MODIS 反演多云地区地表反照率的一种 新方法及其反演试验

陈爱军1,2 卞林根2 刘玉洁3 朱小祥3

1南京信息工程大学遥感学院,南京 210044
 2中国气象科学研究院,北京 100081
 3国家卫星气象中心,北京 100081

摘 要 在参考国内外卫星遥感反演地表反照率方法的基础上,提出了一种反演多云地区地表反照率的新方法,称之为组合反演法。对于受云影响而无法获得足够的晴空观测数据的像素点,在遥感地表分类数据和归一化植被指数(NDVI)数据的辅助下,在其周围的有限范围内选择与其具有相同 BRDF 形状的像素点,将它们在观测角度上互为补充的晴空观测数据组合成对同一个 BRDF 形状的一组多角度观测数据,达到一定数量后直接利用线性的 RossThick-LiSparse 互易核驱动模型反演二向反射分布函数(BRDF)参数。然后,根据"16天"期间平均的当地正午太阳高度角计算反照率。选择青藏高原地区 2004 年 6~8 月间 5 组 "16 天"的 Terra MODIS 数据进行的反演试验表明,该方法不仅具有反演多云地区地表反照率的能力,而且能够更好地反映实际的地表信息,反演结果的精度与美国 MOD43 产品的精度相当。

关键词 遥感 反照率 二向反射分布函数 (BRDF) 组合反演 **文章编号** 1006-9895 (2007) 05-0855-08 **中图分类号** P407 **文献标识码** A

A New Way to Retrieve Surface Albedo over Cloudy Areas with MODIS Data and the Retrieval Experiment

CHEN Ai-Jun^{1, 2}, BIAN Lin-Gen², LIU Yu-Jie³, and ZHU Xiao-Xiang³

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information & Science Technology, Nanjing 210044

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract A new way is presented to retrieve albedo over cloudy areas, which is called compositive inversion. It selects pixels having the same BRDF (bi-directional reflectance distribution function) shape as the pixel frequently cloud-influenced within a limited area around it using information provided by data of land cover types and synchronous Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data, and unites their complementary angular observations into a set of multi-directional and multi-angular measurements till it is enough to retrieve reliable BRDF parameters directly with the linear kernel-driven RossThick-LiSparse Reciprocal (RossThick-LiSparseR) model. Then, black-sky albedo (BSA) and white-sky albedo (WSA) can be calculated with local noon solar altitude angle. Retrieval experiments with five "16-day" MODIS data from June to August 2004 over the Tibetan Plateau reveal that compositive inversion can retrieve albedo over cloudy areas successfully without depending on a priori BRDF information. Retriev-

收稿日期 2006-10-16, 2007-03-07 收修定稿

资助项目 科技部基础数据建设项目 2004DEA3 0041-05, JICA 中日气象灾害合作研究中心项目,科技部 973 项目 2004CB418305,南京 信息工程大学科研基金项目 Y645

作者简介 陈爱军,男,1972年出生,讲师,博士研究生,主要从事卫星遥感应用研究。E-mail: nuistchen@sohu. com

als from compositive inversion can give more detailed land surface information than those from magnitude inversion, a method adopted in the U. S. MODIS BRDF/albedo algorithm under the same condition, and accuracy of retrievals from compositive inversion is equivalent to those from magnitude inversion.

Key words remote sensing, albedo, bi-directional reflectance distribution function (BRDF), compositive inversion

1 引言

地表反照率是指地表反射太阳辐射与入射太阳 辐射之比,是地-气间辐射能量收支的重要参数之 一。因此,准确获得大范围的地表反照率一直受到 关注。过去,人们主要利用 NOAA AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 资料进 行统计反演得到地表反照率[1~5]。但是,统计反演 中假设地表为朗伯体会引起高达 45 %的误差[6]。 利用二向反射分布函数 (Bi-directional Reflectance Distribution Function, 简称 BRDF) 能够描述地表 各向异性反射的特性,在半球空间内对 BRDF 积分 可以获得真实的地表反照率^[7]。随着 BRDF 模型 和遥感技术的发展,利用多角度遥感数据反演地表 BRDF 参数已成为准确获得地表反照率的一条有效 途径。美国已开始利用 MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) 和 MISR (Multi-angular Imaging Spectra Radiometer) 探测器获得的数 据反演全球的地表反照率[8~10]。在国内,有学者利 用 AVHRR 数据通过 BRDF 反演来计算地表反照 率[11~13],也有学者利用 MODIS 数据及地面和机载 观测数据开展这方面的研究^[14, 15]。

目前,云仍是卫星遥感反演全球地表反照率的 一个重要影响因素。为了克服云的影响,尽可能准 确地获得地表反照率信息,美国 MODIS 全球1 km 分辨的 BRDF/反照率产品(编号 MOD43)反演时, 要求"16 天"期间累积的晴空多角度观测总数(n) 不少于7个(即 $n \ge$ 7),才能通过全反演法(Full Inversion)获得 BRDF 参数,然后,计算黑空反照 率(Black-Sky Albedo,简称 BSA)和白空反照率 (White-Sky Albedo,简称 WSA)^[8,9]。对于那些 经常有云而无法获得足够的晴空多角度观测数据的 地区,只能采用等量反演法(Magnitude Inversion)。等量反演时,要求晴空观测总数不少于3个 (即 3 \le n<7),而且要用先验的 BRDF 信息做辅 助,否则无法获得地表反照率^[8,9,16]。对于先验的 BRDF 信息,可以通过在试验场对各种地表类型观 测的数据建立,也可以联合多种探测器的观测数据 反演获得,还可以通过其它途径获得[10,17]。多角 度观测数据有限时,也可以采用一种"多核差值最 小"(Multikernel Least-Variance)法选择多次迭代 反演时白空反照率 BSA 变化最小的 BRDF 模型来 反演地表反照率^[18],但需要有多种核组合的 BRDF 模型可供选择。为获得比较连续的地表反照率,有 人根据物候生态变化曲线与反照率之间的对应关 系,对 MOD43 产品中由于云或积雪的影响而无法 反演的反照率空白点进行插补^[19],这种方法需要 积累一定时间的数据,无法满足卫星遥感反演的实 时性需求。最近,有研究将相同地表类型像素点的 晴空观测数据按归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, 简称 NDVI) 的大小 分类,从每一类像元所有的晴空观测数据中挑选观 测角度互为补充的数据反演 BRDF 参数,并作为该 类像元实际的 BRDF 参数, 然后计算反照率^[20]。 这种方法虽然有利于获得同一类像元的 BRDF 参 数,但忽略了各像素点在空间分布上的差异。

在参考国内外卫星遥感反演地表反照率方法的 基础上,本文依据 BRDF 理论,提出一种充分利用 实时遥感观测数据反演多云地区地表反照率的新方 法,可称之为组合反演法(Compositive Inversion)。

2 组合反演法

2.1 理论分析

BRDF 是准确描述地表各向异性反射特性的重 要参数^[7], BRDF 形状(或参数)成为地表特征的 一个重要属性。对单个像元而言,如果有充足、合 适的多角度观测数据,就能获得其真实的 BRDF 形 状。对于两个具有相同 BRDF 形状的像元,如果有 充足、合适的多角度观测数据,那么交换或混合它 们的多角度观测数据,甚至从中去掉一部分,应该 仍然能够比较准确地获得二者所共有的 BRDF 形 状。

有关研究已证实,同种地表覆盖类型具有基本

相似的 BRDF 形状^[20, 21]。这是目前 MOD43 产品 算法中等量反演法的基础^[9, 16]。在由相同地表覆盖 类型组成的有限区域内,可能存在两个甚至多个相 同 BRDF 形状的像元。对于这些具有相同 BRDF 形状的像元,在各自的多角度观测数据有限的情况 下,无法由观测数据直接独立地反演各自的 BRDF 形状。但是,如果把它们各自有限的观测数据组合 起来,形成对相同 BRDF 形状的多个方向、多个角 度的观测,达到一定数量后就能反演出它们所共有 的 BRDF 形状。

对于经常有云而使"16天"期间的晴空有效观测总数不足的像素点,若能在其周围一定范围内找 到与其具有相同 BRDF 形状的像素点,就可以将它 们的晴空有效观测数据组合起来,形成足够数量的 多角度观测数据,然后通过合适的 BRDF 模型反演 BRDF 参数。

线性的 RossThick-LiSparse 互易核驱动 BRDF 模型具有很强的拟合实测数据的能力^[22~24],是目 前最适合于 MODIS BRDF/反照率反演的 BRDF 模 型^[25]。因此,获得足够的多角度观测数据后,可以 利用线性的 RossThick-LiSparse 互易核驱动 BRDF 模型反演 BRDF 参数。然后,根据"16 天"期间平 均的太阳高度角计算地表反照率。

上述分析表明,组合反演法的关键是找到具有 相同 BRDF 形状的像素点,并将这些像素点的晴空 观测数据组合成足够数量的多角度观测数据。

2.2 实现途径

研究表明,同种地表覆盖类型具有基本相似的 BRDF 形状^[16, 20, 21]。因此,确定两个像素点具有 相同 BRDF 形状的前提是两者具有相同的地表覆 盖类型。比较常见的遥感地表覆盖类型数据是按照 IGBP (International Geosphere and Biosphere Program) 地表分类标准获得的^[26]。一般认为地表覆 盖类型短期内不会发生大的变化。

其次,要考虑地表覆盖类型的时域变化,尤其 是植被。RossThick-LiSparse 互易核驱动 BRDF 模 型中的 RossThick 核和 LiSparse 核都强调了植被 的因素^[27,28]。但是,随着植被生长状态的变化,其 BRDF 形状也会发生相应的变化,尤其是农作物、 落叶林等季节性植被。因此,需要反映植被生长状 态的参数来进一步确定两个具有相同地表类型的像 元是否具有相同的 BRDF 形状。在反映植被状态 的遥感产品中,NDVI 是比较常用的一种,而且它 对晴空条件的依赖性不高^[29],也比较容易根据需 要获得相应时段的 NDVI 数据。因此,利用 NDVI 数据控制地表类型(尤其是植被)的时域变化,有 利于更好地选择同种地表类型中具有相同 BRDF 形状的像元。

因此,可以通过将遥感的 IGBP 地表分类数据 与 NDVI 数据相结合的方法,在目标点周围一定的 空间范围内找到与其具有相同 BRDF 形状的像元。 这样,不仅有利于消除具有相同地表类型的像元在 空间分布上的差异带来的影响,而且考虑了它们在 时域上的对应关系,因而有利于更加准确地找到具 有相同 BRDF 形状的像元。

3 反演实验

为了检验组合反演法的反演能力,并对其反演 结果的精度进行评价,选取 2004 年 6 月 10 日~8 月 28 日期间(分别对应于当年的第 11~15 个 "16 天")青藏高原地区的 Terra MODIS 数据及相关遥 感产品进行反演实验。所选区域对应的 MODIS 正 弦投影网格编号为 H25V05,四个角点的经纬度分 别为(40.0°N,91.38°E)、(40.0°N,104.42°E)、 (30.0°N,80.83°E)、(30.0°N,92.38°E)。

3.1 数据说明

反演实验所用的全部卫星数据及遥感产品均由 美国国家航空航天局 NASA 地球资源观测与科学 (Earth Resources Observation and Science, E-ROS)所属的陆地卫星数据处理、分发与存档中心 (Land Processes Distributed Active Archive Center, LP DAAC)提供。这些数据已经确认可以用 于科学研究领域^[30]。

卫星数据包括 MOD09GHK、MOD09GST 和 MODMGGAD。MOD09GHK 包括 MODIS 1~7 通道的反射率数据,已经过定标、定位、融合和大 气校正,空间分辨率为 500 m; MOD09GST 主要提 供 MOD09GHK 数据的质量信息,包括云覆盖及云 影信息和 1~7 通道反射率数据的质量标记,分辨 率为 1 km; MODMGGAD 主要提供卫星-地表-太 阳之间的几何关系,包括太阳天顶角和方位角、卫 星天顶角和方位角,分辨率为 1 km。为了使这三 种数据形成空间上完全匹配的 500 m 分辨率数据, 还要用 MODPTHKM 数据作中介。 MODIS 遥感产品包括 MOD13A1 和 MOD12Q1。MOD13A1是 MODIS 500 m分辨率 的 NDVI产品,产品周期为"16天"; MOD12Q1 是 MODIS 1 km分辨率的地表覆盖类型数据。由 于目前 LP DACC 还没有 MODIS 500 m分辨率的 地表覆盖类型数据可以提供,只能用 MOD12Q1 插 值而得。需要指出的是,实验所用的 MOD12Q1 数 据来自 2004年。由于地表覆盖类型的年际变化一 般不大,尤其夏季的青藏高原地区,因而对实验结 果的影响可以忽略。

3.2 对比实验

在美国 MOD43 产品的算法中,"16 天"期间的 晴空有效观测数据总量 $n \ge 7$ 时采用全反演法, 3 \le n < 7 时采用等量反演法^[8,9]。为了方便,记为 "FM 反演"(Full inversion and Magnitude inversion)。本文对晴空观测总数 $n \ge 7$ 的像素点采用全 反演法,尽管组合反演法能对晴空观测数据少于 3 个的像元进行反演,但为了与美国 MOD43 产品对 比,只对 3 \le n < 7 的像素点采用组合反演法。为了 方便,记为 "FC 反演"(Full inversion and Compositive inversion)。

组合反演时,在以目标点为中心的一定范围内 搜索与之具有相同 BRDF 形状的像素点,条件是两 者的地表覆盖类型完全相同且 NDVI 值基本相同。 然后,将这些像素点的晴空有效观测数据与目标点 的晴空有效观测数据组合在一起,剔除其中相互重 复的数据(尤其是卫星天顶角和太阳-卫星之间的 相对方位角),构成对它们共有 BRDF 形状的一组 多角度的晴空观测数据。组合后,如果晴空有效 观测总数 *n*≥7,就利用 RossThick-LiSparse 模型 反演 BRDF 参数。最后,根据"16 天"期间平均 的正午太阳天顶角计算黑空反和白空反照率。

为了提高反演效率,需要对输入数据进行控制,要求像素点的几何角度和1~7通道的反射率数据全部有效。这样,对于一个受云影响的像素 点,经过一次组合就可以成功地反演7个波段的反 照率,也有利于根据窄波段一宽波段的转换关系成 功获得可见光、近红外和短波三个宽波段的黑空和 白空反照率^[31]。之后,根据当地的气溶胶光学厚 度,利用辐射传输模式模拟计算出天空漫射光的比 例,并以其为权重对黑空和白空反照率^[7,8]。

3.3 结果与分析

在 2400×2400 像素点区域内的 5 个连续的 "16 天"资料中,累计的晴空有效观测总数 *n*≥7 的 像素点所占的比例最高为 46.86 % (图 1)。也就是 说,如果只采用全反演法,这期间该区域最多只有 46.86%的区域能获得反演结果。经过反演后,在 该区域这期间能够获得 75 %以上,最高可达 85 % 的反演结果 (图 1)。这表明组合反演能提高 MO-DIS 数据反演地表反照率的能力,有效地反演多云 地区的地表反照率。

对比两种反演结果,可以发现 FC 反演结果比 FM 反演结果更加连续,反映的地表信息更加丰富 (图 2a、b),一些 FM 反演无法获得反演结果的像 素点,FC 反演却显示出反照率高值区(图 2a)。与 同步的 NDVI 图像及对应区域的数字海拔(Digital Elevation Model, DEM)图像对比,可以发现 FC 反演结果中的这些反照率高值区与 NDVI 低值区 非常吻合(图 2c),并且对应的海拔高度一般都在 5000 m 以上(图 2d),表明 FC 反演结果中的这些 反照率高值区具有合理性。因为青藏高原的高海拔 山区存在常年积雪,因而反照率偏高且 NDVI 值趋 于 0。

一般气候模式研究要求反照率的绝对精度为 0.02~0.05^[32,33],该精度要求也成为评价遥感反 演地表反照率精度的一个标准^[34~39],本文将按照 这一精度要求分析组合反演结果的精度。目前,美 国尚未公开发布 500 m 分辨率的 MODIS 地表反照 率产品,因而只能选择 1 km 分辨率的 MOD43 产



图 1 2004 年 H25V05 区第 11~15 个 "16 天" 晴空有效观测总 数不少于 7 个的像素点所占的比例(用 X 表示)及 FC 反演结 果所占的比例(用 Y 表示)

Fig. 1 Ratio of total clear observations less than 7 (X) and the corresponding ratio of FC inversion results (Y) over tile H25V05 during the 11th – 15th "16-day" in 2004



图 2 2004 年 H25V05 区第 13 个 "16 -天" MODIS 4 通道黑空反照率 (a、b)、NDVI (c) 及对应区域的 DEM 图像 (d)。(a)、(b) 分别为 FC、FM 反演结果,其中 32767 表示无反演结果; (a) 中 A~H 表示 FM 反演结果所无法提供的一些反照率高值区

Fig. 2 Black-sky albedo of MODIS band 4 achieved with FC (a) and FM (b) inversion and NDVI (c) over tile H25V05 during the 13th 16-day in 2004, and DEM of the corresponding area (d). In (a) and (b), number 32767 represents no retrieval; in (a), characters A – H represent some areas with high albedo values, which cannot be achieved with FM inversion

品与 FC 反演结果进行对比。由于 1 个 1 km 分辨 率的像素点对应于 4 个 500 m 分辨率的像素点,因 而可以用 FM 反演结果中 1 个像素点的反演结果与 FC 反演结果中对应的 4 个像素点的算术平均值进 行比较。如果 FM 反演结果来自等量反演,FC 反 演结果中对应的 4 个像素点均为组合反演结果,且 两者的绝对误差不超过 0.05,则两者的一致性较 好。在这 5 个连续的"16 天"期间,组合反演和等 量反演的黑空反照率 BSA 在各波段的一致率一般 都在 80%以上,而白空反照率 WSA 一般都在 70% 以上(表 1)。用同样的方法对 FM 反演和 FC 反演 的全反演结果进行对比分析,发现 FM 反演和 FC 反演的全反演结果的一致率并不能达到 100%,其 中 BSA 在各波段的一致率在 98%以上,WSA 在各 波段的一致率在 95%以上(表 2)。

通过上述分析,可以认为组合反演结果与等量 反演结果之间具有较好的一致性,两者的精度相 当。两者之间存在一定差异的原因在于:(1)FC 反演结果的空间分辨率为500m,而MOD43产品 的分辨率是1km,对比分析时由于两者的空间分 辨率并不匹配,因而带来一定的误差,且误差对 WSA的影响要比对BSA的影响大。(2)在反演过 程中,FC反演结果比美国MOD43产品采取了更 加严格的输入数据控制方案,这也是引起两者间差 表 1 2004 年第 11~15 个 "16 天"期间分辨率为 500 m 的组合反演结果与分辨率为 1 km 的等量反演结果的一致率 (H25V05)

Table 1Percentage of consistency between retrievals from magnitude inversion at 1 km resolution and those from compositive in-
version at 500 m resolution during the 11th - 15th "16 - day" in 2004 (Tile H25V05)

	波段1		波段 2		波段 3		波段 4		波段 5		波段 6		波段 7	
时间	BSA	WSA	BSA	WSA										
第 11 个 "16 天"	0.8892	0.7640	0.8860	0.7252	0.8653	0.7831	0.8891	0.7915	0.9027	0.7380	0.8603	0.7014	0.85240	0.7051
第 12 个"16 天"	0.8289	0.7457	0.8385	0.7102	0.7887	0.7437	0.8282	0.7677	0.8494	0.7116	0.8256	0.6806	0.8339	0.7062
第13个"16天"	0.8887	0.7658	0.8958	0.7148	0.8278	0.7411	0.8727	0.7794	0.9165	0.7052	0.9026	0.7122	0.9010	0.7135
第 14 个 "16 天"	0.8384	0.7504	0.8495	0.7059	0.7808	0.7247	0.8258	0.7639	0.8748	0.7068	0.8766	0.7176	0.8826	0.7401
第 15 个 "16 天"	0.8965	0.7535	0.9111	0.7191	0.8555	0.7298	0.8905	0.7692	0.9245	0.7138	0.9161	0.7377	0.9166	0.7485
平均值	0.8683	0.7559	0.8762	0.7150	0.8236	0.7445	0.8613	0.7743	0.8936	0.7151	0.8762	0.7099	0.8773	0.7227

表 2 2004 年第 11~15 个 "16 天"期间分辨率为 500 m 的全反演结果与分辨率为 1 km 的全反演结果的一致率 (H25V05) Table 2 Percentage of consistency between retrievals from full inversion at 1 km resolution and those at 500 m resolution during the 11th - 15th "16 - day" in 2004 (Tile H25V05)

	波段1		波段 2		波段 3		波段 4		波段 5		波段 6		波段 7	
时间	BSA	WSA												
第11个"16天"	0.9953	0.9846	0.9937	0.9803	0.9942	0.9871	0.9961	0.9876	0.9948	0.9855	0.9884	0.9753	0.9825	0.9644
第 12 个 "16 天"	0.9923	0.9647	0.9917	0.9595	0.9931	0.9759	0.9935	0.9729	0.9943	0.9668	0.9898	0.9483	0.9853	0.9415
第13个"16天"	0.9861	0.9639	0.9843	0.9581	0.9834	0.9705	0.9869	0.9719	0.9888	0.9677	0.9871	0.9610	0.9841	0.9568
第 14 个 "16 天"	0.9939	0.9760	0.9944	0.9711	0.9922	0.9817	0.9940	0.9809	0.9970	0.9746	0.9964	0.9664	0.9936	0.9624
第 15 个 "16 天"	0.9972	0.9752	0.9971	0.9711	0.9961	0.9814	0.9974	0.9809	0.9982	0.9766	0.9966	0.9671	0.9942	0.9620
平均值	0.9930	0.9729	0.9922	0.9680	0.9918	0.9793	0.9936	0.9788	0.9946	0.9742	0.9917	0.9636	0.9879	0.9574

异的原因之一。(3) 美国 MOD43 产品中等量反演 结果本身的质量级别并不高^[8,9,35,36,38,39],这是引 起两者差异的另一个重要原因。因此,无论是等量 反演结果,还是组合反演结果,都有待于研究更加 有效的方法来评价它们的精度。

4 小结与讨论

本文基于 BRDF 理论,提出一种充分利用实时 卫星遥感观测数据来反演多云地区地表反照率的新 方法——组合反演法。该方法利用多角度遥感观测 的特点,并发挥卫星遥感的优势,在遥感的地表分 类数据及同步的 NDVI 数据的辅助下,最大限度地 利用"16 天"期间具有相同 BRDF 形状像元的晴空 观测数据,将它们在观测角度上互为补充的观测数 据组合在一起,形成一组多角度观测数据后,直接 利用 RossThick-LiSparse 互易核驱动的 BRDF 模 型反演 BRDF 参数,并计算黑空和白空反照率。

选择青藏高原地区 2004 年 6 至 8 月间的第 11~

15个"16天"的 Terra MODIS 资料进行的反演试 验表明:

(1) 组合反演能够有效地反演多云地区的晴空 地表反照率,提高 MODIS 数据遥感反演地表反照 率的能力;

(2)组合反演结果能够更好地反映实际的地表 信息,因为它利用了遥感的地表分类信息和同步的 NDVI数据提供的辅助信息;

(3)组合反演结果与美国 MOD43 产品中等量 反演结果的精度相当。

组合反演法发挥了卫星遥感的优势,采用遥感的地表分类数据和同步的 NDVI 数据提供辅助信息,能够有效地反演多云地区的晴空地表反照率而不用依赖于先验的 BRDF 信息。由于地表覆盖类型的变化不大,而同步的 NDVI 又比较容易获得,并且具有较好的时空对应关系,因而组合反演算法不仅易于实现,而且有利于更加准确地获得多云地区的地表反照率,更好地反映实际的地表信息。

组合反演为缩短 MODIS 地表反照率产品的时间周期提供了一种新思路:可以尝试通过组合反演 在少于 16 天的时间内获得足够的多角度观测数据, 从而获得时间周期更短的地表反照率产品。另外, 随着多角度遥感观测的发展,组合反演法的思路也 为未来如何充分利用多角度观测数据更好地获得地 表信息,提供了一种新思路。

需要指出的是:(1)由于同步的 NDVI 信息在 组合反演中起着重要作用,因而在那些植被覆盖比 较丰富的地区,组合反演的效果可能会更好。(2) 由于组合反演时需要在一定范围内搜索具有相同 BRDF 形状的像元,因而对计算机的性能(尤其是 内存)有一定的要求。未来,随着对组合反演算法 的进一步优化设计,以及计算机硬件技术的发展, 相信实现组合反演法的业务化运行是可能的。

致谢 感谢美国波士顿大学地理系与遥感中心刘吉成博士在数据 处理方面给予的大力支持;感谢国家卫星气象中心赵明现硕士在程 序调试中给予的大力帮助。

参考文献 (References)

- Brest C L, Goward S N. Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8 (3): 351~367
- [2] Wydick J E, Davis P A, Gruber A. Estimation of broadband planetary albedo from operational narrowband satellite measurements. NOAA Technical Report NESDIS 27. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration and National Environmental Satellite, Data & Information Administration. 1987
- [3] 方宗义,刘玉洁,林曼芸. 青藏高原地表反照率计算研究.
 气象学报,1996,54(5):580~589
 Fang Zongyi, Liu Yujie, Lin Manyun. The research and cal-

culation of surface albedo over Tibetan Plateau from satellite data. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1996, 54 (5): $580 \sim 589$

- [4] 陈云浩,李晓兵,谢锋. 我国西北地区地表反照率的遥感研究. 地理科学, 2001, 21 (4): 327~333
 Chen Yunhao, Li Xiaobing, Xie Feng. Study on surface albedo distribution over Northwest China using remote sensing technique. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, 21 (4): 327~333
- [5] 金莲姬,刘晶森,李雁领,等.利用 NOAA-AVHRR 遥感资料反演长江三角洲地表反照率的试验.南京气象学院学报, 2002,25(1):28~35

Jin Lianji, Liu Jingmiao, Li Yanling, et al. Deriving the surface albedo over the Yangtze Delta from NOAA-AVHRR data. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2002, 25 (1): 28~35

- [6] Kimes D S, Sellers P J. Inferring hemispherical reflectance of Earth's surface for global energy budgets from remotely sensed nadir or directional radiance values. *Remote Sens. Environ.*, 1985, 18: 205~223
- [7] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. National Bureau of Standards Report, NBS MN-160, Washington, DC, 1977
- [8] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Transa. Geosci. Remote Sens.*, 2000, 38 (2): 977~998
- [9] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 83 (1-2): 135~148
- [10] Jin Y, Gao F, Schaaf C B, et al. Improving MODIS surface BRDF/Albedo retrieval with MISR multiangle observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, 40 (7): 1593~ 1603
- [11] 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
- [12] 徐兴奎. 长江三角洲地区地表月平均反照率的卫星遥感研究. 大气科学, 2002, 26 (3): 394~400
 Xu Xingkui. A study of monthly-mean surface albedo of the Yangtze River Delta. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 26 (3): 394~400
- [13] 徐兴奎,刘素红.中国地表月平均反照率的遥感反演. 气象 学报,2002,60(2):215~220
 Xu Xingkui, Liu Suhong. Deriving monthly means surface albedo of China. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2002,60(2):215~220
- [14] 张杰,张强,郭铌,等.应用EOS-MODIS 卫星资料反演西北 干旱绿洲的地表反照率.大气科学,2005,29(4):510~517 Zhang Jie, Zhang Qiang, Guo Ni, et al. Retrieval of the land surface albedo over arid oasis of Northwest China from EOS-MODIS Data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, 29(4):510~517
- [15] 焦子锑, 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. 遥感学报, 2005, 9 (1): 64~72
 Jiao Ziti, Wang Jindi, Xie Liou, et al. Initial validation of MODIS albedo product by using field measurements and airborne multiangular remote sensing observations. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 2005, 9 (1): 64~72
- [16] Strugnell N C, Lucht W. An algorithm to infer continental-

scale albedo from AVHRR data, land cover class, and field observations of typical BRDFs. J. Climate, 2001, 14 (7): 1360~1376

- Li X, Gao F, Wang J, et al. A priori knowledge accumulation and its application to linear BRDF model inversion. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D11): 11925~11935
- [18] Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Using a multikernel least-variance approach to retrieve and evaluate albedo from limited bidirectional measurements. *Remote Sens. Environ.*, 2001, 76 (1): 57~66
- [19] Moody E G, King M D, Platnick Steven, et al. Spatially complete global spectral surface albedos: value-added datasets derived from Terra MODIS land products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, 43 (1): 144~157
- [20] Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sens. Environ.*, 2003, 86 (2): 198~205
- [21] Luo Y, Trishchenko A P, Latifovic R, et al. Surface bidirectional reflectance and albedo properties derived using a land cover-based approach with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer observations. J. Geophys. Res., 2005, 110 (D1), D01106, doi: 10.1029/2004JD004741
- [22] Hu B, Luchet W, Li X, et al. Validation of kernel-driven models for the BRDF of land surfaces. *Remote Sens. Envi*ron., 1997, 62 (3): 201~214
- [23] Privette J L, Eck T F, Deering D W. Estimating spectral albedo and nadir reflectance through inversion of simple BRDF models with AVHRR/MODIS-like data. J. Geophys. Res., 1997, 102 (D24): 29529~29542
- [24] Bicheron P and Leroy M. Bidirectional reflectance distribution function signatures of major biomes observed from space. J. Geophys. Res., 2000, 105 (D21): 26669~26681
- Wanner W, Strahler A H, Hu B, et al. Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MO-DIS and MISR data: Theory and algorithm. J. Geophys. Res., 1997, 102 (D14): 17143~17162
- [26] Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, et al. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 83 (1-2): 287~302
- [27] 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 (D18): 20455~20468

- Wanner W, Li X, Strahler A H. On the derivation of the kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance.
 J. Geophys. Res., 1995, 100 (D10): 21077~21089
- [29] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 83 (1-2): 195~213
- [30] http://delenn.gsfc.nasa.gov/ims-bin/pub/nph-ims.cgi/ u44859
- [31] Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I. Algorithms. *Remote Sens. Environ.*, 2000, 76 (2): 213~238
- [32] Henderson-Sellers A, Wilson M F. Surface albedo for climate modeling. *Review of Geophysics*, 1983, 21: 1743~1778
- [33] Sellers P J. Remote sensing of land surface climatology. NASA/GSFC International Satellite Land Surface Climatology Project Report. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1993
- Liang S, Fang H, Chen M, et al. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 83 (1-2): 149 ~162
- [35] Jin Y, Schaaf C B, Gao F, et al. Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 1. Algorithm performance. J. Geophys. Res., 2003, 108 (D5): 4158, doi: 10.1029/2002JD002803
- [36] Jin Y, Schaaf C B, Woodcock C E, et al. Consistency of MO-DIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 2. Validation. J. Geophys. Res., 2003, 108 (D5): 4159, doi: 10.1029/2002JD002804
- [37] Wang K, Liu J, Zhou X, et al. Validation of the MODIS global land surface albedo products using ground measurements in a semidesert region on the Tibetan Plateau. J. Geophys. Res., 2004, 109 (D5): D05107, doi: 10.1029/ 2003JD004229
- [38] Stroeve J, Box J E, Gao F, et al. Accuracy assessment of the MODIS 16-day albedo product for snow: Comparisons with Greenland in situ measurements. *Remote Sens. Environ.*, 2005, 94 (1): 46~60.
- [39] Salomon J G, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using compositive observations from the Aqua and Terra platforms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, 44 (6): 1555~1565