

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.04.02

引用格式: 秦其明,陈晋,张永光,等. 定量遥感若干前沿方向探讨[J]. 国土资源遥感,2020,32(4):8-15. (Qin Q M, Chen J, Zhang Y G, et al. A discussion on some frontier directions of quantitative remote sensing [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020,32(4):8-15.)

定量遥感若干前沿方向探讨

秦其明^{1,2}, 陈晋³, 张永光⁴, 任华忠¹, 吴自华¹, 张赤山³, 吴霖升⁴, 刘见礼⁵

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 自然资源部地理信息系统技术创新中心, 北京 100871; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 自主创新能力的提高, 关键在人才, 核心在教育。为了培养“定量遥感”领域高素质的创新人才, 2020 年北京大学第十七届“定量遥感”暑期课程班结合听课学员关注的定量遥感前沿问题, 举办了研究生线上学术讨论。学术讨论针对“定量遥感”理论、方法技术和应用中广泛关注的学术问题, 举办了 4 场学术讨论, 分别讨论了辐射传输机理、高光谱遥感混合像元分解、植被荧光遥感和无人机定量遥感应用与服务等 4 个方向的前沿进展。其中, “辐射传输机理”学术讨论主要从麦克斯韦方程组出发, 讨论了用微观物理学阐释辐射传输理论的进展状况以及目前存在的局限性; “高光谱遥感混合像元分解”学术讨论主要聚焦在端元变异性研究的 2 个方面, 即针对同一端元类别内的光谱变异性性和不同端元类别之间的光谱相似性的讨论, 深入探讨了高光谱遥感混合像元如何消除解混误差的理论与方法; “植被荧光遥感”学术讨论主要讨论了日光诱导叶绿素荧光 (solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF) 遥感的应用进展, SIF 从叶片内激发到传感器接收的过程及其作用机理, 重点针对其中 5 个主要问题进行了深入讨论; “无人机定量遥感应用与服务”学术讨论围绕无人机定量遥感和应用服务等问题开展了深入讨论, 普遍认为无人机定量遥感应用与服务在未来具有广阔前景。每场学术讨论由一名研究生作主题发言, 参加人员围绕该主题申请发言, 展开讨论与质疑, 并就相关进展阐述个人观点或补充相关研究进展信息, 主持人作总结发言。学术讨论通过 bilibili 网站在线直播, 吸引了众多感兴趣的研究生和其他人员参与, 拓展了定量遥感知识的传播, 深化了对讨论问题的认识。

关键词: 线上学术讨论; 辐射传输机理; 混合像元分解; 植被荧光遥感; 无人机定量遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)04-0008-08

0 引言

定量遥感是遥感领域迅速发展的学术前沿之一。2020 年 7 月 25—30 日, 北京大学举办了第十七届“定量遥感”暑期研究生课程班。前 16 届暑期课程班, 授课教师在北京大学校园内进行面对面教学, 学员在课堂学习与学术讨论。2020 年, 由于受新型冠状病毒肺炎疫情影响, 课程班会务组决定探索与实践新的教学方式, 在线上举行第十七届“定量遥感”暑期研究生课程班, 通过腾讯会议和 WEBEX 进行定量遥感课程教学与学术讨论。报名参加该课程的研究生、本科生以及青年教师超过 2 200 人。学员来源广泛, 有来自全国各地的高校与科研院所, 还有部分来自国外高校。

为了活跃学术思想、鼓励学术争鸣, 激发听课学员的学术灵感, 弘扬敢于质疑、大胆探索的精神, 推

动“定量遥感”学术创新, 课程班决定开展定量遥感若干前沿方向探讨。通过广泛征求定量遥感学术讨论议题, 在听课学员提交的感兴趣议题中, 从定量遥感理论、方法与技术应用的角度, 分别筛选并凝练出 4 个定量遥感前沿方向的学术讨论主题, 在互联网上将讨论主题与学术讨论举办时间提前通知。学术讨论邀请部分学员与特邀专家, 采用主题发言与学员提问与讨论相结合的方式进行, 主持人最后总结。学术讨论实况通过 bilibili 网站在线直播。

1 定量遥感若干前沿方向探讨综述

1.1 辐射传输理论的再认识

辐射传输 (radiative transfer) 理论是研究电磁辐射强度在非均匀和随机介质中散射、吸收、传播的理

论^[1-2],它在电磁波与复杂地物相互作用的研究领域中有着重要应用,是定量遥感理论的基石。近年来,随着定量遥感研究的不断深入发展,基于能量守恒的辐射传输理论逐渐暴露出它的不足:建立在能量守恒基础之上,无法从电磁理论的麦克斯韦方程严格推导得出^[3]。其机理性认识的欠缺,导致辐射传输理论在实际应用中的局限性无法得到合理解释,也限制了对辐射传输理论的进一步发展和完善。近年来,一系列研究从麦克斯韦方程组出发,提出了辐射传输理论的微观物理学阐释^[4-7],揭示了辐射传输理论的物理本质,但其推导过程依赖于较多的假设和近似^[8-10],还存在着较大的局限性。围绕辐射传输理论的发展现状和未来的发展方向,定量遥感班在7月25日晚上举行了主题为“辐射传输理论再认识”的研究生线上学术沙龙。参加“定量遥感暑期课程班”的部分学员和特邀专家参加了学术讨论。北京大学秦其明教授主持了学术沙龙。

围绕本次学术沙龙的主题,北京大学博士研究生吴自华作了主题发言,他结合自己研读辐射传输理论经典著作和最新研究进展文献中的体会和认识,从辐射传输的概念出发,对辐射传输过程的描述、辐射传输方程的推导、微观物理学方法的原理和局限性等方面内容进行了介绍,并对辐射传输理论的未来发展提出了自己的想法,指出密集散射体、非独立分布等情景,是辐射传输理论研究中下一步需要攻克的难点。

针对辐射传输理论的传统唯象阐释,吴自华在发言中首先介绍了唯象理论的概念。唯象阐释所基于的比尔-朗伯-布格定律,正是一个来自于对大量实验结果的概括提炼,而无法从现有的基本的物理学定律推导得来的唯象定律;另一方面,唯象阐释没有考虑电磁波的相干性,因此无法解释后向散射增强等现象。而与之相对的,辐射传输理论的微观物理学阐释,不再依赖于虚构的“光子”概念,而是从麦克斯韦方程组出发,在 Twersky 近似等前提下,首先推导得到矢量辐射传输方程,再简化得到标量辐射传输方程,保证了理论的自洽性,夯实了辐射传输的理论基础。通过进一步考虑散射图中的循环项和其他项,该理论能够从物理机理上考虑后向散射增强等现象,揭示了辐射传输方程内在依赖的假设和近似,为辐射传输方程在实际应用中的修正提供了方向。

主题发言之后,参与讨论的老师和学员们各自在定量遥感理论和应用研究中的认识,各抒己见,开展了讨论。从麦克斯韦方程组出发实现辐射传输方程的推导(虽然还基于大量近似和假设),从

根本上把辐射传输理论和经典电磁学理论连接了起来,这意味着未来有可能将一些计算电磁学的方法与辐射理论相结合,从而建立起一个物理机理清晰明确的全谱段(包括可见光、近红外、中红外、热红外和微波)辐射传输模型提供了可能性。有学者指出,除了考虑到上述谱段存在波长的差异外,也存在辐射源和观测方式等的差异。对于一定的介质和散射体来说,有可能在光学波段能够满足远场条件,目前在微波波段无法满足远场近似条件,这也会带来理论建模上的困难。有学员通过微信在线发言指出:辐射传输方程依然(或暂时)难以摆脱远场假设,计算电磁学对于近场的散射(项)建模是一个途径。涉及到复杂下垫面微观场景,可通过物理场的近似化处理获得一些解析解。上述讨论,开拓并深化了辐射传输理论的认识。

主持人最后发言指出,科学的生命是探索,是创新,是发展,期望课程班研究生更多关注辐射传输理论的进展,勇于解决这些影响深远并且难度大的辐射理论问题。

1.2 高光谱遥感混合像元分解

卫星影像中广泛存在混合像元问题,其对准确的地表解释和参数反演造成了巨大的挑战。在地面异质区域,混合像元作为遥感地表解译和参数反演的主要误差来源的观点已被学界广泛接受^[11-12]。为解决这一问题,混合像元分解模型(spectral mixture analysis, SMA)应运而生,其中线性 SMA (linear SMA, LSMA)由于其模型简单且精度较高的特点而受到广泛关注^[12-15]。LSMA 假设混合像元的光谱信号由各个地物成分(即端元)的光谱信号和它们对应的比例(即丰度)加权求和得到^[16]。通过确定端元以及混合像元的光谱便可以反算出地物的丰度。然而,由于在选择端元及其端元光谱方面存在不确定性,以及使用的解混算法的不完善,SMA 计算得到的端元丰度的精度仍可能无法满足应用要求,因此相关模型的精度仍有待提高。

围绕“高光谱遥感混合像元分解”讨论主题,7月26日晚上,定量遥感暑期课程班学员参加了北京师范大学陈晋老师主持的学术讨论。研究生张赤山结合科研取得的新认识,作了主题发言。他指出混合像元分解过程中端元变异性是最主要的误差来源之一^[11,17]。结合他所在团队的研究工作,阐述了端元变异性通常指一个单独的端元在不同的空间和时间中表现出光谱信号的差异。造成这种同一端元中光谱信号变异的原因一部分是光照和大气条件的改变,而更为重要的原因在于一个端元内通常包含具有光谱多样性的多个子类。例如,植被端元通常包

括许多植物种类,并且这些植物种类可能显示出由不同的生化成分和生物物理结构而导致的光谱差异。端元变异性通常被区分为 2 种类型:①同一端元类别内的光谱变异性(类内变异性);②不同端元类别之间的光谱相似性(类间变异性)^[18-19]。

张赤山在主题报告中,阐述了使用理论分析和模拟实验相结合的方式,研究了 LSMA 中由端元变异性引起的误差传播过程^[20]。基于推导出的误差传播模型为:

$$\Delta f = GD = G(-\Delta Rf), \quad (1)$$

式中: Δf 为丰度估计中的偏差; f 为真实丰度; ΔR 为 LSMA 中使用的光谱与像素级别的真实端元光谱之间的差值,代表了端元的光谱变异性; G 为增益矢量; D 为由频率变异性引起的偏差矢量。进一步提出了控制端元变异性对 SMA 影响程度的 4 个主要的影响因子:①光谱变异性;②端元丰度;③端元反射率的幅度;④端元间光谱相似度,并使用模拟实验的方式对其进行了验证。

最后,张赤山结合他们团队的研究成果,给出了一个评价现有方法的统一的理论框架和主要的研究结论:①端元变异性对 LSMA 解混误差的影响取决于偏差信号与增益向量之间的交互作用;②其中误差来源于偏差信号,其主要由端元内部的光谱变异性(即类内变异性)和端元丰度决定,而增益向量主要受控于端元光谱反射率的幅度和不同端元间的光谱相似性,其会放大或者缩小偏差信号;③各种减轻端元变异性影响的典型方法不仅可以改变偏差信号,而且可以影响增益向量,从而在一定程度上提高了 LSMA 的性能。

基于这些结果,他建议在大多数应用中使用多端元光谱解混的方法,因为它在缓解端元变异性的影响方面具有稳健性。最后讨论了端元变异性误差传播理论的应用前景。

在本次学术讨论的讨论环节中,参加者对相关问题进行了深入的讨论:

1) 理论推导部分中并未考虑非负约束的情况,这是否会使得结论的适用性受限? 非负约束的实现需要借助迭代或其他数值计算方法,使得该约束情况下无法得到解析解。对此问题,报告人补充说明,暂时还没有找到有效的方法直接计算得到非负约束的误差传播过程。但在理论验证部分,使用了模拟实验的方式对非负约束进行了全面的讨论,证明了结论对非负约束同样适用。

2) 该理论推导均建立在线性假设之上,如若加入多次散射,结论是否会发生改变? 报告人认为:

多次散射的误差项(S)可以直接加入该误差传播模型的偏差信号(D)中,将偏差信号变为原始的偏差信号加上多次散射项,即

$$D = (-\Delta Rf) + S. \quad (2)$$

同时多次散射项永远为正值,其可能与光谱变异性相互抵消。在这种情况下误差模型对多次散射同样适用。

3) 模拟控制实验中选用了 3 个端元,以及光谱变异性较大的不透水层端元,其依据是什么? 报告人进一步说明了在城市遥感中 VIS(植被-不透水层-土壤)3 端元模型应用非常广泛,同时由于不透水层是人造地物的特殊性导致其在现实情况中经常存在反射率差异极大的情况。因此上面的这些选择都是为了贴近真实的遥感应用。

4) 该理论能否与稀疏矩阵方法相结合的问题,报告人说明,稀疏矩阵解混法会同时解算出端元光谱和对应的丰度,并认为这类方法解算得到的端元光谱在尽可能减少光谱变异性的同时还可能会优化增益向量,从而降低端元变异性的影响,但其得到的端元物理意义可能缺失,并不利于地学应用。

在讨论发言过程中,特邀专家武汉大学钟燕飞老师等人针对高光谱遥感混合像元分解前沿问题给出了进一步研究方向。最后,学术讨论主持人对大家讨论的问题做了总结与点评。

1.3 植被荧光遥感

日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)遥感是植被光合遥感的创新,近 20 a 来,发展迅猛,得到研究者越来越多的关注。SIF 作为“新兴”的遥感技术,还有诸多问题等待探索,例如,SIF 信号的尺度效应、SIF 与光合作用的机理和 SIF 应用等问题。针对上述问题,定量遥感班在 7 月 28 日晚上举行了主题为“植被荧光遥感研究进展”的研究生线上学术讨论,旨在通过讨论提升对 SIF 遥感的认识与前沿方向的把握。南京大学张永光老师主持了学术讨论,南京大学博士生吴霖升作主题发言。

吴霖升在主题发言过程中,首先概要总结了 SIF 遥感的发展进程,指出 SIF 遥感的优势在于全球及区域的光合作用探测。通过介绍 SIF 应用的经典案例阐述了 SIF 遥感应用进展,诸如,总初级生产力(gross primary productivity, GPP)估算^[21-22]、农作物产量估算^[23-24]、干旱监测^[25]、热害提前预警^[26]、植被蒸腾遥感监测^[27]、物候与全球气候变化^[28-30]。之后,他进一步介绍了 SIF 的机理研究进展。SIF 从叶片内激发到传感器接收的过程,会受到冠层结构、

观测角度及太阳角度等因素的影响,可能导致其不能准确反映植物的真实光合状态。如何消除这些影响,获取光系统尺度的总发射 SIF,对于 SIF 的研究具有重要意义。远红荧光(far-red SIF)在从叶片逃逸出冠层到达传感器前,主要经历了冠层内部的散射^[31],NIRv 和 fPAR 的比值可以简单描述其逃逸概率(fesc)^[32],通过 fesc 即可计算得到叶片的总激发的远红荧光(far-red SIF_{total}),并可应用于全球 GPP 的估算等方面^[33-34]。然而红色荧光(red SIF)在叶片内部和冠层内部除了经历散射,还有很严重的重吸收,导致 red SIF 较大程度的“失真”,目前通过随机森林的方法从冠层降尺度到光系统及通过简单反射率的方法可以得到红色总发射荧光(red SIF_{total})^[35-36]。这些研究进展,很大程度上解决了 SIF 本身的一些问题,使其能更好地表征光合作用,但仍需更多研究更准确地解译 SIF 所包含的生理信息。

最后,吴霖升结合个人认识阐述了 SIF 未来发展方向,并提出了 SIF 应用潜力以及 SIF 是否能够取代反射率植被指数等 5 个热点问题。学术讨论还邀请了中科院空天院刘新杰博士作了“SIF-GPP 关系及其影响因素讨论”的主题发言,进一步阐明了 SIF 机理。

主题发言之后,参与沙龙的老师和学员们结合各人在植被荧光遥感原理和应用研究中的经验,对 5 个问题开展了讨论:①SIF 未来的研究方向是什么?②SIF 是否能够取代反射率植被指数?③NIRv 指数是否会对 SIF 造成很大挑战?④far-red SIF_{total} 是否优于方向性观测?⑤red SIF 的辐射传输过程更加复杂,far-red SIF_{total} 模型是否适用于 red SIF_{total}?

围绕上述问题,学术讨论参与者畅所欲言,更进一步加深了对相关问题的认识,例如,NIRv 并不会对 SIF 造成很大挑战,由于 SIF 具有表征植物生理能力的独特优势,不可取代。荷兰特温特大学的杨沛琦博士也分享了对部分问题的看法,针对问题③,他认为这不是挑战,恰恰是机遇,可以用 NIRv 或者 FCVI 获得 SIF 的发射效率,即纯生理指标,并且推荐使用 FCVI,同时提醒要注意推导的细节,不然会造成很大误差。针对问题④,有专家强调,far-red SIF_{total} 和 far-red SIF_{obs} 的单位并不一样,对于农作物观测数据,far-red SIF_{total} 并不一定比 far-red SIF_{obs} 好,但是对于大角度和大范围的卫星数据可能会更好。参与者也讨论了 SIF 遥感在农作物表型和胁迫及时监测等相关领域应用的可行性与不足。在讨论发言过程中,中科院空天院的刘良云老师等人应邀发言,他们就植被荧光遥感发展阐述了独到

的见解。

此次学术讨论,汇集了海内外研究者对 SIF 研究的前沿进展以及相关问题的见解,增进了学员们对 SIF 的认识,促进了研究者的互动交流,将有助于国内 SIF 遥感研究的推广及发展。

1.4 无人机定量遥感受用与服务

7月29日晚上,围绕无人机定量遥感受用与服务涉及的瓶颈问题举办了学术讨论。北京大学任华忠老师主持,邀请中国科学院地理科学与资源研究所刘见礼博士生作主题发言。他结合参与重点研发计划“高频次迅捷无人航空器区域组网遥感受用技术”项目的科研实践,从目前无人机遥感在国内外的研究与应用的现状入手^[37-39],分别介绍了无人机定量遥感、多机协同组网遥感受用技术体系^[40]、多机多载荷下的遥感机理研究、复杂场景下的多机协同组网遥感受用与服务等内容。针对主题发言,参与人员开展了热烈讨论。

针对无人机遥感在原始数据获取、数据处理、几何与光谱标定等环节与传统的卫星与航空遥感的差异,讨论中有人指出,无人机数据分辨率并非越高越好,比如在提取作物覆盖范围时需要根据作物的分布信息,通过重采样的方法降低分辨率从而去除背景噪声的影响,同时不同作物对数据分辨率的要求具有一定的差异性,可以根据应用需求对数据获取不同分辨率进行测试,进而确定最优的分辨率。也有人指出:分辨率也影响了无人机作业效率,因此探究尺度效应在无人机数据信息提取的精度影响具有很强的现实意义。初步研究结果表明,在 0.1 ~ 1.5 m 左右时随着空间分辨率的降低,识别精度升高;在大约 1.5 m 达到极值点,然后下降。关于无人机数据处理,有人指出,无人机遥感复杂度相比卫星遥感更高,无人机的几何纠正更加复杂,由于无人机幅宽小,因此涉及到尺度效应、角度效应的问题,同时由于不同航带获取时间的不同,还需要进行时间归一化。

针对无人机热红外遥感数据的定标,参加会议讨论的特邀专家肖青指出目前主要采取 2 种方法:一种通过辐射传输模型进行求解,需要已知无人机高度和大气剖面数据,同时传感器要进行精确的室内辐射性能与通道响应函数的标定;另一种是同步参考地物法,同步测量温度差较大的地物或靶标,通过线性回归进行纠正。同时肖青指出,由于非控温传感器容易受到环境温度漂移、角度效应和时间效应的影响,目前还没有系统的方法解决此问题。针对大气的问题,他建议考虑下行的透过率,一种方法是采取温度差较大或明暗程度的地物,通过简单的

线性回归进行纠正；另一种采取辐射传输模型的方法,但需要已知无人机飞行高度和大气剖面数据,同时需要对传感器进行精确的辐射定标,将 DN 值转成辐射亮度,但这种方法对于初学者具有难度。

讨论过程中,北京大学任翔博士生分享了他从事的无人机热红外视频流的地理信息增强与地面目标检测跟踪的研究工作。bilibili 网站网友参与沙龙讨论热情很高,在互动讨论中提出了多个问题,请求沙龙主持人给与说明或者解答。大家对沙龙讨论主题兴趣盎然,认为无人机定量遥感应用与服务在未来发展中具有广阔前景。

最后任华忠研究员总结指出,相对于卫星与航天遥感,无人机遥感已经形成了独立的体系,从数据的获取、处理、反演模型等与常用的遥感方法都有很大的不同,需要在未来共同努力探索,解决其中的问题。

2 未来研究方向

基于上述 4 个方面的学术讨论与认识,建议深入开展如下探索与研究:

1) 辐射传输的微观物理学理论从基本电磁学理论出发,在介质、散射体以及散射体在介质中的分布满足一定前提条件的情况下,基于一系列合理的近似,成功地推导得到了矢量辐射传输方程。与传统的唯象理论相比,微观物理学理论拥有更为坚实的物理基础,同时也更加清晰地说明了辐射传输方程的成立所需要依赖的基本前提和假设。但目前,这一理论还局限在稀疏介质、散射体独立无关的情形,而在实际情况下,致密介质中的散射体之间往往存在着相互作用,这将导致远场近似等不再成立;同时,也没有考虑非线性光学效应等物理现象。这些更复杂的情景,还有待后续的进一步研究。

2) 当前主流的解混方法主要关注于压缩端元的光谱变异性,而忽略了优化增益向量。因此,进行合理的端元光谱组合,同时压缩光谱变异性 and 优化增益向量将会是具有潜力的方向。此外,使用辐射传输模型和实际观测的遥感数据,进一步完善误差传播理论,并将该理论更多地应用到其他应用中,如:精度检验和端元选择等也是具有价值且值得探索的方向。

3) 植被荧光遥感仍有诸多方向需进一步探索与研究。在 SIF 观测方面,在 2022 年之后,中国即将发射森林碳卫星,还有其他国家即将发射的 FLEX 卫星和 GeoCARB 对地静止卫星,它们将提供更佳时空分辨率的 SIF 产品,但现阶段仍需长时序及覆盖更多生态系统的地基观测,以及更多机载观

测,以弥补卫星 SIF 遥感时空分辨率的不足,同时为未来卫星 SIF 数据做前期探索和验证工作;此外,在 SIF 与光合作用机理研究方向,如何更准确地解译 SIF 信号所包含的生理信息,以更好地表征植物真实的光合状态,仍有待深入研究;同样,在 SIF 应用方面,目前 SIF 在逆境胁迫和生产力估算等方面虽然得到较广泛应用,但仍需更深入研究,SIF 在作物表型以及水生态等其他领域的应用潜力也有待更多的探索与拓展。

4) 无人机遥感快速发展,推动遥感走向微观和大众化应用,无人机遥感和其他技术相结合,呈现多样化应用发展的趋势,具有越来越广泛的应用前景。同时应该看到,无人机遥感发展过程中也有许多问题亟待解决:如无人机组网+遥感数据的实时传输涉及的关键技术;图像空间分辨率与效率的平衡;无人机定量遥感中数据的几何配准与辐射定标精度问题;无人机遥感与即时定位与地图构建技术结合涉及的方法与技术。上述问题的解决与业务化应用尚需大量研究探索。

举办此次线上学术讨论,提供了一个崭新的学术平台,它促进了听课研究生之间横向交流,有利于弥补线下“定量遥感”课程教学缺乏学术讨论的“短板”,发挥了碰撞思想火花,激发创新活力的功效。研究生是科学技术创新的生力军,也是未来定量遥感科学与技术发展的中坚力量。线上学术讨论聚焦定量遥感前沿若干方向中的理论、方法与关键技术问题,对于开拓研究生学术视野,引领学术创新方向具有重要意义。

线上学术讨论避免了“新型冠状病毒肺炎”疫情期间线下学术讨论聚会带来的风险,可以有效杜绝病毒在聚会人群中的传播与感染。2020 年年初突如其来的新型冠状病毒传染病,使全球多数国家众多学校关闭校园。目前的在线教育对线下高校教育理念、教学模式、学术交流方法与教师规模等带来了新的挑战。可以说,线上“定量遥感”学术讨论,是学术创新的一次实践,它对于探索在线教育模式与学术交流途径具有参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 曾亮,金亚秋. 随机介质中的矢量辐射传输理论[J]. 物理学进展,1990(1):57-99.
Zeng L, Jin Y Q. Vector radiative transfer theory in random media [J]. Progress in Physics, 1990(1):57-99.
- [2] 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论[M]. 北京:科学出版社,1993.
Jin Y Q. Remote sensing theory of electromagnetic scattering and thermal radiation [M]. Beijing: Science Press, 1993.

- [3] Wendisch M, Yang P. Theory of atmospheric radiative transfer: A comprehensive introduction [J]. *Contemporary Physics*, 2012, 53 (6): 506.
- [4] Mishchenko M I. Vector radiative transfer equation for arbitrarily shaped and arbitrarily oriented particles: A microphysical derivation from statistical electromagnetics [J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (33): 7114 – 7134.
- [5] Mishchenko M I. Microphysical approach to polarized radiative transfer; Extension to the case of an external observation points [J]. *Applied Optics*, 2003, 42 (24): 4963 – 4967.
- [6] Mishchenko M I. Maxwell's equations, radiative transfer, and coherent backscattering: A general perspective [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 101 (3): 540 – 555.
- [7] Tsang L, Kong J A. Scattering of electromagnetic waves: Advanced topics [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [8] Doicu A, Mishchenko M I. Overview of methods for deriving the radiative transfer theory from the Maxwell equations. I: Approach based on the far-field Foldy equations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 220: 123 – 139.
- [9] Doicu A, Mishchenko M I. An overview of methods for deriving the radiative transfer theory from the Maxwell equations. II: Approach based on the Dyson and Bethe – Salpeter equations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 25 – 36.
- [10] Doicu A, Mishchenko M I. Electromagnetic scattering by discrete random media. III: The vector radiative transfer equation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 236: 106564.
- [11] Somers B, Asner G P, Tits L, et al. Endmember variability in spectral mixture analysis: A review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115 (7): 1603 – 1616.
- [12] Bioucas – Dias J M, Plaza A, Dobigeon N, et al. Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression – based approaches [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5 (2): 354 – 379.
- [13] Boardman J W, Kruse F A, Green R O. Mapping target signatures via partial unmixing of aviris data [C]//JPL Airborne Geoscience Workshop, 1995: 23 – 26.
- [14] Ridd M K. Exploring a V – I – S (vegetation – impervious surface – soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities? [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16 (12): 2165 – 2185.
- [15] Keshava N, Mustard J F. Spectral unmixing [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19 (1): 44 – 57.
- [16] Adams J B, Smith M O, Johnson P E. Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander – 1 site [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91 (b8): 8098 – 8112.
- [17] Zare A, Ho K C. Endmember variability in hyperspectral analysis: Addressing spectral variability during spectral unmixing [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31 (1): 95 – 104.
- [18] Dennison P E, Roberts D A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87 (2 – 3): 123 – 135.
- [19] Zhang J, Rivard B, Sánchez – Azofeifa A, et al. Intra – and inter – class spectral variability of tropical tree species at La Selva, Costa Rica: Implications for species identification using HYDICE imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105 (2): 129 – 141.
- [20] Zhang C S, Ma L, Chen J, et al. Assessing the impact of endmember variability on linear spectral mixture analysis (LSMA): A theoretical and simulation analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235: 111471.
- [21] Frankenberg C, Fisher J B, Worden J, et al. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L17706.
- [22] Guanter L, Zhang Y, Jung M, et al. Global and time – resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111: E1327 – E1333.
- [23] Guan K, Berry J A, Zhang Y, et al. Improving the monitoring of crop productivity using spaceborne solar – induced fluorescence [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22: 716 – 726.
- [24] Peng B, Guan K, Zhou W, et al. Assessing the benefit of satellite – based solar – induced chlorophyll fluorescence in crop yield prediction [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 90: 102126.
- [25] Daumard F, Champagne S, Fournier A, et al. A field platform for continuous measurement of canopy fluorescence [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48 (9): 3358 – 3368.
- [26] Song L, Guanter L, Guan K Y, et al. Satellite sun – induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo – Gangetic Plains [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (9): 4023 – 4037.
- [27] Shan N, Ju W, Migliavacca M, et al. Modeling canopy conductance and transpiration from solar – induced chlorophyll fluorescence [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 189 – 201.
- [28] Wang S, Ju W, Penuelas J, et al. Urban – rural gradients reveal joint control of elevated CO₂ and temperature on extended photosynthetic seasons [J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2019, 3: 1076 – 1085.
- [29] Zhang Y, Commane R, Zhou S, et al. Light limitation regulates the response of autumn terrestrial carbon uptake to warming [J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 739 – 743.
- [30] Zhang Y, Parazoo N C, Williams A P, et al. Large and projected strengthening moisture limitation on end – of – season photosynthesis [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 (17): 9216 – 9222.
- [31] Yang P Q, van der Tol C. Linking canopy scattering of far – red sun – induced chlorophyll fluorescence with reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 456 – 467.
- [32] Zeng Y, Badgley G, Dechant B, et al. A practical approach for estimating the escape ratio of near – infrared solar – induced chlorophyll fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111209.
- [33] Zhang Z, Chen J M, Guanter L, et al. From canopy – leaving to total canopy far – red fluorescence emission for remote sensing of photo-

- synthesis: First results from TROPOMI [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(21): 12030 – 12040.
- [34] Zhang Z, Zhang Y, Porcar – Castell A, et al. Reduction of structural impacts and distinction of photosynthetic pathways in a global estimation of GPP from space – borne solar – induced chlorophyll fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111722.
- [35] Liu X, Guanter L, Liu L, et al. Downscaling of solar – induced chlorophyll fluorescence from canopy level to photosystem level using a random forest model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 110772.
- [36] Liu X, Liu L, Hu J, et al. Improving the potential of red SIF for estimating GPP by downscaling from the canopy level to the photosystem level [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: 107846.
- [37] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2014, 39(5): 505 – 513, 540.
- Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 505 – 513, 540.
- [38] 廖小罕, 周成虎, 苏奋振, 等. 无人机遥感众创时代 [J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(11): 1439 – 1447.
- Liao X H, Zhou C H, Su F Z, et al. The mass innovation era of UAV remote sensing [J]. *Journal of Geo – Information Science*, 2016, 18(11): 1439 – 1447.
- [39] 廖小罕, 肖青, 张颢. 无人机遥感: 大众化与拓展应用发展趋势 [J]. *遥感学报*, 2019, 23(6): 1046 – 1052.
- Liao X H, Xiao Q, Zhang H. UAV remote sensing: Popularization and expand application development trend [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1046 – 1052.
- [40] 廖小罕. 地理科学发展与新技术应用 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(5): 709 – 715.
- Liao X H. Advance of geographic sciences and new technology applications [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(5): 709 – 715.

A discussion on some frontier directions of quantitative remote sensing

QIN Qiming^{1,2}, CHEN Jin³, ZHANG Yongguang⁴, REN Huazhong¹,
WU Zihua¹, ZHANG Chishan³, WU Linsheng⁴, LIU Jianli⁵

(1. *School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *Technology Innovation Center for Geographic Information System Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100871, China*; 3. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 4. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China*; 5. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract: The key to improving the ability of independent innovation lies in talents and education. In order to cultivate high – quality innovative talents in the field of “quantitative remote sensing”, this summer course held an academic salon for graduate students in combination with the frontier issues of quantitative remote sensing that the trainees were concerned about. The academic salon held four academic salons aiming at the academic problems in the theory, method, technology and application of quantitative remote sensing. The mechanism of radiation transfer, the decomposition of hyperspectral remote sensing mixed pixels, the application and service of UAV quantitative remote sensing were discussed. Among them, the academic salon of “radiation transfer mechanism” mainly discussed the progress and limitations of radiation transfer theory from Maxwell’s equations to microcosmic physics. “Hyperspectral remote sensing mixed pixel decomposition” academic salon mainly focused on two aspects of endmember variability research, namely, the discussion of spectral variability within the same endmember category and the spectral similarity between different endmember categories. Participants deeply discussed the theory and method of how to eliminate the unmixing error of hyperspectral remote sensing mixed pixel. The “vegetation fluorescence remote sensing” academic salon mainly discussed the application progress of solar – induced chlorophyll fluorescence (SIF) remote sensing, the process and mechanism of SIF excitation from leaf to sensor and its mechanism. Participants discussed five main issues in depth. “UAV quantitative remote sensing application and service” academic salon focused on UAV quantitative remote sensing and multi aircraft cooperative networking earth observation and remote sensing application service in complex scenes. Participants believed that UAV quantitative remote sensing application and service has broad prospects in the future. In each academic salon, a graduate student made a keynote speech. The participants would apply for a speech around the topic, discuss and question, and elaborate personal views or supplement relevant research progress information on relevant progress.

The host would make a summary speech. The online academic salon provided a new academic platform for graduate students to exchange and discuss the frontier progress of quantitative remote sensing. The academic salon attracted many interested graduate students and other personnel to participate through live broadcast of bilibili station, and expanded the dissemination of quantitative remote sensing knowledge.

Keywords: online academic salon; radiation transmission mechanism; mixed pixel decomposition; vegetation fluorescence remote sensing; UAV quantitative remote sensing

(责任编辑: 李 瑜)

下期要目

- 李 力 基于暗通道先验的航拍图像去雾效果优化研究
范嘉智 基于 FY-3C/MWRI 的湖南省地表温度遥感反演评价
董天成 基于 Faster R-CNN 和 MorphACWE 模型的 SAR 图像高原湖泊提取方法
潘 梦 高亚洲地区冰湖遥感研究进展及展望
夏 炎 模糊超像素分割算法的无人机影像烟株精细提取
陈 震 土地生态质量遥感评价模型与主控因子研究——以广安市为例
孟 清 秦岭山地对气溶胶的生态屏障效应
仇一帆 无人工标注数据的 Landsat 影像云检测深度学习方法
吴 倩 基于高光谱的土壤碳酸钙含量估算模型研究
闵文彬 青藏高原 FY-3C 卫星积雪产品评估
陈 帅 黑臭水体遥感识别研究进展
何海英 张家口明长城景观廊道 Sentinel-1 影像 SBAS 形变监测示范研究
蔡 祥 面向对象结合深度学习方法的矿区地物提取
张萌生 一种基于格网索引优化的遥感影像自动配准算法
蒋 校 国产高分一号卫星数据在境外地质矿产调查中的应用——以伊朗法尔亚地区为例