

中国定量遥感发展的一些思考

梁顺林

马里兰大学 地理科学系, 美国 马里兰 20742

摘要: 中国定量遥感始于20世纪80年代, 在过去10多年得到了空前的发展。在2012年左右中国首次超越美国成为世界上在英文遥感刊物上发表文章最多的国家, 特别是近几年文章数已经是美国的两倍左右。尽管在遥感数据的定量反演方法等研究方面, 中国已经处于世界的前沿, 是定量遥感的大国, 但总体上尚不是定量遥感强国, 在绝大多数的分支领域上还没有处于世界引领的地位。本文在回顾世界和中国定量遥感发展历史的基础上, 从遥感数据获取与处理, 前向辐射传输建模, 变量反演, 高级产品生产, 地面观测, 遥感云平台建设, 遥感教育和遥感应用等8个方面, 简要地讨论了中国定量遥感发展的一些问题和挑战, 并提出了一些期望与初步建议。

关键词: 定量遥感, 反演, 高级产品, 地面观测网, 遥感云

引用格式: 梁顺林. 2021. 中国定量遥感发展的一些思考. 遥感学报, 25(9): 1889–1895

Liang S L. 2021. Some thoughts on the development of quantitative remote sensing in China. National Remote Sensing Bulletin, 25(9): 1889–1895 [DOI: 10.11834/jrs.20211516]

1 引言

对地观测的遥感对象主要包含大气, 陆表和海洋。大气和海洋遥感的研究对象基本上是连续变量, 所以它们一直试图发展定量的方法。但是陆地遥感要复杂得多, 早期的信息提取大都依赖于人工目视解译, 随着计算机和数值模型的广泛使用, 人们可以定量地从遥感数据中估算陆地环境的一些生物、物理和化学变量, 这就被称为陆地定量遥感, 或者简称定量遥感, 以区别于其他的研究方法 (比如目视解译) 或者研究内容 (比如目标识别, 地表类型的分类, 遥感数据的几何处理等)。因此定量遥感这种叫法通常只存在陆地遥感领域。如果把遥感粗略地分为几何遥感与物理遥感, 定量遥感就近似等同于物理遥感。

定量遥感的核心研究内容主要是从遥感数据中确定陆表环境变量的数值, 并且在初级产品 (经过几何定位和辐射定标的原始观测数据) 的基础上生成标准 (具有相同面积或者角度的网格, 和相同时间分辨率) 的高级产品供更多的用户使用。数据源是定量遥感研究的前提; 数据预处理

是定量遥感必不可少的一部分, 直接影响到后继信息提取的质量与精度。因此定量遥感包含5个部分: 数据获取, 数据预处理, 前向辐射传输模型的建立与变量反演, 高级产品的生成和遥感应用。本文也主要是围绕这些方面, 探讨目前定量遥感的现状、挑战与展望。

2 定量遥感发展的历史回顾

首先回顾一下国际上以美国为代表的定量遥感的发展历程。大致可分为4个主要的时间节点。第1个时间节点是1972年美国发射了第一颗陆地卫星 (Landsat)。多波段MSS传感器数据得到了空前的重视。比如, 美国宇航局在1970s开始启动的LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) 和AgRISTARS (Agriculture and Resources Inventory survey through Aerospace Remote Sensing) 项目, 正是利用这些卫星数据和地面采样数据, 进行大范围的作物种植面积的估算, 主要是依靠各种统计模型。所以早期定量遥感的发展来自农业遥感的驱动。

第2个时间节点是20世纪80年代。两个重要

收稿日期: 2021-07-26; 预印本: 2021-07-28

第一作者简介: 梁顺林, 1963年生, 男, 教授, 研究方向为定量遥感与环境变化。E-mail: sliang@umd.edu

事件极大地影响了定量遥感发展。第1个是20世纪80年代初美国宇航局(NASA)开始启动了“Remote Sensing Science”的研究计划,意在长期稳定地资助遥感前向物理模型的发展,Alan Strahler教授是其中的受资助人之一,李小文院士的硕士和博士论文的研究就是在这个研究计划资助下进行的。此后,一大批物理模型陆续在遥感刊物上发表,包含几何光学模型(比如Li-Strahler模型),辐射传输模型, Monte-Carlo和Radiosity等计算机模拟模型。虽然许多模型不再被使用,但是现在常用的几个模型都是在这些早期的模型基础上发展演化而来。第2个事件是1981年美国大气海洋局(NOAA)发射的NOAA-7号(以及后继持续的)气象卫星携带了AVHRR传感器,所获取的大量卫星观测数据被发现可以有效地用于陆表环境变化研究。由于AVHRR数据量大,空间分辨率较粗(局部LAC数据是1 km,全球GAC数据是4 km),人们无法直接进行目视解译,特别是大量的云覆盖干扰地表信息,迫切需要发展先进的数据处理与分析方法。当时最有效的方法是采用合成的NDVI植被指数数据来研究陆地生态系统和其他环境变化。即在一个固定的时间窗口之内(比如8 d,或者1个月),假定地表条件不变,选择最大的NDVI数据来代表这个时段的NDVI,这样可以最大限度地抑制大气中云与气溶胶对地表信息的干扰,也可以极大地减少数据量。这样的方法一直延续到现在,仍然有很多学者在不断地补充和发展不同的植被指数和合成方法。由于合成的NDVI数据具有不同的太阳入射角和传感器观测角,同时催生了地表双向反射率(BRDF)的建模研究。理论建模与数据处理分析两个方面的发展推动了定量遥感研究进入了一个新阶段。

第3个时间节点是20世纪90年代。美国宇航局(NASA)正式启动了对地观测计划(EOS)。EOS计划的旗舰型卫星叫Terra,于1999-12-18发射成功,然而卫星数据的定量反演方法研究提前10年就启动了。注意力不断地从前向辐射模拟模型的建模转到遥感数据的环境变量反演。各种实用的反演算法得到了发展,比如查找表方法,用于确定地表双向反射率的核驱动模型等。

第4个时间节点是在2005年前后。当时Terra卫星几颗传感器已经获取了接近5年的数据,反演算法经过几年的调试修改,生成的多种高级遥感产品已经具有很高的质量与精度,由此带动了各

行各业的专业人士进入到遥感应用领域。

回顾中国定量遥感的发展历程,大致有3个主要的时间节点。第1个时间节点是在20世纪80年代到90年代初,此时主要关注发展地面观测并且与遥感数据建立统计模型,用于作物种植面积和产量估算以及其他的应用。代表性人物包含中国科学院地理科学与资源研究所张仁华研究员,原中国科学院遥感与数字地球研究所田国良研究员,北京大学徐希孺教授,北京师范大学朱启疆和王锦地教授等。这里值得提及的是,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所建立的一个室内地物双向反射率测量装置,这在当时是世界上唯一的大型室内观测装置,在模拟光的照射下,传感器可以在不同方位不同观测角下测量物体的反射率。很可惜,这项成果在国际上并没有得到应有的影响。在李小文院士的推动下,Strahler教授与北师大朱启疆教授申请到了中美基金委的一个国际合作项目,作者在1992年回国去长春进行联合测量不同植被的双向反射率,文章几年以后才发表出来(Liang等,1997)。第2个时间节点是90年代后期,李小文院士从波士顿大学回到北京师范大学全职工作,重点探索定量遥感的一些机理性问题,比如尺度转换,真实性经验,热红外等效温度与发射率等,并且在2000年左右申请到科技部定量遥感的第一个973项目,培养了一批年轻的定量遥感研究人员。第3个时间节点是2010年左右,徐冠华院士推动建立了十一五国家高技术研究发展计划(863计划)重点攻关项目,其中一个项目是发展5个全球陆表遥感高级产品,这是GLASS产品研发获得的第一笔资助经费,另一个同期启动的国家高技术研究发展计划(863计划)重点项目是由陈军院士牵头的全球二期30 m土地覆盖制图,这标志中国定量遥感进入到反演算法与遥感高级产品研发的研究热潮。

随着国际上大量遥感高级产品的免费使用,国家科研经费的不断加大投入,中国的遥感应得到了空前的发展,整体的遥感水平迅速地跻身世界大国的地位。这里给出两个标志性的例子。第一是全球大学遥感学科的排名。武汉大学遥感学科从2017年起已经连续5年在软科世界一流学科排名中评为全球第一,北京师范大学也一直排在前4名。第二个标志性的例子是遥感英文出版物的数目,在2012年左右中国作者第一次超越美国作者,

成为全球第一（图1）。这是2021-06-21在Web of Science中搜索“Remote Sensing”得到的结果。关

于定量遥感，中国学者仅在2019年就发表了一系列高质量文章（梁顺林等，2019）。

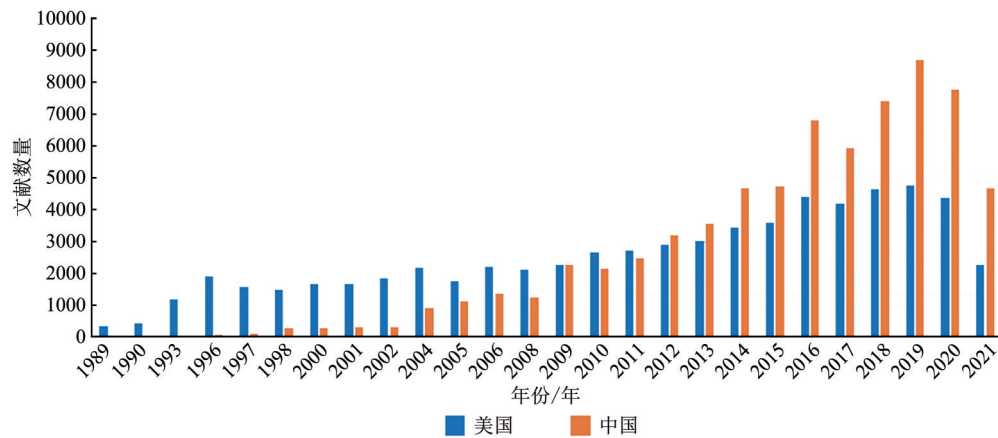


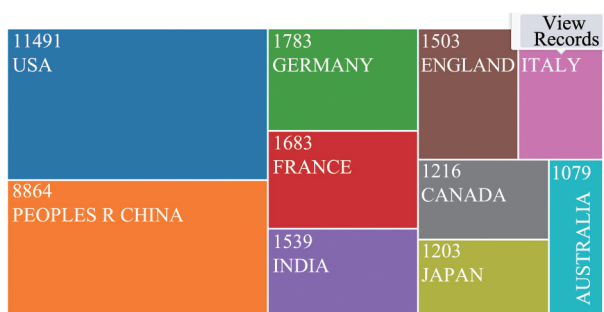
图1 中国与美国每年发表的遥感英文文献的动态分布

Fig. 1 Annual publications of remote sensing in English in China and the United States

尽管如此，这并不意味着中国已经是个遥感强国。软科世界一流学科排名是根据总量，武汉大学约有300名左右的教师从事遥感相关的研究，加上大量的研究生，其队伍规模应该在全球高校中最大；北京师范大学也有近50名教师从事遥感的研究。中国在绝大多数的遥感前沿领域尚未起到引领的作用。

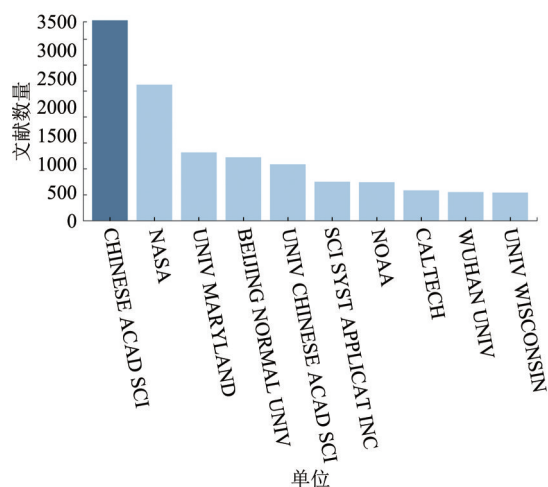
如果仅仅从定量遥感的角度来看，中国的遥感研究也不是最强的。举例来说，在陆表定量遥感中，处理分析和应用MODIS数据产品是最热门的研究之一。MODIS是美国宇航局EOS计划中的一个核心传感器，搭载在Terra（上午过境）和

Aqua（下午过境）两颗卫星上。在Web of Science数据库中，全球总共发表了近3万（29,592）篇有关MODIS的英文出版物（图2），这是2021-06-21在Web of Science中搜索“MODIS”得到的结果。其中美国作者占38.83%，中国作者占29.96%。如果按照出版作者的单位来统计，前5名分别是中国科学院（12.96%），美国宇航局（8.77%），美国马里兰大学（4.35%），北京师范大学（4.04%）和中国科学院大学（3.58%），充分显示出中国科学院系统的总体领先地位。中国气象卫星风云三号的MERSI传感器与MODIS高度相似。当在数据库中检索MERSI时出现一千多文献。



(a) 主要国家的分布

(a) Publications from the major countries



(b) 主要研究单位的分布

(b) Publications from the major institutes

图2 有关美国MODIS传感器发表的文章统计

Fig. 2 Total publications on the MODIS sensor of the United States

尽管这样的比较并不客观公正, 因为 MODIS 的数据从 2000 年就已获取, 而 MERSI 的数据从 2008 年才开始获取。但是从出版物数目的巨大差别来看, 美国 MODIS 数据比中国 MERSI 数据在世界上得到了更广泛的应用。为什么会这样? MERSI 数据的低使用率可能有很多的原因, 比如数据下载困难, 数据几何与辐射定标欠佳, 缺少官方发布的陆表高级产品供用户使用等。这些可能都是中国定量遥感发展中存在问题的缩影。

3 中国定量遥感发展的现状、挑战与展望

下面就从几个剖面来谈谈一些不成熟的观点和想法。主要包含 8 个方面: 遥感数据获取与处理、前向辐射传输模型建模、变量反演、高级产品生产、地面观测、遥感云平台建设、遥感教育和遥感应用。

3.1 遥感数据获取与处理

(1) 卫星计划: 遥感技术发展的早期阶段, 卫星计划考虑更多的是技术示范, 得到的可应用观测数据是附带产物。随着遥感技术的不断成熟, 遥感应用需求应该成为卫星计划的主要驱动力。很遗憾, 目前中国的卫星计划还没有完成这样的转变, 遥感应用人员对卫星平台和传感器的参数设置尚缺少足够的话语权。

对于中长期的卫星计划制定, 可以借鉴国外成功案例的做法。每 5—10 a 从全国征集卫星计划的建议书, 经过公开讨论、专家认证的形式筛选出我们真正需要的卫星计划。

中国正在掀起一股发射卫星的热潮, 但是需要一个协调认证机制, 对基于政府公共经费的各个行业、部门、高校等卫星发射计划进行协调整合。虽然发射小卫星的成本已经下降很多, 但是过多的低水平重复也会造成惊人的浪费。

目前中国尚缺少专门用于地球系统科学研究的卫星计划, 在研的碳卫星、水循环卫星等寥寥可数, 与中国的科研国际地位极不相称。也可以借鉴国外的做法, 采用具有遥感应用背景的首席科学家负责全链条卫星系统的试验, 最大程度地发挥遥感应用需求的驱动力。

任何卫星计划都需要有足够的经费来确保遥感数据具有高精度的几何校正和高频率高精度的辐射定标, 否则严重制约定量反演和应用效果。

这是目前国产卫星数据得到评价不高的原因之一。

(2) 无人机系统: 无人机航空遥感具有一系列独特的优点, 比如快速响应, 近实时数据获取, 数据具有高空间分辨率数据、自动性强、操作简单、能够用于高风险区域、成本低、灵活性强等, 已经得到了广泛的应用。许多单位都在纷纷地购买无人机系统。我们需要一个机构能够提供用户咨询 (比如系统选择)、数据处理技术规范、高级产品的研发与生产、数据管理等。特别是能够实现无人机系统获取的数据和衍生的高级产品对科研人员共享, 最大程度地发挥公共资源的利用效率。

纵观目前中国众多的卫星发射计划以及遥感数据不尽人意的质量, 很显然中国需要更高质量而不是更多数量的卫星观测数据。

3.2 前向辐射传输模型建模

地表辐射传输模型是定量遥感最核心的研究内容之一。目前国际上常用的陆表辐射传输模型基本上都非中国学者研发。中国科学院空天信息创新研究院发展的 RAPID 模型 (Huang 等, 2013) 和最近北京师范大学新发展的 LESS 模型 (Qi 等, 2019), 是令人振奋的例外。目前定量遥感中急需适合复杂场景, 便于计算的辐射传输模型。

李小文院士的成名成果是 Li-Strahler 植被几何光学模型, 但是现在并没有得到很好的传承, 这是需要我们反思的。作者的硕士和博士论文都是发展新的辐射传输模型。虽然文章已经很好地说明模型的想法是多么的好, 并且能够发表在高质量的杂志上, 但是在写模型的计算机代码时候, 往往缺少适当的图形用户界面, 不方便众人的广泛使用。而且做模型的圈子很小, 文章的引用率就不高, 很容易让人放弃这个研究方向。希望学术评价系统不要过于看重文章的引用率, 要能够客观地评价研究工作真正的学术价值。

事实上绝大多数中国学者都具有较好的数理基础, 非常适合模型研发。但是模型的研发需要长周期的投入, 目前的科研评价体系需要进一步完善, 避免让人急功近利。也希望年轻的专家学者能够坐得起冷板凳, 耐得起寂寞。

3.3 变量反演

在最近过去的 10 多年中, 中国学者在定量遥

感反演方法的研究中整体上已经处于世界前沿。在对方法探索的广度上，中国应该是领先的，不同的方法都做了很好地尝试，但在研究的深度上，还需要进一步加强，并没有建立起完整实用的反演方法和体系。我们需要继续探索新的理论与方法，评价利用各种机器学习方法，特别是深度学习方法，同时能够引进各种物理原理与物理公式，提高反演算法的有效性，加深对反演结果的理解。

需要更多地探索如何综合使用多种遥感数据：比如主动与被动、多光谱、多空间分辨率、多时像、航天与航空、过去与现在的、国内与国外的遥感数据等。进一步发展虚拟卫星星座的构建与使用等理论与方法。

需要探索如何联合使用遥感数据与多源常规数据，比如地面观测，气象再分析数据，数值模型的模拟数据等。

需要继续加强探索数据同化方法。遥感定量反演是个“病态”反演问题，需要多种正则化方法的制约（比如先验知识，空间约束，时间约束，多源数据），数据同化提供了一种合适的理论方法框架。目前急需研发计算效率高的数据同化算法。

需要国家对反演算法发展有长期稳定的支持机制。不宜在一个五年计划中资助多个研发项目，另一个五年计划中几乎没有，这样难以确保中国在这个领域的持续领先地位。

对于任何大的卫星计划，建议尽早采用国际上流行的传感器科学团队（Science Team）的模式。科学团队与通常的专家组不一样，每个成员负责一个或者多个高级产品的反演算法研发，拥有算法的知识产权。通过公平竞争的方式，确保其算法的先进性。科学团队也可以征集国外优秀遥感学者的参与，扩大中国卫星计划的国际影响力。

3.4 高级产品生产

生产高级产品供广泛的用户使用已经极大地推动了遥感应用向广度与深度发展。GLASS（Global Land Surface Satellite）产品（Liang等，2021）是中国最早生产的一套全球多变量陆表遥感高级产品数据集，正在得到国内外的广泛使用。中国也有一些其他在国际上有很大的影响力的遥感高级产品。

据我所知，目前许多单位正在计划构建不同规模的遥感高级产品生产系统，因为投入大，设

备更新快，此趋势不宜助长。大家应当更多地使用私有云和公共云资源，比如许多学者就成功地利用GEE生成不同的遥感高级产品。

算法文章一经发表，不要立即用于生产产品，因为算法文章主要考虑新方法新思路，通常只进行了有限的验证。将算法应用于产品生产，特别是全球产品生产，需要更广泛的算法和产品验证。但是目前存在的普遍问题是没有算法文章就直接发表产品文章，其产品也达不到充分验证。

目前的遥感高级产品都具有固定的时间和空间分辨率，实际上就是在时间和空间维度上进行采样。对于不同的变量，不同的地理环境，以及不同的应用需求，固定的时空分辨率不是最佳的。如何发展可变分辨率的智能化的遥感高级产品，是定量遥感面临的又一挑战。

希望将来每个产品的每个像元不仅有均值，还应该有不不确定性数值，这是极为挑战的，因为既需要理论方法的突破，也需要大量的验证数据。需要全面比较每个变量的不同产品，评价不同变量产品的一致性，以及分析产品的时空连续性和变化趋势，这些都是评价产品质量的有效手段。

3.5 地面观测

获取大量的地面观测数据是发展反演算法与产品验证的关键。中国有一些大学和研究所已经建立了少量的地面试验场，一些大型卫星计划（如高分）也开始建立地面验证网络，非常可喜可赞！但是总的数量需要大量增加。尽管中国可能是世界上购买最多最昂贵的遥感测量仪器设备的国家，但是它们的利用率却低的可怜。由于固定的遥感观测网络极少，绝大多数的仪器主要用于夏天的野外试验。

目前基于项目建立的试验场难以提供长期稳定的观测数据。希望国家能够像支持其他的观测网络（比如气象站，生态站和水文站）一样，长期稳定地支持遥感地面观测网络。即使是与其他网络系统相结合，对中国和世界的定量遥感的发展也会发挥不可限量的作用。

试验场的管理与维护需要有固定工作人员，不能仅仅依靠来来往往的研究生。固定实验人员的考核，可通过评价是否测量了足够多的数据以及足够多的人在使用。如果每个数据集在数据中心都有数据号（DOI），就很容易进行客观评价。

希望中国能够充分利用丰富的优质人力资源,发挥遥感大国的世界领先作用,通过建立多种“标准”的地面验证数据集,引领世界遥感反演算法和产品综合验证计划。

3.6 遥感云平台建设

目前大多数人都是先下载初级的遥感数据,在自己的计算机系统上发展反演算法和高级遥感产品。随着遥感数据量和必需计算资源的加大,使用遥感云平台是定量遥感发展的必经之路。

谷歌公司的 GEE (Google Earth Engine) 是目前全球最大的遥感数据云平台,包含 200 多个卫星,地形和模型输出的数据集。Earth on AWS 包含多个卫星数据,比如 Landsat 8, Sentinel-1, Sentinel-2, 和 CBERS, 以及全球模型数据, DigitalGlobe 的开源数据。用户可以在平台上调度数据并且进行产品生成。

微软公司的 Planetary Computer 云,除了部分卫星数据,也包含许多地面观测,模型模拟数据等。

中国许多私有云(比如阿里云,百度云)尚未包含海量卫星数据。然而中国科学院空天信息创新研究院郭华东院士领导建立的 CASEarth 云的发展是令人鼓舞的(郭华东, 2020): 目前它有 50 PB 的总存储能力, 1 万台虚拟机数, 尽管为了存储更多的遥感与其他类型的数据, 还需要更大的存储、计算和分析能力。

盼望中国的有关大公司也能够尽早建立遥感相关的云平台, 而其他星罗棋布的小型遥感私有云只需包含一些具有特色的数据, 以避免存储和计算资源的浪费。

3.7 遥感教育

如果教育部能够正式确立遥感科学技术一级学科, 相信更多的学校将开设遥感专业, 中国的遥感队伍将更加的壮大。

除了基本理论方法和技术技能方面的训练, 建议在教学计划对本科生开设一定比例的地质课程; 高年级本科生和研究生需要学习一些遥感物理的基础知识。此外, 随着定量遥感发展的不断深入, 遥感物理教材急需更新或重写。

许多学校可能严重缺乏定量遥感师资。参加相关遥感高校举行的培训班是非常有效的解决办

法。北京师范大学、武汉大学和北京大学每年暑期都会举办定量遥感相关的暑期培训班。今年武汉大学第三届定量遥感暑期学校吸引了来自全国遥感相关专业高校的在读研究生、高年级本科生、青年教师和科研院所、其他企事业单位的工作人员共 5500 多名在线参加, 累计在线观看的有 13054 人次。希望有条件的单位举办更多的专题性质的培训班。

3.8 遥感应用

定量遥感发展的生命力在于应用。希望大家不要都汇集在发展遥感反演方法与高级产品生产方面研究, 避免会形成严重“内卷”, 不利于定量遥感研究整体发展。需要积极探索新的应用领域与方法。人类目前正面临一系列的环境和社会经济问题, 比如温室气体排放引起的气候变化, 人类社会发展的可持续和粮食安全等。这些问题的解决在很大程度上依赖于定量遥感。也希望更多的年轻人能够研究数据同化方法, 有效地结合遥感定量产品与各种数值模型, 实现信息到知识的转变。作者曾经与施建成研究员和李新研究员共同举办过三届全国数据同化培训班, 早期的教材以中英文分别在国内外出版。希望数据同化培训班能够再次启动, 发展壮大其研究队伍。

4 结 语

中国定量遥感在过去的 10 多年得到了长足的发展, 已经成为名副其实的遥感大国。但是要成为遥感强国, 引领世界遥感的发展, 尚需要更多的努力, 需要进行一些制度层面上的完善, 比如更好地协调卫星发射计划与遥感应用的关联, 真正让遥感应用成为驱动。对大的卫星计划(比如高分卫星系列, 风云卫星系列), 需要有遥感全链条系统的整体考虑, 卫星数据必须有高精度的几何定位和辐射标定, 也需要研发高质量的高级产品以促进卫星数据的更广泛使用, 建议使用国际上广为使用的传感器科学团队 (Science Team) 的模式。

同时我们也需要学术生态的改善和更好的发展策略。可以充分利用已有优势首先选择攻关一些前沿问题。比如中国遥感研究人员整体上具有较好的数理基础, 有些人可以攻关实用性强的辐射传输模型的建模。中国有集中资源办大事的举国体制,

可以快速地建立大型遥感公有云平台，为中国遥感学人进行高级遥感产品生产和应用提供强有力的技术支撑，避免大家都争着建立自己的高级遥感产品生产系统，变成一个个“小作坊”式的发展模式。以中国巨大的人力资源优势 and 大量已经购买的地面观测仪器设备，我们可以建立类型众多的遥感地面观测网络，可单独也可联合国家现有的其他地面观测网络，以引领遥感数据反演算法或者遥感产品的全球比较计划。我相信在不久的将来，中国将成为名副其实的遥感强国。

志 谢 感谢2021-04在扬州召开的遥感沙龙参与者！会议讨论对本文的写作提供了很多素材与启发。感谢第五届全国定量遥感学术论坛提供的特邀报告的机会。也非常感谢中国科学院地理科学与资源研究所方红亮研究员、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所李爱农研究员，武汉大学何涛教授和北京师范大学姚云军教授、阎广建教授和赵祥教授对本文初稿提出了很多宝贵的修改意见。

参考文献(References)

Guo H D. 2020. Report on Data Sharing of Big Earth Data Science Programme-2019. Beijing: Science Press (郭华东. 2020. 地球大

数据科学工程数据共享蓝皮书-2019. 北京: 科学出版社)

Huang H G, Qin W H and Liu Q H. 2013. RAPID: A radiosity applicable to porous Individual objects for directional reflectance over complex vegetated scenes. *Remote Sensing of Environment*, 132, 221-237 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.013]

Liang S L, Bai R, Chen X N, Cheng J, Fan W J, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L M, Jiao Z T, Liu Y B, Ni W J, Qiu F, Song L L, Sun L, Tang B H, Wen J G, Wu G P, Xie D H, Yao Y J, Yuan W P, Zhang Y G, Zhang Y Z, Zhang Y T, Zhang X T, Zhao T J and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(6): 618-671 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子锦, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2020. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 24(6): 618-671) [DOI: 10.11834/jrs.20209476]

Liang S L, Cheng J, Jia K, Jiang B, Liu Q, Xiao Z Q, Yao Y J, Yuan W P, Zhang X T, Zhao X and Zhao J. 2021. The global Land surface satellite (GLASS) product suite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(2), E323-E337 [DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0341.1]

Liang S L, Strahler A H, Jin X F and Zhu Q J. 1997. Comparisons of radiative transfer models of vegetation canopies and laboratory measurements. *Remote Sensing of Environment*, 61(1), 129-138 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00247-7]

Qi J B, Xie D H, Yin T G, Yan G J, Gastellu-Etchegorry J P, Li L Y, Zhang W M, Mu X H and Norford L K. 2019. LESS: Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221, 695-706 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.036]

Some thoughts on the development of quantitative remote sensing in China

LIANG Shunlin

Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

Abstract: Quantitative remote sensing in China began in the 1980s and has achieved unprecedentedly rapid development in the past decade. Around 2012, China surpassed the United States for the first time and became the country with the most articles of remote sensing published in English in the world. Especially in recent years, the number of articles has been about twice that of the United States. Although China has been at the forefront of the world in the research on inversion methodology and is a large country in quantitative remote sensing, it is not sufficiently powerful on the whole to be in the leading position in the world in most sub-fields. After reviewing the development history of quantitative remote sensing in the world and China, this paper briefly discusses some problems and challenges of quantitative remote sensing in China from eight aspects: data acquisition and pre-processing, forward radiative transfer modeling, inversion, high-level product production, ground observation, cloud platform construction, education and application. Some expectations and preliminary suggestions are also put forward.

Key words: quantitative remote sensing, inversion, high-level products, ground observation networks, remote sensing clouds