

应用 EOS-MODIS 卫星资料反演西北 干旱绿洲的地表反照率

张杰¹ 张强¹ 郭锐¹ 王建²

1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘 要 地表反照率是一个广泛应用于地表能量平衡、中长期天气预测和全球变化研究的重要参数, 作者应用 EOS-MODIS 卫星数据和目前发展的推算反照率比较完善的一种二向反射(BRDF)模型 Ross Thick-Li Sparse R 核算法(AMBRALS 算法), 对西北干旱绿洲区非均匀分布的地表反照率进行反演与分析, 结果表明, 应用该方法反演的地表参数与实际观测值基本接近。敦煌戈壁站的反演值与观测值的春、夏、秋季绝对误差最大为 0.019, 冬季为 0.051, 黑河绿洲实验站的反演值较观测值低 0.019; 绿洲、绿洲-沙漠交界地带、戈壁和沙漠等反照率差别明显, 并划分了区域内阶梯状反照率的变化值; 另外, 植被区四季反照率差异较大, 夏季(8 月)最小, 冬(2 月)、春季(4 月)最大, 与植被指数呈负相关关系, 反照率的变化也充分体现了地表类型随气候变化的特性。

关键词 地表反照率 EOS-MODIS 卫星 反演 西北干旱绿洲 非均匀地表

文章编号 1006-9895(2005)04-0510-08

中图分类号 P412

文献标识码 A

Retrieval of the Land Surface Albedo over Arid Oasis of Northwest China from EOS-MODIS Data

ZHANG Jie¹, ZHANG Qiang¹, GUO Ni¹, and WANG Jian²

1 Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract Surface albedo is widely used in energy balance of the earth's surface, weather forecast and global change research. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is a perfect method of calculating albedo. The AMBRALS algorithm is adopted for calculating albedo from MODIS. The surface albedo is gained by using this method and albedos in different seasons are analyzed. The result shows that the retrieval albedos are basically close to the observed value, the maximal absolute errors are 0.019 in spring, summer and autumn, and 0.051 in winter at Dunhuang Gobi station, 0.019 at Heihe oasis station. The spatial difference of albedo is distinct because of the different earth surface characters such as soil, vegetation, desert, water system and different vegetation structure. Compared with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), there is opposite trend, albedo differs greatly in different seasons, it is the lowest in summer (August) and highest in winter (February) and spring (April). The variation of albedo shows that surface types vary with climate.

Key words albedo of the earth's surface, EOS-MODIS, retrieval arid oasis in Northwest China, asymmetry surface

1 引言

地表反照率 (Albedo) 表征地球表面对太阳辐射的反射能力, 是一个广泛应用于地表能量平衡、中长期天气预测和全球变化研究的重要参数^[1]。准确测定地表反照率是研究地表能量和水分平衡中的一项重要工作, 具有十分重要的意义。近年来, 随着遥感对地观测和信息处理技术的迅速发展, 利用遥感技术反演地表反照率已被证明是一种行之有效的科学方法。过去, 只有单一角度的遥感数据, 从这些数据中反演反照率, 常常假定地表为朗伯反射, Kimes 等的研究^[2]认为这种假设会引起高达 45% 的误差。考虑二向反射函数 (BRDF)^[3]是目前发展的比较完善的一种推算反照率的方法, 根据反照率的定义, 二向反射函数对于观测方向在半球空间的积分就得到了方向一半球反照率, 即深空反照率, 深空反照率是太阳天顶角的函数, 在光线入射方向的半球空间积分得到白空反照率, 自然条件下描述地表的真实反照率需要对这两种反照率进行组合。

西北干旱绿洲区下垫面边界条件复杂, 有沙漠、戈壁、绿洲、高山等类型, 而绿洲作为干旱背景基质上的异质, 地表植被形态、温度、湿度、粗糙度等性质在空间上有系统性不均匀分布, 它们能够在较小尺度上引起大气的响应和影响大气的运动, 形成一些特殊的气候特征^[4]。因此, 准确获取地表反照率参数, 为研究这种特殊气候和能量输送以及发展区域气候模式提供一定的参考依据。在西北干旱区复杂边界条件下, 对于点的地表状况观测研究较多^[5, 6], 但对这种复杂的面的地表特征研究较少, 并且大多是针对较小区域的研究^[7, 8], 在较大的空间尺度上缺乏可比性和特征分析, 对绿洲-沙漠过渡带的分析比较少, 特别对敦煌绿洲、张掖绿洲这种特殊背景下的异质及其过渡带的特征研究较少。本文发挥遥感技术对面上信息获取的优势, 针对干旱区植被稀少的特点, 结合 MODIS 算法, 最终以 EOS-MODIS 1 km×1 km 像元为单位, 建立了复杂地形条件下的地表反照率反演模型, 同时利用该模型对区域地表反照率进行了精确的反演, 并且根据植被覆盖的情况划分了绿洲、绿洲-沙漠、戈壁-沙漠等不同地表状况的反照率分布。许多环流模式中通常应用可见光波段 (0.4~0.7 μm)、近

红外波段反照率 (0.7~3.0 μm), 而在研究表面能量平衡时需要总反照率 (0.25~5.0 μm), 本研究主要针对干旱区能量输送研究进行的部分工作, 所以最终取得的反照率为总反照率。

2 研究区域概况和数据处理

西北干旱敏感区的复杂下垫面具有空间上的系统性不均匀分布的特征, 本文选取该典型区域 [如图 1 (见文后彩图) 所示] 进行地表反照率的反演, 区域包括 400×300 个像元, 以 1 km×1 km 像元为单位, 范围为 (38.5~41.9°N, 93~101°E), 包括了高山、绿洲、戈壁、沙漠等复杂结构, 其中, 重点分析的敦煌和黑河绿洲、戈壁实验站分别位于 (40.17°N, 94.52°E)、(40.133°N, 94.783°E)、(39.15°N, 100.17°E)、(39.15°N, 100.10°E), PAM 站 [便携式自动中尺度观测站网 (Portable Automated Mesonet)] 位于 (40°09'N, 94°41'E), 研究区代表了干旱敏感区的农业-生态一体的复杂下垫面。

本文所使用的资料主要包括: (1) 遥感资料的大气订正输入参数采用 MODIS 3A 文件数据, 包括太阳天顶角、方位角、卫星天顶角、方位角、地理经纬度以及地形高度等资料, 分辨率为 1 km, 数据来源于中国气象局兰州干旱气象研究所遥感中心。(2) MODIS 资料的处理过程中需要一些能见度资料, 主要采用敦煌、安西、张掖的当日观测资料, 来源于甘肃省气象局兰州中心气象台。(3) 分析资料为 MODIS HDF 格式数据, 分辨率为 1 km, 夏季资料选用 2002 年 8 月 14 日的过境数据, 四季代表月份为 2002 年 4 月 26 日 12 时、8 月 14 日 12 时、11 月 2 日 12 时、2003 年 2 月 22 日 12 时的过境数据。

数据处理过程中, 应用 ENVI 软件进行地理定位、通道反射率的转换和区域数据的存取, 应用 6S 辐射传输模型进行大气订正、BRDF 模型^[3]的参数计算, 用添加的模块进行地表反照率的计算。

3 MBRALS 算法与原理

3.1 核驱动模型及反演

自然的下垫面大多是不均匀的, 粗糙度也各自不同, 没有严格意义上的朗伯体 (Lambertian), 卫星观测的波段反射率与观测的角度密切相关^[9, 10]。

植被体更是一个动态变化的过程,其反射特性和植物的生长发育、植物本身的颜色以及植物种类有关。因此,有必要建立相应的动态的双向反射模型。双向反射分布函数描述了从半球一个方向进入另一个方向的散射光特性,定义^[11]为

$$f(z, \phi, \theta, \phi') = \frac{dL(\theta, \phi)}{dE(z, \phi')}, \quad (1)$$

其中, $L(\theta, \phi)$ 为反射方向的辐射率, $E(z, \phi')$ 为入射辐照度, z 为入射角, $\phi' = 0$ 为相对于太阳的入射方位角, θ, ϕ 为太阳方位角和相对天顶角。MODIS BRDF/Albedo 算法充分应用核驱动模型,线性 BRDF 模型依赖于等方向性参数和两个核的比重数^[9]:

$$R(\theta, \nu, \phi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta, \nu, \phi, \lambda) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta, \nu, \phi, \lambda), \quad (2)$$

式中, θ, ν, ϕ 为太阳方位角、观测方位角和相对天顶角, R 为二向反射函数, $K_{\text{vol}}(\theta, \nu, \phi, \lambda)$ 核来源于体散射辐射传输模式^[12], $K_{\text{geo}}(\theta, \nu, \phi, \lambda)$ 核来源于表面散射和几何阴影理论^[13], $f_{\text{geo}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{iso}}$ 为各项核系数,通过最小二乘法反演得到,经过上式反演出核系数之后,可以通过核的外推求出任意太阳入射角和观测角条件下的二向反射, Roujean 等^[9]对 8 种地表类型的可见光和近红外波段的核系数进行了反演,本文以 Roujean 反演的核系数为基础,对 8 种地表类型的 Ross Thick-Li Sparse-Reciprocal 核系数进行反演,作为本研究的输入参数值,并对该地区地物进行了简单分类,根据分类结果应用上述参数。研究表明, Ross Thick-Li Sparse-Reciprocal 核组合是目前最适合于 MODIS BRDF/Albedo 的算法^[14]。

3.2 基于 BRDF 模型的反照率计算

反照率与双向反射函数存在一定的积分关系,根据反照率的定义,方向-半球(深空)反照率和双半球(白空)反照率在数学上等于 BRDF 核驱动模型中核的方向-半球空间积分和双半球空间积分的线性组合,则每一个核的积分定义为

$$h_k(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} K_K(\theta, \nu, \phi) \sin \nu \cos \nu \, d\nu d\phi, \quad (3)$$

$$H_k = 2 \int_0^{\pi/2} h_k(\theta) \sin \theta \cos \theta \, d\theta, \quad (4)$$

式中, $h_k(\theta), H_k$ 分别为方向-半球(深空)反照率和双半球(白空)反照率积分, $K_K(\theta, \nu, \phi)$ 为核值。

通过上式得到的方向-半球反照率和双半球反

照率分别为

$$\alpha_{\text{bs}}(\theta, \lambda) = \sum_k f_k(\lambda) h_k(\theta), \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{ws}}(\lambda) = \sum_k f_k(\lambda) H_k, \quad (6)$$

其中, $\alpha_{\text{bs}}(\theta, \lambda), \alpha_{\text{ws}}(\lambda)$ 分别为方向-半球反照率和双半球反照率, $f_k(\lambda)$ 为核系数。基于公式(5)、(6),通过积分计算反照率,对于一个完整的数据处理系统来说速度太慢,MODIS 目前的 AMBRALS 算法中应用多项式来拟合核的积分,拟合效果较好,核积分的多项式拟合表达式的形式^[15]为

$$h_k(\theta) = g_0 K + g_1 K\theta^2 + g_2 K\theta^3, \quad (7)$$

其中, θ 为太阳方位角(此处单位为弧度),AMBRALS 运算中所用的各个核的多项式拟合表达式的系数^[16]如表 1 所示。

表 1 方程(7)中的各项系数

Table 1 Coefficients in Eq. (7)

K 核系数 Coefficients for kernel K	等方向性 K 值 K is isotropic	罗斯厚核 K is Ross Thick	李系数互惠核 K is Li Sparse R
$g_0 K(1)$	1.0	-0.007574	-1.284909
$g_1 K(\theta^2)$	0.0	-0.070987	-0.166314
$g_2 K(\theta^3)$	0.0	0.307588	0.041840
白空反照率	1.0	0.189184	-1.377622
White-sky albedo			

自然条件下描述地表的真实反照率需要对方向-半球和双半球两种反照率进行组合。表达式^[17]为

$$\alpha(\theta, \lambda) = \{1 - S[\theta, \tau(\lambda)]\} \alpha_{\text{bs}}(\theta, \lambda) + S[\theta, \tau(\lambda)] \alpha_{\text{ws}}(\theta, \lambda), \quad (8)$$

$\alpha(\theta, \lambda)$ 为地表真实反照率, S 为散射光所占的百分比。由此,各个通道的反照率参数即可得到。

3.3 宽波段反照率的提取

传感器波段一般较窄,要得到宽波段反照率必须进行变换,首先对其进行波段内插和外延,然后根据反照率的定义,进行公式变换。在 AMBRALS 算法中,将上述两步合并,变换公式为

$$A(\theta) = \sum C_i \alpha(\theta, \lambda_i), \quad (9)$$

C_i 为变化因子系数, Liang 等^[18]针对 MODIS 算法求出 3 个常用宽波段(可见光 0.3~0.7 μm 、近红外 0.7~3.0 μm 、总波段 0.3~5.0 μm)的计算系数,由此根据需要,可以计算出所需的宽波段反照率,计算系数如表 2。

表2 MODIS窄波段和宽波段转换的系数

Table 2 Weights of converting surface MODIS narrow band albedo to broadband albedo

MODIS 通道 MODIS band	波段范围 Wavelength/nm	可见光 Visible light	近红外(1) Near-IR(1)	近红外(2) Near-IR(2)	短波波段 Short-wave
1	620~670	0.3265	/	/	0.3973
2	841~876	/	0.5447	0.5271	0.2382
3	459~479	0.4364	/	/	0.3489
4	545~565	0.2366	/	/	-0.2655
5	1230~1250	/	0.1363	0.1795	0.1604
6	1628~1652	/	0.0469	/	-0.0138
7	2105~2155	/	0.2536	0.2755	0.0682
常数 Constant	/	-0.0019	-0.0068	-0.0071	0.0036

通过上述步骤的运算,即可得到所需的反照率的值。

4 结果分析

4.1 夏季地表反照率的分布

地表反照率反应了地表的物理特征,包括地表颜色,湿度以及粗糙度等,地理类型和气候特征是造成地表物理特征分布不均的主要原因,从而成为影响各个区域反照率年际变化的两个重要因素^[9]。西北干旱绿洲区地理类型在区域尺度上空间变化多样,气候特征的年际和年代际变化复杂,所以造成地表反照率的变化较为复杂。

本文应用上述模型对2002年夏季(8月14日)干旱绿洲区反照率进行了反演,图2(见文后彩图)给出了区域内的归一化植被指数和地表反照率空间分布,区域内归一化植被指数 I_{NDV} 变化范围为-0.7000到0.7841,反照率变化范围较大,从0.10到0.31以上,与 I_{NDV} 相对应的植被区反照率在0.10~0.21之间,并具有显著的层次分布,植被指数较高的绿洲地区,反照率为0.10~0.16,植被指数略低的绿洲-沙漠的交界地带,反照率为0.16~0.21,根据分布的层次,分为0.16~0.19、0.19~0.21两个部分,戈壁、沙漠地区的反照率在0.21~0.31之间,靠近植被区的为0.21~0.24,远离植被的区域为0.24~0.31。我们认为反照率有层次的原因是:卫星获取的一个像素点的信息是1000 m×1000 m范围内的平均信息,绿洲-沙漠的交界地带,有两个层次存在,主要受绿洲区植被的影响,靠近绿洲的区域植被相对较多,并且下垫面相对湿

润一些;对于戈壁、沙漠地区,一方面,靠近植被区有稀疏的植被存在,另外,下垫面也相对湿润;水体反照率小于0.10,积雪反照率大于0.31,积雪周围区由于积雪融化,土壤湿度增大,反照率相对降低。

反照率的空间变化不仅体现在绿洲与沙漠、戈壁的不同异质上,对于同一类基质,反照率的差异也比较大,如区域内的敦煌绿洲区,反照率间于0.1~0.16之间的范围具有零星分布的特征,其间有0.16~0.19的反照率过渡带,并且反照率在0.19~0.21范围的过渡带较大;而黑河实验区的绿洲则不同,绿洲区域内大部分反照率间于0.1~0.16,并且连续性比较好,0.16~0.19、0.19~0.21范围的反照率过渡带较小,从图2a可看出,归一化植被指数的分布与反照率分布具有一致性;除了种植作物有差异外,一个可能的原因是黑河绿洲区的灌溉较好,土壤较敦煌湿润;另一方面说明区域内的气候有东西差异,东部的气候较湿润。

由此表明,反照率的不同在一定程度上也反应了地表综合的特性。遥感技术的应用使人们对地理环境自然综合体特性有了集中了解,这为我们将来在气候模式中引入陆表特征的同化过程、地表能量收支等提供了依据。

4.2 地表反照率的季节变化

气候差异是造成地表覆盖类型分布不均的一个重要原因,随着季节不同,地表覆盖类型差异很大,反照率也随之发生显著变化。图3给出了敦煌绿洲区和黑河绿洲区内一个10×10个像素点的四

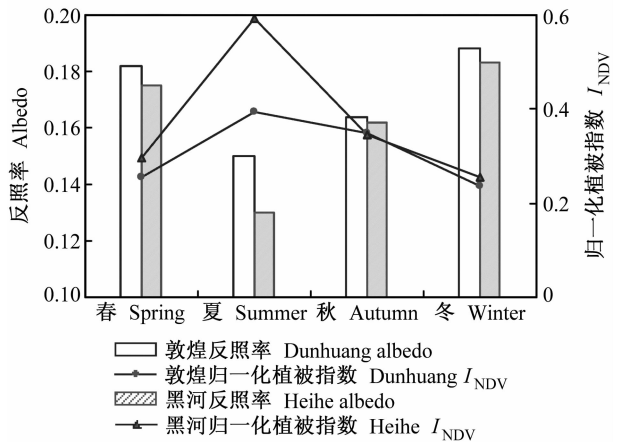


图3 绿洲区地表反照率 R 与 I_{NDV} 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of surface albedo and I_{NDV} in the oasis region

个季节的反照率和植被变化值,结果表明,2002 年敦煌、黑河绿洲植被平均地表反照率都大于 0.15、0.13,同时也呈现出明显的季节特征,夏季最小,分别为 0.15、0.13,秋季有所增加,为 0.164、0.162,春季次之,为 0.182、0.175,冬季最大,为 0.188、0.183。反照率的季节变化与下垫面地表覆盖类型、土壤湿度等的季节变化紧密相关,夏季有明显的植被覆盖信息,并且植被覆盖区较高的地区,土壤相对湿润,而秋季随着气候变冷,植被开始衰老,覆盖度减小,反照率随之增加,而冬、春季植被覆盖最差,地表反照率达到最大;另外,敦煌绿洲的四季反照率都略高于黑河绿洲。

从图 3 可以看到,植被指数 I_{NDV} 反应了植被覆盖类型,地表覆盖类型的季节变化直接导致了地表反照率的季节差异,地表植被覆盖率高,反照率相对较低。夏季,敦煌、黑河绿洲区植被覆盖率最大, I_{NDV} 值达到 0.394、0.592,反照率达到了最小;随着秋季的到来,气温开始下降,植被开始变老, I_{NDV} 值下降到 0.349、0.346,反照率逐渐增加,冬季和春季,区域内 I_{NDV} 小于 0.3,地表类型以裸地和极少植被为主,因此反照率较大;另外,除了秋季以外,敦煌绿洲站的归一化植被指数都小于黑河绿洲区。

4.3 地表反照率与 I_{NDV} 的关系

图 3 表明,地表反照率与植被指数 I_{NDV} 变化具有负相关关系,本文选取了敦煌绿洲区 53 个点的数据建立了西北地表反照率 R 与 I_{NDV} 的负指数关系为

$$R = 0.1126(I_{NDV} + 0.2)^{-0.6213},$$

其中, $R^2 = 0.836$, 样本数 $n = 53$ 。

将反演的地表反照率和植被指数 I_{NDV} 计算值建立了一个关系(如图 4 所示),方程通过 95% 的置信度,表明区域地表反照率与植被指数的变化具有显著的负相关关系。文献[19]表明,北半球 I_{NDV} 与气温变化具有很好的相关性的结论,区域内地表反照率与 I_{NDV} 的负指数关系也说明了区域内地表反照率与区域气候的季节变化和年际、年代际变化具有很好的一致性。这也为我们下一步分析地表能量收支及其预测研究打下了基础。

4.4 结果检验

应用上述方法对于干旱绿洲区的不同地物进行反

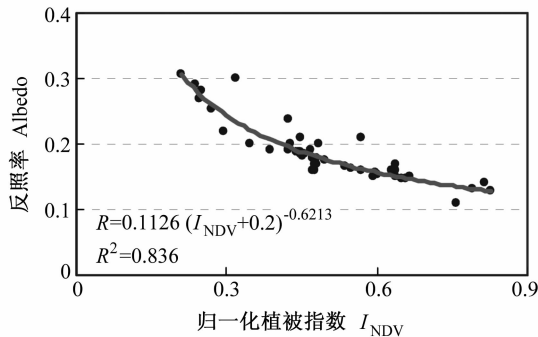


图 4 绿洲区地表反照率随 I_{NDV} 的变化关系

Fig. 4 Relation between I_{NDV} and albedo in the oasis region

演,得出表 3 所示的结果:MODIS 反演的绿洲、绿洲-沙漠、戈壁沙漠的四个季节的反照率与站点的观测值相比,黑河实验区的反照率与 1990 年夏季(8 月)黑河实验所得的结果^[5~8,20]都处于同一量级,但略低一点,绝对误差为 0.019;与 2000 年敦煌戈壁站春、夏、秋、冬四季的观测值^[5]比较接近,绝对误差分别为 0.019、0.013、0.002、0.051,春、夏、秋季的误差较小,冬季较高,说明对戈壁的反演结果是比较准确的;与 TM (thematic map, 即由陆地卫星上搭载的专题制图仪获得的资料)反演的一些结果相比,数值很接近,但 MODIS 反演值略大,夏季,黑河绿洲、戈壁的绝对误差为 0.02、0.016,敦煌绿洲、戈壁的绝对误差为 0.01、0.01,说明不同卫星的反演结果十分接近;深秋,黑河绿洲、戈壁的绝对误差为 0.05、0.055,误差较大。上述结果可以说明三个问题,首先,MODIS 反演的地表反照率是有效的,敦煌戈壁、绿洲的反照率较黑河戈壁、绿洲的反照率反演结果略高,并且戈壁的四季反照率都比较稳定,最大振幅为 0.036;其次,戈壁的反照率说明敦煌的气候较黑河地区干燥,由于没有关于绿洲种植作物的详细资料,所以还不能完全从绿洲反照率上来分析气候情况;最后,从绿洲、戈壁反照率上看,绿洲内反照率的范围较宽,而观测值仅为一点,最大相对误差达到 ± 0.035 ,戈壁反照率的波动也很大,临近植被的地方反照率较小,远离植被的地方反照率较大,与观测值的最大绝对误差为 ± 0.056 ,所以,对于非均匀的复杂下垫面,点上的信息不能很好地反映区域状况,遥感技术的应用为生态环境的空间分析提供了有利的条件。

表 3 区域地表反照率的反演值与部分观测值
Table 3 Calculated and observed value of albedo in the oasis area

地表类型 Type of the earth's surface	绿洲 Oasis	绿洲-沙漠交界 Oasis - desert interface	戈壁沙漠 Gobi and desert	范围 Range
MODIS 春季 MODIS spring (2002-04-26) 敦煌、黑河实验站 Dunhuang, Heihe station	0.147~0.18 0.182, 0.175	0.18~0.21	0.21~0.299 0.249, 0.238	0.147~0.299
MODIS 夏季 MODIS summer (2002-08-14) 敦煌、黑河实验站 Dunhuang, Heihe station	0.10~0.16 0.15, 0.13	0.16~0.21	0.21~0.3124 0.24, 0.23	0.1~0.31 0.1~0.31
MODIS 秋季 MODIS autumn (2002-11-02) 敦煌、黑河实验站 Dunhuang, Heihe station	0.143~0.18 0.164, 0.162	0.18~0.205	0.205~0.301 0.268, 0.249	0.143~0.301
MODIS 冬季 MODIS winter (2003-02-22) 敦煌、黑河实验站 Dunhuang, Heihe station	0.169~0.19 0.188, 0.183	0.19~0.21	0.21~0.31 0.285, 0.281	0.18~0.31
敦煌实验区 TM Dunhuang station TM (2000-08-22) [7]	0.14	—	0.23	0.08~0.36
黑河实验站 TM Heihe station TM (1991-07-09) [8]	0.11	0.14~0.18	0.246	0.04~0.3
黑河实验区 TM Heihe station TM (1991-10-29) [20]	0.09~0.161	0.17~0.24	0.26~0.36	0.09~0.36
与卫星对应的敦煌四季观测值 Observation value of Dunhuang (2002-04-26, 08-14, 11-02, 01-22)	—	—	0.268, 0.253, 0.27, 0.234	
敦煌观测值 Observation value of Dunhuang (2000-05-25~06-17) [8]	—	—	0.254	0.255±0.021
黑河观测值 Observation value of Heihe (1990-08-15~30) [5]	0.149	—	0.228~0.246	0.228~0.246

5 结论

本文采用最新发射的对地观测卫星 EOS-MODIS, 并应用目前最先进的双向反射模型反演地表反照率的方法, 对西北干旱绿洲区四季地表反照率进行了反演。结果表明, 干旱绿洲区地表反照率的时空分布特征很好地表征了区域尺度上复杂的下垫面特性及其随季节的变化, 并与植被指数的变化具有显著的负相关关系; 反照率随季节的变化符合地球下垫面的特性, 冬、夏季的地表反照率有明显的差异, 反映出地表类型随气候的变化关系。

(1)土壤、植被、沙漠、水体等地表特性不同, 造成区域地表反照率存在区域空间格局的显著差异, 夏季, 区域内绿洲地区反照率为 0.10~0.16 绿洲-沙漠交界地带的反照率为 0.16~0.19 和 0.19~0.21, 戈壁、沙漠地区的反照率在 0.21~0.24 和 0.24~0.31 之间, 水体反照率小于 0.10, 积雪反照率大于 0.31。

(2)植被区反照率随植被指数不同表现出明显格局; 四季反照率差异较大, 2002 年敦煌、黑河绿洲植被平均地表反照率都大于 0.15、0.13, 同时也呈现出明显的季节特征, 夏季最小, 分别为 0.15、

0.13, 秋季有所增加, 为 0.164、0.162, 春季次之, 为 0.182、0.175, 冬季最大, 为 0.188、0.183。

(3)MODIS 反演结果与观测结果基本接近, 敦煌戈壁站的四季反演值与观测值的绝对误差分别为 0.019、0.013、0.002、0.051, 黑河绿洲实验站的反演值较观测值高为 0.02; 与 TM 相比, 黑河绿洲、戈壁的绝对误差为 0.02、0.016, 敦煌绿洲、戈壁的绝对误差为 0.01、0.01。

(4)绿洲、戈壁的反照率变化范围较宽, 对于非均匀的复杂下垫面, 点上的信息不能很好地反映区域状况, 遥感技术的应用为生态环境的空间分析提供了有利的条件。

西北绿洲地表反照率随下垫面地表覆盖类型等的变化而变化, 是时间的函数, 这为我们将来在区域气候模式中引入陆表特征的同化过程提供了坚实的基础, 也为下一步分析地表能量收支及其预测研究打下了基础。

参考文献 (References)

[1] Dickinson R E. Land processes in climate models. *Remote Sensing Environment*, 1995, **55**(1): 27~38
[2] Kimes D S, Seller P J. Inferring hemispherical reflectance of

- the Earth's surface for global energy budgets from remotely sensed nadir or directional radiance values. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **18**(2): 205~223
- [3] Hapke B W. Bidirectional reflectance spectroscopy—1. Theory. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 3039~3054
- [4] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应. 地球科学进展, 2002, **17** (4): 477~486
Zhang Qiang, Hu Yinqiao. The geographical features and climatic effects of oasis. *Advance in Earth Science* (in Chinese), 2002, **17** (4): 477~486
- [5] 邹基玲, 侯旭宏, 季国良. 黑河地区夏末太阳辐射特征的初步分析. 高原气象, 1992, **11** (4): 381~387
Zou Jiling, Hou Xuhong, Ji Guoliang. Preliminary study of solar radiation properties in HEIHE area in late summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1992, **11** (4): 381~387
- [6] Zhang Qiang, Cao Xiaoyan, Wei Guoan, et al. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (1): 121~135
- [7] Ma Yaoming, Wang Jiemin, Huang Ronghui et al. Remote sensing parameterization of land surface heat fluxes over Arid and semi-arid area. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (4): 530~539
- [8] 马耀明, 王介民, Massimo Menenti, 等. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量. 气象学报, 1999, **57**(2): 180~189
Ma Yaoming, Wang Jiemin, Massimo Menenti, et al. Estimation of flux densities over the heterogeneous land surface with the aid of satellite remote sensing and field observation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (2): 180~189
- [9] Roujean J L, LEROY M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 20455~20468
- [10] 徐兴奎, 林朝晖. 青藏高原地表月平均反照率的遥感反演. 高原气象, 2002, **21**(3): 233~237
Xu Xingkui, Lin Zhaohui. Remote sensing retrieval of surface monthly mean albedo in Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21** (3): 233~237
- [11] Walthall C L, Norman J M, Welles J M, et al. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surface. *Applied Optics*, 1985, **24** (3): 383~387
- [12] Ross J K. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Norwell. The Hague-Boston-London: Dr. W. Junk Publishers, 1981, 392
- [13] Li X, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1992, **30**: 276~292
- [14] Wanner W, Strahler A H, Hu B, et al. Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: Theory and algorithm. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 17143~17162
- [15] Lucht W, Hyman A H, Strahler A H, et al. A comparison of satellite-derived spectral albedos to ground-based broadband albedo measurements modeled to satellite spatial scale for a semi-desert landscape. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **74**: 85~98
- [16] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H. First operational BRDF albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens. of Environ.*, 2002, **83**: 135~148
- [17] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **38**: 977~998
- [18] Liang S L, Strahler A H, Walthall C. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study. *J. Appl. Meteor.*, 1999, **38**: 712~725
- [19] 龚道溢, 史培军, 何学兆. 北半球春季植被指数 NDVI 对温度变化响应的区域差异. 地理学报, 2002, **57**(5): 505~514
Gong Daoyi, Shi Peijun, He Xuezhao. Spatial features of the coupling between spring NDVI and temperature over Northern Hemisphere. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57**(5): 505~514
- [20] 马耀明, 王介民. 黑河实验区地表净辐射区域分布及季节变化. 大气科学, 1997, **21**(6): 743~749
Ma, Yaoming, Wang Jiemin. Distribution and season variation of regional net radiation in HEIHE area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1997, **21**(6): 743~749

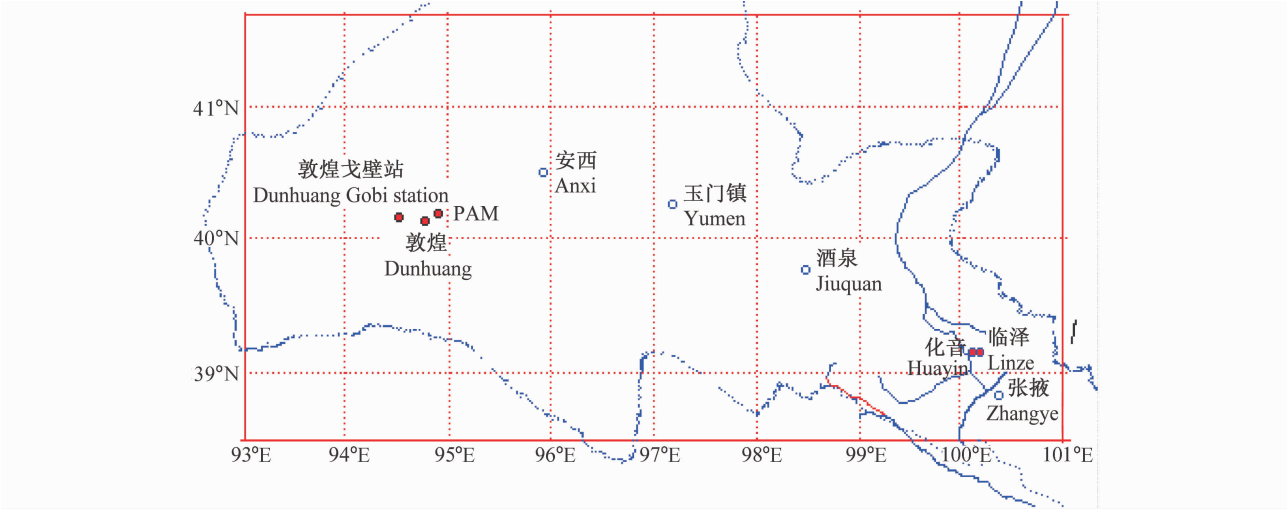


图 1 研究区域概况与站点分布。红色实心圈表示敦煌和黑河绿洲、戈壁 4 个实验站以及 PAM 站, 分别位于(40. 17°N, 94. 52°E)、(40. 133°N, 94. 783°E)、(39. 15°N, 100. 17°E)、(39. 15°N, 100. 10°E)、(40°09'N, 94°41'E)

Fig. 1 Distribution of stations and survey of areas. Red solid loops denote the oasis and Gobi stations of Dunhuang and Heihe and PAM station, and the locations are in (40. 17°N, 94. 52°E), (40. 133°N, 94. 783°E), (39. 15°N, 100. 17°E), (39. 15°N, 100. 10°E), (40°09'N, 94°41'E)

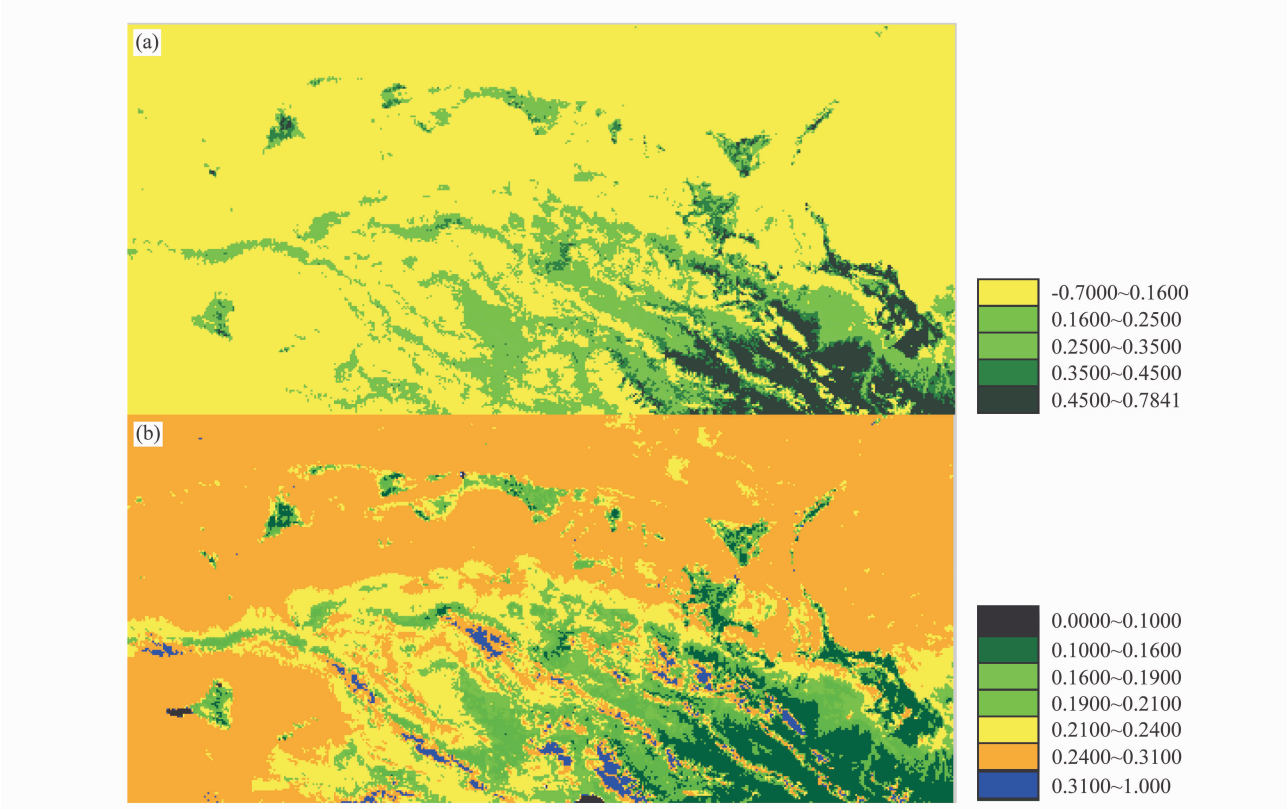


图 2 绿洲区夏季归一化植被指数 I_{NDV} (a)和地表反照率(b)空间分布

Fig. 2 Distribution of I_{NDV} (a) and surface albedo (b) in summer in the oasis area