

基于机载平台测量地表反照率的方法

杨太平^{1,2}, 司福祺¹, 赵敏杰¹, 窦科¹, 周海金¹, 罗宇涵¹, 刘文清¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 地表反照率是研究陆地辐射收支情况、区域及全球气候、地貌等信息的先决条件, 对其进行精确测量是开展相关研究的前提和保证。由于大气层吸收的影响, 地表反照率不能进行直接测量。因此, 采用测量垂直向下与向上散射光的方法, 结合 SCIATRAN 辐射传输模型获得地表反照率。基于此方法, 在机载平台上进行观测实验, 获取机载平台上垂直向上和向下的辐亮度值, 采用迭代反演方法获得石家庄到保定地区紫外波段 350~395 nm 的地表反照率, 并对不同下垫面、不同波段反照率进行比较, 对城区中心到边缘过渡变化进行详细分析。结果表明, 紫外波段 350~395 nm 地表反照率随波长增大而缓慢升高, 结果与中等分辨率成像光谱仪(MODIS)数据可达到良好的一致性。不同观测区域结果对比显示, 城区地表反照率大于农田, 且城区中心比边缘地表反照率大 0.014 左右, 其差异也随波长增大而升高。

关键词 遥感; 地表反照率; 机载; 迭代反演; 辐射传输模型

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1228001

Method for Measuring Surface Albedo Based on Airborne Platform

Yang Taiping^{1,2}, Si Fuqi¹, Zhao Minjie¹, Dou Ke¹,
Zhou Haijin¹, Luo Yuhan¹, Liu Wenqing¹

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The surface albedo is a prerequisite for the research of the information such as land radiation budget, regional and global climate, and geomorphology. Therefore, its precise measurement is the premise and guarantee of relevant research. Due to the influence of atmospheric absorption, the surface albedo cannot be directly measured. Therefore, the method of measuring vertical downward and upward scattered light and combining SCIATRAN radiative transfer model is adopted to obtain the surface albedo. Based on this method, the observation experiment is carried out on the airborne platform. The vertical downward and upward radiance values are obtained. The iterative retrieval method is used to obtain the surface albedo of the area from Shijiazhuang to Baoding in the ultraviolet band from 350 nm to 395 nm. And the surface albedos of different underlying surfaces and different bands are compared. The transition from the center to the edge of the city is analyzed in detail. The results show that the surface albedo of ultraviolet waveband ranging from 350 nm to 395 nm goes up slightly with the increase of the wavelength, which is in good agreement with medium resolution imaging spectrometer (MODIS) data. In addition, the comparison of different observation areas shows that the surface albedo of urban area is larger than that of farmland, and the surface albedo of the center of the city is about 0.014 higher than the edge of the city. The difference also goes up with the increase of the wavelength.

收稿日期: 2017-06-29; **收到修改稿日期:** 2017-07-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0200400)、国家自然科学基金(41605017, U1407135)

作者简介: 杨太平(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事紫外辐射测量、痕量气体反演方面的研究。

E-mail: tpyang@aiofm.ac.cn

导师简介: 司福祺(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光信息处理、痕量气体光学与光谱学监测方法方面的研究。

E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn(通信联系人)

Key words remote sensing; surface albedo; airborne; iterative retrieval; radiative transfer model

OCIS codes 280.1310; 300.6550; 260.7190

1 引 言

地表反照率被定义为地表对太阳的反射通量与太阳入射通量的比值^[1],地表反照率在科学探测与研究方面具有很重要的意义。首先,作为地表的波长函数,地表反照率携带地表的光学特性以及大气中能量相互作用的信息,可以定量陆地表面和大气界面之间的辐射度,用于土地利用和土地覆盖等方面^[2];其次,人类活动导致土地状况不断变化,如土地的沙漠化、城市化等^[3],土地覆盖变化会导致全球辐射强迫发生变化^[4]。地表反照率作为地表辐射和气候模型中的重要参数,是遥感数据反演和定量应用的关键因素之一,因此需要精确地测量地表反照率^[5]。

地表反照率测量方法可分为地面、机载和星载测量。地面测量不受大气效应的影响,但是其覆盖区域有限^[6];卫星测量如中等分辨率成像光谱仪(MODIS)和多角度成像光谱仪(MISR)可提供全球覆盖数据^[7],但受大气层及云的影响较大。机载测量弥补了地面和卫星的不足,可以高精度、高时间分辨率地测量区域平均地表反照率^[8],并且只需要校正地表和飞行高度之间的大气效应。此外,虽然相对于地表信息,大气的影只占非常小的一部分^[9],但测量地表反照率需要提供辐射传输模型的一些边界条件^[10]。机载测量的地表反照率为卫星产品提供重要的数据依据,也可用于验证卫星反照率产品^[11]。近年来,国内外通过机载测量地表反照率主要包括我国北京师范大学采用的半经验的二向性反射核驱动模型算法^[11](AMBRALS)、德国莱比锡大学采用的非线性外推法^[8]以及美国科罗拉多大学采用的迭代反演方法^[7]。其中,科罗拉多大学实验采用 8-12 nm 中等分辨率光谱仪的太阳谱通量辐射计(SSFR)对下垫面为干草的农场和城区两个区域进行辐照度的测量。

为了了解地表和大气层对紫外光谱的反射和吸收等情况,本文采用迭代反演对紫外波段地表反照率进行研究,相对于 MODIS 几百纳米测一个反照率值和科罗拉多大学采用中等分辨率光谱仪测量,本实验采用光谱分辨率为 0.2~0.4 nm 的海洋光谱仪,可以实现 2 nm 测量一个反照率(考虑大气吸收的影响每 2 nm 求光强度平均值),极大地提高光谱分辨率。高精度地表反照率研究有利于痕量气体反演得到更加精确的大气校正。本实验选择多个实验观测区域,并对其地表反照率进行比较及验证。此外,本文对保定城区中心到边缘过渡变化进行了详细的分析。

2 研究方法

2.1 研究区域

研究区域为石家庄-保定-石家庄(38°N~39°N,114°E~116°E)区域,该区域地处华北平原,是典型的冲积平原,地势平缓,地面海拔约为 50 m,属于温带湿润半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷干旱,雨雪稀少。

实验数据采集时间为 2016 年 12 月 2 日 11:40—15:45,飞机飞行高度在 3 km 左右,具体参数根据飞机的全球定位系统(GPS)历史数据得到。实验期间天气为晴天,有薄云,雾霾比较严重。因此在使用 SCIATRAN 辐射传输模型模拟时需要考虑云和气溶胶的影响,并对相关参数进行设置。

实验采用两台海洋光谱仪(Maya2000-Pro),分别将其安装在飞机的顶部和底部,用以测量垂直向上和向下的光强度。实验对飞行轨迹中的 5 个地区的地表反照率进行测量,如图 1 所示,分别为定州、保定、农田 1 号、农田 2 号、农田 3 号。各个地区的太阳天顶角(SZA)、方位角(SAA)、飞行高度及下垫面状况等基本信息如表 1 所示。5 个地区的下垫面类型主要包含农田、乡村和城市,实验主要研究冬季城市和农田紫外波段反照率的差别。此外,对保定地区进行梳状扫描,选择保定城区三个地区的地表反照率进行迭代反演,如图 2 所示,分别为城区中心、城区中部地区和城区边缘地区,相邻两地区之间距离均为 6.5 km,并对这三个地区紫外波段 350~395 nm 范围地表反照率的变化趋势进行重点分析。

2.2 研究方法

实验采用迭代反演方法,结合光谱仪测量和 SCIATRAN 辐射传输模型计算,最终获取地表反照率。由于光谱仪测量为像元(DN)值,为得到散射光向上辐亮度(F_u)和向下辐亮度(F_d),需在实验室采用积分球对

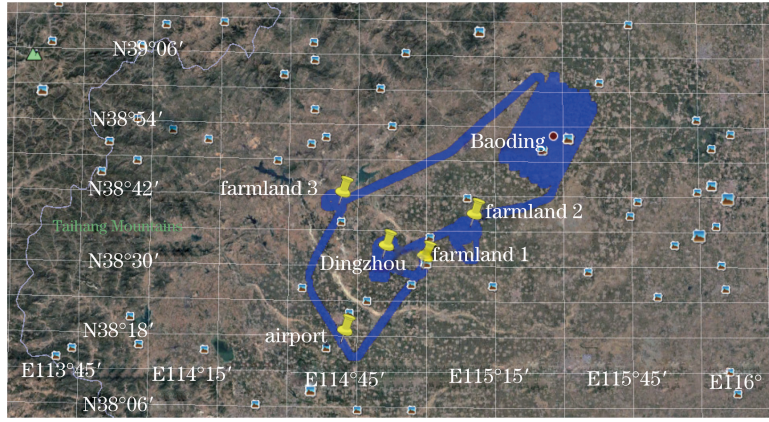


图 1 实验飞行轨迹及选择的 5 个区域

Fig. 1 Experimental flight path and five selected areas

表 1 观测区域基本信息

Table 1 Basic information of observation areas

Observation area	SZA / (°)	SAA / (°)	Flight altitude / km	Underlying surface
Dingzhou	60.57	176.64	3.0	Building sparse urban area
Baoding	67.23	210.68	3.0	Building more intensive urban area
Farmland 1	60.48	179.83	3.0	Farmland, village
Farmland 2	63.46	200.91	3.7	Farmland, village
Farmland 3	75.08	224.77	2.4	Farmland, dry grass, village

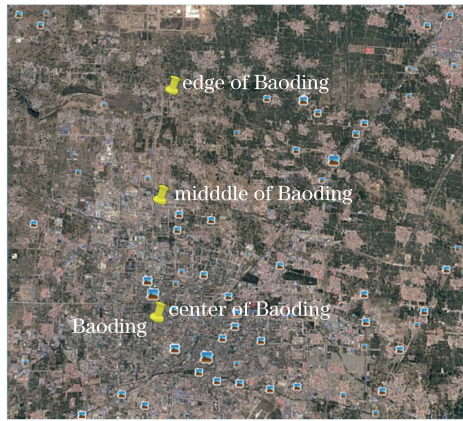


图 2 选择的保定城区三个观测地区

Fig. 2 Three selected observation areas of Baoding

光谱仪进行绝对辐亮度定标^[12],并用积分球(Labsphere:US-200-SF)作为标准光源,得到定标系数 R 为:

$$R_i = \frac{L(\lambda)}{V_{DN_i} - V_{DN_{dark}}}, \quad (1)$$

式中, i 为像元序数, $L(\lambda)$ 为标准辐亮度, V_{DN_i} 、 $V_{DN_{dark}}$ 分别为第 i 个像元的响应值和暗电流。

在大气校正过程中,气体吸收满足:

$$\ln\left(\frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}}\right) = f[\sigma_{\lambda,i(z)}, n_i(z)], \quad (2)$$

式中, I_λ 为测量光谱, $I_{0\lambda}$ 为太阳参考光谱, $\sigma_{\lambda,i(z)}$ 为第 i 种气体的光谱吸收截面, $n_i(z)$ 为分子数浓度。在紫外可见光谱范围,(2)式可以精确地近似为线性模型(线性化朗伯比尔定律)^[13]。

辐射在大气传输过程中与物质相互作用而减弱,设 I_λ 为辐射强度,在传播方向上经过 ds 厚度后变为 $I_\lambda + dI_\lambda$,大气辐射传输普遍原理可以表示为^[14]:

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda, \quad (3)$$

式中 ρ 为物质密度, k_λ 表示对辐射波长 λ 的质量消光截面(以每单位质量的面积为单位)。 J_λ 为定义的源函数, 即 $J_\lambda \equiv j_\lambda/k_\lambda$, 其中 j_λ 为定义的源函数系数, 和质量消光系数具有相同的物理意义, 由 $dI_\lambda = j_\lambda \rho ds$ 和 $dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds$ 联立可得(3)式。在大气辐射的很多应用中, 均假设局域大气为平面平行, 设定测量与分层平面垂直线性距离为 z , 普遍辐射传输方程可转化为^[13]:

$$\cos\theta \frac{dI(z; \theta, \phi)}{k\rho dz} = -I(z; \theta, \phi) + J(z; \theta, \phi), \quad (4)$$

式中 θ 表示相对于向上垂线的倾角, ϕ 表示相对于 x 轴的方位角, 这里省去各辐射量的下标 λ 。

引进由大气向下测量的垂直光学厚度:

$$\tau = \int_z^\infty k\rho dz', \quad (5)$$

则有:

$$\mu \frac{dI(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau; \mu, \phi) - J(\tau; \mu, \phi), \quad (6)$$

$\mu = \cos\theta$, 对于边界在 $\tau=0$ 和 $\tau=\tau_*$ 之间的有限大气, 可以求解出(6)式, 并给出向上的、向下的辐射强度。为了求得高度为 τ 的向上强度($\mu>0$), 将方程乘以因子 $\exp(-\tau/\mu)$, 然后由 τ 积分到 $\tau=\tau_*$ 可得^[13]:

$$I(\tau; \mu, \phi) = I(\tau_*; \mu, \phi) \exp\left(-\frac{\tau_* - \tau}{\mu}\right) + \int_\tau^{\tau_*} J(\tau'; \mu, \phi) \left(-\frac{\tau' - \tau}{\mu}\right) \frac{d\tau'}{\mu} \quad (0 < \mu \leq 1). \quad (7)$$

为了求得高度为 τ 的向下强度($\mu<0$), 将方程乘以因子 $\exp(\tau/\mu)$, 并用 $-\mu$ 代替 μ , 然后由 $\tau=0$ 积分到 τ 可得:

$$I(\tau; -\mu, \phi) = I(0; -\mu, \phi) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu}\right) + \int_0^\tau J(\tau'; -\mu, \phi) \left(-\frac{\tau - \tau'}{\mu}\right) \frac{d\tau'}{\mu} \quad (0 < \mu \leq 1). \quad (8)$$

(7)~(8)式中, $I(\tau_*; \mu, \phi)$ 和 $I(0; -\mu, \phi)$ 分别为在底面和顶面向介质内的源强度。

2.3 数据处理

实验数据处理总流程图如图 3 所示。

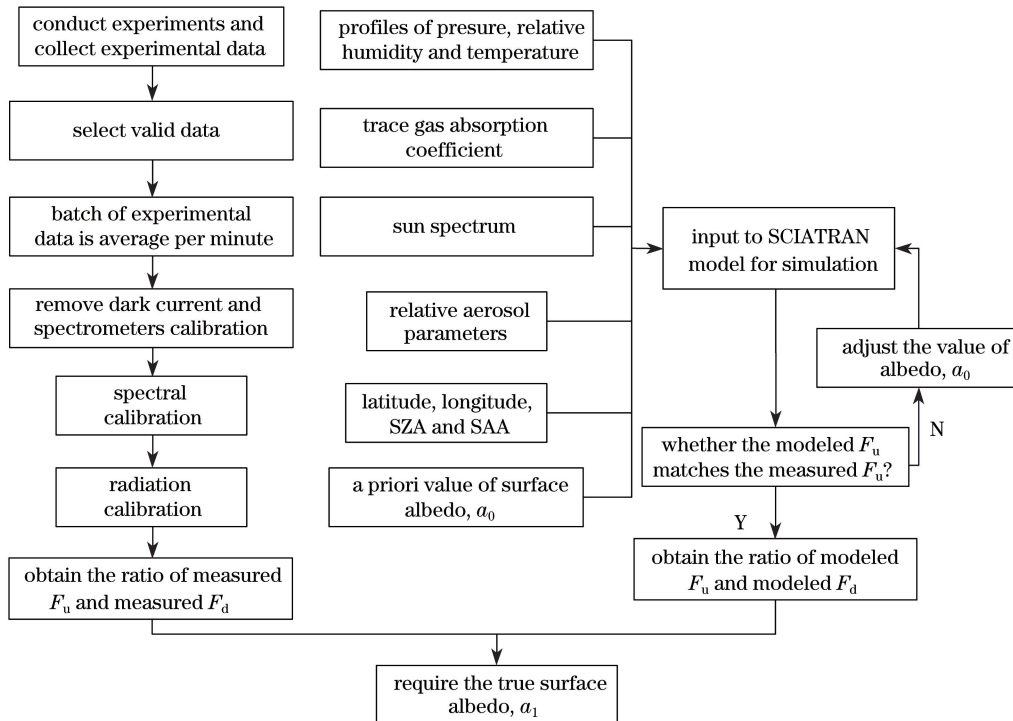


图 3 总流程图

Fig. 3 Total flow diagram

反照率反演方法的基本前提包括地表反照率先验值 a_0 , 需要不断调整其大小输入到 SCIATRAN 辐射传输模型进行模拟, 直到在飞行高度模拟的向上辐亮度 F_u 与光谱仪测量值匹配为止。

实验的辐射传输模型可以选择由不莱梅大学开发的 SCIATRAN 模型进行模拟, 模型需要输入的主要参数如表 2 所示。

表 2 辐射传输模型输入参数
Table 2 Input parameters of radiative transfer model

Parameter							
Atmospheric profile	Relative trace gas absorption coefficient ^[15]	Sun spectrum	Latitude, longitude and altitude	SZA, SAA	Relative cloud parameter	Relative aerosol parameter ^[16]	A priori value of surface albedo

通过比较在飞行高度测量的和模拟的下行辐亮度 F_d 对特定大气廓线模拟结果进行验证。图 4(a) 显示了测量与模拟的 F_d 之间具有很好的一致性, 差异在 10% 以内, 如图 4(b) 所示。

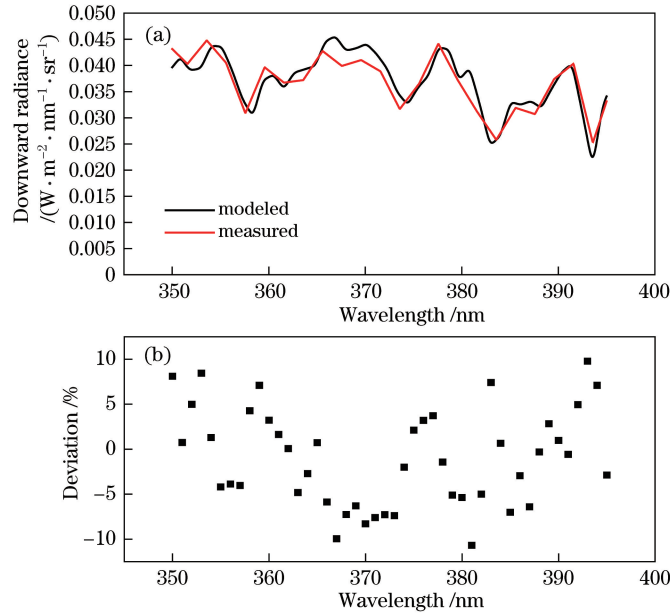


图 4 (a) 模拟和实测的 F_d 比较; (b) 差异分析

Fig. 4 (a) Comparison of modeled and measured F_d ; (b) deviation analysis

由于在飞行高度测量的和模拟的 F_u 和 F_d 之间存在一定的差异, 为了使在飞行高度模拟和测量的 F_d 之间的残差不影响到地表反照率的反演, 需要对其进行校正, 主要用于校正作为模型输入的地表反照率先验值 a_0 , 从而获得真实地表反照率 a_1 。向下辐亮度光谱校正因子 (V_{corr_d}) 是在飞行高度模拟的和测量的 F_d 之间的比值, 定义为:

$$V_{\text{corr}_d} = \frac{F_{d_{\text{mod}}}}{F_{d_{\text{mea}}}}, \quad (9)$$

式中 $F_{d_{\text{mod}}}$ 为模拟的下行辐亮度, $F_{d_{\text{mea}}}$ 为测量的下行辐亮度。同样, 向上辐亮度光谱校正因子 (V_{corr_u}) 是在飞行高度模拟的和测量 F_u 之间的比值, 可以表示为:

$$V_{\text{corr}_u} = \frac{F_{u_{\text{mod}}}}{F_{u_{\text{mea}}}}, \quad (10)$$

式中 $F_{u_{\text{mod}}}$ 为模拟的上行辐亮度, $F_{u_{\text{mea}}}$ 为测量的上行辐亮度, 最终地表反照率的模型可以表示为:

$$a_1 = a_0 \times \frac{V_{\text{corr}_d}}{V_{\text{corr}_u}} = a_0 \times \frac{F_{d_{\text{mod}}}}{F_{u_{\text{mod}}}} \times \frac{F_{u_{\text{mea}}}}{F_{d_{\text{mea}}}}. \quad (11)$$

3 结果分析与讨论

3.1 不同地区地表反照率的比较及验证

实验对表 1 中 5 个地区的紫外波段地表反照率进行计算,其结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,两个城市的地表反照率分别为 0.09 和 0.1,三个农田均为 0.087 左右,地表反照率能够反映出下垫面的类型。保定城区面积为 380 km²,人口近 240 万人,定州城区面积 44 km²,人口 22 万人,从此方面比较保定城区人口和面积比例较定州市更小,住房等建筑面积更大更紧凑。所以保定城区地表反照率大于定州是由于保定城区建筑较定州更加密集,植被覆盖较少。城区地表反照率整体大于农田,三个农田下垫面状况相似,结果显示三个农田地表反照率非常相近。实验当天天气晴且测量时间段较短,温度和湿度变化小,可忽略温湿度的影响,因此地表反照率大小可准确反映下垫面状况及其植被覆盖情况。

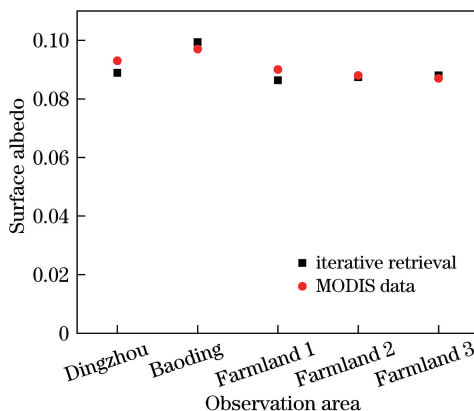


图 5 观测区域迭代反演地表反照率和 MODIS 数据的比较

Fig. 5 Comparison of surface albedo retrieved by iterative retrieval and MODIS data of observation areas

图 5 将迭代反演的反照率与 MODIS 数据进行比较,黑色方形表示迭代反演地表反照率,红色圆点表示 MODIS 数据。从图 5 中可以看出两种方法获得的结果能达成良好的一致性,差异如图 6 所示,都在 5% 以内,此结果有效地验证了迭代反演的可行性和准确性。

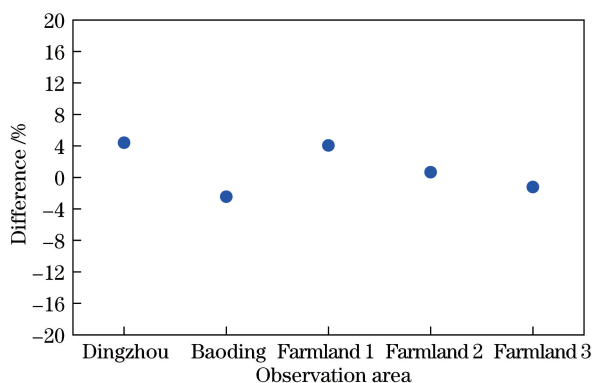


图 6 观测区域迭代反演结果与 MODIS 数据的差异

Fig. 6 Difference of results of iterative retrieval and MODIS data of observation areas

3.2 紫外波段地表反照率的变化

图 7 所示为保定城区三个实验地区的紫外波段地表反照率结果,黑色实线表示保定城市中心地表反照率,红色虚线表示保定城市北部的边缘地区,蓝色虚点线表示保定城市中部地区。在 350~395 nm 波段范围,城区中心地表反照率比边缘高 0.014 左右,城区中心比城区中部地区地表反照率高 0.004 左右,城区中部比城区边缘地表反照率高 0.01 左右,且均随波长增大缓慢升高,具体差异图如 8 所示,并且随着波长增大,其差异也呈现升高趋势。城区中心下垫面主要为建筑、柏油路 and 水泥地面,植被较少,城区中部地区绿化带比例增多,但建筑仍占大部分,所以其与城区中心地表反照率之间差异较小。城区边缘主要覆盖类型为植被

和农田,建筑物比例大大减少,植被指数快速增加。相对于城区中心到城区中部之间地表反照率的差异,在相同空间距离变化下,城区中部到城区边缘地表反照率下降更快。此结果同时也验证了地表反照率随植被指数增加而降低的理论^[17]。

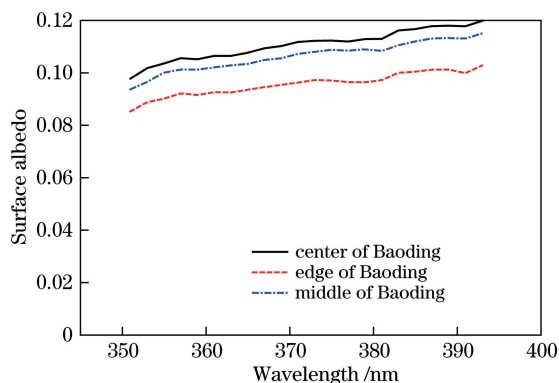


图7 保定城区中心、城区中部及边缘迭代反演地表反照率结果

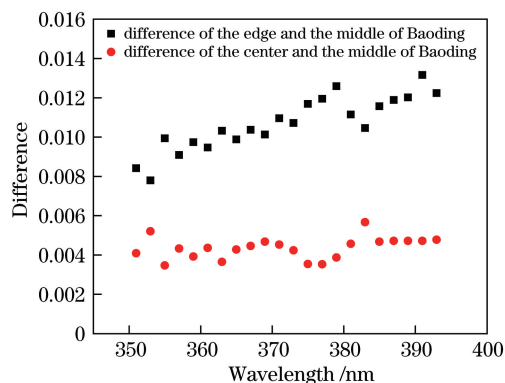


图8 保定城区中心、城区中部及边缘地表反照率的差异分析

Fig. 7 Iterative retrieval results of surface albedo of the center, middle and edge of Baoding city

Fig. 8 Difference analysis of the surface albedo of the center, middle and edge of Baoding city

4 结 论

采用迭代反演方法得到冬季石家庄-保定地区的紫外波段地表反照率,比较了不同地区紫外波段地表反照率的差异,并根据下垫面状况和植被指数的影响分析其产生的原因。结果表明:城区大于农田紫外波段地表反照率,该方法的实验结果与MODIS数据吻合,证明了该方法的准确性和可行性,并为基于机载平台的廓线反演及大气校正提供了有效的数据。保定城区中心和边缘地区350~395 nm紫外波段地表反照率均随波长增大而缓慢升高,并且由于城区中心到城区边缘过渡范围内下垫面植被指数的不断增大,地表反照率快速降低,城区中心地表反照率比城区边缘大0.014左右,该结果有助于反照率产品的验证,并且为大气反演研究提供更加精确的数据。

参 考 文 献

- [1] Qi Wendong, Liu Qiang, Hong Yutang, *et al.* Comparison analysis based on different inverse algorithms of surface albedo products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(3): 559-572.
齐文栋, 刘强, 洪友堂, 等. 3种反演算法的地表反照率遥感产品对比分析[J]. *遥感学报*, 2014, 18(3): 559-572.
- [2] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 977-998.
- [3] Yang J. Analysis of surface albedo distribution and variation in Beijing region with the MODIS data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2006: 9-21.
- [4] Zhai Jun, Liu Ronggao, Liu Jiyuan, *et al.* Radiative forcing over China due to albedo change caused by land cover change during 1990-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 875-885.
翟俊, 刘荣高, 刘纪远, 等. 1990-2010年中国土地覆被变化引起反照率改变的辐射强迫[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 875-885.
- [5] Xiao Dengpan, Tao Fulu, Moiwo J P. Research progress on surface albedo under global change[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1217-1224.
肖登攀, 陶福祿, Moiwo J P. 全球变化下地表反照率研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1217-1224.
- [6] Pinty B, Lattanzio A, Martonchik J V, *et al.* Coupling diffuse sky radiation and surface albedo[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(7): 2580-2591.
- [7] Coddington O, Schmidt K S, Pilewskie P, *et al.* Aircraft measurements of spectral surface albedo and its consistency with ground-based and space-borne observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(17): 1-13.

- [8] Wendisch M, Pilewskie P, Jäkel E, *et al.* Airborne measurements of areal spectral surface albedo over different sea and land surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D8): D08203.
- [9] Michalsky J, Min Q W, Barnard J C, *et al.* Simultaneous spectral albedo measurements near the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains (ARM SGP) central facility[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D8): 4254.
- [10] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, *et al.* First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS[J]. *Remote Sensing Environment*, 2002, 83(1-2): 135-148.
- [11] Jiao Ziti, Wang Jindi, Xie Liou, *et al.* Initial validation of modis albedo product by using field measurements and airborne multiangular remote sensing observations[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(1): 64-72.
焦子梯, 王锦地, 谢里欧, 等. 地面和机载多角度观测数据的反照率反演及对 MODIS 反照率产品的初步验证[J]. *遥感学报*, 2005, 9(1): 64-72.
- [12] Zhao Minjie, Si Fuqi, Lu Yihuai, *et al.* Spectral image correction method for space-born differential optical absorption spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1230002.
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1230002.
- [13] Sun Youwen, Xie Pinhua, Xu Jin, *et al.* Measurement of atmospheric CO₂ vertical column density using weighting function modified differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 130703.
孙友文, 谢品华, 徐晋, 等. 采用加权函数修正的差分光学吸收光谱反演环境大气中的 CO₂ 垂直柱浓度[J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 130703.
- [14] 廖国男. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 1985.
- [15] Mlawer E J, Clough S A. On the extension of rapid radiative transfer model to the shortwave region[C]. *Proc Sixth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting*, 1997: 223-226.
- [16] Mou Fusheng, Li Ang, Wu Fengcheng, *et al.* Retrieval of aerosol optical parameters based on ring effect observed by MAX-DOAS[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0701001.
牟福生, 李昂, 吴丰成, 等. 基于 MAX-DOAS 观测大气 Ring 效应的气溶胶光学参数反演[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0701001.
- [17] Yao Tong, Zhang Qiang. Study on land-surface albedo over different types of underlying surfaces in North China[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 089201.
姚彤, 张强. 我国北方不同类型下垫面地表反照率特征[J]. *物理学报*, 2014, 63(8): 089201.