

# MODIS 科学数据处理研究进展<sup>\*</sup>

刘荣高<sup>1\*\*</sup> 刘洋<sup>1,2</sup> 刘纪远<sup>1</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 地球系统科学的研究正跨入全球化、系统化、定量化的新时代, 长期连续观测的遥感数据已成为其最主要的分析资料来源. 美国宇航局(NASA)为地球观测计划(EOS)发射的中分辨率成像光谱仪(MODIS), 把大气—陆地—海洋作为一个整体来综合观测, 代表了当前遥感应用技术的最新水平. NASA已经建起了针对MODIS数据处理、分析、发布与共享的平台, 为全球各类用户提供服务. 文中分析了当前NASA对MODIS数据处理的方法, 讨论了这些算法的优点和存在的问题, 并介绍作者在MODIS数据处理方面的相关工作, 包括设计了更有效的遥感反演算法、更有针对性的数据产品及派生的应用系统等, 展望了未来处理算法的改进和下一步卫星计划的数据处理.

**关键词** MODIS 遥感反演 数据产品

20世纪70年代中期, 科学家提出应该将地球作为一个整体系统, 研究其多时空尺度的物理、化学和生物过程. 随着社会经济的发展, 人类活动对地球系统的影响日益显著, 气候变化、大气组成变化和土地利用变化引起的全球变化问题逐步凸显, 成为当前研究的热点问题<sup>[1]</sup>. 作为全球变化的研究对象, 地球系统科学的研究正跨入全球化、系统化、定量化的新时代, 越来越重视对长期连续观测资料的积累与分析, 遥感技术为从整体上监测、分析和模拟地球系统提供了可能. 为了深入理解地球系统的成分和相互作用以及系统的变化状况, 从全球尺度上对地球系统实现综合观测, 美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于1994年启动了对地观测计划(Earth Observing System, EOS)<sup>[2]</sup>. EOS揭开了地球系统科学研究的序幕, 中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS)是其核心传感器.

NASA 早于1984年就开始规划MODIS传感器的研制, 投入巨资, 成立了传感器设计、数据处理

算法设计、系统运行等前期工作组. 经过10多年的工作, 两个设计完全相同的传感器分别搭载在TERRA和AQUA卫星上于1999年12月和2002年5月成功发射并工作<sup>[3]</sup>. MODIS可以同时获得可见光到近红外(0.405—14.385 μm)的36个波段、最大空间分辨率为250m的数据, 单星数据全球覆盖时间为1—2d, 双星数据使覆盖时间缩小一半. MODIS继承了以往Landsat TM, NOAA AVHRR, NOAA HIRS和Nimbus CZCS等传感器的许多特性, 把这些传感器的特征集中在一个平台之下, 使单个平台可以同时获得以前需要多个平台才能获取的信息, 实现了把大气—陆地—海洋作为一个整体的地球综合观测, 并在波段数目、分辨率、接收方式和存储格式等方面有了很大进步, 是现有最全面的集成遥感数据获取平台, 代表了当前光学传感器的最高水平. 目前, MODIS数据已经广泛应用于地表覆盖变化、生态环境监测、气候预测、灾害监测、臭氧和海洋监测等领域. 例如, 在科学研究方面, 以MODIS为关键词从“科学引文

2008-03-11 收稿, 2008-05-30 收修稿稿

<sup>\*</sup> 国家“八六三”(批准号: 2007AA12Z158)、国家自然科学基金(批准号: 40471098)和国家科技支撑计划(批准号: 2006BAC08B04)资助项目

<sup>\*\*</sup> E-mail: liurg@reis.ac.cn

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

索引(Science Citation Index, SCI)”搜索, 相关引用文章从2001年的43篇迅速增长至2007年的450篇. 一些针对MODIS数据的应用系统也已经建立, 比如NASA建立的全球MODIS快速反应系统, 可以实现火灾、沙尘暴、飓风等监测, 国内也建立了国家MODIS数据共享等平台, 实现了对接收数据的快速共享, 并建立了多个国家级的应用系统.

MODIS对地球系统科学研究的重要意义, 决定了对其数据处理的巨大需要. 为更好地使用这一体现当前最新发展成就的新一代卫星遥感数据资源, NASA成立了3大研究组, 其中MODIS卫星维护组(MODIS Characterization Support Team, MCST)负责卫星的运行维护及数据接收; MODIS管理组(MODIS Administrative Support Team, MAST)负责对MODIS科学家组及相关的科学事务进行管理; MODIS科学数据支持组(MODIS Science Data Support Team, SDST)负责将各科学家小组的算法进行集成, 开发能够生产MODIS标准数据产品的软件系统. MODIS科学家组包括陆地、大气、海洋及产品验证4个小组, 成员来自大学、研究机构在定量遥感领域有突出成就的科学家, 负责数据产品和处理算法设计, 并进行初步验证. 这些工作组采取全开放的运作模式, 所有算法文档、数据处理源代码都公开免费共享.

从2002年7月开始, 本文研究小组开始开发自有知识产权的MODIS数据处理平台MODISoft<sup>2</sup>. 在分析、吸收NASA MODIS科学产品算法文档的基础上, 开发了更加实用的数据基础算法, 发展了新的数据产品和算法, 改进了部分MODIS标准算法, 并对一些输入参数进行了本地化. 在2002年底, 发布了第一个版本. 目前, 完成了绝大部分大气和陆地产品的软件开发工作, 包括了MODIS基本数据处理模块、大气产品模块及陆地产品模块. 文中评述NASA的MODIS标准产品及其算法优缺点, 并介绍MODISoft<sup>2</sup>在MODIS数据处理方面的特点.

## 1 MODIS数据产品及算法

### 1.1 MODIS数据产品

早期的卫星遥感获得的是照片, 不包含定标信息, 地面站接收的数据没有过多处理就直接提供给用

户使用. 随着遥感技术的发展, 地面接收站也加入了与仪器设备相关的校正、定标、轨道定位等一些预处理工作, 用户拿到的是比原始数据更易用的高级数据. 但是, 这时的数据应用范围仍然有限, 用户要提取信息还需自己设计处理程序, 对很多用户来说这是非常困难的. 后来, 随着遥感应用迅速扩展, 由专业人员完成的高级产品逐渐出现, 例如由NOAA AVHRR处理获得的土地覆盖分类数据<sup>4</sup>和全球8 km NDVI数据<sup>5</sup>等, 这些数据都可以直接用于驱动模型和地学分析, 极大地提高了数据的应用水平. 因而, 现在的趋势是由遥感专家设计、开发数据产品, 克服数据处理中的专业处理障碍, 促进数据的推广应用.

MODIS数据的多波段、高时空分辨率的特点, 可用于提取很多参数信息. MODIS科学家组制定了涵盖定标产品、大气产品、陆地产品和海洋产品的44个产品, 这是当前设计的标准产品最多、覆盖面最广的遥感器标准产品. 其中, MOD1-3为定标产品, MOD4-8为大气产品, MOD9-17为陆地产品, MOD18-32为海洋产品. MOD33以后产品的定义没有规律. 从产品的定义可以看出, MODIS的标准产品开始只有32个, 后来在此基础上又补充了12个, 但补充的12个产品有些与已有产品重复或几乎不可能从MODIS数据反演而被废弃, 在最新的产品清单中只保留了38个产品. 所有设计的产品中, 只有部分产品提供日常下载, 其中校准产品3个: MOD01辐亮度、MOD02定标产品、MOD03地理定位产品; 大气产品6个: MOD04气溶胶、MOD05总可降水、MOD06云参数、MOD07大气轮廓产品、MOD08栅格大气产品和MOD35云覆盖产品; 陆地产品10个: MOD09地表反射率、MOD10雪覆盖、MOD11地表温度和比发射率、MOD12土地覆盖/土地覆盖变化、MOD13栅格植被指数、MOD14热异常和生物量燃烧、MOD15叶面积指数/光合有效辐射吸收比率、MOD17植被生产力与净初级生产力、MOD43地表反射率与BRDF/Albedo参数和MOD44植被覆盖变换产品.

另外, 国家雪冰数据中心提供MOD29海冰覆盖产品, 马里兰大学提供全球分辨率为500 m的月火烧迹地的实验产品MCD45A1, GSFC的OCDPS网站提供下列海洋产品: 412, 443, 448, 531, 551和667 nm波段归一化离水辐射, 869 nm光学厚度, 748

和 869 nm 波段气溶胶校正 Epsilon 参数, OC3 叶绿素 a 浓度等. 总体来说, 大气产品设计的种类较少, 但全部提供了标准产品, 陆地产品除了 MOD16 蒸散量产品和已废弃产品外, 设计的产品基本上已经提供标准产品. 海洋产品的处理相对滞后, NASA 在其网站上公布的 MODIS 标准产品中海洋产品包括: MOD18 归一化离水辐亮度、MOD19 色素浓度、MOD20 叶绿素荧光、MOD21 叶绿素 a 色素浓度、MOD22 洋面 PAR、MOD23 悬浮固体浓度、MOD24 有机物浓度、MOD25 球石粒浓度、MOD26 海洋水衰减系数、MOD27 海洋初级生产力、MOD28 海表温度、MOD36 总吸收系数、MOD37 海洋气溶胶、MOD39 清水 Epsilons. 但目前仅提供 412, 443, 448, 531, 551 和 667 nm 波段归一化离水辐射, 869 nm 气溶胶光学厚度, 748 和 869 nm 波段气溶胶校正 Epsilon 参数, OC3 叶绿素 a 浓度、490 nm 波段散射衰减系数、埃氏系数、海表温度等海洋水色和海表温度产品. 因为海洋产品算法设计是早期的 MODIS 海洋组科学家完成的, 而产品则是后来由 SeaDAS 小组完成, 因而算法和产品间存在不一致.

MODIS 数据可以免费获得, 卫星传感器扫描获得的原始数据通过非加密的 X 波段对地面广播, 地面接收站可以免费接收, NASA 也提供了从 LAADS 网站下载的服务. NASA 的 MODIS 标准产品由地球观测系统数据和信息系统 (earth observing system data and information system, EOSDIS) 生产并分发. 标准产品可以从如下网站上下下载获得: Level 1 级和大气可以从 LAADS 的网站上获得, 陆地产品可以从美国地质调查 EROS 数据中心 (U. S. Geological Survey EROS Data Center, EDC) 的陆地处理 DAAC 网站上下下载, 低温层产品 MOD10 和 MOD29 可以从国家雪冰数据中心 (National Snow and Ice Data Center, NSIDC) 获取, 海洋水色产品和海表温度产品可以从 GSFC 的 OCDPS 网站上下下载. MODIS 标准数据产品分为 5 级, EOS 数据和处理系统 (EOS data and operation system, EOS-DOS) 将卫星地面站接收到的信号解码, 输出 PDS 格式的 0 级数据; 随后, 定位与辐射定标后得到 1 级产品; MODIS 数据处理系统 (MODIS adaptive processing system, MODAPS) 在 1 级数据基础上反演得到 2 级以上产品.

MODIS 数据以 HDF 格式储存, 但 EOS 定义了一些特定参数和组织方式, 称为 HDF-EOS 格式. 数据以两种方式存放, 一种是分景 (granule) 的方式, 接收数据以 5 min 为单元, 1 km 分辨率的像元为  $2030 \times 1354$ , 这种数据经过了几何定位处理, 从中可得出每个像元的地理坐标, 定位精度可达到  $50\text{m}^{[6]}$ , 但没有实现标准格网化, 每个像元的大小不同. NASA 经过格网化处理的数据其像元大小相同, 以分幅 (tile) 形式存放, 全球分为  $36 \times 18$  幅, 每幅覆盖范围  $10^\circ \times 10^\circ$ , 1 km 分辨率数据的大小是  $1200 \times 1200$ . 分幅数据早期采用正弦投影和积分正弦投影两种投影方式, 但由于很多商业软件不支持积分正弦投影, 因而版本 4 后的分幅数据均采用了正弦投影.

MODIS 分景数据每个像元有对应的空间坐标信息, 这些信息存于 MOD03 数据或数据中的 Geolocation 数据集, 因而几何纠正就是用其空间定位信息将空间图像转换为标准格网数据, 不再需要加入控制点以获取每点坐标. 但是, MODIS 传感器的扫描角度很大, 由于地球曲率导致的数据畸变和多行数据同时扫描使得这种数据在边缘存在明显的“双眼皮”现象, 使用控制点方法校正会带来很大的误差. NASA 提供了分景数据几何校正的程序 MRTSwath, 可以对有坐标的 MODIS 数据进行标准格网化, 使之成为具有标准格网的数据. 对于分幅数据, NASA 也提供了一个处理工具 MRT, 可以对 MODIS 高级产品进行投影转换和镶嵌等操作. 这些工具的提供, 可以使非专业用户能够直接使用 MODIS 数据更好地解决专业问题. 但这两个软件都不能有效地处理数据中的保留值, 在具体应用中有时会出现问题.

## 1.2 MODIS 数据处理算法

NASA 在定义 MODIS 数据的标准产品后, 由科学家组的专家设计各产品生产的处理算法, 每个科学家负责 1—2 个产品. 算法文档于 1998 年在卫星发射前提交了第一版本算法文档, 卫星发射后, 又根据处理数据特性在原来算法的基础上进行了更新和优化. 这些产品的大部分算法都是在 MODIS 项目启动后, 针对规划的产品由项目科学家独立设计的, 总体上优于这之前出现的同类算法, 代表当时最高研究水准. 这些文档全部公开, 其算法的源代码也已经在网上公开发布. 但是, 并不是所有规

划产品都有算法文档,也不是存在算法文档就有对应的产品.例如,海洋产品提供了下列算法文档:归一化离水辐亮度、叶绿素 a、吸收系数、洋面 PAR 和 IPAR、清水 Epsilons、叶绿素荧光、球石粒浓度、年海洋初级生产力、红外海表温度等产品算法,但目前很多设计的产品尚未提供.更详细的算法可以从附录中相关的网站获得.

### 1.3 MODIS 数据产品算法的不足和当前的改进

NASA 设计的 MODIS 产品及算法代表了当时的最高水平,但随着研究和应用的深入,各种算法的局限性逐渐出现,算法存在很多改进的空间,概述如下:

(1) 很多规划的产品没有处理算法,当然也就没有标准产品,这一方面是由于有些参数的提取本来就相当困难,另一方面也体现了项目组在管理中的问题,例如,有些产品科学家在得到连续十多年的大量经费支持下仍然没有设计出规划的产品算法,而同期其他科学家设计的算法并没有被 NASA 采纳至其产品处理中,比较突出的是海洋产品和 MOD16 产品.

(2) 当时的很多产品设计都不是以应用为目的,只考虑设计尽可能精确的反演算法,没有考虑到这些数据后续应用的问题,例如,云的干扰是光学遥感的最主要障碍,对于模型驱动,必须消除这种干扰,而 MODIS 产品中,只是简单的进行屏蔽和标注.用户得到这些数据时,还需要进一步的处理工作.对于某些产品,用户可以通过时间序列插值消除这种干扰,如 NDVI, LAI 等参数.但是,对于另一些参数,简单的插值会导致大的正偏差.如晴空地表温度通常高于云天的地表温度,使用晴空温度插值获得云天温度当然会导致估值偏高;对于 NPP 产品也存在同样的问题,云天的 NPP 由于光合辐射减少,必然低于晴空时的 NPP,但在 MODIS 产品中只是以简单的云标记标注.这种产品用来进行统计分析,必然会导致对 NPP 的高估.因此,云天 NPP 的估计不能从晴天 NPP 简单插值得到,而应在模型运算前先消除云的影响,在最新的版本的 NPP 产品中,已经尝试这种做法<sup>[7]</sup>.

(3) 有些产品,特别是需要复杂模型处理的产品,输入参数的不确定性很大,其中最突出的是 NPP 产品,该产品要求输入气象参数,而全球的气

象参数无法通过插值得到,只能采用气象同化处理得到的产品,一方面产品的分辨率很低,需要特殊处理以消除产品中像元间的斑块现象<sup>[7]</sup>.输入数据的不确定也会给结果带来很大的偏差<sup>[8]</sup>.一个例子是土地覆盖分类产品,该产品算法需要大量的训练数据,但这些训练数据采集通常很困难,MODIS 算法中的训练数据主要集中在北美地区,对于全球的情况不见得一定适用,因而不同生产者获得的同一类型数据会有较大的差别.

(4) 有些产品模型的输入数据很难从遥感获得.例如, NPP 模型中,计算水胁迫的因子需要土壤信息,土壤数据的不确定性就很大,而且土壤水分平衡的模型不确定性也很大,因而注定这种模型在大范围上有很大的不确定性.最近,有学者提出了全遥感参数的 NPP 模型<sup>[9,10]</sup>,这种模型因为考虑的参数比较少,而且所有参数都从遥感数据直接获得,在点上的精度可能不高,但因其面上的数据有很高的一致性,因而其结果在全球范围更能体现区域的差异.另一方面,在区域上,应该选择更符合区域情况的输入参数.

(5) 有些产品的算法陈旧.譬如,陆地气溶胶反演的算法是基于 1980 年代的暗物体算法<sup>[11]</sup>,为了满足算法的假设,空间分辨率只有 10 km,远远低于其用于提取气溶胶波段的 500 m 分辨率,而且对于厚气溶胶和亮表面只能进行屏蔽处理,这会极大低估气溶胶.最近,算法做了很多改进,例如加入更合理的气溶胶模式、更好的地表反射率估算等<sup>[12]</sup>,但算法精度依然低于其他算法<sup>[13]</sup>.

当然,从遥感算法到可运行的产品处理系统是一个非常复杂的过程,特别是生产全球产品更是具有很高的难度.一方面,各地的地表状况差别很大,算法要考虑的因素很多,在某些区域很好的算法,并不能适用于其他区域,同时,这种区域的差异性也加大了训练样本选择难度.另外,算法的简易高效性也非常重要,因为全球数据量非常巨大,如果算法很复杂,则不容易实现及时处理,这要求设计的算法既要有鲁棒性又要有可实现性;算法的发展日新月异,对于各种产品,设计出了各种不同的算法.但这些算法中,只有很少一部分算法适合于生成数据产品,很多算法只是处于一种概念模式,人工处理小范围数据或许可行,大范围的自动处理就

无能为力。而且,有时看似有很大改进的算法,其结果并不一定好,需要大量的第三方检验<sup>[14]</sup>,这也是很多新算法不能很快用于生产数据产品的原因。譬如,最近的 5.2 版气溶胶遥感算法是对 4.0 版的很大改进<sup>[12]</sup>,但是验证结果却表明,在有些方面,前者远没有后者精度高<sup>[15]</sup>。

目前有可能改进的产品算法:(1)气溶胶,基于背景知识的气溶胶反演算法不但可以提取更精确的气溶胶光学厚度,而且,可以提取气溶胶的粒度大小和单次反射率<sup>[16]</sup>。(2)NPP,基于全遥感的 NPP 模型,将可有效避免输入数据的不确定性,并可实现对 NPP 的实时观测<sup>[10]</sup>。(3)地表温度产品,由于地表温度和比辐射率高度耦合,两者的分离有很大难度,分裂窗算法需要假设地表的辐射率,而基于物理模型同时求解的白天/黑夜算法的稳定性很差,而基于中红外波段的算法可能具有更好的鲁棒性<sup>[17]</sup>。(4)LAI 产品,LAI 产品虽然采用了复杂的三维模型,但有些时候无法求解而不得不使用备份算法,这使得产品中出现时间序列的不一致的锯齿现象,更鲁棒的逐渐拟合逼近的算法可有效解决传统反演中不收敛的问题,找到一个最可能的值<sup>[18]</sup>。(5)BRDF 产品,目前的 BRDF 产品是以 16d 为单元,主算法要求 8d 晴空的条件过于苛刻,特别是对在热带雨林地区,而且在某些时段,16d 地表不变的假设也很难满足,因此需要设计能处理单景数据的算法。

另外,去除噪音逐渐引起重视,现在已经开始提供实验产品<sup>[19,20]</sup>。

## 2 MODISoft<sup>2</sup> 产品平台

MODIS 数据处理平台(MODISoft<sup>2</sup>)是一个完全拥有知识产权的、集成的 MODIS 数据处理平台。平台在参考 NASA 标准产品算法文档及最新 MODIS 定量遥感算法的基础上,开发出了符合 NASA MODIS 标准产品规范的高级产品。目前已经能够生产全部的大气产品及地表反射率、植被指数、火灾监测、地表温度、LAI、fPAR 等陆地标准产品,并包括了支撑数据处理所需的基础功能<sup>[21]</sup>。

在平台的设计上,采用开放式的接口,以目前 MODIS 数据特征为基础,并考虑未来遥感信息处理的需求,目标是逐渐发展成为可以兼容多种遥感

数据的通用定量遥感数据处理平台。目前,MODISoft<sup>2</sup> 支持 4 个数据的基础功能:数据基础处理功能、陆地产品处理、大气产品处理及灾害监测,将来还会扩展海洋处理模块。整个系统平台以 C++ 语言开发,除处理 HDF 的数据读写驱动使用自由软件外,其他的软件模块拥有完全的自主知识产权。软件运行无须除操作系统外的其他任何第三方软件支持。数据处理的核心模块采用标准的 C++ 语言开发,不依赖于任何特殊的编译器,以便于将来在各种操作系统平台中移植。在用户界面方面,提供了良好的窗口操作用户界面,用户只要具有 Windows 操作的基本知识,即可毫无困难的操纵软件完成所需要数据处理要求。

系统无须用户输入参数及辅助数据,一些需要辅助数据的产品,所需的辅助数据作为系统的一部分提供,许多需要其他数据输入的产品其输入数据尽量由数据本身生产,这一方面减少了多源数据带来的不必要的误差,也避免用户在不能获得外部数据时无法生产所需产品的困难。所有提供的辅助数据对用户是透明的,用户无须知道生产何种产品需要何种辅助数据,这对非遥感专业的用户特别重要,因为他们可能不具备了解生成某种产品的方法与流程的能力,所需要的只是最终的加工产品。

对于高级用户,系统也提供了全自动的处理功能。在处理大容量数据及复杂数据时,此项功能非常重要,只需要提供 MODIS 2B 的数据,系统会根据处理的要求进行全自动的处理,中间过程无须任何人的介入,特别适合于大规模的数据产品生产。系统为数据提供了多种数据格式支持,可以输出 HDF 及常用的 Geotiff 数据格式,并支持 Arcview 的 Shapefile 数据格式输出,这些功能更能适合中国用户的使用。

系统针对 MODIS 数据已经开发了多个新的处理算法:(1)适用于任何陆地表面的气溶胶与地表反射率的分离算法:MODIS 1、3 波段的比率具有很好的稳定性,其变化与植被指数有关,通过构建扩展暗物体方法,可以提高气溶胶的反演精度和空间分辨率;(2)陆地光合有效辐射(PAR)的算法:构建时间序列的地表反射率,直接从大气顶层反射率估算 PAR<sup>[22]</sup>;(3)考虑观测角度的 LAI/fPAR 反演算法:直接将观测角度引入反演模型中,采用渐进逼近的方式估算 LAI/fPAR<sup>[18]</sup>;(4)新的晴空

数据合成算法: 用最小可见光/近红外比值合成, 有效避免阴影的影响; (5) 精度更高的云检测算法: 采用动态阈值方法, 获得更精确的云检测; (6) 可用于单个观测值的地表 BRDF 参数反演算法: 采用模型或背景知识库最佳匹配方法, 可求出单景 BRDF 参数; (7) MODIS 数据内部噪声的检测方法: 基于双眼皮像元观测值相近的假设, 估算数据内部噪声<sup>[23]</sup>; (8) 时间序列的数据插值: 采用小波算法, 插值时间序列数据, 消除云等噪音的污染<sup>[20]</sup>; (9) 几何校正: 速度是 NASA 算法的 6 倍。

因为掌握了全套处理技术, 因而很容易以 MODISoft<sup>2</sup> 为基础构建快速反应监测系统, 例如以此为基础构建的林火自动监测系统已在国家林业局森林防火办作为业务系统运行。

### 3 总结与展望

目前, MODIS, AVHRR, Vegetation, SeaWiFs, POLDER, MERIS, AATSR, MMRS 等中分辨卫星传感器实现了 20 世纪 80 年代至今的地球环境生物物理监测。为了将这种监测延续下去, 学术界正在发展下一代的卫星传感器。MODIS 虽然是 EOS 重要的传感器, 但实际上是作为美国极轨环境卫星业务系统(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System, NPOESS)的一个实验传感器而非业务传感器设计的。下一代中分辨率传感器 NPOESS 将把现有的极轨卫星系统集成在一起, 收集和发布地球天气、大气、海洋、陆地和近太空环境数据, 成为天气预报和长时间气候研究的核心极轨卫星, 预计 2018 年升空。在 NPOESS 发射之前, NPOESS 预备星(NPOESS Preparatory Project, NPP)将作为过渡星率先于 2008 年升空, NPP 上搭载的可见光/近红外成像辐射计(Visible/Infrared Imager Radiometer Suite, VIIRS)是 MODIS 的替代传感器。目前, AVHRR 已经提供了自 1981 年以来的 20 年地球观测数据, MODIS 延续了 AVHRR 的观测数据。NPOESS 发射后, 将在现有 AVHRR 和 MODIS 的基础上, 持续对地观测, 并生产地表温度、地表反照率、植被指数等业务产品, 建立对地观测的长时间观测序列数据集, 这将成为地球系统科学研究的关键数据来源<sup>[24]</sup>。

MODIS 也为新一代卫星传感器系统的构建提供了

很多成功的经验, 如科学团队间保持密切交流、传感器升空后数据生产、算法发展、产品校正和验证、产品质量控制、处理系统开发、多传感器综合应用等方面都保持相当高的水准, 特别是 MODIS 的全开放性的工作机制, 更是前所未有的, 包括所有文档、算法、处理过程、源代码、原始数据及数据产品都可以从相关的网站免费下载。但是, MODIS 项目也暴露了一些管理上的问题: 如早期采用合同方式管理项目, 一旦成为产品专家, 不管做的好坏都会得到持续的经费支持。这虽然保持了研究队伍的稳定性, 但大批新成长起来的科学家被排除在外, 而有些产品却又无法生产, 这要求项目管理应有效平衡研究的持续性和竞争性。NASA 管理部门已经意识到这一问题, 在最近的产品更新中, 采用了项目申请替代以前的固定合同, 并将一大批优秀科学家加入到专家组中。另外, 产品科学家过于关注自己设计的算法而不将同期其他更好的算法融入产品算法中, 造成有些产品不能跟上最新的发展。这种机制上的问题说明, 尽管 MODIS 的管理已经非常开放和有效, 但还远没有达到理想的程度。

### 附录: MODIS 相关资源

- (1) MODIS 官方网站: <http://modis.gsfc.nasa.gov>, 包括相关的项目情况, 人员组成及算法文档、数据产品、不同研究组的链接;
- (2) MODIS 产品下载: WIST <http://wist.echo.nasa.gov/api/>
- (3) MODIS 1B 级产品及大气产品下载: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>
- (4) MODIS 快速反应系统: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>
- (5) MODIS 数据产品相关软件工具: <http://edcdaac.usgs.gov/datatools.asp>
- (6) NPOESS 网站: <http://jointmission.gsfc.nasa.gov/>; <http://www.ipo.noaa.gov/>
- (7) MODIS 海洋水色及海表温度产品下载: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
- (8) MODIS 同温层产品下载: <http://nsidc.org/daac/modis/index.html>
- (9) MODIS 陆地产品下载: <http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp>
- (10) 中国 MODIS 数据处理研究: <http://modis.cn>
- (11) 有关 MODIS 的两个杂志专辑:  
Eos AM-1 platform, instruments, and scientific data

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1045—1353

Special issue on the moderate resolution imaging spectro-radiometer (MODIS): a new generation of land surface monitoring, Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1—2): 1—359

### 参 考 文 献

- 1 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis in Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007, 996
- 2 King MD, Greenstone R, Bandeen W, et al. EOS Science Plan: The State of Science in the EOS Program. NASA, USA, 1999, 3—38
- 3 Salomonson VV, Barnes W, Masuoka EJ. Introduction to MODIS and an Overview of Associated Activities, in Earth Science Satellite Remote Sensing Volume 1: Science and Instruments. New York: Springer-Verlag, 2006, 12—32
- 4 Justice CO, Townshend JR. Data sets for global remote sensing—lessons learnt. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(17): 3621—3639
- 5 Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485—4498
- 6 Wolfe RE, Nishihama M, Fleig AJ, et al. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1—2): 31—49
- 7 Zhao M, Heinsch FA, Nemani RR, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164—175
- 8 Hicke JA. NCEP and GISS solar radiation data sets available for ecosystem modeling: Description, differences, and impacts on net primary production. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(GB2006), doi: 10. 1029/2004GB002391
- 9 Xiao XM, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 519—534
- 10 Drolet GG, Huemmrich KF, Hall FG, et al. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. Remote Sensing of Environment, 2005, 98: 212—224
- 11 Kaufman YJ, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8): 1357—1381

- 12 Levy RC, Remer LA, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D13211), doi: 10. 1029/2006JD007811
- 13 Liang SL, Zhong B, Fang HL. Improved estimation of aerosol optical depth from MODIS imagery over land surfaces. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(4): 416—425
- 14 Cohen WB, Maersperger TK, Yang Z, et al. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: A quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(3): 233—255
- 15 Jethva H, Satheesh SK, Srinivasan J. Assessment of second-generation MODIS aerosol retrieval (Collection 005) at Kanpur, India. Geophysical Research Letters, 2007, 34(L19802), doi: 10. 1029/2007GL029647
- 16 de Almeida Castanho AD, Martins JV, Artaxo P. MODIS aerosol optical depth retrievals with high spatial resolution over an Urban Area using the critical reflectance. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D02201), doi: 10. 1029/2007JD008751
- 17 Petitcolin F, Vermote E. Land surface reflectance emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1—2): 112—134
- 18 Liu RG, Chen JM, Liu JY, et al. Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 649—658
- 19 Moody EG, King MD, Platnick S, et al. Spatially complete global spectral surface albedos: Value-added datasets derived from terra MODIS land products. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(1): 144—158
- 20 Lu XL, Liu RG, Liu JY, et al. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(10): 1129—1140
- 21 Liu RG, Liu JY, Liang SL, et al. Mapping China using MODIS data: Methods, software and products. 遥感学报, 2007, 11(5): 719—727
- 22 Liu RG, Liang SL, He HL, et al. Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 998—1009
- 23 Liu RG, Liu JY, Liang SL. Estimation of systematic errors of MODIS thermal infrared bands. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(4): 541—545
- 24 Townshend JRG, Justice CO. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1): 351—359