

引用格式: 陆彦蓉, 刘强, 李霞, 等. 全球 250 m 反照率产品算法及验证[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 328-335. [ Lu Y R, Liu Q, Li X, et al. An algorithm for producing 250 m global albedo product and validation[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(2): 328-335. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190184

## 全球 250 m 反照率产品算法及验证

陆彦蓉<sup>1</sup>, 刘强<sup>1,2\*</sup>, 李霞<sup>1</sup>, 李秀红<sup>1,2</sup>, 刘璐<sup>1</sup>, 肖洒<sup>1</sup>, 孙美莹<sup>1</sup>

1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 2. 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

### An Algorithm for Producing 250 m Global Albedo Product and Validation

LU Yanrong<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1,2\*</sup>, LI Xia<sup>1</sup>, LI Xiuhong<sup>1,2</sup>, LIU Lu<sup>1</sup>, XIAO Sa<sup>1</sup>, SUN Meiyang<sup>1</sup>

1. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Albedo is an important parameter in surface energy balance, and it is also used in the research of global change and weather prediction. In recent years, due to the abnormal weather changes and the increase of extreme weather, there emerged a great demand for high-quality observation data in environmental and climate research. To better understand albedo, researchers have been constantly updating albedo products. The purpose of this paper is to develop a 250 m albedo product based on the 1 km resolution Global Land Surface Satellite (GLASS) albedo product. Compared with GLASS 1km albedo product, our product has higher resolution and precision. The main idea is to use the texture information from the 250 m band data of Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) to scale down the 1km resolution GLASS albedo. There are three steps for the algorithm: simple direct inversion, simple combination of primary products, and downscaling fusion algorithm. Followingly, the 250 m albedo product was validated by comparing to the ground data from 30 sites in North America. It is found that the 250 m albedo product data is closer to the ground measurements. The accuracy of GLASS 1km product is 0.0257, while that of the 250 m product is 0.0235. Finally, an application of the product was demonstrated through analyzing the inter-annual albedo change trend of Beijing based on the 250m albedo product from 2003 to 2013. The results show that the urbanization of Beijing decreased the average albedo rather than increased, and that albedo changes caused by natural processes or changes in planting patterns and varieties were more significant than those caused by urbanization. Besides, the result shows that the 250 m albedo product is not only with better visual presentation and clearer texture, but also capable to reveal the spatial details of albedo changes.

**Key words:** surface albedo; GLASS; MODIS; algorithm; validation; resolution; spatial details

\*Corresponding author: LIU Qiang, E-mail: toliuqiang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-10-28.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600102); 水专项(2018ZX07111002)。 [ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFA0600102; Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment, No.2018ZX07111002. ]

作者简介: 陆彦蓉(1995—), 女, 甘肃兰州人, 硕士生, 从事地表反照率产品验证研究。E-mail: 201821490035@mail.bnu.edu.cn

\*通讯作者: 刘强(1974—), 男, 云南昆明人, 副教授, 博导, 从事多角度遥感模型和反演研究。E-mail: toliuqiang@bnu.edu.cn

**摘要:**反照率是反映地表能量平衡的重要参数之一,也被运用于全球变化与天气预测研究中。为了更好地获取反照率产品,学者们在不断地更新反照率产品和提出新算法。本文主要是在1 km分辨率的全球陆表特征参量(GLASS)反照率产品基础上进一步开发250 m反照率产品。算法思路是利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)传感器的250 m分辨率波段提供纹理信息,利用成熟的GLASS 1 km反照率产品提供均值信息,进行数据融合,实现GLASS 1 km反照率产品的降尺度。相比于GLASS 1 km反照率产品,250 m产品首先展现出更为丰富的空间细节信息,并且在与地面站点观测数据(北美地区站点数据)直接对比中显示出稍高的验证精度,GLASS 1 km产品的验证精度为0.0257,而250 m产品验证精度0.0235。最后,以北京市为例,基于2003—2013年的产品分析了北京市周边反照率及其变化趋势的空间分布,可以看到250 m反照率产品视觉效果更好,相比于1 km产品能够揭示反照率变化趋势的更多空间细节信息。分析表明,在北京城市化进程中,由于加大了城市绿化,主城区反照率总体呈降低趋势。

**关键词:**地表反照率;GLASS;MODIS;算法;验证;分辨率;空间细节

## 1 引言

地表反照率(Albedo)为太阳辐射短波波段在半球空间的所有地表反射辐射与所有入射能量之比<sup>[1]</sup>,反映了陆地表面面对太阳辐射的反射能力。地表反照率对于地表能量平衡和全球气候变化具有重要的影响<sup>[2]</sup>,地表反照率的升高和降低都会反馈给气候系统,改变局地或全球的气候模式。随着城市化进程的加快,在对植被覆盖度、城市化的研究中,都需要利用地表反照率作为指标因子或驱动因素。同时,它也是陆面过程模式和地球系统建模所需的输入参数之一<sup>[3-5]</sup>。

近年来,由于天气变化异常,极端天气增多,使得在环境与气候研究中对于高质量的观测数据提出了极大的需求<sup>[6]</sup>。所以地表反照率产品在近些年取得了较为广泛的应用。目前可以获得的地表反照率有MODIS全球地表反照率产品MCD43、欧洲全球地表反照率产品GlobAlbedo<sup>[7]</sup>,以及北京师范大学开发的GLASS反照率产品等。其中,使用最广泛的反照率数据是美国公开发布的MODIS地表反照率产品MCD43,最新版产品每天反演一次,是准实时业务化产品,分辨率为500 m,该产品已经被广泛应用在数值天气预报模式等过程中。但是由于云覆盖、气溶胶、降雪等因素的影响,一些产品仍然存在着时空分辨率不能满足应用需求和数据缺失等问题。为了解决相关问题、使地表反照率产品满足更高的需求,许多研究学者及团队正在利用不同的算法开发或改进一系列地表参数产品<sup>[8-9]</sup>。

GLASS反照率产品是由北京师范大学发布的一套全球尺度时空连续的高质量反照率产品<sup>[10]</sup>,是目前国际上时间序列最长的全球地表反照率产品,发布的版本为1 km/5 km的空间分辨率。以往的主要反照率产品,如MODIS反照率<sup>[11-12]</sup>、MERIS反照

率<sup>[13]</sup>等都通常采用核驱动模型,而GLASS反照率产品的主要算法选择了不同的解决方案。GLASS反照率产品反演算法结合了直接反演算法和时空滤波算法,且不需要多角度数据的输入,产品适用于数据质量较差的时间和地区,如极地或多云地区<sup>[14-15]</sup>,其时空连续性较好且数据无缺失。但是随着一些局部区域研究的需要,1 km反照率产品不足以提供相应分辨率数据,所以本研究提出将GLASS反照率产品降尺度到250 m的算法,以满足研究对高分辨率数据的需求。

## 2 数据源和算法

为满足开发可用于业务化生产的250 m分辨率全球反照率生产算法,利用MODIS的250 m波段数据的纹理信息对经过验证成熟的1 km分辨率的GLASS反照率做降尺度处理,最终得到250 m分辨率反照率产品。

### 2.1 数据源

MODIS产品MOD/MYD09QA提供了空间分辨率为250 m、时间分辨率为8 d的大气校正后的红光波段(波段1: 0.62~0.76  $\mu\text{m}$ )和近红外波段(波段2: 0.75~2.5  $\mu\text{m}$ )的地表反射率。但是由于这2个波段未能覆盖短波红外波长范围,光谱覆盖不足,仅用2个波段反演地表短波反照率必然精度较低。基于这个考虑,本文仅用2个波段提供地表反照率的空间纹理信息。

GLASS 1 km反照率产品GLASS02A06是基于MODIS原始数据,首先采用AB(Angular Bin)算法对遥感数据进行反演,获得初级产品,然后采用STF(Statisticsbased Temporal Filtering)算法进一步加工处理得到最终产品<sup>[14,16]</sup>。AB算法是一种直接反演算法,直接从多波段的地表方向反射率或者大

气顶方向反射率中通过简单的线性公式计算出宽波段地表反照率。根据输入数据的不同,AB算法又分为AB1和AB2两个子算法<sup>[14]</sup>,其分别基于MODIS地表反射率和大气层顶反射率数据计算短波波段的黑空反射率和白空反射率,成为初级产品。遥感反演的地表参数产品都会受到云的影响而出现数据缺失现象,因此GLASS系统并不直接向用户发布初步产品(即AB算法的结果),而是使用基于统计知识的时间序列滤波STF算法对初级产品进行合成和滤波,同时填补空缺<sup>[17]</sup>,使其具有更好的连续性,得到完整产品发布给数据用户。基于地面观测资料的验证结果表明,GLASS反照率产品精度与广泛使用的MCD43产品相当,但是GLASS反照率产品具有时空连续无缺失的优点,因此总体质量更高,方便了数据用户的使用<sup>[18-19]</sup>。然而,1 km反照率分辨率不足以满足区域研究的需求,因此考虑使用GLASS 1 km反照率数据产品作为均值信息,结合上述纹理信息后降尺度成为250 m反照率产品。

为验证产品数据定量准确性,选择了北美地区2011—2013年30个站点的地面实测数据信息,这30个站点的数据是相对均匀且质量较好的。验证所用的地面数据点来自于FLUXNET通量网络下的美国通量网(AmeriFlux)以及覆盖全美的辐射观测网络SURFRAD(<https://fluxnet.fluxdata.org/>)。FLUXNET是一个以全世界广泛分布的通量塔为基础的全球通量观测网络,主要负责收集、保存和发布各通量数据。SURFRAD提供长期的覆盖地表的太阳辐射观测资料。

## 2.2 算法流程

简单来说,算法就是将MODIS两个250 m分辨率波段的纹理信息与GLASS 1 km反照率数据产品的均值信息进行定量的融合得到250 m反照率产品,包括简化直接反演算法、初级产品的简单合并和降尺度融合算法3个主要步骤,具体流程如图1所示。

### 2.2.1 简化的直接反演算法

利用简化版的AB1算法对250 m分辨率的MOD/MYD09Q1产品进行初步处理,得到250 m分辨率反照率初级产品。简化版的AB1算法就是从MODIS的红光波段(波段1)和近红外波段(波段2)的地表二向反射率中估算宽波段反照率。因为250 m波段数少,且在1~2.5  $\mu\text{m}$ 波长范围内无数据,所以计算的反射率精度不高,再加上受云影响存在

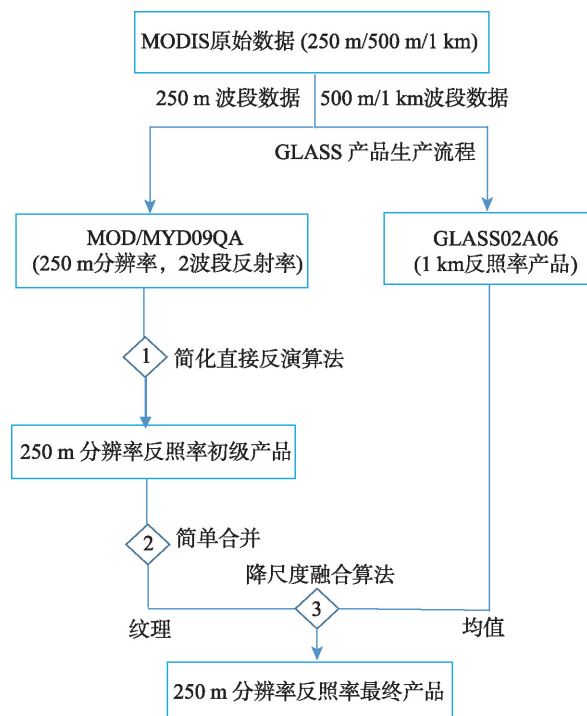


图1 生成250 m反照率产品流程

Fig. 1 Flowchart for generating the 250 m albedo product

较多缺失,在此仅把它作为初级产品。

### 2.2.2 初级产品的简单合并

为了减少受云影响而缺失的数据,对250 m反照率初级产品进行简单逻辑合并。由于GLASS 1 km反照率产品是时间周期为17 d( $\pm 8$  d)的滤波结果,而MOD/MYD09Q1产品和250 m反照率初级产品的时间周期为8 d,而且Terra和Aqua2颗卫星同时提供MODIS数据,即1景GLASS 1 km反照率产品大约对应4景250 m反照率初级产品,因此将4景250 m反照率初级产品进行简单的逻辑合并,便于与1 km产品更好地融合。合并的具体过程为:①判断无效数据,如果该像元在MOD/MYD09A1的质量标志位中的标记为有云、部分有云或者可能有云,则该像元设置为无效数据;另外,如果250 m初级产品聚合为1 km均值后与GLASS 1 km反照率产品的差别大于一定阈值,则认为相关像元的初级产品无效;②平均,如果一个250 m像元可能在多于1景的初级产品中为有效值,则对全部有效值取算术平均。

### 2.2.3 降尺度融合算法

利用简单合并后的250 m反照率初级产品中的纹理信息与GLASS 1 km反照率产品的均值信息进行融合,得到最终的目标产品。适用于不同空间分辨率定量产品融合的算法有基于小波变换的算

法<sup>[20]</sup>、SFIM(基于亮度调节的平滑滤波)算法<sup>[21]</sup>以及最小二乘拟合<sup>[22]</sup>等。考虑到 250 m 和 1 km 反照率产品之间的尺度变换是一个空间采样过程,而已有的融合算法往往对像元空间响应函数缺少定量的描述和考虑,造成融合结果的过度锐化或过度平滑。因此提出基于像元空间响应的融合算法,公式推导如下:

设在 1 km 分辨率上,经过时空滤波的反照率产品值为  $X_i, i=1, \dots, m$ ; 在 250 m 分辨率上,反照率初级产品值为  $y_j, j=1, \dots, n$ 。也可以把 250 m 分辨率的反照率初级产品先聚合成为 1 km 分辨率反照率初级产品,其值为  $Y_i, i=1, \dots, m$ 。在聚合过程中,需要考虑像元的空间响应函数,因此聚合公式为:

$$Y_i = \sum_{\Omega_i} y_j w_{i,j} \quad (1)$$

式中:  $\Omega_i$  为低分辨率像元  $v_i$  的空间响应函数确定的一个邻域;  $w_{i,j}$  为高分辨率像元  $y_j$  在  $Y_i$  中占的权重,  $\sum_{\Omega_i} w_{i,j} = 1$ 。本文参考彭菁菁等<sup>[23]</sup>的研究,该文采用高斯椭圆函数来模拟反照率产品的空间响应函数,其空间响应函数如下:

$$f(\Delta x, \Delta y) = \exp\left(-\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

设降尺度融合结果的 250 m 分辨率反照率为  $z_j, j=1, \dots, n$ , 则期望它能够满足以下 2 个特性:

(1) 若聚合 250 m 分辨率反照率融合结果,那么聚合值尽可能接近 1 km 的时空滤波反照率,因此得到反映均值信息第一个方程为:

$$X_i - \sum_{k \in \Omega_i} w_{i,k} z_k = \varepsilon_1, \quad (i=1, \dots, m) \quad (3)$$

式中:  $\Omega_i$  为第  $i$  个 1 km 像元的空间响应范围确定的邻域。

(2) 250 m 分辨率融合结果的纹理尽量接近 250 m 分辨率初级产品的纹理,因此得到反映纹理信息的第二个方程为:

$$\left(y_j - \sum_{k \in \Omega_i} w_{i,k} y_k\right) - \left(y_j - \sum_{k \in \Omega_i} w_{i,k} z_k\right) = \varepsilon_2, \quad (4)$$

$$i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$$

严格意义上讲,求解这 2 组方程,需要构造代价函数,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  为不确定因素,用迭代优化方法使得  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  极小化,估算最优的  $z_j (j=1, \dots, n)$ , 其计算量非常大。尤其是在低分辨率像元空间响应函数有重叠的情况下,每一个高分辨率像元都会关联到多个低分辨率像元,因此对每一个高分辨率像元

反照率的估算都需要考虑到邻域内多个低分辨率像元的综合影响,求解过程成为复杂的全局优化问题,在工程上难以实现。

本文采用一种简单直观的近似解法,对不同低分辨率像元的影响进行加权平均,如式(5)所示。

$$z_j = y_j + \frac{1}{\sum_{i \in \tilde{\Omega}_j} w_{i,j}^2} \sum_{i \in \tilde{\Omega}_j} w_{i,j}^2 (Y_i - X_i) \quad (5)$$

式中:  $\tilde{\Omega}_j$  为所有对第  $j$  个 250 m 像元有响应的 1 km 像元构成的邻域。

根据数值模拟试验的结果,这种简单直观解法获得的图像是迭代优化方法获得图像的很好的近似,同时也将计算量尽可能的缩小,更具有可行性,故使用式(5)计算生产全球 250 m 产品。

### 3 算法精度验证

本文选择了 2011—2013 年北美地区 30 个站点的地面实测数据用于算法结果的精度验证,这些地面数据点来自于 FLUXNET 通量网络下的美国通量网 (AmeriFlux) 以及覆盖全美的辐射观测网络 SURFRAD。因为通量观测站点的测量值通常仅能代表几米到一两百米的地面范围<sup>[24]</sup>,所以提高遥感产品空间分辨率有利于更好的进行地面观测数据与遥感产品之间的尺度匹配。通过对反照率产品数据和实测点数据进行匹配和比较,得到图 2 所示散点图。图 2(a) 是 250 m 反照率产品在北美站点的验证,图 2(b) 是 GLASS 1 km 反照率产品在北美站点的验证。从 2 幅散点图可看出,因为 250 m 反照率产品在分辨率上得到了很大的提高,所以它更接近于通量站点的实测数据。图 2(a) 的 RMSE 相对图 2(b) 的 0.0257 下降至 0.0235,表明 250 m 反照率产品的精度比 1 km 反照率产品稍高。其中精度得到改进与所选择通量网络的地面站点异质性程度有一定关系,对于相对均匀的站点,空间分辨率提高带来的精度提升不明显。值得一提的是,看到仅由 2 个波段提供纹理信息的 250 m 反照率产品在定量精度上能够达到与 7 个波段提供信息 1 km 反照率产品相当,这表明算法结果满足本文的设计预期。其次,本算法是运用 1 km 产品做融合处理,所以 2 种产品属于继承关系,精度改变不大,主要还是侧重于分辨率的提高。总体来说,250 m 反照率产品比 1 km 反照率产品更接近高分辨率研究需求,可以充分的运用到之后的研究中。

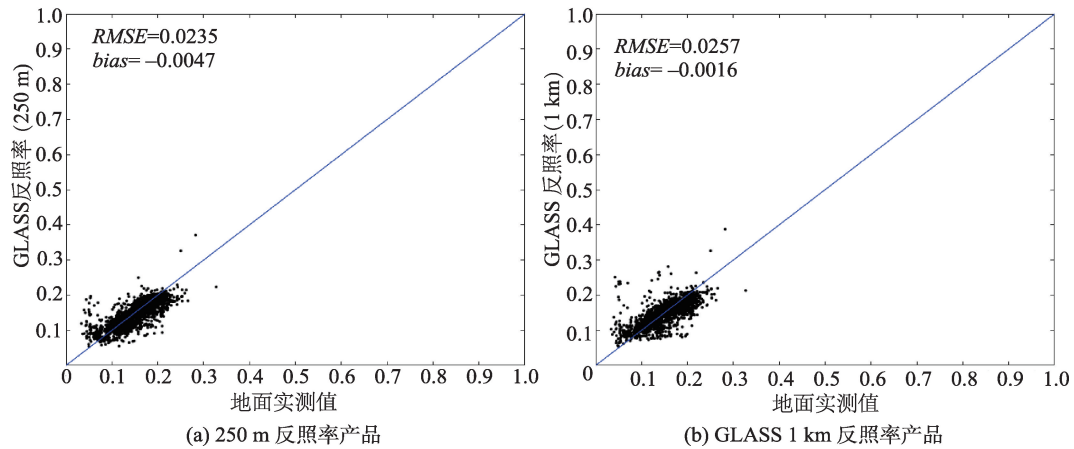


图2 250 m反照率产品和GLASS 1 km反照率产品验证散点图

Fig. 2 Scatter plots of product validation of 250 m albedo product and GLASS 1 km albedo product

#### 4 应用实例

随着中国经济的飞速发展,中国城市化的进程也越来越快,对城市地表反照率进行系统的研究在研究城市化进程中具有重要意义。本文以北京为例,利用提出的算法生产了2003—2013年每8 d的250 m反照率产品,用于分析北京城市化进程中地表反照率的年际变化趋势。

本文算法反演的250 m反照率产品同时拥有MODIS 250 m反照率初级产品的纹理和GLASS 1 km反照率产品的均值信息,所以新的反照率产品集2种产品的优点于一身,既有良好的连续性,又有高分辨率和高精度的保证。这种新产品的质量首先表现在视觉效果上。图3(a)显示的是2013年6月北京市周边的250 m分辨率晴空短波反照率月平

均结果;图3(b)则是从GLASS 1 km反照率产品中裁出的相同区域、相同时间的晴空短波反照率。图3(a)的左上部是坝上高原,下部是地表反照率较高的华北平原地区,在图中还有明显的低反照率区域,即水库、水域位置,而主城区则是在中部呈现淡蓝色的区域。相比之下,虽然图3(b)也可反映高低反照率区域,但是由于空间分辨率较低,水域与城区的形状都变得模糊。

为了说明北京周边地表覆盖状况及城市化进程,图4显示了中国国家地理信息中心生成的GlobalLand30产品中获取<sup>[25]</sup>的北京行政区2000年和2010年的土地覆盖图,该地图为30 m分辨率UTM投影。在研究区的中部主要是城市地表,多为人工地表,在北部和西部地区主要是高覆盖度林区,南部和东部是主要是农田耕地。2000—2010年,人工

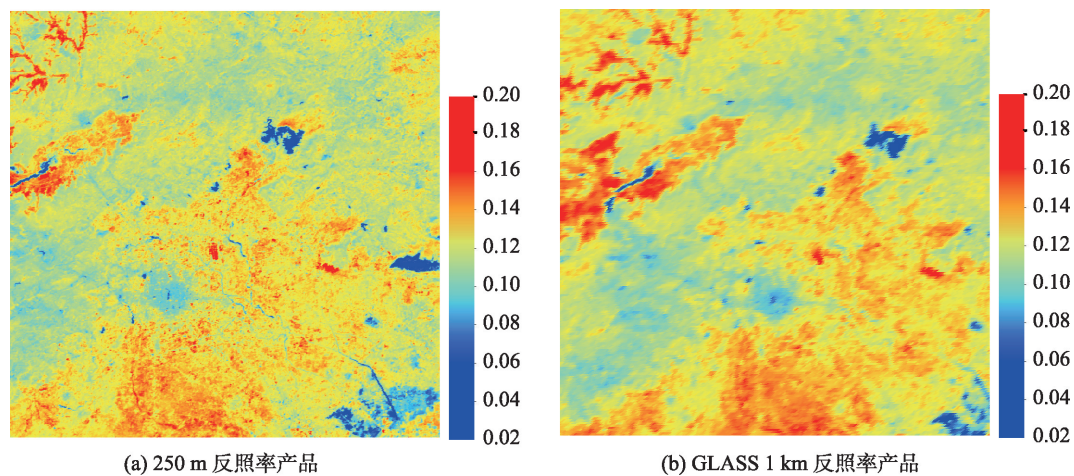


图3 2013年6月北京市及周边地表反照率分布

Fig. 3 Surface albedo maps of Beijing and surrounding areas in June 2013

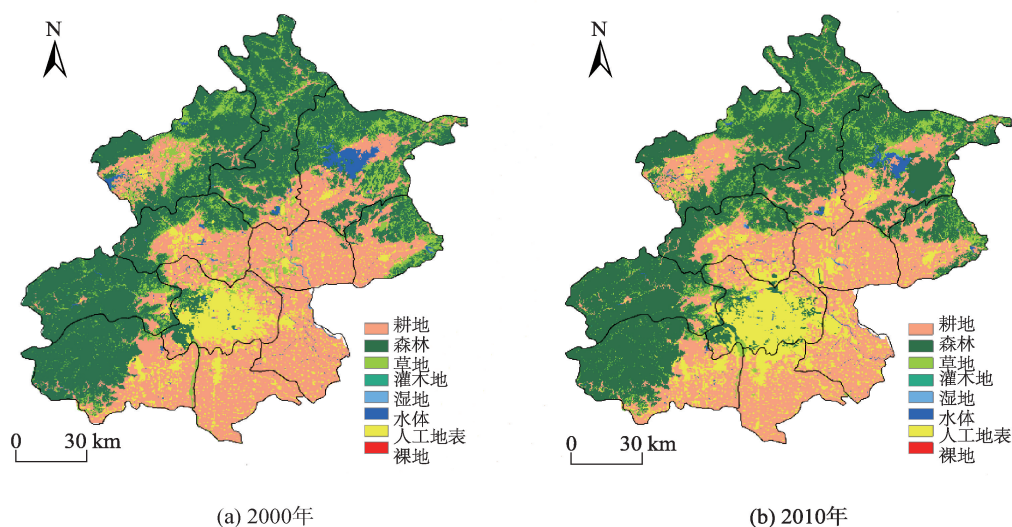


图4 北京市行政区划界线及土地覆盖

Fig. 4 Administrative division boundary and land cover maps of Beijing in 2000 and 2010

地表的覆盖面积有了很大的增长。

首先,在北京市划定3个典型区域:①主城区,即地图上的中心区域;②山地郊区,包括延庆、密云、怀柔、门头沟等区域;③平原郊区,包括顺义区、大兴区、通州区。其他地区不以任何单一地形为主,所以没有参与统计。基于1 km分辨率的GLASS反照率产品统计了上述3个典型区域的平均反照率在2003—2013年的变化趋势(即线性回归的斜率),如表1所示。因为人工地表的反照率通常高于自然植被,在城市化进程中,人工地表的占地面积在逐渐扩大,所以从理论上讲,在北京市城市化进程中反照率会随之增加。然而,统计得到了3个区域的平均晴空反照率变化趋势均为负值,即使在主要城市地区,反照率也呈下降趋势。

表1 北京地区平均晴空短波反照率的变化趋势

Tab. 1 Change trends of average clear sky short-wave albedo in different areas of Beijing

地区	2003—2013年GLASS反照率变化/年 <sup>-1</sup>
所有地区	-0.0003
主要城市	-0.0004
山地郊区	-0.0001
平原郊区	-0.0006

为了解释城市化进程中北京市地表反照率是下降的这一现象,长期使用的GLASS 1 km反照率产品由于空间分辨率较低而难以支持细节分析,不能针对这一现象展开分析。因此,使用250 m反照率产品来对这种变化做更为详细的空间分布分

析。图5是2003—2013年北京地区反照率变化趋势的空间分布图,分辨率为250 m。从图5可看出,在大部分土地覆盖类型为森林的山区,反照率呈温和的上升趋势;土地覆盖类型为耕地的区域反照率的变化趋势呈现多样化,这应该与北京市在经济发

展时期郊区种植品种的多样性相对应,不同的作物品种反照率的变化也不尽相同。图5中反照率明显下降的区域基本都是新增的水体。为了观光和保护生态系统,北京市有一些新建的湖泊或湿地。然而中心城区的大部分人工地表反照率却呈现下降的趋势,只有少数例外,如首都机场的大面积裸露混凝土跑道。经与其他高分辨率遥感图像对比分

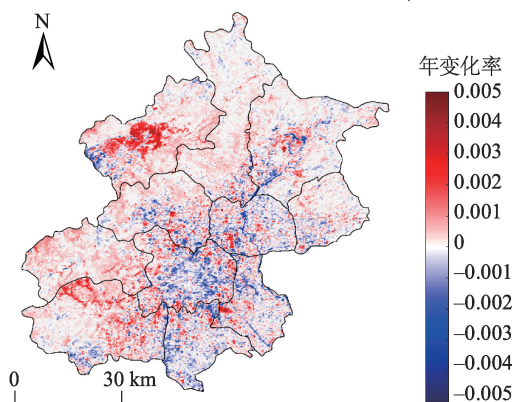


图5 2003—2013年北京市年均晴空短波反照率变化  
Fig. 5 Annual mean clear sky short-wave albedo variation map of Beijing from 2003 to 2013

析,认为人工地表反照率呈下降趋势的原因可能与城市绿化有关。随着城市化进程的加快,为了打造美丽宜居的城市,北京的绿化的需求也不断提高,尤其是2008年北京奥运会响亮地提出了“绿色奥运”口号,北京城市绿化的脚步也不断加快。因此,这些树木花草覆盖了很大一部分的人工地表,导致反照率呈现下降趋势。

上述分析结果表明:①城市化并不一定意味着地表反照率的上升,这与我们的理论预期恰恰相反,它实际上降低了北京市的平均反照率;②由于自然进程(如山区)或种植方式与品种(如农业区)的改变所导致的反照率的改变要比城市化所导致的改变更为显著。同时,250 m反照率产品在空间分析细节上的优势也在该应用中很好的体现,能更好的支持城市化的研究。

## 5 结论与展望

本文基于已有的MODIS 250 m反射率产品与GLASS 1 km反照率产品,提出一种新的算法流程,对GLASS 1 km反照率产品做了进一步的优化,得到250 m反照率最终产品,以满足区域研究及高分辨率的需求。算法同时提取250 m反照率初级产品的纹理信息和GLASS 1 km反照率产品的均值信息,对GLASS 1 km反照率产品进行降尺度融合,得到250 m反照率最终产品。主要结论如下:

(1)相比于GLASS 1 km反照率产品,新算法反演出的250 m反照率产品在保持原有优点的基础上提高了分辨率。本文用北美地区30个站点的数据对250 m新产品和原GLASS 1 km产品进行精度验证,250 m产品的RMSE为0.0235,略低于1 km产品的RMSE(0.0257),表明250 m反照率产品数据更接近于实测数据,精度更佳,分辨率更高。

(2)以北京市城市化进程中反照率的变化趋势研究为应用实例,进一步说明250 m反照率产品的优势。数据分析结果表明北京市城市化导致平均反照率的下降,而不是增加。应用实例说明250 m反照率产品提供了详细的反照率空间分布的细节,在视觉效果方面,比GLASS 1 km反照率产品更清晰,能够更好地支持区域尺度的研究与应用。

本文所介绍的250 m反照率新产品既保证了与GLASS 1 km反照率产品的一致性,而且具有更高的分辨率和精度,使250 m反照率产品成为全球变

化或局部区域环境研究的友好数据源。在今后区域研究或者需要高分辨率数据时,250 m反照率产品将会是很好的选择。后续研究中,需要开展全球范围的250 m反照率产品生产,并进行更为严密和全面的精度验证和分析。

### 参考文献(References):

- [1] Dickinson R E. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance[J]. *Advances in Geophysics*, 1983,25(12):305-353.
- [2] 齐文栋,刘强,洪友堂. 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. [ Qi W D, Liu Q, Hong Y T. Comparison analysis based on different inverse algorithms of surface albedo products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014,18(3):559-572. ]
- [3] A. Henderson-Sellers, Wilson M F. Surface albedo data for climatic modeling[J]. *Reviews of Geophysics*, 1983,21(8):1743-1778.
- [4] Liang S, Wang K, Zhang X, et al. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, Remote sensing and model simulations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 2010,3(3):225-240.
- [5] Yang J, Gong P, Fu R, et al. The role of satellite remote sensing in climate change studies[J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(11):875-883.
- [6] World Meteorological Organization, Global Observing System for Climate: Implementation Needs, GCOS, 2016.
- [7] Lewis P, Brockmann C, Danne O, et al. GlobAlbedo: Algorithm Theoretical Basis Document[C]. 2011.
- [8] Wang D, Liang S, He T, et al. Direct estimation of land surface albedo from VIIRS data: Algorithm improvement and preliminary validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(22):12577-12586.
- [9] He T, Liang S, Wang D, et al. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+, and OLI data based on the unified direct estimation approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018,204:181-196.
- [10] 蔡二丽, 窦宝成, 彭实, 等. 基于图像融合的反照率产品降尺度方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2016,31(4):724-730. [ Cai E L, Dou B C, Peng S, et al. A study of albedo product downscaling method based on image fusion[J]. *Remotesensing technology and application*, 2016,31(4): 724-730. ]
- [11] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,83(1-2):135-148.

- [12] Schaaf C, Martonchik J, Pinty B, et al. Retrieval of surface albedo from satellite sensors[C]. *Advances in Land Remote Sensing: System, Modelling, Inversion and Application*, 2008:219-243.
- [13] Muller J P, Preusker, René, et al. ALBEDOMAP: MERIS land surface albedo retrieval using data fusion with MODIS BRDF and its validation using contemporaneous EO and in situ data products[C]// *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2008.
- [14] Qu Y, Liu Q, Liang S, et al. Direct-estimation algorithm for mapping daily land- surface broadband albedo from MODIS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014,52(2):907-919.
- [15] Liu N F, Liu Q, Wang L Z, et al. A statistics-based temporal filter algorithm to map spatiotemporally continuous shortwave albedo from MODIS data[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(6):2121-2129.
- [16] Liang S, Zhao X, Liu S, et al. A long-term Global Land Surface Satellite (GLASS) data- set for environmental studies[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013,6(sup1):5-33.
- [17] Liu N, Liu Q, Wang L, et al. A temporal filtering algorithm to reconstruct daily albedo series based on GLASS albedo product[C]// *Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2011.
- [18] Liu Q, Wang L, Qu Y, et al. Preliminary evaluation of the long-term GLASS albedo product[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013,6(sup1):69-95.
- [19] 王立钊,郑学昌,孙林,等.利用 Landsat TM 数据和地面观测数据验证 GLASS 反照率产品[J]. *遥感学报*, 2014,18(3):547-558. [ Wang L Z, Zheng X C, Sun L, et al. Validation of GLASS albedo product through Landsat TM data and ground measurements[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014,18(3):547-558. ]
- [20] Sundar K J A, Jahnavi M, Lakshmisaritha K. Multi-sensor image fusion based on empirical wavelet transform [C]. *International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques*. 2017:93-97
- [21] 李存军,刘良云,王纪华,等.两种高保真遥感影像融合方法比较[J]. *中国图象图形学报*, 2004,9(11):1376-1385. [ Li C J, Liu L Y, Wang J H, et al. Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004,9(11):1376-1385. ]
- [22] 商荣,刘荣高,刘洋.基于背景知识的全球长时间序列反照率反演[J]. *地球信息科学学报*, 2015,17(11):1313-1322. [ Shang R, Liu R G, Liu Y. Generation of global long- term albedo product based on the background knowledge[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(11):1313-1322. ]
- [23] 彭菁菁,刘强,闻建光,等.卫星反照率产品的多尺度验证与不确定性分析[J]. *中国科学:地球科学*, 2015,45(1):66-82. [ Peng J J, Liu Q, Wen J G, et al. Multi-scale validation strategy for satellite albedo products and its uncertainty analysis[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015,45(1):66-82. ]
- [24] Román M O, Schaaf C B, Woodcock C E, et al. The MODIS (Collection V005) BRDF/albedo product: Assessment of spatial representativeness over forested landscapes[J]. *Remote sensing of environment*, 2009,113(11): 2476-2498.
- [25] Jun C, Ban Y, Li S. China: Open access to Earth land-cover map[J]. *Nature*, 2014,514(7523):434.