中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 1 期: 49 ~ 60
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

进 展

全球变化科学卫星概念研究

郭华东[①*], 傅文学[①], 李新武[①], 陈培[②], 刘广[①], 李震[①], 王成[①], 董庆[①], 雷莉萍[①], 白林燕[①], 刘庆杰[①]

① 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094;
② 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191
* E-mail: hdguo@ceode.ac.cn

收稿日期: 2013-06-06; 接受日期: 2013-09-23; 网络版发表日期: 2013-12-19
国家重点基础研究计划(编号: 2009CB723900)资助

摘要 全球变化正在对人类生存与发展形成严峻挑战, 空间对地观测技术的宏观、快速、准确特点使其成为全球变化现象观测的一种关键技术手段. 我国是影响全球变化及受其影响最大的国家之一, 目前尚无专门针对全球变化研究的科学卫星. 发展全球变化科学卫星是我国的重要需求, 也是对国际的贡献. 在全球变化敏感因子的空间观测机理分析基础上, 研究了全球变化科学卫星概念, 继而提出发展由 7 类卫星组成的全球变化系列科学卫星的构想, 以便从空间高度对全球环境变化现象实施科学观测.

关键词
全球变化
敏感因子
对地观测
科学卫星

人类正面临着全球变化带来的巨大挑战. 根据国际科学理事会(ICSU)的定义, 全球变化是由自然因素或人类活动导致(或者强烈影响)的生物物理环境变化以及与之相关的社会、机构和人类福祉的变化. 这些变化要么产生在全球尺度, 要么产生在局地尺度但是扩展为全球现象(ICSU, 2011). 全球变化正越来越成为包括我国在内的世界各国关注的重大议题. 政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告(IPCC, 2007)指出: 20 世纪下半叶, 北半球平均温度很可能高于过去 500 年中任何一个 50 年期, 并可能是过去至少 1300 年中平均温度最高的 50 年; 2005 年大气中 CO_2 和 CH_4 的浓度远超过了过去 65 万年的自然变化范围. 与此同时, 环境污染、土地退化、物种灭绝和资源匮乏等一系列重大全球性环境问题愈来愈严重, 威胁着人类的生活方式和生存(Foley 等, 2005).

全球变化具有大尺度、长周期的时空演变特点, 是一个复杂的系统, 需要用多种理论和方法开展研究. 对地观测技术的宏观、动态、快速、准确探测特点, 使其在全球变化研究中具有独特优势. 从政府间气候变化专门委员会的评估报告、地球系统科学联盟(ESSP)、世界气候研究计划(WCRP), 到美国的气候变化科学计划(CCSP)都将空间观测技术的开发应用作为全球变化研究的重中之重(Alonso 等, 2008). 历经半个多世纪的发展, 已经形成对陆地、海洋、大气等层面的立体对地观测系统. 传感器工作波段覆盖了自可见光、红外到微波的全波段范围, 多系统的综合组网观测为全球变化现象精细观测提供了十分有效的技术手段.

在全球气候观测系统(GCOS)提出的 50 个关键气

中文引用格式: 郭华东, 傅文学, 李新武, 等. 2014. 全球变化科学卫星概念研究. 中国科学: 地球科学, 44: 49–60
英文引用格式: Guo H D, Fu W X, Li X W, et al. 2014. Research on global change scientific satellites. Science China: Earth Sciences, 57: 204–215, doi: 10.1007/s11430-013-4748-5

候变化变量(ECVs, http://gosic.org/ios/MATRICES/ECV/ECV-matrix.htm)中, 就有 28 个依赖于卫星观测. 卫星观测已经为全球变化研究提供了丰富的数据资料, 但仍然存在着一些不足, 主要表现为数据的连续性缺乏保障、数据的真实性存在很大的不确定性、多源遥感数据的组网观测还未达到最优化、数据同化处理还缺乏必要的尺度联系和校验、对地观测信息还未能真正满足模型参数的需求等(IPCC, 2007; FAO, 2011), 如对大气温室气体和全球森林碳的观测存在着不确定性, 以及如何实现 CO_2 与气溶胶的最优化协同观测, 提高 CO_2 反演精度也是值得研究的.

我国是受全球变化影响最严重的国家之一, 开展全球变化研究已是我国的重大政治、经济和社会需求. 我国已发射了一系列的遥感卫星, 但主要为行业卫星, 还没有运行中的面向全球变化研究的科学卫星(郭华东, 2010), 在全球变化研究和应用中受到很大制约, 以中国全境为对象的遥感环境变化研究也并不多(宫鹏, 2012). 开展全球变化科学卫星的研究具有重要的科学和社会意义.

1 全球对地观测卫星的发展

根据国际卫星对地观测委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)的全球卫星任务数据(CEOS, 2012)统计, 截至目前, 全球已发射对地观测卫星 200 余颗, 正在计划和规划至 2030 年的对地观测卫星也有 200 余颗. 这些对地观测卫星主要分为业务卫星和科学卫星(图 1). 在科学卫星中, 我们把从空间高度获取全球环境变化关键参数, 为解决全球环境变化重大科学问题提供空间数据支持的叫做全球变化科学卫星. 这里的重大科学问题主要包括地球系统的碳循环、水循环和能量循环、全球大气成份变化、人类活动对全球变化的影响、全球变化的过程及影响等. 全球变化科学卫星的科学内涵是: (1) 全球环境变化重大科学问题驱动; (2) 充分利用电磁波"资源"获取全球环境变化关键参数, 如 CO_2 柱浓度、气溶胶光学厚度、森林生物量、冰川面积等.

1.1 业务卫星

全球对地观测业务卫星已经发展到比较成熟的阶段, 20 世纪 60 年代以来已发射了大约 150 颗, 如 GOES, Resurs, NOAA 系列等. 我国已发射包括气象卫星、资源卫星、海洋卫星、环境卫星在内的一系列业务卫星. 这些卫星组成了全天候、立体、连续的观测网, 对大气、海洋和地表资源环境实现可靠稳定的观测, 大大增强了对地球系统的综合探测能力(Benesch, 2007; Kramer 等, 2008).

1.2 科学卫星

业务卫星的理论基础离不开科学卫星的研究成果. 人们对电磁波与地球系统参数之间的相互作用机理仍然存在着大量的未知, 全球变化敏感因子的观测方法及模式、多因子耦合过程的认识也存在着诸多的不确定性. 截至目前, 全球已发射了大约 66 颗对地观测科学卫星, 涵盖了可见光、近红外至微波波段, 为地球系统科学研究提供数据支持.

虽然地球上空已织就了一张规模宏大的对地观测网, 但真正的全球变化科学卫星并不多. 目前, 全球已发射的全球变化科学卫星约 25 颗, 在轨运行的约 13 颗, 其中比较典型的卫星有美国 NASA 的 AQUA, AURA, TERRA, ICESAT 和 OSTM 等, 欧空局(ESA)的 SMOS 和 CyroSAT, 日本 JAXA 的 GOSAT 等. 另外, 全球主要的对地观测机构都提出了新的全球变化科学卫星计划, 如 NASA 的 ACE, ASCENDS, CLARREO 计划等, ESA 的 EarthCARE 和 ADM-Aeolus 计划等, JAXA 的 GCOM 系列卫星等, 规划了至 2030 年的近 30 颗全球变化科学卫星, 超过了此前半个世纪的数量和观测能力, 显示出国际社会愈加重视全球变化的空间观测研究.

1.3 中国全球变化科学卫星

我国已发射了系列对地观测卫星, 基本建成了相对稳定的对地观测体系. 但面向全球变化研究的数据来源主要为行业应用卫星, 缺乏全球变化科学卫星. "十二五"期间规划的科学卫星主要是深空探测卫星, 近年开始研发碳观测卫星.

2 全球变化科学卫星观测敏感因子

关于全球变化研究的重要因子或者关键参数, 目前相关的国际研究和观测计划有一系列不同的定义和描述, 主要分大气、海洋、陆地这三个圈层来分别概括. 这里主要的体系有全球观测系统(GEOSS)的 3 大体系, 即全球气候观测系统(GCOS)、全球海洋观

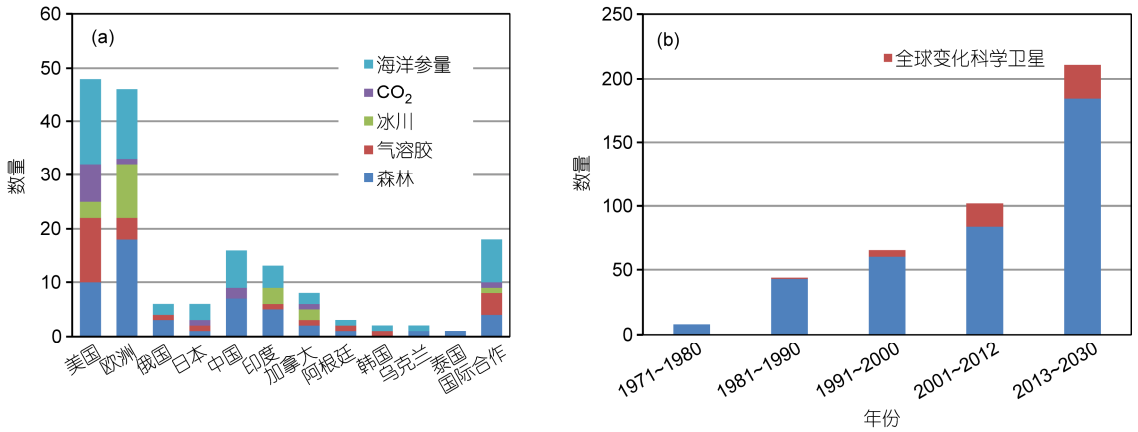

图 1　目前在轨运行的(a)和不同时期已发射及规划中的(b)对地观测卫星数量统计图

根据 CEOS 数据整理

测系统(GOOS)和全球陆地观测系统(GTOS), 以及政府间气候变化工作组(IPCC)等的体系. 这些体系大多是在详细列出各圈层的主要参数的基础上筛选出变化较为敏感的关键参数, 同时考虑空间技术的观测能力(USGCRP, 2012). 这些体系对各圈层主要参数的界定大大促进了星地观测的有效性和目标的凝练, 增加了数据的可比性和交流. 然而, 当前的体系一方面是各圈层分别考虑, 缺乏对地球系统中圈层之间的物质能量交换及人类因素等相互作用重要过程的把握, 特别是对关键的人为因素参量; 另一方面是对不断发展的空间技术在全球变化研究中的应用潜力没有足够的关注. 基于此, 我们从地球系统的关键过程和空间技术的探测潜力入手来刻画全球变化敏感因子(GCSVs)(郭华东等, 2013b), 包括两个层面的意思: (1) 这个因子是刻画全球变化的重要的参数, 即是可以表征地球系统可持续性的关键参数; (2) 它具有空间属性, 是可以通过空间观测的, 其特征是空间上高度的异质性和时间上小周期快速变化. 根据这些属性, 我们提出一些新的关键参数, 如大气中的黑碳、海洋的海岸带沉积和侵蚀、陆地的土壤有机质、水生生物量等, 同时还包括与人类活动有关的土地利用、人为热排放等.

全球变化敏感因子的空间属性使我们利用遥感技术对其进行有效观测成为可能. 由于自然或人为因素的驱动, 全球变化使自然的、规律的全球环境特征发生时空改变, 如 CO_2 和气溶胶的浓度改变影响了其光学特性, 冰川的面积变化影响其空间分布属性等. 这些性质的变化改变了地球系统因子的电磁波辐射、吸收、散射等物理特征, 构成了全球变化科学卫星宏观、实时观测全球变化规律与趋势的基础.

2.1　对陆地敏感因子的观测

陆表生态系统对全球变化的响应, 影响了植被光合作用、冰川冰盖及土壤水分等陆表因子. 陆表反照率、土地覆盖等的变化又对全球变化产生驱动(周广胜等, 2004). 这些过程改变了陆表的异质性、非朗伯性及反射特性, 使地物与电磁波之间的相互作用差异明显, 具有特定的全球变化“地物谱”及辐射散射特性. 以地学规律为基础, 考虑方向性、尺度效应、敏感度等, 建立空间观测的电磁波信息与地表参数之间的关系, 从而对陆表的全球变化信息进行特性分析.

2.2　对大气敏感因子的观测

电磁波在大气中传播时, 发生折射、散射、吸收、频散等物理效应, 同时大气也是电磁波发射源. 因此当大气的成分、温度、压力等大气状况发生变化时, 空间传感器接收的电磁波信号强度、相位、频谱和偏振状态等物理特征也将发生特定的变化, 携带了大气的现象过程及其与全球变化之间的响应反馈信息. 全球变化大气敏感因子的观测即基于传输机理从信号物理特征中甄别出这些特征信息.

2.3　对海洋敏感因子的观测

全球变化影响海平面动态异常、海水物理化学性质的变化, 进而引起全球尺度的海洋动力及生态环境变异. 海洋水体对电磁波的吸收、散射及辐射特征

由电磁波与水体相互作用的辐射传输过程决定, 水体的物质组成、海表特征状态等对电磁波信号有着重要的影响. 根据遥感参数与海洋全球变化因子之间的作用过程模型, 提取出海洋参数, 监测海洋的环流、表面温度、风系统、波浪、生物活动等.

3 全球变化系列科学卫星概念方案

基于我国目前全球变化科学卫星的观测能力比较薄弱以及我国全球变化研究的重大需求, 同时考虑大气、陆地、海洋和人类活动等全球环境变化研究中各自关键因子的优先性和重要性, 我们研究提出了全球变化系列科学卫星构想方案, 包括大气碳卫星、森林生物量卫星、夜间光卫星、气溶胶卫星、冰川卫星、海洋盐度卫星、及全球变化月基对地观测系统等 7 颗卫星. 从总体上说, 该 7 颗卫星的提出主要考虑了全球变化研究重大问题中的碳循环、水循环、能量循环等的空间观测需求, 同时还考虑我们国家在全球变化中对自主的空间观测数据需求等. 因此, 这 7 颗卫星的发展: (1) 对于解决全球环境变化重大科学问题至关重要. 如大气碳卫星和气溶胶卫星对研究人类活动对全球变化的影响至关重要, 森林生物量卫星可以研究陆地森林碳源碳汇的规律. (2) 可以有效应对我国对全球环境变化的研究需求, 如温室气体以及碳循环等, 对于我国开展国际外交至关重要. (3) 中国空间技术的迅猛发展为 7 颗卫星的发展发射提供了重要的技术基础和储备. (4) 提出的 7 颗卫星与国际及国内的卫星要么具有很强的互补性要么填补国内空白, 可以切实有效的提高观测有效性和满足国内需求.

3.1 大气碳卫星

碳卫星观测可以实时客观地捕捉到大气在观测时刻的 CO_2 浓度, 其观测具有统一、连续、覆盖范围广的优势, 相较于地面观测可以全面地覆盖全球各区域. 用于大气 CO_2 浓度观测的卫星可以分为两类: 一类是包含有大气 CO_2 的多种大气成分综合观测卫星, 主要有 AIRS/AQUA, IASI/METOP-A, SCIAMACHY/ENVISAT 等; 另外一类也是本文探讨的专门用于大气温室气体观测的碳卫星, 如目前在轨运行的 2009 年发射的 GOSAT, 以及同年发射失败的美国 OCO 卫星, 还有未来 10~20 年计划发射的 OCO-2, GOSAT-2, TanSat, CarbornSat 以及大气 CO_2 浓度主动遥感观测卫星 ASCENDS, ASCOPE 等.

未来卫星观测面临的挑战是需要敏感于区域排放贡献最大的近地层大气 CO_2 浓度的高精度和高时空分辨率全球覆盖的观测. 对于光谱波段的设置, 大气 CO_2 卫星观测基本是围绕敏感于排放与吸收的对流层大气 CO_2 吸收谱段 1.61 和 2.06 μm 的高光谱观测, 同时通过设置 0.76 μm 处的 O_2 吸收谱段用来最小化由地表气压、云、地形等引起的误差. 对于大气 CO_2 浓度的卫星观测反演误差要求最佳在 1 ppm 以下 (GCOS, 2011), 但也有研究指出在卫星观测反演精度达到 1~4 ppm 时, 应用到碳循环模型计算时可以改进碳源与汇的估算(Houweling 等, 2004; Hungershoefer 等, 2010; Bovensman 等, 2010). 浓度观测的反演精度主要依赖于传感器的硬件工艺技术和算法, 目前硬件工艺也还在不断的改进中, 算法中物理模型算法基本成熟, 而探索利用地面观测进行偏差的系统校正以弥补硬件工艺不足的算法也在不断的完善(Wunch 等, 2011). 目前唯一在轨运行的温室气体专用观测卫星 GOSAT, 从 2009 年发射后的观测开始, 经过算法的不断改进, 误差从 7~10 ppm 缩小到了 1~4 ppm (Yokota 等, 2009; NIES, 2010, 2012; 雷莉萍等, 2013). 对于时空分辨率的需求, 模拟分析指出, 在一般天气条件下, 如果要从大气本底浓度中定量的检测出大型火电厂的 CO_2 排放量, 其空间分辨率需要在 2 km×2 km; 时间分辨率在 6 d 以内(Bovesmann 等, 2010). GOSAT 观测空间分辨率只有 10.5 km, 虽然其 3 天覆盖全球一次, 但由于云的影响 GOSAT 观测到的全球数据中仅有约 5%的数据可用, 即使积累一个月的数据也还有很大范围的无数据区(见图 2 示例). 未来将发射的 OCO-2 卫星, 空间分辨率为 1.29 km×2.25 km, 观测目标精度为 1 ppm (Crisp 等, 2004), 观测周期为 15 d; 我国计划发射的 TanSat 空间分辨率在 4 km, 观测目标精度为 4 ppm, 观测周期 16 d. 这两颗星的观测周期均在半月左右, 意味着并不能在较短时间内获得对地表碳源和碳汇的重复观测.

由于我国硬件工艺还需要一定的时间发展, 而目前为给国家提供碳排放基础数据, 同时面向全球变化研究的需求, 满足基于模型的区域碳源与碳汇估算是当前卫星观测的迫切需求. 为此, 需要优先发展每 1~2 d 覆盖全球一次、2 km 以上空间分辨率的温室气体卫星观测技术, 而对硬件工艺要求比较高的

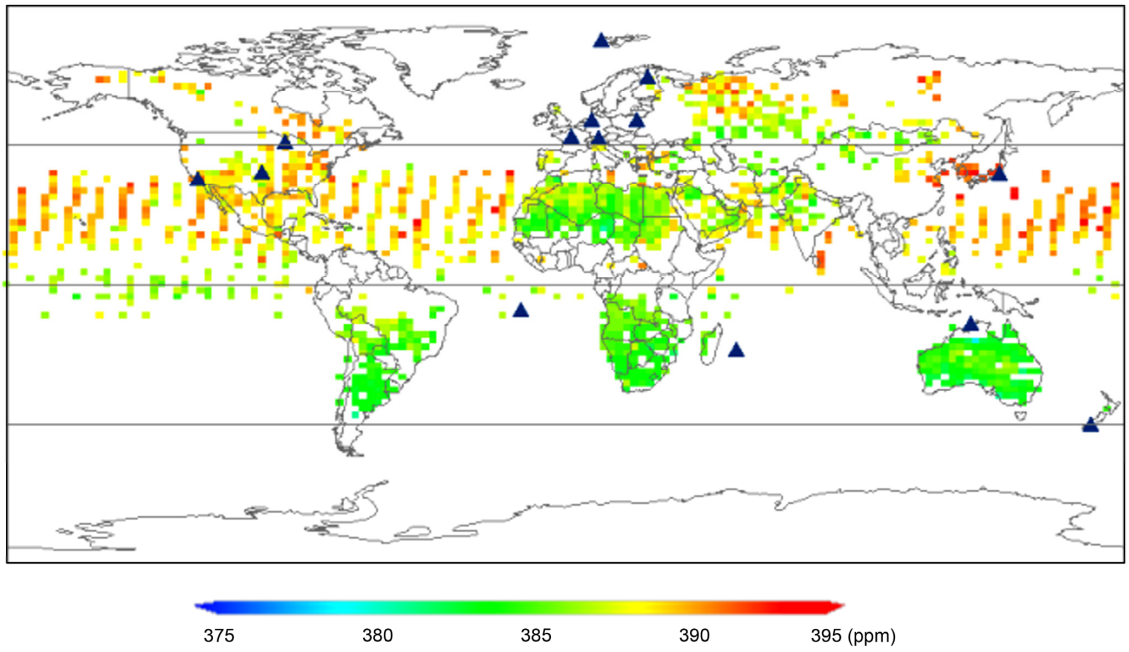

图 2　GOSAT 观测数据示例

2010 年 1 月 GOSAT 大气 CO_2 柱浓度数据, 2°×2°格网内 GOSAT 观测点平均数据. ▲为大气 CO_2 柱浓度地面观测站点

观测精度同时参照碳循环模型的需求可以适当放宽, 设置在 1~4 ppm. 同时, 为保障精确地反演 CO_2 浓度以达到 1~4 ppm 精度要求, 有必要设置极大影响浓度反演的大气气溶胶、地表反照率等参数的同步或准同步协同观测卫星或在同卫星搭载相应观测的传感器.

3.2　森林生物量卫星

森林在调节全球碳平衡, 减缓 CO_2 等温室气体浓度上升方面具有不可替代的作用. 全世界森林的碳储量超过 6500 亿吨, 由于森林总面积的下降, 全球森林碳储量正在下降(FAO, 2011). 森林的碳储量有 44%在生物量中, 目前对森林生物量空间分布的研究还存在着很大的不确定性, 关于森林在陆地碳汇中所起的作用, 至今没有形成一致的观点(FAO, 2011; 廖宏等, 2010). 因此, 在区域或者全球尺度上准确估算森林碳储量及其动态变化对全球碳循环和气候变化研究至关重要, 森林生物量的定量表达已经成为认识全球碳循环的关键要素之一. 对森林生物量进行研究不仅可以丰富碳循环科学的研究理论与方法, 更重要的是为全球变化研究提供科学依据. 同时, 我国是森林资源大国, 森林生物量卫星的精细观测可以更深入的研究我国在全球碳循环中的贡献.

3.2.1　激光雷达(LiDAR)

近年来迅速发展的激光雷达技术可以精确获取林分高度和三维结构信息, 在估算森林生物量上更具优势, 极大地提高了森林结构参数的估算精度(Wang 等, 2013). ICESat/GLAS 是全球第一个连续全球观测的星载激光雷达系统, 在服役 6 年后于 2009 年 11 月失效, 后续星 ICESat-2 计划于 2016 年 7 月发射.

星载激光雷达系统可以定量、连续获取区域乃至全球尺度高精度森林生物量, 有助于正确评估我国森林碳储量和时空变化, 充分认识我国森林在全球变化中的贡献, 为全球变化研究提供更为科学合理的数据支持. 同时, 全波形 LiDAR 已经用来估算冠层高度和地上生物量(Lefsky 等, 2005; Sun 等, 2008), 可使植被高度和生物量估计精度提高 5~10 倍(Dubayah 等, 2000). 在生物量达 1300 t/ha 的森林地区, LiDAR 数据和森林地上生物量的相关性仍然非常显著(Means 等, 1999).

激光森林生物量卫星可采用近极地太阳同步轨道, 以便于对全球范围进行观测. 采用全波形、高重复周期、高密度扫描的激光雷达观测系统. 考虑到普通乔木的平均冠幅大小以及林分水平的监测需要, 采用 10 m 的地面光斑大小. 为了达到整个地球表面的激光点均匀覆盖以及林分水平上的森林结构观测

需要, 激光点密度需要达到 2500 点/km^2. ICESat/GLAS 已经实现了森林结构参数的全球尺度制图(Miller 等, 2011), 而激光森林生物量卫星在激光光斑大小以及激光点密度方面更具优势, 因而可以实现较高精度的全球森林结构参数制图.

3.2.2 合成孔径雷达(SAR)

SAR 具有一定的穿透能力, 能反映森林的内部结构信息, 提供精确的生物量反演结果. 极化干涉SAR(PolInSAR)和 SAR 层析成像(SAR Tomography)技术的出现, 充分利用极化 SAR 的幅度和相位信息进行森林生物量建模反演也已经取得了理想的结果(Hajnsek 等, 2009; Tebaldini 等, 2008).

森林生物量卫星要能满足对全球大部分森林的监测. 与波长较短的波段相比, P 波段(波长: 70 cm, 频率: 435 MHz)具有更高的森林观测饱和度, 可以超过 200 t/ha, 且具有更宽的后向散射系数动态范围(Englharta 等, 2011). 同时, 研究表明(Hajnsek 等, 2008), 长达 30 天的时间间隔内, P 波段在温带森林仍然能保持很高的相干性(相干性为 0.9), 因此森林生物量 SAR 卫星可采用 P 波段. 目前国际上还没有运行中的星载 P 波段 SAR 系统, 欧空局正在规划的 P 波段 BIOMASS 卫星采用 50~60 km 的幅宽, 对全球大范围森林生物量的观测的能力不足, 而且也难以满足对我国森林重点观测的需求.

发展我国的 P 波段 SAR 森林生物量卫星, 在空间分辨率的选择上, 高分辨率会破坏森林信号的统计特性, 也会使图像幅宽下降, 而低分辨率又不能体现森林的细节信息, 因此二者兼顾可采用 50 m×50 m 左右的中等分辨率. 为实现多极化及极化干涉 SAR 的应用, 采用紧缩极化模式, 可以有效增大成像幅宽, 也有利于消除电离层的影响. 在轨道选择上, 太阳同步晨昏轨道一方面可以有效减小电离层扰动的影响, 另一方面对于主动雷达卫星的太阳能电池板能始终被阳光照到, 以保证卫星电量的供应. P 波段 SAR 还可以与前述激光雷达协同观测, 既可以提高激光雷达的空间分辨率, 也可以提高 P 波段 SAR 的反演精度, 实现优势互补. 采用宽幅模式达到对我国森林每年覆盖一次、全球森林 5 年覆盖一次的观测能力.

3.3 夜间光卫星

城市化是人类文明的重要进程. 城市系统在全球社会、经济、文化、政治和环境体系中发挥着重要作用, 同时也带来空气污染、热岛效应、地表径流增多、水质恶化、土地类型变化等环境问题(Gong 等, 2012). 国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)已关注于城市化与全球变化相互关系及相互作用机制的研究. 夜间灯光数据是人类活动的重要标志(Zhang 等, 2011), 也是在空间领域表征当前人类社会城市化的一个最直接的特征. 近年来, 夜间灯光数据越来越多地被用来研究全球或区域尺度的城市土地覆盖、人口估算、经济活动等城市化关键要素的快速评估与空间综合分析, 尤其在全球尺度的城市化分析方面具有无可比拟的优势. 全球及区域夜间灯光的多维多尺度研究有助于全球环境变化与人类环境耦合规律的认识和理解. 目前对城市化的时空变化规律研究, 存在时间尺度和空间尺度的不完整(Taubenbock 等, 2012), 全球环境变化与人类环境的交互作用规律亦尚在研究之中.

目前用于全球夜间灯光观测的卫星比较少. 美国军事气象卫星 DMSP 搭载的 OLS 传感器提供了最常用、最完整的全球夜间灯光对地观测数据, 但存在空间分辨率过低、缺乏在线定标、信号过饱和、波段单一等不足(Elvidge 等, 2007), 后来虽进行过在线定标的努力, 但由于硬件设备的限制, 依然不能完全满足完全定量化分析的需要; 国际空间站(ISS)的 Kodak-Nikon 760 仅在短时间内提供过夜间灯光数据; 美国国家极轨环境卫星(NPOESS)的 VIIRS 传感器也仅提供一个白天/夜间波段(Day/Night Band, DNB)的低空间分辨率的夜间灯光辐射数据, 可以进行更高定量化程度地快速分析. 利用卫星、国际空间站、航空、地面平台, 进行城市夜间光光谱特征以及夜间光对地观测模式的综合实验研究, 指出了利用夜间光对地观测在城市化快速动态监测中的广阔应用前景. 中国目前正在经历着快速的城市化, 如何对城市化进程进行动态有效监控, 并对不同环境承载力下的城市化环境(如: 热环境等)影响进行评估, 对于政府的决策具有重要的现实意义. 因此, 对于全球尺度的城市化环境耦合作用研究, 发展可用于城市化综合分析的夜间灯光对地观测卫星具有重要的科学意义, 可为定量化分析全球城市化的类型、阶段、过程提供空间观测的技术支持.

夜间灯光观测卫星可以采用多光谱(4~6 个波段)的可见光近红外波段, 形成与其他卫星的白天/夜间

观测互补的虚拟多星座观测模式, 既可以有效地降低成本, 又可以实现对全球主要陆地区域的有效观测. 另可增加一个多光谱(2~3 个波段)热红外波段传感器, 可以实现城市化温度的同步观测, 满足城市化过程中热环境的研究需求. 采用太阳同步近极轨飞行模式, 实现每天覆盖全球一次.

3.4　气溶胶卫星

气溶胶在全球气候变化中扮演着重要的角色, 通过散射和吸收太阳辐射及地面反射直接影响地-气系统的辐射收支平衡(Twohy 等, 1995; Rosenfeld, 2000), 从而对气候产生影响. 气溶胶还与环境问题密切相关, 其光学厚度与 $PM_{2.5}$ 具有强相关性(图 3), 严重损害人类的健康.

气溶胶的时空分布受其排放源和大气活动等多因素影响. IPCC 评估报告中有关气溶胶直接辐射强迫的认识水平为“中-低”, 间接辐射强迫的认识水平为“低”(IPCC, 2007), 对全球变化贡献的定量表达仍不精确. 利用卫星遥感数据反演大气气溶胶光学特性, 研究其空间分布特征, 是目前广泛应用的可信可行的技术手段. 随着卫星传感器的不断发展, 已经初步建立了气溶胶光学特性监测的空间观测技术体系. 然而, 目前在轨运行卫星上搭载的具有大气气溶胶探测能力的传感器, 大多数仅能提供气溶胶光学厚度参数, CLIPSO 能够提供大气层垂直结构信息. 然而这些卫星对气溶胶组分类型探测能力弱, 对一些特殊下垫面(积雪、山地、城市等)地区探测能力不足(Fraser 等, 1985; Guang 等, 2012; Li 等, 2007), 而且在部分低纬度地区监测频次低.

因此, 准确监测气溶胶可为区域和全球气候模拟预测提供准确大气气溶胶总量、性质及分布信息, 对气溶胶的时空变化及其迁移进行动态监测; 同时准确监测气溶胶可为进一步查明气溶胶与云、降水的相互关系提供基础数据, 以便更加准确地估算气溶胶的间接气候效应, 从另一方面为全球气候变化模拟与预测提供数据支持.

气溶胶卫星采用极地轨道, 并与本文所提出的大气碳卫星形成组网观测, 在其之前数分钟内过境, 为大气碳卫星提供气溶胶和云信息. 采用可见光、近红外和红外通道, 中心波长在 0.4~2.3 μm, 包含用于气溶胶监测的可见光波段、云及大气中水汽监测的近红外、红外波段. 空间分辨率在 0.5~2 km 之间.

3.5　冰川卫星

冰川变化是全球变化研究中的一个独特而重要的领域, 是全球气候变化极好的代用指标和依据. 冰川过程以其独有的方式记录或反馈全球环境气候变化, 气温、降水与冰川进退、物质平衡密切相关. 除极地的冰盖冰川外, 冰川主要分布在欧洲、北美和中亚等地区. 这些冰川在全球变暖的环境下正在不断

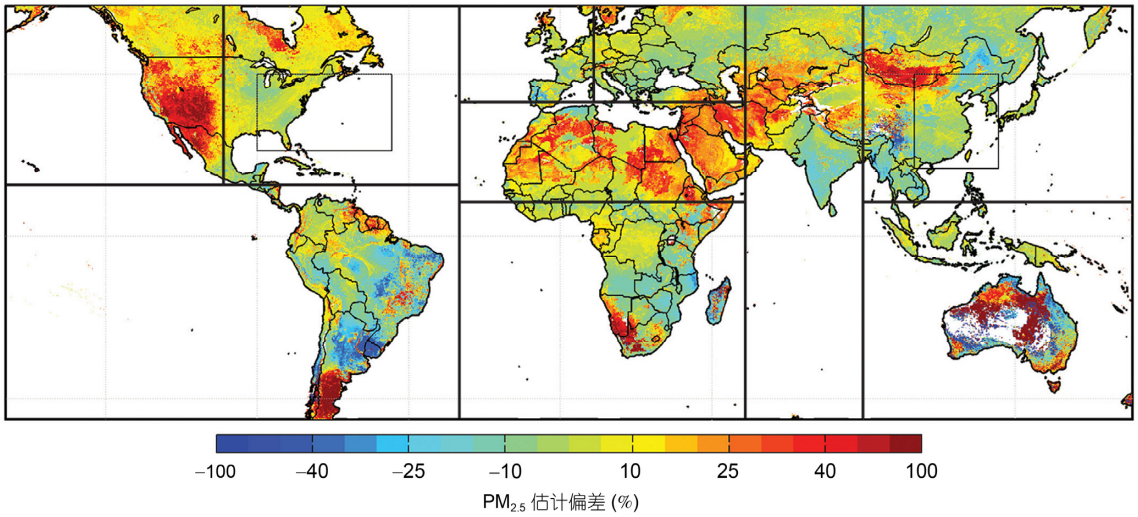

图 3　基于空间观测技术的 $PM_{2.5}$ 估计偏差

偏差定义为(估计值−真值)/真值(Donkelaar 等, 2010)

的消融, 致使海平面不断上升, 加剧了全球淡水资源的紧缺, 成为威胁人类生存的潜在因素. 我国冰川总面积 59406 km^2, 储存冰川水资源为 5590 km^3(姚檀栋, 2003), 是第四大冰川资源国(施雅风, 2005). 最新研究表明, 受全球气候变化的影响, 过去 30 年来青藏高原及其周边地区的冰川变化具有明显的系统性差异, 地域变化较大, 喜马拉雅山脉呈强烈的冰川萎缩, 尤其是受季风影响的区域. 冰川萎缩程度一般是从喜马拉雅山向高原内部递减, 在帕米尔高原萎缩程度最小(Scherler 等, 2011; Yao 等, 2012; Li 等, 2012).

遥感卫星对冰川的监测, 现在主要集中在冰川面积、体积变化和冰川运动速度探测等方面(Zhou 等, 2011). 光学卫星在冰川面积变化提取上优势明显; 高度计卫星, 如 ICESAT 卫星激光雷达可通过激光脉冲测得冰川的表面高度, CrySat-2 利用雷达高度计, 可对冰川厚度、面积等状况进行精确测量; 重力卫星如 GRACE 可通过重力平衡大尺度分析冰川的物质平衡(Sheperd 等, 2012); 而雷达卫星 SAR 数据, 在区分冰川和非冰川区、探测冰川移动、高度变化分析、冰川雪线提取等方面有着巨大优势. 20 世纪发射的 JERS-1, ERS, Radarsat-1 等卫星, 以及 21 世纪初发射的 ENVISAT 和 ALOS 卫星, 都在冰川研究中得到了较好的应用. 新一代的卫星如 Radarsat-2, TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed SAR 等有效地解决了轨道精度、分辨率较低的问题, 但是这些卫星都是商业卫星, 数据费用昂贵, 数据获取控制权在国外, 限制了我们的应用. 因此, 我国以此为契机研制新一代冰川科学卫星, 将为全球冰川变化研究提供强有力的数据支持, 并且冰川科学卫星的研制将进一步促进 SAR 技术的进步, 提高我国 SAR 卫星的技术水平.

冰川集中分布在极地和高原, 通常气候恶劣, 冰川常年有积雪覆盖, L 波段 SAR 信号穿透云雨、积雪的能力强, 在采用干涉技术监测冰川时可以获得更高的相干性(图 4), 可以提高监测精度(周建民等, 2009). 冰川表面物质的探测、表面分类、积雪深度等需要全极化或双极化数据; 而对冰川整体移动速率、冰流监测、冰川地形绘制等需要干涉雷达技术, 单极化数据是更好的选择, 因此可采用全极化或可选单极化模式. 采用近极地太阳同步轨道, 能更好的观测极地冰川. 为减小去相干的影响, 可考虑多星座组网观测的模式.

3.6 海洋盐度卫星

海洋变化不仅是全球变化的一部分, 更有可能是导致全球变化的动因之一. 海洋盐度是海洋环境动力学重要参数, 也是全球变化的指示参数之一. 盐度的变化与海洋环境及全球气候变化息息相关, 是研究环流、全球海平面变化等海洋现象中必不可少的环境变量, 而且也为水团分析以及全球海洋模式等研究提供了参数依据. 另外全球海洋表层盐度的观测精度的提高有助于改进数值预报模式(Reynolds 等, 1998).

海洋盐度参数对于 ENSO 事件的研究和准确预报具有重要意义. 全球水蒸气蒸发的 86%和降雨的 78%发生在海洋表面, 淡水输入输出和海表盐度密切相关. Lukas 对西太平洋暖池区降水量和蒸发量进行了分析, 结果显示, 盐度降低 1 psu(practical salinity unit)可以使海面升高 0.1 m, 使赤道潜流流速减小 0.25 m/s (Lukas, 1990). 这些现象对于深入研究 ENSO 事件的机制有着重要影响. 另一方面, 盐度测量为估计海洋吸收释放/CO_2 提供可靠的参量依据. 因此海表盐

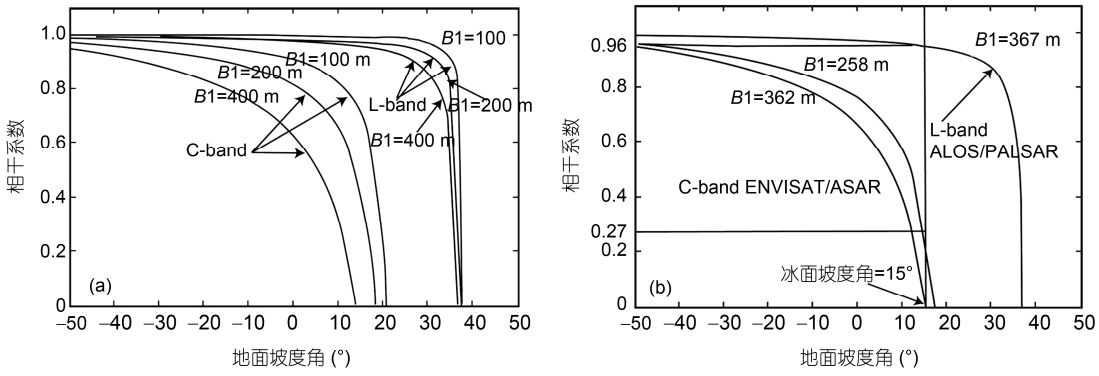

图 4　C 波段和 L 波段雷达图像在不同地面坡度、垂直基线(B1)情况下的空间相干系数(据周建民等, 2009)

度的精确测量, 对研究海洋学、海洋环境和全球气候等具有十分重要的科学意义.

海洋盐度空间观测研究需要越来越精细地对影响海水辐射亮温的因素进行研究, 需要建立适合星载的轻量、大口径天线的微波辐射计, 并且在盐度反演中还需利用辅助信息, 如: 海水的温度、海面的粗糙度等(李青侠等, 2007). 海洋盐度卫星能提供高时间(周平均或者旬平均)和空间分辨率的全球海表盐度数据, 为全球变化提供关键的海洋参数, 并改善对海洋环流模式的理解, 有助于更好的理解地球水循环. 欧空局的 SMOS 卫星是海洋盐度与土壤湿度卫星, 重访周期为 3 d. SMOS 卫星关键任务之一是提供空间分辨率大约 100 km, 精度为 0.1~0.2 psu 的全球海表面盐度分布. Boutin 等人对 SMOS 的盐度产品进行了印证, 结果显示: 在开放海域, 当风速 3~12 m/s, 分辨率为 100 km×100 km 时, 升轨 10 d 观测所得平均海表盐度精度为 0.4 psu (Boutin 等, 2011), 这与其设计目标相差较大. 美国 NASA 的 Aquarius 卫星在反演的海表盐度精度上, 距离其 0.1~0.2 psu 的目标也有不少差距(Ebuchi 等, 2012), 未能满足全球变化与海洋循环研究的需要. 我国目前关于海洋循环的高精度卫星数据稀少, 随着经济的发展和科技投入, 中国未来 5~10 年完全有能力研发更高辐射精度和分辨率的微波辐射计传感器. 对于中国海洋盐度卫星设计需要考虑提高传感器辐射精度和海表盐度反演精度, 缩短重访周期等.

我们对不同雷达频率下海表盐度对海表亮温的影响进行了模拟计算, 发现当频率为 0.75 和 1.41 GHz 时, 海表亮温对于海表盐度的变化比较敏感(图 5(a)). 为了避免电磁波干扰, 采用无线电天文学预留的受保护的 L 波段(1.41 GHz)微波辐射计更为合理. 而在入射角相同时, 海表盐度对亮温的影响 V 极化比 H 极化更加敏感(图 5(b)), 随着入射角的增加, V 极化的海表亮温增加, H 极化则降低, 因此采用全极化模式, 以实现多极化的综合观测. 采用太阳同步轨道可以有效减少太阳耀斑对辐射的影响.

3.7　全球变化月基观测

目前, 基于星-机-地观测平台仍然只能同时对地球上有限区域的科学现象进行短暂观测, 对于全球变化这种大尺度科学现象观测数据获取周期长, 难以满足全球尺度、周期性动态变化的宏观地球科学现象必须具有的空间一致性和时间一致性, 即需要在相对一致的观测时间段内获得大区域的空间连续覆盖的需求. 月球是地球唯一的自然卫星, 也是人类目前唯一到达的星球, 在月球上布设传感器, 利用月球作为对地观测平台来对全球尺度的科学现象进行研究, 通过提高载体平台的高度, 建设持续的地球全球观测能力, 对于实现长期连续的大区域全球变化和宏观地球科学现象的观测具有重要意义.

月球作为对地观测平台具有独特优点: 月表处于超高真空状态, 有一面总是朝向地球, 可以对地球上的同一地区进行长时段、可变视角的快速观测, 可同时观测到地球半球的全景, 稳定性也是卫星无法

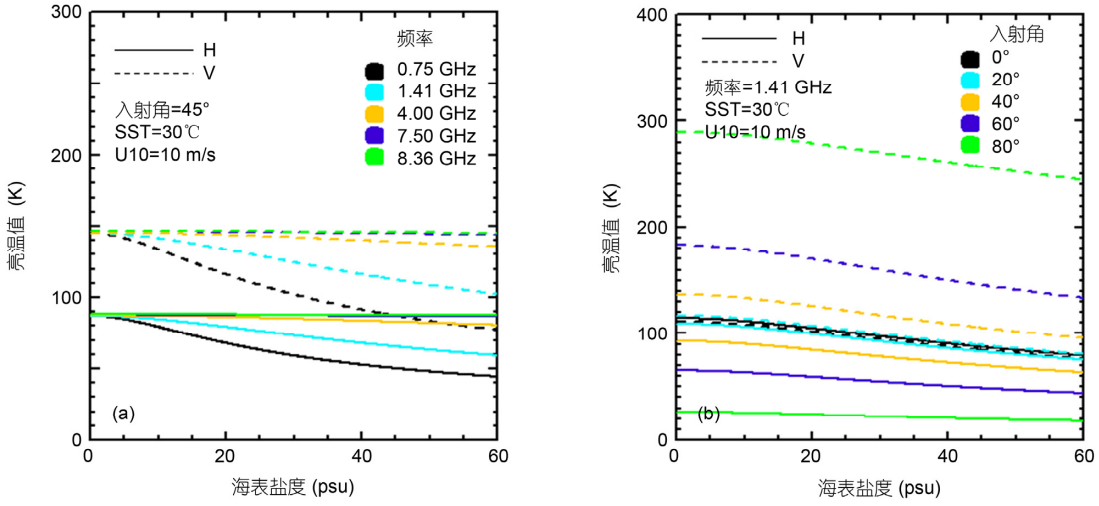

图 5　不同雷达频率(a)和入射角(b)下的海表盐度对海表亮温的影响

比拟的. 我们对近地轨道卫星(LEO)、中轨卫星(MEO)、地球静止轨道卫星(GEO)、高轨卫星(HEO)、拉格朗日点卫星(L1)及月基对地观测(MOONBASED)几种对地观测平台的特征进行了分析比较(表 1), 分析表明月基传感器可对地球上发生的大尺度、动态变化等宏观地球科学问题在全球尺度进行时间连续、空间同步对比观测, 获得更为丰富的全球变化信息.

针对全球变化等科学现象的对地观测战略需求, 全球变化月基观测的科学目标是要研究月基对地观测的方法体系, 并确定适合于月基对地观测的科学现象及相应的仪器参数及观测方式, 最终建立月-星-机-地一体化的综合观测系统, 实现对地球的气候变化、生态演化、环境污染和各种自然灾害进行高精度的观察和监视, 为全球变化研究提供更为理想的遥感技术支撑.

月基平台可采用高分辨率光学相机、合成孔径雷达传感器, 具有高分宽幅连续观测的能力, 幅宽可达千公里级, 分辨率可在 50~1000 m, 观测模式可以在同一地点布设大量的传感器组, 采用阵列的观测方式, 形成主被动协同观测(郭华东等, 2013a).

综上, 全球变化系列科学卫星的探测因子、科学目标及参数规划总结见表 2.

表 1　几种对地观测平台的特征比较

	LEO	MEO	GEO	HEO	L1	MOONBASED
空间分辨率	高	高	高	低	低	低
重复获取频率	一般较低	一般较低	高	一般较低	高	高
覆盖范围	小	小	小	小	大	大
生命周期	最短	较短	短	短	长	长
费用	少	多	多	多	高	高
定标	差	差	差	差	差	优
稳定性	低	中	中	中	高	高
可维护性	难	难	难	难	难	易

表 2　全球变化系列科学卫星方案

卫星名称	探测因子	科学目标	卫星参数
大气碳卫星	CO_2	降低碳源汇时空分布不确定性; 定量化 CO_2 浓度增加对全球变暖的贡献; 预测未来 CO_2 浓度变化	空间分辨率: 2 km×2 km, 1~2 d 全球覆盖一次; 波段: 1.5~2.1 μm
森林生物量卫星 激光雷达	森林生物量、森林高度、数字地形、森林碳	监测全球的森林生物量及分布, 改善生物量模型; 监测全球森林生物量变化, 为陆地碳源汇研究提供数据; 正确理解森林在全球气候变化中的作用	波长: 1064 nm; 发射脉冲宽度: 5 ns; 光斑直径: 10 m; 激光点密度达到 2500 点/km^2
森林生物量卫星 SAR			P 波段 SAR; 紧缩极化; 空间分辨率: 50 m×50 m; 对我国森林每年覆盖一次、全球 5 年覆盖一次
夜间光卫星	夜间光	满足全球变化与城市化交互作用科学研究的需求; 定量化分析全球城市化的类型、阶段、过程	多光谱可见光近红外波段及热红外波段传感器; 太阳同步近极轨模式, 每天覆盖全球一次
气溶胶卫星	气溶胶、水汽	提升气溶胶监测能力; 增加区域气溶胶监测信息量; 为全球气候变化模拟与预测提供数据支持	波长: 0.4~2.3 μm; 空间分辨率: 1~2 km; 采用极地轨道, 与大气碳卫星形成组网观测
冰川卫星	冰川变化、数字地形	研究冰川对全球变化的响应; 探索冰川变化对生态环境资源的影响	L 波段 SAR; 全极化和可选单极化; 空间分辨率: 5~100 m; 近极地太阳同步轨道
海洋盐度卫星	海洋盐度	提供高时空分辨率的全球海洋盐度数据; 改善对海洋环流模式的理解; 对 ENSO 等事件更准确地研究和预测	L 波段微波辐射计; 采用全极化模式, 并采用综合孔径; 太阳同步轨道
全球变化月基观测系统	太阳辐射、冰川、大气成分、植物物候、冰盖	对地球的大尺度、动态问题的细致和连续观测; 提高全球变化敏感因子的遥感动态监测水平	高分辨率光学相机、合成孔径雷达, 幅宽: 千公里级; 连续观测; 分辨率: 50~1000 m

4 结语

全球变化是人类共同面临的紧迫问题, 对地观测技术在这一重大问题上承担着重要的使命. 在全球变化背景下全面而深刻的研究地球系统的关键过程, 无一例外地对对地观测科学卫星提出了新的需求. 传感器技术和新观测理论的发展, 使人类可以构建长期、稳定的综合对地观测技术, 以更为理想的参数和模式实现对全球变化因子的观测.

我国的空间观测技术近年来已有长足的进步, 在大力发展业务卫星的同时, 以应对人类生存所面临的全球变化问题为主要科学目标, 构建我国有特色的全球变化科学卫星观测系统. 本文所涉及的 7 颗卫星仅为首批研究内容, 我们的研究工作仍将继续, 为形成我国的全球变化科学卫星计划而努力, 为我国和全球的全球变化研究做出贡献.

参考文献

宫鹏. 2012. 拓展与深化中国全境的环境变化遥感应用. 科学通报, 57: 1379–1387

郭华东. 2010. 全球变化敏感因子的空间观测与认知. 中国科学院院刊, 25: 167–169

郭华东, 丁翼星, 刘广, 等. 2013a. 面向全球变化探测的月基成像雷达概念研究. 中国科学: 地球科学, 43: 1760–1769

郭华东, 朱岚巍. 2013b. 空间观测全球变化敏感因子的机理与方法. 中国科学院院刊, 28: 525–530

雷莉萍, 关贤华, 曾招城, 等. 2014. 基于 GOSAT 卫星观测的大气 CO_2 浓度与模型模拟的比较. 中国科学: 地球科学, 44: 61–71

李青侠, 张靖, 郭伟, 等. 2007. 微波辐射计遥感海洋盐度的研究进展. 海洋技术, 26: 58–63

联合国粮食与农业组织. 2011. 2010 年森林资源评估: 主报告. 粮农组织林业文集. 163

联合国政府间气候变化专门委员会. 2007. 气候变化 2007: 综合报告. IPCC, 瑞士, 日内瓦

廖宏, 朱懿旦. 2010. 全球碳循环与中国百年气候变化. 第四纪研究, 30: 445–455

施雅风. 2005. 简明中国冰川编目. 上海: 上海科学普及出版社

姚檀栋. 2003. 要高度重视西部大开发中的冰川水资源问题. 中国科学院院刊, 18: 58–60

周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 等. 2004. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展. 气象学报, 62: 692–707

周建民, 李震, 李新武. 2009. C-band 和 L-band 雷达干涉数据西部冰川区域相干性对比分析. 国土资源遥感, (2): 9–13

Alonso B, Valladares F. 2008. International efforts on global change research. In: Chuvieco E, ed. Earth Observation of Global Change: The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment. Heidelberg: Springer. 1–21

Benesch W. 2007. 60 Years Operational Satellites: An overview from the beginning of operational satellite applications at an NMS up to 2030. The Joint 207 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference and the 15th American Meteorological Society (AMS) Satellite Meteorological & Oceanography Conference. 24–28

Boutin J, Martin N, Yin X, et al. 2011. First assessment of SMOS measurements over open ocean: Part II. Sea surface salinity. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 99: 1–14

Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J P, et al. 2010. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO_2 emissions from space and related applications. Atmos Meas Tech, 3: 781–811

CEOS (The Committee on Earth Observation Satellites). 2012. The Earth Observation Handbook. UK: Symbios Spazio Ltd

Crisp D, Atlas R M, Breon F M, et al. 2004, The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. Adv Space Res, 34: 700–709

Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, et al. 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application. Environ Health Perspect, 118: 847–855

Dubayah R, Drake J. 2000. Lidar remote sensing for forestry. J Forest, 98: 44–46

Ebuchi N, Abe H. 2012. Evaluation of sea surface salinity observed by Aquarius. IEEE Geosci Remote Sensing Symposium, 1: 5767–5769, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6352300

Elvidge C D, Cinzano P, Pettit D R, et al. 2007. The nightsat mission concept. Int J Remote Sens, 28: 2645–2670

Englharta S, Keuck V, Siegert F. 2011. Aboveground biomass retrieval in tropical forests: The potential of combined X- and L-band SAR data use. Remote Sens Environ, 115: 1260–1271

Foley J A, DeFries R, Asener G P, et al. 2005. Global consequences of land use. Science, 306: 570–574

Fraser R S, Kaufman Y J. 1985. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 23: 625–633

Global Climate Observing System (GCOS). 2011. Systematic observation requirements for satellite-based data products for climate (2011 update). WMO, Geneva, Switzerland

Gong P, Liang S, Elizabeth J C, et al. 2012. Urbanisation and health in China. Lancet, 379: 843–852

Guang J, Xue Y, Lia Y J, et al. 2012. Retrieval of aerosol optical depth over bright land surfaces by coupling bidirectional reflectance distribution function model and aerosol retrieval model. Int J Remote Sens, 3: 577–584

Hajnsek I, Kugler F, Lee S K, et al. 2009. Tropical-Forest-Parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 47: 481–493

Hajnsek I, Scheiber R, Ulander L, et al. 2008. BIOSAR 2007: Technical assistance for the development of airborne SAR and geophysical measurements during the BioSAR 2007 Experiment. ESA contract No. 20755/07/NL/CB (Final Report)

Houweling S, Breon F M, Aben I, et al. 2004. Inverse modeling of CO_2 sources and sinks using satellite data: A synthetic inter-comparison of measurement techniques and their performance as a function of space and time. Atmos Chem Phys, 4: 523–538

Hungershoefer K, Breon F M, Peylin P, et al. 2010. Evaluation of various observing systems for the global monitoring of CO_2 surface fluxes. Atmos Chem Phys, 10: 10503–10520

ICSU (International Council of Scientific Unions). 2011. Earth System Sustainability Initiative. ICSU Report, Paris

Kramer H J, Cracknell. 2008. An overview of small satellites in remote sensing. Int J Remote Sens, 29: 4285–4337

Lefsky M A, Harding D J, Keller M, et al. 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. Geophys Res Lett, 32: L22S02

Li Z Q, Niu F, Lee K H, et al. 2007. Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China. J Geophys Res-Atmosph, 112: D22S07, doi: 10.1029/2007JD008479

Li Z, Xing Q, Liu S, et al. 2012. Monitoring thickness and volume changes of the Dongkemadi ice field on the Qinghai-Tibetan Plateau (1969–2000) using Shuttle Radar Topography Mission and map data. Int J Digit Earth, 5: 516–532

Lukas R. 1990. The role of salinity in the dynamics and thermodynamics of the western Pacific warm pool. International TOGA Scientific Conference Proceedings, 379: 73–81

Means J E, Acker S A, Harding D J, et al. 1999. Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. Remote Sens of Environ, 67: 298–308

Miller M E, Lefsky M, Pang Y. 2011. Optimization of Geoscience Laser Altimeter System waveform metrics to support vegetation measurements. Remote Sens Environ, 115: 298–305

NIES GOSAT Project. 2010. Algorithm theoretical basis document for CO_2 and CH_4 column amounts retrieval from GOSAT TANSO-FTS SWIR, NIES-GOSAT-PO-017, V 1.0

NIES GOSAT Project. 2012. Summary of the GOSAT Level 2 data Products Validation Activity

Reynolds R W, Ji M, Leetmaa A. 1998. Use of salinity to improve ocean modeling. Phys Chem Earth, 23: 543–553

Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. Science, 287: 1793–1796

Scherler D, Bookhagen B, Manfred R S. 2011. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. Nat Geosci, 4: 156–159

Sheperd A, Ivins E, Geruo A, et al. 2012. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. Science, 338: 1183–1189

Sun G, Ranson K J, Kimes D S, et al. 2008. Forest vertical structure from GLAS: An evaluation using LVIS and SRTM data. Remote Sens Environ, 112: 107–117

Tebaldini S, Rocca F. 2008. Polarimetric SAR Tomography of forested area: A covariance matching approach. EuSAR 2008

Taubenbock H, Esch T, Felbier A, et al. 2012. Monitoring urbanization in mega cities from space. Remote Sens Environ, 117: 162–176

Twohy C H, Durkee P A, Huebert B J, et al. 1995. Effects of aerosol particles on the microphysics of coastal stratiform clouds. J Clim, 8: 773–783

USGCRP. 2012. US Climate Change Science Program Strategic Plan 2011–2020. Washington D C: the National Academies Press

Wang C, Tang F, Li L, et al. 2013. Wavelet analysis for waveform decomposition of ICESat/GLAS data and its application in tree height estimation. IEEE Geosci Remote Sensing Lett, 10: 115–119

Wunch D, Wennberg P O, Toon G C, et al. 2011. A method for evaluating bias in global measurements of CO_2 total columns from space. Atmos Chem Phys, 11: 12317–12337

Yao T, Thompson L, Yang W, et al. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Clim Change, (2): 663–667

Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, et al. 2009. Global concentrations of CO_2 and CH_4 retrieved from GOSAT: First preliminary results. SOLA, 5: 160–163

Zhang Q, Seto K C. 2011. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS night light data. Remote Sens Environ, 115: 2320–2329

Zhou J, Li Z, Li X, et al. 2011. Movement estimate of the dongkemadi glacier on the Qinghai-Tibetan Plateau using L-band and C-band spaceborne SAR data. Int J Remote Sens, 32: 6911–6928