

大气遥感研究展望

邱金桓 陈洪滨 王普才 吕达仁

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 对大气遥感研究发展方向作了展望, 重点论述了如下几个方面: 1) 未来大气遥感研究若干特点; 2) 主被动式相结合的卫星大气遥感; 3) 大气遥感技术与应用集成; 4) 大气和地表物理参数的综合遥感; 5) 气溶胶与云光学特性遥感; 6) 微量气体时空分布遥感; 7) 地基大气遥感及走向综合集成。

关键词 大气遥感 研究特点 前沿课题

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0131-06

中图分类号 P407

文献标识码 A

A Prospect on Future Atmospheric Remote Sensing

QIU Jin-Huan, CHEN Hong-Bin, WANG Pu-Cai, and LU Da-Ren

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The prospect on future developments of atmospheric remote sensing research is made. It focus on: 1) some characteristics on future researches of atmospheric remote sensing; 2) active plus passive satellite remote sensing; 3) integration applications of atmospheric remote sensing techniques; 4) synthetic remote sensing of physical parameters of atmosphere and ground-surface; 5) remote sensing of aerosol and cloud optical properties; 6) remote sensing of the spatial-temporal distribution of atmospheric trace components; 7) ground-based atmospheric remote sensing.

Key words atmospheric remote sensing, research characteristics, frontier projects

1 引言

大气遥感是 20 世纪 60 年代发展起来的大气科学的新兴学科分支。大气遥感以探测大气参数和过程为目标, 主要研究内容包括遥感原理、探测技术、反演理论与方法、遥感实验与应用 4 个方面。1960 年 4 月美国发射的世界上第一颗气象卫星泰罗斯-1 号, 是开始大气遥感时代的一个象征性标志。自那时起, 由于大气科学本身发展的迫切需要, 也由于当代卫星、计算机等新技术的推动, 大气遥感的新原理、新技术、新方法和新应用层出不穷, 大气遥感取得了日新月异的大发展^[1~4]。

尽管大气遥感研究在近数十年来取得了飞速的发展和骄人的成就, 在探测气象要素、大气微量成分等方面, 几乎是无所不能, 但现在大气遥感的量化水

平仍然不能满足气候与环境变化研究、数值天气预报等应用的越来越高的要求, 某些大气参数的量化遥感技术与原理还有待于突破。未来大气遥感研究任重道远, 还面临不少难题和挑战。如何把握大气遥感未来发展的方向、前进的脉搏、研究特点和前沿研究课题, 有挑战性, 也有重要意义。基于过去多年的大气遥感研究工作与思考, 我们试图就大气遥感研究未来发展方向、研究特点、若干重大的前沿研究课题作一展望。

2 大气遥感研究特点

回顾过去数十年来大气遥感研究的发展历程, 面对全球环境与气候变化深化研究的需求和新形势, 对未来大气遥感研究特点我们概括为如下几点:

(1) 大气遥感与大气科学其他学科分支的相互交

融与综合发展 大气中的物理过程研究不仅涉及大气科学的方方面面,还与陆地学、海洋学、生物学和空间科学等学科密切相关。大气遥感未来发展需要大气科学各分支、地学领域多学科相互交融的研究路线与方法。在 20 世纪,大气遥感的众多分支,独立发展,各领风骚。为了适应地球环境与全球气候变化的深入研究需求,大气科学各学科分支的相互交融与综合发展是必然的发展趋势,这也是大气遥感研究未来发展的研究路线和鲜明特点。

(2) 人类生存环境与气候变化研究为中心 大气科学在 21 世纪最重要的使命是科学预测十年到百年间的环境—气候变化趋势。因此,大气遥感未来发展必须以人类生存环境与气候变化研究为中心,发展探测大气参数与过程的新技术和方法,基于探测结果与模拟研究的相结合,揭示与预测空气质量变化趋势及其对全球气候与环境变化的影响。

(3) 地球观测系统 (EOS) 与数字化大气相结合的发展战略 大气科学 21 世纪的战略性的研究方向与焦点将集中在发展对十年到百年间的气候变化进行预测的能力。数字化大气是实现这一预测研究从定性向定量发展的重要一环。20 世纪后期提出的“地球观测系统 (EOS)”是实现这一发展计划的关键技术之一。EOS 时代将是 21 世纪包括大气科学在内的地球系统科学的具有极其重要意义的发展趋势和特征,是一个具有轨道观测能力的长期发展计划,是 21 世纪包括大气科学在内的地学领域的一个划时代的全球性的重大科学技术工程。EOS 未来星上探测器的大多数包含大气遥感的设计目的和功能,大气遥感在 EOS 系统中占有极其重要的地位。EOS 系统的发展也必将把大气遥感研究推向一个新阶段。

(4) 未来技术与理论创新的最主要使命:大气遥感的高精度、高分辨率的定量化 大气遥感原理与探测技术日新月异的不断发展与创新是这一学科另一鲜明的特点。由于大气物理过程的复杂性和多因子依赖性,大气参数遥感的定量化面临大量的难题,这就要求不断发展新原理和新方法,以满足实际应用的要求。大气遥感的发展史就是一部创新史。

尽管大气遥感研究在近数十年来取得了飞速发展,但现在大气遥感的定量化水平仍然不能满足气候与环境变化研究,也不能满足数值天气预报等应用的越来越高的要求,一些大气参数的定量化遥感技术与原理还有待于突破,这使得现在的大量大气遥感数据在数值天气预报、气候变化研究等方面的应用还处于有限的状态。遥感的高精度、高分辨率的定量化是未

来大气遥感科学的永恒主题。越来越高的应用需求是大气遥感技术与理论创新的最重要的推动力。随着大气遥感定量化水平的不断提高,大气遥感数据的应用必定越来越深入、越来越广泛。

(5) 高新技术应用与市场相结合的大气遥感技术发展路线 大气遥感技术涉及当代高新技术的几乎所有方面,包括卫星、计算机、激光、精密机械、光电信息处理和仿真、虚拟等高新技术。大气遥感的需求也必将推动一些高新技术及其应用市场的发展。例如近年来国际上致力发展的 $\text{Ho}:\text{Tm}:\text{YLF}$, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 等高能、高重复频率、高工作稳定性的固体激光器,正是为了满足空间多普勒激光测风雷达的探测能力与精度要求,才迅速发展起来的,而这些高技术也一定在未来的高技术市场上产生重要的经济效益与辐射功能。

(6) 实验科学与应用物理学的紧密结合 基于近代电磁学、热力学与统计物理学、光学与量子物理学的基本理论和方法,实验研究与理论研究紧密结合,是发展大气遥感新原理、新探测技术与反演方法的基本路线。

3 主被动式相结合的卫星大气遥感

20 世纪的空间大气遥感以被动式的卫星遥感为主。21 世纪必定迎来主、被动式卫星大气遥感各领风骚、互相交融的新时代。在可预见的未来,主动式的卫星大气遥感手段将主要是空间激光雷达和微波雷达以及 GPS 卫星探测技术。主动式的空间激光雷达与微波雷达技术要比被动式卫星遥感技术复杂得多,但由于它们具有多功能、高探测分辨率、高探测精度等独特优点,20 世纪 80 年代以来一直受到高度重视,一系列关键技术已经被攻克,美国 NASA 于 1994 年 9 月成功地发射了载有激光雷达的航天飞机,进行了空间激光雷达探测全球云和气溶胶的首次实验,取得了令人鼓舞的探测结果^[4,5]。2003 年 1 月 12 日,世界上第一个空载的地球科学激光高度计系统 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 成功上天,它不仅在探测地球物理参数方面有重要的应用,而且可以高精度地探测全球的云顶高度。国际空间遥感界已经制定了多个在 21 世纪初期实施装载激光雷达或微波雷达的卫星平台发射计划,用于探测全球的降雨、风场、云和气溶胶分布,微量气体成分的三维空间分布等。国际上计划发展的星载激光雷达主要是后向散射、差分吸收和多普勒 3 类,其中以后向散射为工作原理的 Nd-YAG 激光雷达技术最成熟,它首先被送上

空间平台以探测大气气溶胶和云的光学特性等。探测大气微量气体的差分吸收激光雷达和测风的多普勒激光雷达不久也将被载上空间平台。应用 GPS 技术遥感水汽、温度等大气参量的原理与实验研究近年来也取得了重要的进展,具有非常诱人的应用前景,必将在 21 世纪的大气遥感中发挥日益重要的作用。

在 20 世纪,被动式的卫星大气遥感主要用于探测大气水汽、温度、降水、云量和气溶胶等参量的空间分布,现在的主要问题是探测分辨率与精度方面的定量化水平还与实际应用要求存在较大的差距。为了突破这一应用瓶颈,21 世纪将主要发展高光谱、多角度、多时相、多探测器的星载探测器技术以及基于这些技术的新一代的遥感机理与反演方法。在发展先进的反演方法方面,综合应用主、被动式的卫星遥感信息,互为输入参数(边界条件)或约束条件的反演技术,对于解决某些遥感问题将是极其重要的。例如,空间激光雷达探测的全球云的参数可作为输入参数场,用于被动式的红外与微波卫星遥感大气水汽与温度分布,有希望突破云天情形下高精度卫星遥感大气水汽与温度分布的难题。在 21 世纪前期,卫星大气遥感新原理、新技术与新应用发展有希望在如下几个方面取得突破:

(1) 新的遥感信息提取技术与反演方法,包括解决云天情形下大气水汽与温度分布的高精度反演问题;

(2) 应用新型激光器的激光大气遥感技术,特别是解决全球风场以及微量气体含量的激光遥感技术;

(3) 监测全球风场三维分布技术;

(4) 监测全球云和降水三维分布技术。

国际遥感定量化技术迅速发展,主、被动式卫星遥感相结合,地基与空间探测相结合,综合利用高光谱、多传感器、多时相的卫星探测资料,应用先进的信息提取与反演技术,一个高精度定量化、时空高分辨率、完备的全球大气参数的探测系统一定能够实现,并在全球资源环境和气候变化研究方面,发挥日益重要的作用。

4 大气遥感技术与应用集成

大气遥感技术的一大特点是它的多样性与互补性。不同的探测技术各有所长,互相补充,单一或几个探测手段难以满足气候变化预测和天气预报对大气要素的探测要求。未来的大气遥感系统一定是多种探测技术的集成。这里所谓的“集成”不是简单的堆积,应包含如下的关键技术:

(1) 不同探测技术的综合、互补与集成 在 20 世纪,声波、微波、红外和光学遥感,主动式和被动式的遥感,地基、机载和卫星遥感,常规气象要素观测和遥感,各自独立发展,各有所长。就大气遥感而言,这一技术路线在原理与技术的发展阶段,是合理的。但在建立并逐步完善数字化的全球大气探测系统阶段,必须研究不同探测技术与应用的综合、互补和集成,舍此不可能建立真正数字化的全球大气探测系统。这里论及的“互补”主要表现在空间意义上,即集成不同技术探测的不同空间(特别是垂直尺度)的大气要素,建立起满足当代气象预报和气候变化研究要求的三维空间大气过程和要素的实时探测系统。

(2) 不同遥感方法探测结果的可比性。

(3) 不同遥感方法的探测结果互为附加信息或约束条件的遥感反演技术。

现在的大气遥感,特别是被动式的遥感,普遍存在反演不适定(稳定)的问题,需要引入一些附加信息、边界条件或约束条件。由于缺乏这些信息,过去往往在反演中引入一些假设,使反演精度和分辨率不尽人意。随着许多大气遥感技术的不断发展与成熟,现在有条件在反演中应用其他遥感手段的探测结果作为附加信息或约束条件,大大提高反演精度和分辨率。例如,从空间激光雷达回波信号提取大气气溶胶或云的消光系数垂直分布需要输入边界条件(近端或远端边界处消光系数),可以应用临边扫描法探测的高层气溶胶消光系数值,作为边界条件;或应用星载成像光谱仪探测的大气柱气溶胶光学厚度,作为约束条件,求得气溶胶消光系数垂直分布。又如,可以应用空间激光雷达探测的云高和云消光系数分布,作为卫星红外遥感云天情形下的水汽和温度垂直剖面的附加信息,提高反演精度和分辨率。我们还可以应用 GPS、卫星微波和红外探测的水汽分布和总水汽含量的结果互为附加信息,……等等。这一技术的不断探索和应用,一定会在提高卫星遥感大气参数的精度和分辨率方面,发挥非常重要的作用。

(4) 全球与局地尺度的遥感数据(包括不同手段的探测结果)同化。

5 大气和地表物理参数的综合遥感

地表光谱反射率影响地球辐射收支,是空间对地遥感应用的主要理论依据之一,在遥感信息识别、地表与植被分类、国土资源探测、环境污染及病虫害监测、农作物估产等方面都有广泛的应用,植被光谱反射率特性还能反映植物的生长状态和季节变化,信息

农业革命的关键技术之一是空间遥感植被特性的定量化。

要从卫星探测的向上辐射亮度提取地表光谱反射率信息,必须进行所谓的大气订正,即从该亮度扣除大气辐射影响。国际遥感界长期以来一直把大气订正视为卫星对地定量化遥感的关键技术之一,并已开展了大量研究,提出了许多大气订正方法^[6]。但由于不同地区大气状态的不同,现有各种方法还不能满足遥感信息定量化应用的要求。迅速使大气订正走向实用化是遥感定量化发展的关键战略之一。在过去的数十年中,空间对地遥感基本上走的是地表遥感加大气订正的技术路线。大气订正的研究方向之一是通过大气气溶胶和水汽等主要因子的同步测量及大气辐射传输计算加以实现。这个方法被普遍认为是可靠的大气订正方法。但这种方法的主要问题是需要大量的地面同步测量,只能用于有限地方。因此,基于遥感影像自身信息,不需要大气测量、地面测量等辅助资料的大气订正方法研究就更加显得尤为重要。由于大气订正面临一些问题,也由于大气气溶胶问题的重要性,近年来国内外一些学者开始致力于地表反射率和气溶胶光学参数的综合遥感研究。这个方法的一个突出优点是不需要同步测量可从空间探测信息本身反演得到气溶胶参数,并用于大气订正获得更精确的地表光谱反射率信息。NASA 的中分辨率的成像光谱仪(MODIS)、多角度的成像光谱仪(MISR)等新一代的星载探测器的一个重要应用方向正是探测全球(包括陆地)的气溶胶光学特性。遥感的定量化是遥感研究的永恒主题,国际遥感定量化技术迅速发展,特别是利用多遥感器、中高光谱、多时相遥感资料进行监测和分析全球资源环境、气候变化的需要,使得遥感信息定量化方法研究越来越受到重视。由于地表反射比大气气溶胶对向上的天空亮度一般有大得多的影响,为了探测气溶胶特性,必须走地表特性和大气参数综合遥感的技术路线,综合遥感是 21 世纪空间对地定量化光学遥感研究的必然发展趋势。

探索从空间综合光学遥感大气参数和地表特性的理论、技术、反演方法和应用,对环境与气候变化研究、国土资源探测、信息农业革命等都具有重要的意义,是实施数字化地球发展战略的关键技术之一。

地表与大气的综合光学遥感研究是 20 世纪的地表遥感加大气订正的研究阶段和路线的必然发展,是定量化空间对地光学遥感的迫切需要,是新一代的中分辨率和高分辨率的成像光谱仪空间探测应用的必然趋势。我国未来也计划发射光学卫星,以探测地表与

大气特性,进行资源探测与农业估产等。从这个角度上说,开展大气与地表的综合遥感研究是迫切而又非常重要的。

6 气溶胶与云特性参数遥感方法与应用

在诸多影响气候变化的因子中,云和气溶胶是两个非常重要、但又最不确定的影响因子。由于云和气溶胶在气候变化中的重要作用,有关云和气溶胶的研究近年来一直受到高度重视,被列为全球变化研究中优先的项目。然而云和气溶胶的辐射气候强迫问题至今并未得到很好解决,原因主要是两个方面的。原因之一在于云和气溶胶辐射强迫机制的复杂性,其物理过程远比 CO_2 等微量气体的温室效应复杂。由于不同的物理光学特性,有的类型的气溶胶对地气系统起加热作用,有的反而起冷却作用,气溶胶既能直接散射和吸收太阳辐射,产生直接的辐射强迫,又可作为云凝结核,影响云的微物理特性和宏观云量,影响地球—大气系统的水循环,产生更加复杂和不确定的间接辐射强迫。不同的云也存在不同的辐射强迫,低云起冷却作用,高云通常起加热作用,其特性密切依赖于云的微物理特征。另一原因在于缺乏云和气溶胶物理光学特性的系统资料,难以估计其变化趋势,导致目前对于气溶胶和云的辐射强迫估计千差万别。由于气溶胶和云的时空变化比较大,加上云和气溶胶的一些关键参数(如单次散射反照率)的定量化探测技术并未很好解决,这一问题变得更加突出。20 世纪末和 21 世纪初,已经上天或即将陆续上天的多个新型的卫星探测器,如美国 NASA 的中分辨率的成像光谱仪(MODIS)、高分辨率成像光谱仪(HIRIS)、云和气溶胶的空间激光雷达观测系统(PICASSO-CENA),日本的临边大气光谱仪(ILAS-II)、全球成像光谱仪(GLI),欧洲空间局(European Space Agency,简称 ESA)局的偏振探测仪(POLDER)等,都瞄准解决探测局地 and 全球尺度云和气溶胶参数的问题。因此,云和气溶胶物理光学特性高量化的卫星与地基遥感方法及其应用在未来数十年内将是重要的前沿研究课题,研究的重点将集中在如下几个方面:

(1) 卫星定量化遥感陆地和海洋上空大气气溶胶的原理、方法及其应用。两个关键的技术和难题是陆地光谱反射率及其陆地上空的气溶胶光学厚度的综合遥感和气溶胶单次反射率(折射率虚部)的探测。

(2) 地基和空基遥感相结合,定量化探测局地和全球尺度的云光学厚度、粒子半径、云高、云水含量

等重要参数的方法。对不同的云系, 有不同的遥感难题。对空间高度不均一的云(如碎云等), 目前的遥感精度还很低。空间激光雷达是未来探测(光学上)中、薄云的云高、云中消光系数分布等参数的最先进的手段。激光雷达距离云等大气散射介质越远, 多次散射贡献越大^[7,8]。对空间激光雷达测云而言, 多次散射贡献往往很大, 特别对较厚的云, 激光回波中多次散射贡献可比一次散射成分大数十倍。基于多次散射探测原理的空间激光雷达有可能大大提高激光探测云光学特性的能力。因此, 研究多次散射激光雷达探测云光学特性的原理、技术与反演方法是重要的。空间微波雷达与激光雷达相结合, 再加上被动式的卫星可见、红外与微波遥感, 在不远的将来, 应能够建立起可探测不同云系特性的遥感系统。

(3) 适用于非球状气溶胶和云条件的地基和空基遥感技术和信息提取方法。由于探测原理上困难, 在遥感探测气溶胶和云的物理光学特性方面, 过去普遍采用球状粒子的假设。一些研究表明, 这可能引起很大的探测误差。应用主、被动光学遥感手段相结合探测的多角度和多光谱的偏振散射信息, 可能是寻求这一突破的有效途径。

(4) 地基遥感与空间遥感相结合, 探测全球尺度的云和气溶胶光学参数, 研究这些参数的时空分布特征。

7 大气微量气体时空分布遥感研究

大气组分是大气科学中既古老而又年轻的研究对象。20 世纪中叶以来, 人们对大气组分的研究给予了极大的关注并成为全球变化的热点科学问题, 逐渐发现大气中的某些组分正在发生明显变化, 进而导致全球环境和气候的变化。大气组分的变化主要是指那些氮、氧之外的微量气体和颗粒物的变化。由于社会发展和人类活动的增强, 使得大气中的微量气体组分的种类明显增加, 其浓度也在不断发生变化, 这些微量气体组分的定量获取和认识它们的变化特征则是研究它们环境、气候效应的基础。在大气微量气体时空分布、变化趋势及其气候效应研究方面, 对人类生存环境变化至关重要的科学问题包括:

(1) CO_2 , O_3 , CH_4 等温室气体的变化趋势及其环境—气候效应;

(2) 伴随世界的全面工业化过程, 人类有序和无序行为可能产生的新的微量气体及其辐射—气候效应;

(3) 微量气体时空分布的准确探测。

对大气组分的探测有三种基本方法, 即卫星遥感探测、地基遥感探测和直接探测。三种方法各有特点, 直接探测能够获得高可靠性的大气组分垂直分布数据, 地基遥感探测可以获得长期可靠的总量结果, 而卫星遥感可以获得全球范围的总量和垂直分布观测数据。随着探测技术的发展和研究工作的需求, 往往采用多种手段来对某一种大气组分进行探测。在未来的大气微量成分时空分布的遥感中, 采用差分吸收和拉曼散射原理的两类激光雷达(特别是空间激光雷达)将发挥主角作用。差分吸收激光雷达可探测 O_3 , SO_2 , CH_4 , C_2H_4 , N_2O , CFCs 和 NH_3 等大气微量气体成分浓度分布。拉曼散射原理的激光雷达的一个突出优点是对激光波长的要求不如差分吸收激光雷达严格, 它在技术上的一大瓶颈是拉曼散射光一般很微弱, 要比非拉曼散射的激光回波信号强度小几个数量级。因此, 20 世纪 80 年代以前, 拉曼散射原理的激光雷达主要用于监测大气中浓度较高的污染气体, 如 SO_2 的排放浓度等。近年来, 由于小接收视场角和窄滤光技术的应用, 使激光雷达在白天也可以采用光子计数技术, 极大地提高了接收灵敏度和探测微弱激光回波信号的能力, 使新一代的拉曼散射激光雷达在白天都能探测对流层、甚至平流层的微量气体浓度分布。随着拉曼散射与差分吸收激光雷达技术的不断发展, 我们一定能迎来空间激光雷达探测全球大气微量成分时空分布的时代。卫星临边技术探测对流层上部至平流层中部大气微量成分是另一重要的发展方向^[9], 未来要突破的关键技术是如何提高它的探测精度, 特别是在对流层上部的探测精度。

8 地基大气遥感及走向综合集成

地基大气遥感具有时间连续观测方面的优点, 作为卫星遥感和直接探测的补充, 也将得到快速的发展。

地基大气遥感对于某些大气信息的获取已经而且正在发挥着巨大的作用。例如, 地基天气雷达站网对于(强烈)天气预报、定量测量降水和洪涝灾害预警等业务工作是必不可少的。全球 Dobson 臭氧总量的站网观测是监测和研究全球臭氧变化的重要资料来源。近年来, 气溶胶气候效应问题研究需要的气溶胶地基遥感测量站网(AERONET/photon)正在建立和扩大, 在某些国家和地区建立的雷电监测网为雷电灾害防护及相关科学研究提供了有价值的信息资料。

未来地基大气遥感也将向综合集成方向发展。以激光雷达、微波雷达(包括风廓线雷达)、无线电声

雷达、太阳光度计与光谱仪、红外和微波辐射计等组成的大观测系统,将使大气主要参数(风、温度、湿度、云及一些重要微量成分)垂直廓线的同步反演与连续监测成为现实,其应用范围得以进一步扩大。

9 结束语

大气遥感原理与探测技术日新月异的不断发展与创新是这一学科的一大鲜明特点。基于我们过去多年的大气遥感研究工作与思考,本文我们试图就大气遥感研究未来发展方向、研究特点、若干重要的前沿研究课题作一展望。由于水平的限制,可能有不少不妥之处。

参考文献

- [1] 周秀骥,陶善昌,姚克亚. 高等大气物理学. 北京:气象出版社,1991
Zhou Xiujì, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics*. Beijing: China Meteorological Press, 1991
- [2] 邱金桓,吕达仁,陈洪滨,等. 现代大气物理学研究进展. 大气科学, 2003, **27**: 628 ~ 653

- Qiu Jinhuan, Lu Daren, Chen Hongbin, et al. Modern research progresses in atmospheric physics. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2003, **27**: 628 ~ 653
- [3] King M D, Kaufman Y J, Tanre D, et al. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80**: 2229 ~ 2259
- [4] McCormick M P. Spaceborne lidars. *The Review of Laser Engineering*, 1995, **23**: 89 ~ 93
- [5] Winker D M, Couch R H, McCormick M P. An overview of LITE: NASA's Lidar In-space Technology Experiment. *Proc. IEEE*, 1996, **84**: 164 ~ 180
- [6] Kaufman Y J, Tanre D, Gordon H R, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16815 ~ 16830
- [7] Qiu Jinhuan, Quenzel H, Wiegner M. Parameterized multiple-scatter lidar equation and its inversion theory, I: Equation. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1992, **16**: 229 ~ 239
- [8] Qiu Jinhuan. Aerosol and cloud extinction profiles retrieved from LITE data using multiple-scattering model. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2003, **4893**: 37 ~ 44
- [9] McCormick M P, Veiga R E. SAGEII measurements of early Pinatubo aerosols. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**: 155 ~ 158