式对整景影像进行大气校正并对结果进行分析。大气校正是通过运行 6S 模型来获取辐亮度转换为地表反射率的相关参数，将影像的辐亮度转换为地表反射率^[12-13]，此时模型的输入为需要进行大气校正的辐亮度影像，输出是地表反射率影像^[14-15]。

具体流程如图 5 所示。

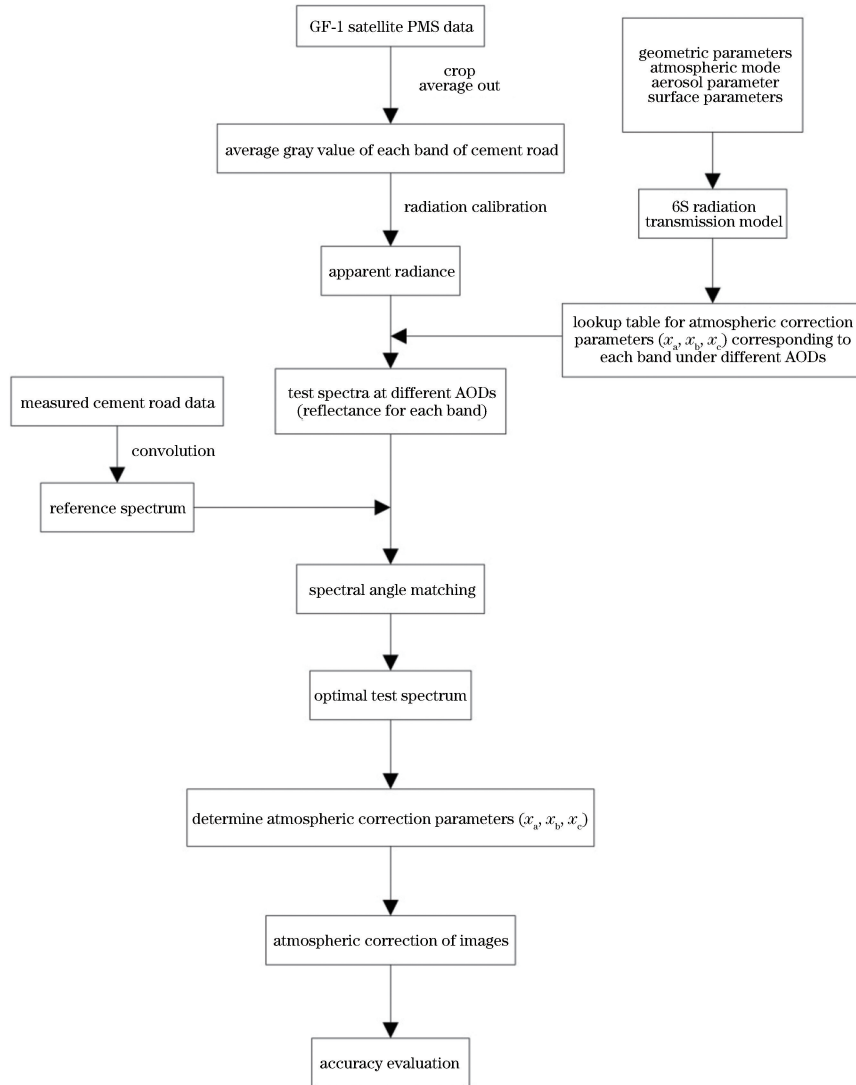


图 5 光谱匹配法大气校正流程图

Fig. 5 Flow chart of atmospheric correction by spectral matching method

4 大气校正结果分析

4.1 校正前后的直方图对比分析

直方图能够反映影像的信息量及分布特征，大气校正的结果间接地改变了影像的直方图。为此，对大气校正前该影像的各个波段的表观反射率和大

气校正后各波段的地表反射率作直方图统计，分析大气校正对 GF-1 卫星 PMS2 影像各波段反射率的影响。图 6(a)~(d)为大气校正前后影像各波段的反射率直方图。表 8 为大气校正前后的平均反射率以及动态范围。

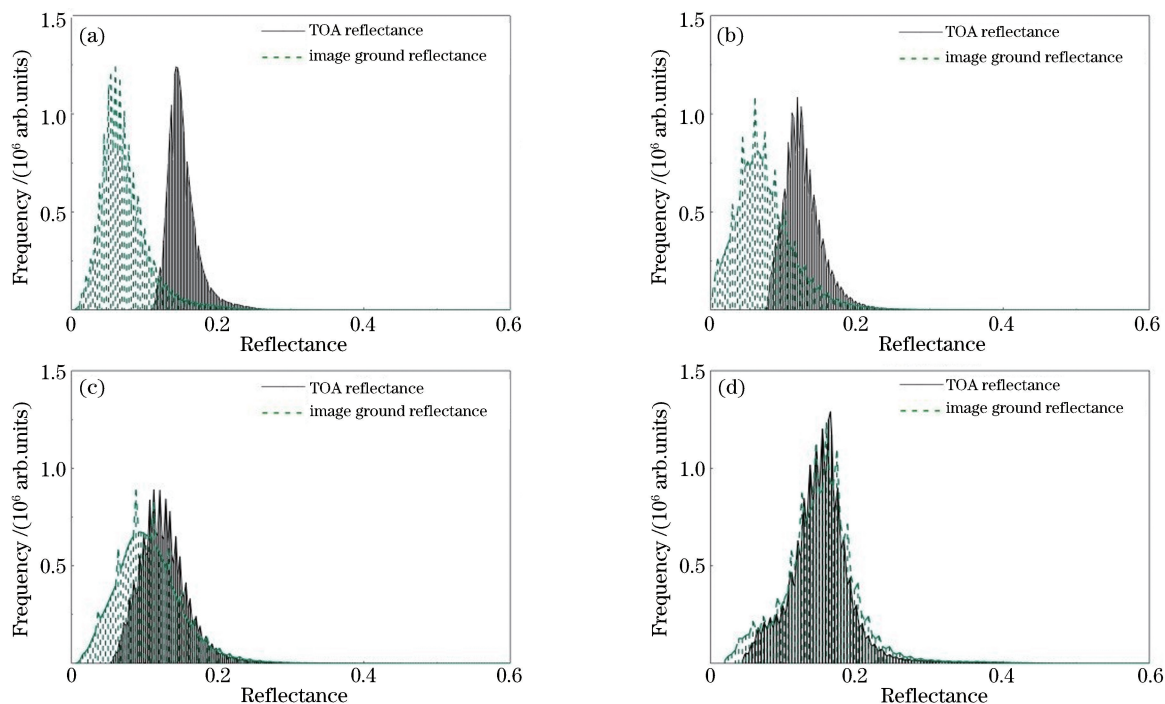


图 6 大气校正前后各波段的反射率直方图。(a)波段 1;(b)波段 2;(c)波段 3;(d)波段 4

Fig. 6 Reflectance histogram of each band before and after atmospheric correction.

(a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3; (d) band 4

表 8 大气校正前后的平均反射率及动态范围

Table 8 Average reflectance and dynamic range before and after atmospheric correction

Band	Remote sensing image	Average reflectance	Dynamic range [5%-95%]
Band 1	Before atmospheric correction	0.1522	0.1256-0.1929
	After atmospheric correction	0.0726	0.0321-0.1370
Band 2	Before atmospheric correction	0.1268	0.0889-0.1759
	After atmospheric correction	0.0737	0.0163-0.1495
Band 3	Before atmospheric correction	0.1261	0.0795-0.1841
	After atmospheric correction	0.1061	0.0395-0.1851
Band 4	Before atmospheric correction	0.1497	0.0774-0.2116
	After atmospheric correction	0.1500	0.0625-0.2254

由图 6 和表 8 可以看出:大气校正后,图像的直方图向左侧移动(蓝波段、绿波段、红波段的中心反射率分别向左偏移了 0.0796、0.0531、0.0200),且直方图变宽。这表明大气校正后去除了大气的影 响,导致图像的平均反射率降低,动态范围增加。其中,波段 1~4 的反射率变化依次减小,即在蓝波段反射率的变化幅度最大,绿波段和 红波段逐渐减小,到近红外波段,大气校正的影响很小,甚至可忽略不计。这是由于在短波波段的 大气散射较强,而在长波波段的 大气散射较弱,导致大气校正效果不明显。

4.2 与典型地物光谱进行对比分析

为了实现大气校正效果的定量评价,利用地面实测数据进行验证。采用的地面实测数据为 2014 年 12 月 1 日在北京奥林匹克公园附近利用 AvaFieid-3 便携式高光谱地物波谱仪(光谱范围为 300~2500 nm;光谱分辨率为 1.4 nm@300~1100 nm,15 nm@1000~2500 nm;尺寸为 310 mm×450 mm×135 mm;质量为 5.8 kg)测量的各种地物光谱,包括裸土、水体、枯草、水泥道路等。同时,记录了测量时间、对应的经纬度和照片等信息。图 7 为地面数据实测位置。

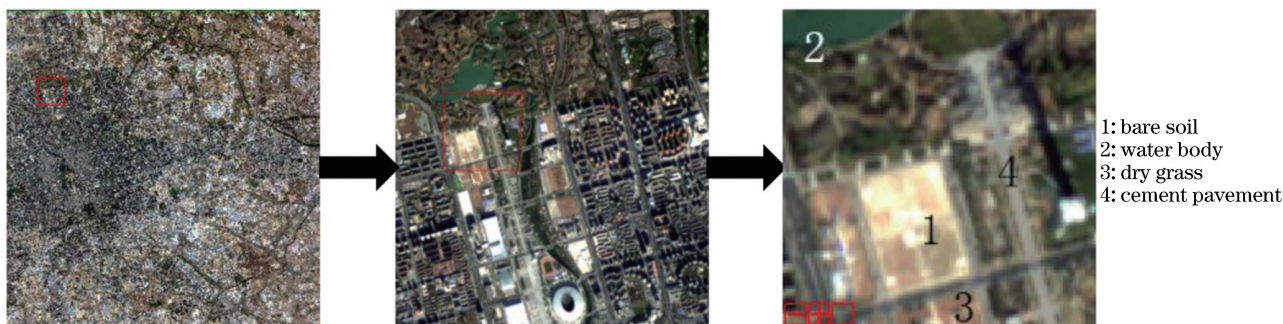


图 7 地面数据实测位置

Fig. 7 Measured positions of ground data

将实地测量得到的 4 种地物类型的多条光谱数据分别与 GF-1 卫星 PMS2 传感器的光谱响应函数进行卷积,并计算出每一种地物多条光谱曲线的平均值,确定多次测量地面反射率的标准差(SD),并作出误差棒,如图 8(a)~(d)所示,用于与遥感反演结果进行对比分析。

提取大气校正后的 2014 年 11 月 18 日影像上与实测光谱位置相同的地物,包括裸土、水体、枯草、水泥道路,将影像上所选地物的表观反射率、大气校正后的地表反射率和典型地物光谱数据进行对比分析,如图 8(a)~(d)和表 9 所示。

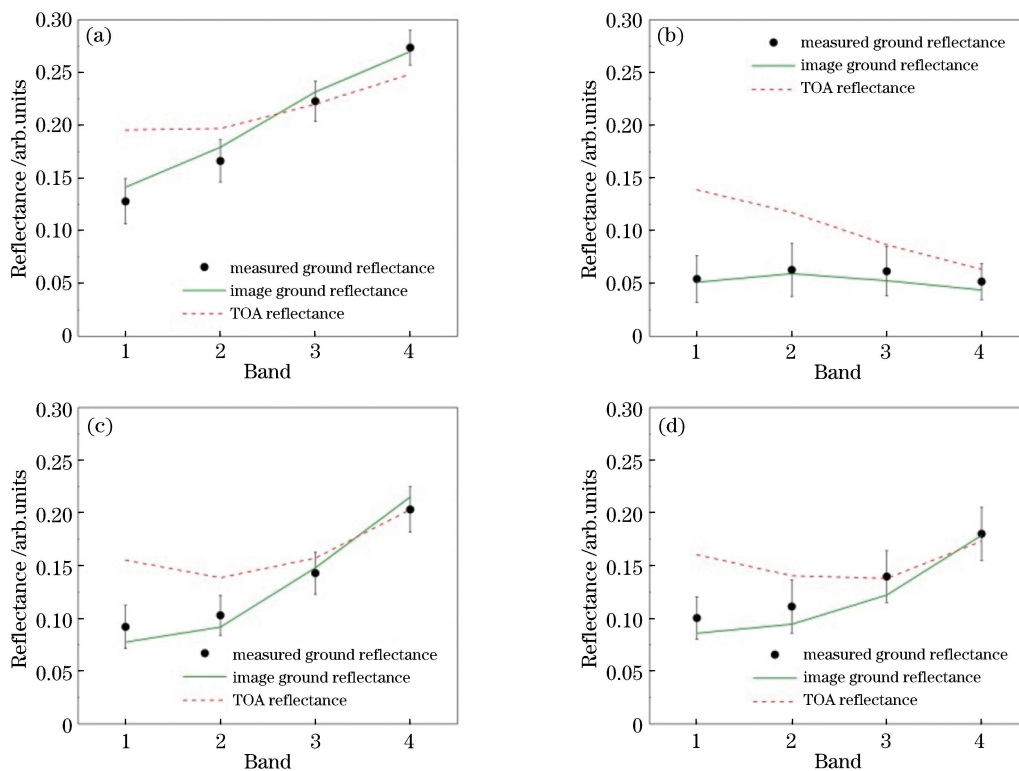


图 8 大气校正结果与典型地物光谱的比较。(a)裸土;(b)水体;(c)枯草;(d)水泥道路

Fig. 8 Comparison between atmospheric calibration results and typical ground spectrum.

(a) Bare soil; (b) water body; (c) dry grass; (d) cement pavement

根据图 8 和表 9 可以看出:大气校正前,表观反射率与典型地物光谱数据在部分波段差别较大;大气校正后,地表反射率与典型地物光谱数据的变化趋势一致,且非常吻合,差值均在误差范围内,这表明大气校正的精度较高,效果较为理想。经过大气

校正的地表反射率更接近地表真实反射率,更能反映地物的真实特性。

4.3 不同时相卫星影像大气校正结果的对比分析

为了实现不同时相大气校正效果的定量分析,分别利用新方法对 2014 年 11 月 18 日和 2016 年

2月16日两景北京地区的GF-1卫星PMS2传感器影像进行大气校正。比较大气校正后两景影像在相同地区同一地物(水泥路、裸土、屋顶、枯草,如图9所示)上的反射率,并计算不同地物反射率的相关系数。水泥路、裸土、屋顶和枯草的相关系数 R^2 分别

为0.9876、0.9841、0.9923、0.9794,如图10所示。上述地物在不同时相的地表反射率均具有较高的相关性,这表明该方法可适用于不同时相的卫星影像,具有一定的普适性。

表9 大气校正结果与典型地物光谱的误差分析

Table 9 Error analysis for atmospheric calibration results and typical ground spectrum

Class	Parameter	Blue	Green	Red	Near infrared
Bare soil	TOA reflectance	0.1956	0.1970	0.2201	0.2485
	Measured ground reflectance	0.1279	0.1662	0.2229	0.2736
	Image ground reflectance	0.1414	0.1793	0.2317	0.2699
	Difference	0.0135	0.0131	0.0088	0.0037
	SD	0.0215	0.0201	0.0192	0.0165
Water body	TOA reflectance	0.1389	0.1173	0.0868	0.0636
	Measured ground reflectance	0.0543	0.0629	0.0616	0.0518
	Image ground reflectance	0.0512	0.0594	0.0527	0.0439
	Difference	0.0031	0.0035	0.0089	0.0079
	SD	0.0222	0.0250	0.0234	0.0171
Dry grass	TOA reflectance	0.1553	0.1386	0.1572	0.2032
	Measured ground reflectance	0.0919	0.1029	0.1429	0.2033
	Image ground reflectance	0.0775	0.0918	0.1480	0.2151
	Difference	0.0144	0.0111	0.0051	0.0118
	SD	0.0205	0.0189	0.0200	0.0215
Cement pavement	TOA reflectance	0.1605	0.1404	0.1380	0.1732
	Measured ground reflectance	0.1004	0.1113	0.1396	0.1802
	Image ground reflectance	0.0859	0.0945	0.1222	0.1787
	Difference	0.0145	0.0168	0.0174	0.0015
	SD	0.0201	0.0252	0.0245	0.0251

5 结 论

针对暗目标法对植被覆盖度较低的影像适用性差的问题,提出了一种基于光谱匹配的大气校正方法。该方法以城市地区的水泥路面为切入点,利用6S辐射传输模型建立查找表,得到不同大气校正参数下的测试光谱;通过测试光谱与参考光谱的光谱角度匹配,得到气溶胶光学厚度和对应的大气校正参数,最终实现了多光谱影像的大气校正。

校正前后的直方图对比分析表明,基于光谱匹配的大气校正可以实现城市地区遥感影像的大气校正。校正后的地表反射率与典型地物光谱数据的对比分析表明,该方法的大气校正效果良好,可有效消

除大气的影,更好地还原地表真实反射率,具有较高的精度。不同时相同一地物的反射率对比表明该方法具有一定的普适性。因此,采用光谱匹配法进行大气校正具有较好的可行性,为今后城市地区的大气校正工作提供了新思路。

当然,本研究也存在不足之处。GF-1卫星PMS2传感器影像的幅宽为36 km,在天气晴朗的情况下,可以认为整景影像的气溶胶光学厚度是一致的,这对于大气校正来说,可能会存在一定的误差;同时,还需要根据影像上不同区域的水泥路面确定多个参考光谱,进而得到最优的大气校正参数,并完成大气校正。

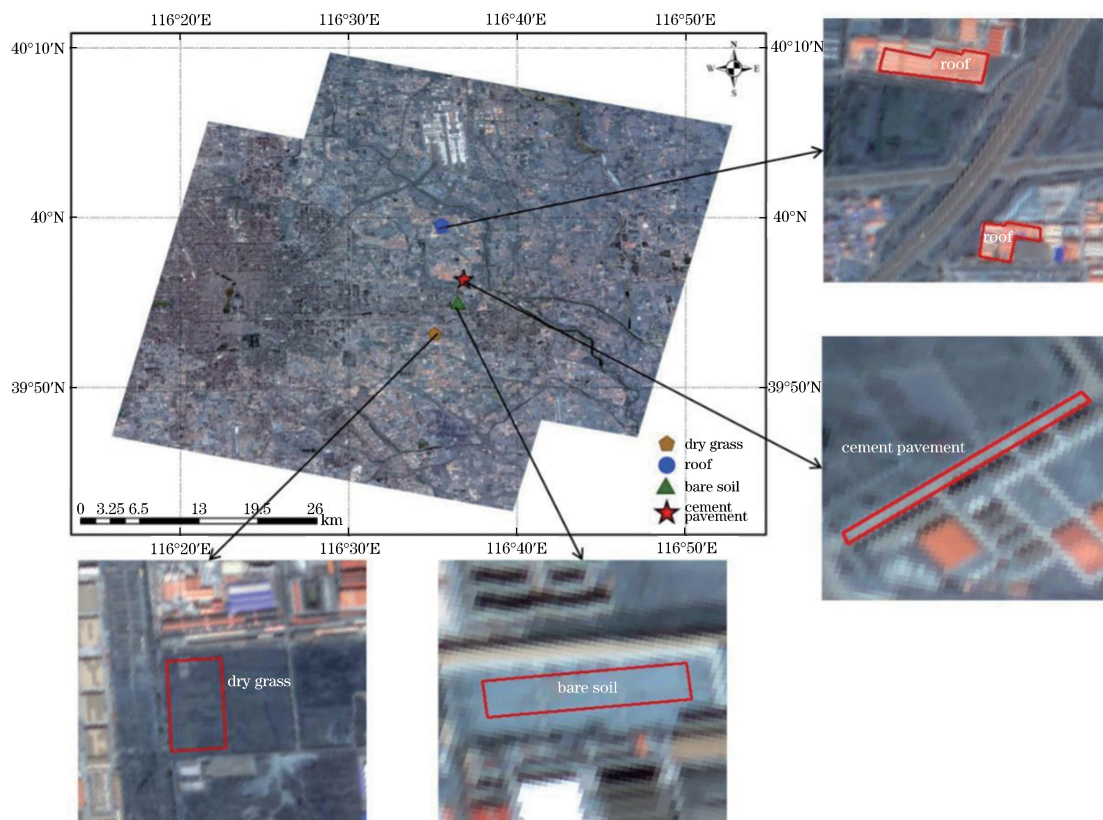


图 9 不同时相、同一地物的位置示意图

Fig. 9 Diagram of locations of the same ground object at different times

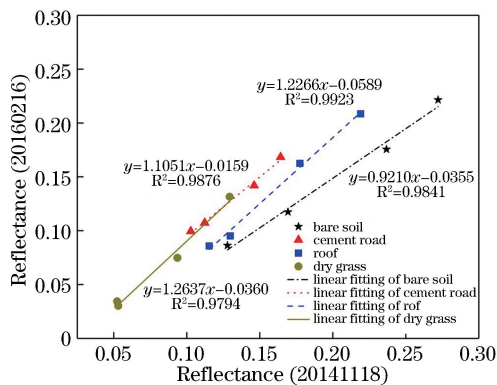


图 10 不同时相的各波段反射率

Fig. 10 Reflectance of each band in different phases

致谢 本文使用的 GF-1 卫星数据由中国科学院遥感与数字地球研究所提供,地物光谱数据由遥感与数字地球研究所的刘其悦同志以及华南农业大学的苏辉跃、刘珊珊同学协助获得,在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] Zheng Y, Wang Q J, Liang Z Z. Aerosol retrieval and atmospheric correction of HJ-1 satellite CCD data over land surface of Taihu Lake[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(5): 10-15.

郑尧, 王琪洁, 梁忠壮. 太湖地区 HJ-1 卫星 CCD 数据反演气溶胶及大气校正[J]. 测绘工程, 2016, 25 (5): 10-15.

[2] Liu Q Y, Yu T, Fang L, *et al.* Image-by-pixel atmospheric correction of HJ-1/CCD image based on 6S model[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(31): 11, 107.

刘其悦, 余涛, 方莉, 等. 基于 6S 模型的 HJ-1/CCD 影像逐像元大气校正[J]. 黑龙江科技信息, 2010 (31): 11, 107.

[3] Wang A C, Fu Q Y, Min X J, *et al.* Atmospheric correction for the HJ-1A/B satellite CCD sensor[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2011, 41 (S1): 76-88.

王爱春, 傅俏燕, 闵祥军, 等. HJ-1A/B 卫星 CCD 影像大气订正[J]. 中国科学:信息科学, 2011, 41 (S1): 76-88.

[4] Sun C K, Sun L, Ma S F, *et al.* Atmospheric correction method based on HJ-1 CCD data [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(4): 826-836.

孙长奎, 孙林, 麻盛芳, 等. HJ-1 CCD 数据大气校正方法研究[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 826-836.

[5] Wang Z T, Chen L F, Gu X F, *et al.* A fast atmospheric correction method based on CBERS-02 data[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5):

- 709-714.
王中挺, 陈良富, 顾行发, 等. CBERS-02 卫星数据大气校正的快速算法[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 709-714.
- [6] Liu J, Wang L M, Yang L B, *et al.* GF-1 satellite image atmospheric correction based on 6S model and its effect[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 159-168.
刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于 6S 模型的 GF-1 卫星影像大气校正及效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 159-168.
- [7] Fang L, Yu T, Gu X F, *et al.* Aerosol retrieval and atmospheric correction of HJ-1 CCD data over Beijing [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(1): 151-164.
方莉, 余涛, 顾行发, 等. 北京地区 HJ-1 卫星 CCD 数据的气溶胶反演及在大气校正中的应用[J]. 遥感学报, 2013, 17(1): 151-164.
- [8] Zheng S, Zhao X, Zhang H, *et al.* Atmospheric correction on CCD data of HJ-1 satellite and analysis of its effect[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(4): 709-721.
郑盛, 赵祥, 张颢, 等. HJ-1 卫星 CCD 数据的大气校正及其效果分析[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 709-721.
- [9] Ji C D, Sun D Z, Ma C N. NPP VIIRS data fast atmospheric correction and accuracy evaluation based on 6S model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080101.
吉长东, 孙道中, 马传宁. 基于 6S 模型 NPP VIIRS 数据快速大气校正及精度评估[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080101.
- [10] Wang Z W, Yang S Q, Zeng Q L, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth for Chongqing using the HJ-1 satellite data[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(3): 586-596.
- [11] Zhou L, Li Y M, Guo Y L, *et al.* Atmospheric correction for case-2 waters using a radiative transfer optimized model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201002.
周莉, 李云梅, 郭宇龙, 等. 基于辐射传输优化模型的二类水体大气校正[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201002.
- [12] Wang F, Wang S X, Zhou Y. A study of 6S model used for atmospheric correction of MODIS image over Taihu Lake [C] // 2011 International Conference on Multimedia Technology, July 26-28, 2011, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2011: 116-119.
- [13] Barducci A, Guzzi D, Lastrì C, *et al.* Blind atmospheric correction of hyperspectral images gathered by high spectral resolution sensors [C] // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 22-27, 2012, Munich, Germany. New York: IEEE, 2012: 4070-4073.
- [14] He H J. The study of atmospheric correction scheme based on the radiative transfer theory [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006: 44-48.
何海舰. 基于辐射传输模型的遥感图像大气校正方法研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006: 44-48.
- [15] Su W, Zhang M Z, Jiang K P, *et al.* Atmospheric correction method for Sentinel-2 satellite imagery[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0128001.
苏伟, 张明政, 蒋坤萍, 等. Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0128001.