

# 中国典型地区大气光学特性及其应用

饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 王英俭, 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 大气的光学性质决定了大气辐射平衡; 各种先进光电技术的应用场景绝大部分都位于地球大气层内或通过大气路径, 相关光电系统的功能受到大气光学特性不同程度的影响。大气光学特性(包括地表的光学特性和天空背景辐射特性)是光波在大气中传播和大气辐射传输研究必需的基础物理性质, 在气象、气候和天文观测等基础和应用研究以及自适应光学技术、自由空间光通讯等光电工程应用中具有十分重要的作用。中国的自然环境十分复杂, 相应的大气光学特性不能简单的套用国际上其它地区的模式。应进行中国大气光学特性的区域划分, 在各个典型地区进行大气光学特性的系统测量和数据分析, 对有关大量气象和大气光学特性观测资料进行分析研究, 获得各典型地区大气光学特性的统计特征, 建立可用于辐射大气传输、光波大气传播研究、光电系统分析与设计等的我国各个典型地区的大气光学特性的统计平均模式, 研制光辐射大气传输及其光电应用软件包。

**关键词:** 大气光学性质; 大气辐射传输; 光波大气传播; 光电应用

中图分类号: O43;P40;P41;P42;TN2

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)06-0401-08

## Research and Application on Optical Properties of Atmosphere in Typical Regions of China

RAO Rui-zhong, QIAO Yan-li, WEI He-li, WANG Ying-jian, GONG Zhi-ben

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Optical properties of the atmosphere have important effects on the atmospheric radiation balance and on the functions of various advanced opto-electric instruments working in the atmospheric environments. Optical properties of the atmosphere including sky background radiation and surface reflectance are basic physical quantities for atmospheric radiative transfer, light propagation research, and can also find important application in remote sensing, adaptive optics, free-space optical communication, etc. The atmospheric environments of China are very complicated and popular models like US standard atmosphere can not be applied simply. We suggest to divide the whole territory into several typical regions according to the environment, the surface, the solar irradiance, and the climate condition. Systematic and long-term measurements on the optical properties of the atmosphere should be performed, and application models should be built on the statistical characteristics. Algorithm codes and softwares should be built in consideration of the atmospheric models.  
**Key words:** atmospheric optics; atmospheric radiative transfer; light propagation in atmosphere; opto-electric engineering

收稿日期: 2007-07-24; 修改日期: 2007-08-21

E-mail: rao@aiofm.ac.cn

## 1 大气光学性质对气候变化和光电技术应用的影响

大气的 $\text{光学性质}$ 决定了大气的辐射收支平衡,影响了气象和气候变化<sup>[1-2]</sup>。在国民经济建设中,各种先进光电技术的应用场景绝大部分都位于地球大气层内或通过大气路径,其系统功能将受大气光学特性的影响,其有效使用的概率受到不同程度的限制。一方面光电系统的设计必须考虑大气光学特性;另一方面,何时何地使用何种系统以达到最佳效果也需要对大气光学特性的系统了解<sup>[3-4]</sup>。因此了解和掌握大气光学性质,正确分析大气对气象和气候等基础研究以及光电技术应用系统功能的影响,进而进行气候变化的有效预测、发展校正或减小大气对光电系统影响的方法和技术,对我国经济建设具有十分重要的意义。

大气光学特性、地表光学特性、天空背景辐射特性以及光电传输特性受地域、天气、环境等多种因素的影响,只有研制相应观测设备,系统地测量大气光学参数、地表光学参数和天空背景辐射参数,建立符合实际大气环境条件下的大气光学特性应用模式,才有可能对大气对气候变化以及光电系统功能的影响做出可靠的判断。

随着我国国民经济的快速增长,对气候变化的可靠预报、大气环境的监测等方面的需求日益迫切。得益于我国光电科技事业的飞速发展,各种现代化的光电系统相继投入使用或正在研制中,我国航天事业的长足进步使我们掌握了一些了解和利用自然资源的利器。所有这些以及更多的经济建设都对大气中的光电问题的研究和解决方法提出了十分迫切的要求。如果不建立起中国自己的大气光学特性数据库并拥有自己的大气光学特性应用模式,就不能正确的分析我国的气候变化和在大气环境中工作的光电仪器的效能,甚至造成严重的不良后果,影响我国国民经济和科技事业的快速发展。因此,我国大气光学参数是国家基础性的重要科技资源。

兹将目前气候变化研究、遥感和激光等光电工程中几个突出和紧迫的涉及到大气光学问题的基础

研究和光电应用略述于下。

### (1) 气候变化

近年来,全球气候变化问题正引起越来越广泛的重视。全球变暖问题正成为共识,温室气体如二氧化碳的排放已成为国际上各国政府间的大事。全球气候变化异常日益明显,正带来越来越严重的危害。极端气候现象(如去年重庆地区的大旱和今年重庆地区的洪水)给气候变化的中长期预报带来了挑战。虽然目前的气象观测系统在相当广泛的地区形成了观测网,当大部分台站的观测数据仅限于常规气象参数,只有较少的台站具有廓线测量能力。而对影响大气辐射收支平衡的吸收气体的含量、大气气溶胶粒子的含量和光学性质等缺乏观测,这些无疑会严重影响大气辐射分析模式的精度和预测能力。

### (2) 光学遥感、天文观测等

空间资源的重要性与日俱增,世界各国对空间资源的竞争日益激烈,利用航空航天技术进行地球资料的探测一直是十分重要并广泛开展的工作。随着光学遥感技术水平的提高,大气影响的重要性也会越来越明显。大气衰减降低了目标的辐射强度,从而影响到探测阈值;天空背景辐射降低目标对比度,从而影响到目标的识别;大气湍流降低目标成像分辨率,影响跟踪和定位精度。众所周知,大气是影响地面天文观测的最大阻碍。如何避开或克服大气的影 响,是当今天文学界最重要的任务之一。

只有在对大气光学特性基本规律性认识的基础上,才能根据需求提出光学遥感系统的技术指标。另一方面,在光学遥感系统工作时,实时掌握大气光学特性,则可校正大气影响,从而大大提高仪器的功能和扩大使用条件的范围。

### (3) 激光大气传输及相关工程应用

激光在大气传输过程中产生的一系列线性和非线性效应(包括折射、分子吸收,和气溶胶粒子吸收与散射、湍流效应、热晕效应等)导致激光束能量的衰减、光斑漂移、扩展、畸变以及对目标识别能力和跟踪瞄准精度的下降,严重影响着激光的工程应用。掌握大气对激光传输的影响及其校正效果

的基本规律和定量数据, 将使激光技术的应用研究少走弯路, 避免失败。同样在实际激光应用系统设计中发挥至关重要的作用。例如随着我国空间技术和通讯事业的飞速发展, 自由空间光通讯技术得到了日益增强的重视, 国内多家科研单位已经着手开展这项工作, 他们很快就发现了大气的影 响是制约自由空间光通讯技术发展并影响其应用效果的关键因素。

典型应用地区大气光学参数的数据库和统计模式, 可以为激光大气传输数值模拟计算提供基础数据, 对于激光应用的可行性论证和系统设计是必不可 少的。在激光的实际应用中, 基于这些大气模式进行实时大气状态的分析预报是评估激光应用效果的不可缺少的重要环节。

尚有许多其它牵涉到大气的基础研究和应用的问题, 这里就不再一一详述了。

## 2 国内外研究现状

发达国家投入大量的人力和物力对大气光学特性从理论和实验两个方面进行了大量的深入研究, 掌握了一些必要的数 据, 建立了相关的数理模型和数据库, 开发了有关的应用软件。基于对大气光学特性的深入认识, 有关气候变化的预报精度和光电技术系统性能的提高获得了长足进步。

美国对大气光学特性研究一直高度重视, 空军地球物理实验室、林肯实验室等著名的实验室投入大量力量汇编了大气分子吸收谱线数据库, 研制了一系列的大气光学参数测量设备, 在一系列激光实际大气传输重大原理性综合试验及定标实验中进行了全面的大气光学参数测量, 包括湍流强度、大气平均风速和风向以及风速脉动、大气吸收系数等<sup>[5]</sup>。针对不同的应用场景(包括波斯湾、地中海、日本海等), 开展了长期、系统的大气光学参数测量研究, 建立了大气光学参数模式和数据库及应用软件。美国空军地球物理实验室开发的 Lowtran(低分辨率大气透过率计算程序) 和 Modtran(中分辨率大气透过率计算程序) 在国际上得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。经过不断改进, Lowtran 最后一版为 1989 年发布的第 7 版

(Lowtran7)。可以计算从  $0.2 \mu\text{m}$  到远红外波段的大气光谱透过率和天空背景辐射(包括太阳直射、大气散射和热辐射), 光谱分辨率为  $20 \text{ cm}^{-1}$ 。在 Lowtran7 的基础上, 发展了 Modtran, 将 Lowtran7 分子吸收部分的  $20 \text{ cm}^{-1}$  分辨率提高到  $2 \text{ cm}^{-1}$ , 分子吸收的计算可选用精确的相关 K 分布法, 辐射量计算除了二流近似外, 还可选用精确的离散坐标法。最近 Modtran 又推出了最新版 Modtran5<sup>[7]</sup>。对于激光的应用, 则推出了 HITRAN 大气参数数据库<sup>[8]</sup>, 不断翻新, 并相应推出了应用软件 FASCODE<sup>[9]</sup>。

就辐射传输算法而言, Lowtran 或 Modtran、FASCODE 的数理模型是基本合适的, 它也经过了许 多实际测量数据的检验。现在这些软件在全世界广泛使用, 为分析大气对光电系统的影响发挥了重要作用。但其中的“标准”大气模式和气溶胶模式等光学参数不能满足特定地区的应用需要, 也缺乏大气湍流模式。该软件是根据美国的自然环境和地理、大气条件设计的, 如将地理区域分为热带、中纬度、近北极, 气溶胶类型分为乡村、城市和海洋。这些都和我国的实际情况差异很大。另一方面, 国内外有关专家已指出: 这些软件使用的气溶胶散射模型数据难以进行分析, 因而难以进行实际检验。最后, 该软件由多人集体完成, 结构混乱, 不符合现代结构编程规则, 难以进行有效的移植与改进。

我国也长期开展了大气光学特性方面的研究工作, 在大气吸收气体测量研究、大气溶胶光学特性测量研究以及光波在大气中传输的各个方面, 包括特定波长的激光大气传输、红外辐射特性测量及其大气修正、激光大气探测、卫星反演大气光学参数和背景辐射、光波大气传输的数值仿真计算软件等工作开展了研究。但这些工作大都服务于特定的需求, 研究结果也仅仅适用于特定目的。规律性的、适用于各种目的大气光学特性的系统研究尚未真正系统地展开。

大气光学特性、天空背景辐射特性和地表反射光学特性是许多基础科学研究和光电工程应用的基础, 虽然有着不容低估的科学价值, 但由于它们在晴好天气条件下并未直观、直接、显性致命地构成

光电工程应用的威胁,致使它们在我国并未引起足够的重视。在我国众多科研机构和应用部门中,大量使用着上述国外的大气模式和软件。存在着很大的不确定性和风险,因此许多用户都发出了建立我国自己的模式和软件的呼声。

### 3 美国标准大气和大气光学特性应用模式简介

美国分别在 1962 年和 1976 年建立了常规气象参数(温、湿、压、大气密度、气体组分等及其廓线分布)的标准模式<sup>[10]</sup>。但这个标准大气缺乏大气光学特性的许多参数,为此美国空军地球物理实验室

建立了较全面反映大气光学特性的参数模式<sup>[11]</sup>。并按照美国标准大气的格式,建立了热带、中纬度冬季、中纬度夏季、近北极冬季、近北极夏季五种应用模式<sup>[12]</sup>。这些模式都嵌入到 Lowtran、Modtran 和 Fascode 软件中,此后在全世界得到了广泛应用。

随着这几个软件的发展,有关气溶胶粒子光学特性、云、雨、海雾等特殊大气介质的光学特性也得到了定量模型化,并嵌入到软件中<sup>[6]</sup>。而随着高分辨率大气光谱研究工作的进展,大气分子吸收谱线数据汇编 HITRAN 则不断扩充、完善,最大限度地采纳了全世界学者的研究成果<sup>[13]</sup>。图 1 分别绘

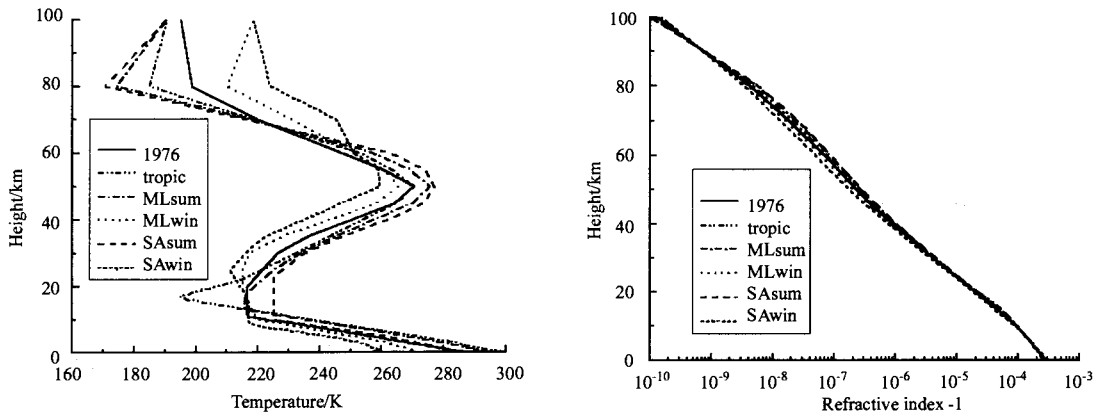


图 1 美国标准大气和五种应用模式下大气温度和折射率的高度分布廓线

Fig.1 Atmospheric temperature and refractive index profiles for US standard atmosphere and five models

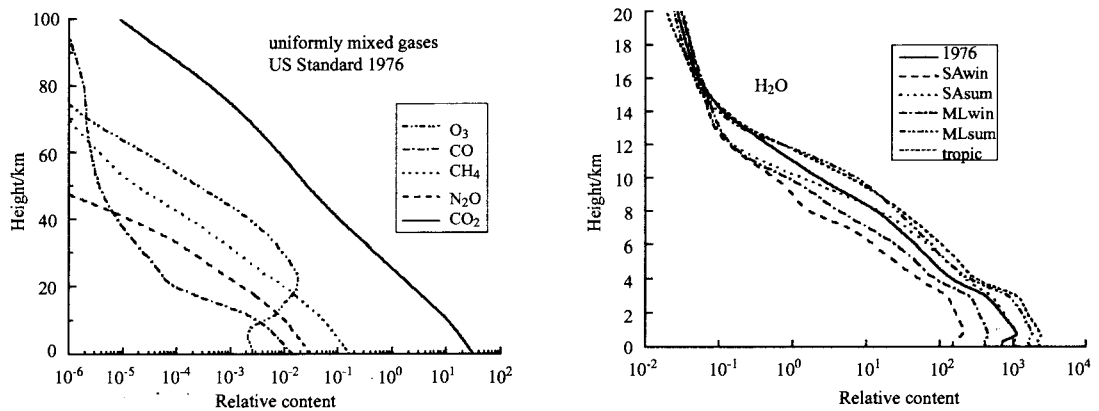


图 2 美国标准大气和五种应用模式下大气均匀混合气体和水汽的高度分布廓线

Fig.2 Atmospheric content profiles of uniformly mixed gases and water vapor for US standard atmosphere and five models

出了美国标准大气和热带、中纬度冬季、中纬度夏季、近北极冬季、近北极夏季五种应用模式下大气温度和折射率的高度分布廓线。图 2 则分别绘出了美国标准大气和五种应用模式下大气均匀混合气体和水汽的高度分布廓线。

## 4 中国大气光学特性的复杂性

地球大气是一个非常复杂的系统,在不同的地区、环境、季节等条件下,其光学特性的差别是非常巨大的。我国幅员辽阔,不同地区的自然地理条件差异非常明显,大气条件同样千差万别,各种国防光电系统的应用场景必然涉及我国国土的各种典型地区。

现在我们仅从自然环境、地表、大气的角度简单领略一下我国的复杂情况。从我国的地形图中可以看出,即使山地、平原、海洋等宏观的特征也不能用地理纬度或其它参量简单地区分<sup>[14]</sup>。各种自然地理区划不尽统一,地貌区划主要反映了天-气-地系统中“地”的复杂情况;气候区划主要反映了天-气-地系统中“气”的复杂情况。而太阳辐射的分布反映了天-气-地系统中“天”的复杂情况。目前的中国自然地理区划也是一种较简化的处理,因为按地、气、天进行的区划并不完全重合。一个特别明显的例子是四川盆地,地表和太阳辐射量迥异于其它地区;另一个例子是黄土高原地区和华北平原,它们都没有被区分开来。因此,中国自然地理区划只能作为最简单的初步模型基础。

显然,简单地套用外国的模式(如美国按热带、中纬度等划分方式的大气模式)不但在技术上是不可靠的,而且会产生不同层面的误导作用,甚至可能带来严重的后果。为了我国国民经济建设和科研事业的发展,必须建立起我国的光学大气模式。这是一件具有重要应用前景但同时也是十分艰巨的工作。其核心是在我国的典型地区开展大气光学特性特征参数(包括大气气溶胶、大气湍流、主要吸收气体含量、天空背景辐射和地表反射)的长期、系统的测量工作,获得规律性的认识,并利用我国气象事业获得的长期、系统的气象资料,建立起我

国自己的大气光学特性应用模式,并根据需求建立大气辐射传输和光电大气影响分析软件系统。可以广泛用于大气辐射研究、航空航天、遥感、激光技术应用等有关国计民生的诸多重要领域,产生重大社会效益。使我国在本领域的研究工作摆脱依赖国外模式的被动局面,将产生意义深远的影响。

## 5 中国典型地区大气光学特性研究

中国大气光学特性研究的目标是:建立我国各典型地区的大气光学特性应用模式,包括常规气象参数(温、湿、压、风速、风向及其廓线分布、大气密度、气体组分等)、大气湍流强度及垂直廓线分布、大气气溶胶粒子谱分布、折射率、浓度垂直廓线分布等。提供我国各典型地区大气光学特性模式、天空背景辐射光谱分布模式和地面反照率光谱特性模式及光电应用软件包。形成符合我国大气特点的大气辐射传输模型,建立包括激光大气传输、大气辐射传输等的计算软件。这些应用模式和软件应具有可推广性,软件应具备适用性、快速性、易移植性等。

中国大气光学特性研究的关键科学问题包括:(1)中国典型地区大气光学特性模式体系的构建;(2)中国典型地区大气光学特性的典型区域划分方法;(3)巨量时空数据的统计分析方法和模式研究;(4)光辐射大气传输算法;(5)大气光学特性高精度测量新技术;(6)大气光学特性模式的校验方法;(7)光辐射大气传输综合测试技术。

主要研究内容包括:进行中国典型地区大气光学特性的区域划分,在各个典型地区进行大气光学特性、天空背景辐射特性和地表反射光学特性的系统测量和数据分析,对有关大量气象观测资料和大气光学特性观测资料进行分析研究,获得各个典型地区大气光学特性的统计特征,建立可用于光电大气传输研究和系统分析的各个典型地区的大气光学参数冬、夏两季(部分地区四季)的统计平均模式,研制光辐射大气传输及其光电应用软件包。

大气光学特性模式包括常规气象参数(温、湿、压、风速、风向及其廓线分布、大气密度、气体

组分等); 大气湍流强度及垂直廓线分布; 大气气溶胶粒子谱分布、折射率、浓度垂直廓线分布等。大气光学特性模式和天空背景辐射光谱分布模式、地面反照率光谱特性模式一起, 可直接提供给大气辐射传输研究和大气中光电仪器工作性能的分析与预测。

通过对典型地区的大气光学特性、天空背景辐射光谱特性和地面反照率光谱特性的测量和建模, 系统地研究影响光辐射大气传输特性的大气光学参数, 未来可以利用有关的大气探测设备(包括地基观测设备和空间观测设备如气象卫星)的探测结果, 对某一特定区域、特定时间内的气象状况和光电系统性能等做出较准确的预报。

上述研究内容的核心在于要获得大气光学特性的规律性认识、建立我国自己的大气光学特性模式。为此, 需要在各种典型地区进行长期的大气光学特性(主要为气溶胶光学特性、湍流光学特性、主要吸收气体含量)、天空背景辐射光谱特性和地面反照率光谱特性的系统测量, 获得这些地区分季节的统计数据, 建立起这些地区的大气光学特性等模式。由于大气密度和气溶胶粒子浓度、湍流强度等随高度指数减小, 大气背景辐射和光辐射大气传输效应主要来自中低层大气的贡献, 这些测量以中低层大气为主, 即对流层和平流层(从地面到 50 km 左右的高度)。

## 6 中国典型地区大气光学特性的研究方法

首先根据中国的自然环境和地理、气象和大气条件设计大气光学特性分区模型。经初步研究提出的一种方案是: 可分为东北地区、华北地区、西北地区、青藏地区、四川盆地、黄淮地区、长江中下游地区、华南地区、云贵地区, 以及渤海、黄海、东海和南海海域。在各个典型地区选择有代表性的合适地点建立综合观测台站, 长期开展大气光学特性、天空背景辐射光谱特性和地面反照率光谱特性的综合性实验测量研究。

以每个地区有代表性的数个气象观测站近五

十年的气象资料建立其常规大气模式(包括温度、湿度、气压、风、空气密度、各气体组分含量等), 初步分为冬季和夏季、白天和晚上, 而根据近两年我国沙尘暴天气不断加剧的情况, 对华北地区和黄淮地区还必须增加春季模型。在典型地区的典型站点使用常规气象参数探空仪测量温度、湿度高度分布; 使用 CO<sub>2</sub> 分析仪等设备重点测量 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 等主要吸收气体的浓度。

广泛搜集世界各地的气溶胶和云的观测资料, 进行综合分析研究, 确立适合我国各典型地区的气溶胶和云的光学性质(浓度、化学组分、微物理性质、光学性质等), 建立各地区的气溶胶初步模型。逐步在上述各地区建立观测点, 使用太阳辐射计和光电粒子计数器等进行气溶胶观测, 使用激光雷达、全天空成像仪等仪器逐步在上述各地区进行云的特性观测, 根据观测结果对各典型地区的模式进行校验并逐年完善。使用 Mie 散射和非球形粒子散射理论, 进行散射光学量的计算, 得到只依赖于浓度、种类、形态和波长的气溶胶光学参量模型。

广泛搜集世界各地地表反照率观测资料, 进行综合分析研究, 按照我国各典型地区的地理、地貌特征以及植被的季节变化特征确立适合我国各典型地区的地面反照率初步模型。使用地物光谱辐射计等仪器逐步在上述各地区进行实地地面反照率观测, 根据观测结果对各典型地区的模式进行校验并逐年完善。

广泛搜集世界各地天空背景辐射光谱特性观测资料, 进行综合分析研究, 按照我国各典型地区的地理和气候特征确立适合我国各典型地区的天空背景辐射光谱特征初步模型。使用光谱辐射计等仪器逐步在上述各地区进行天空背景辐射光谱特性观测, 根据观测结果对各典型地区的模式进行校验并逐年完善。

广泛搜集世界各地的湍流观测资料, 进行综合分析研究, 确立适合我国各典型地区的湍流光学性质(强度、谱分布、特征尺度等), 建立各地区的光学湍流初步模型。逐步在上述各地区建立观测点, 使用温度脉动仪测量近地面湍流强度; 使用湍流探

空仪测量湍流强度及其高度分布廓线; 使用大气相干长度仪(白天利用太阳光、夜晚利用星光)测量整层大气相干长度等大气湍流光学性质参量的测量, 根据观测结果对各典型地区的模式进行校验并逐年完善。

广泛搜集世界各地风的特性观测资料, 进行综合分析研究, 按照我国各典型地区的地理和气候特征确立适合我国各典型地区的风的特征初步模型。使用微波雷达、激光雷达等仪器逐步在上述各地区进行风的特性观测, 根据观测结果对各典型地区的模式进行校验并逐年完善。

此外可以利用气象卫星(GMS、NOAA)、海洋卫星(SeaWiFS)和地球观测系统(EOS-MODIS)以及“风云”系列卫星的公开数据, 分析大气温度和湿度廓线、地-气系统长波向外总辐射、太阳可见光辐射以及红外和  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波段的环境辐射。由于卫星是连续测量, 可以得到大气参数和环境背景辐射每天的平均值, 统计平均后就可以得到按月、季度和年的平均值及方差。

以美国标准大气模式的内容和格式为基础, 增添大气气溶胶、云、湍流、风的内容, 海拔高度  $50\ \text{km}$ , 建立我国各典型地区的大气光学特性模式。

在建立我国的大气光学特性模式的基础上, 进行辐射传输计算模式的研究, 对目前国际上应用较多的辐射传输计算模式进行分析, 以 Modtran 和 Fascode 和光传播数值模拟计算方法为基础, 使用我们自己的大气光学参数模式, 改进气溶胶光学参量模型, 增加光辐射传输大气湍流效应, 进行光辐射大气传输软件的研制。程序完全结构化、模块化, 根据将来的需要随时加以扩充。利用光辐射大气传输综合测量系统在各典型地区进行观测, 和利用大气光学特性模式进行计算的结果相比较, 进行大气光学模式的验证。

## 7 中国典型地区大气光学特性研究的初步成果

按照我们提出的上述研究内容和方法, 在中

国科学院知识创新工程的支持下, 我们在已有的工作基础上, 选择以合肥为代表的长江中下游地区、东南沿海地区和西北地区开展了进一步研究工作, 建立了这三个地区大气光学特性的初步数据库和应用模式, 研制了通用大气辐射传输软件 CART(atmospheric radiative transfer code), 光波大气传播应用软件 CLAP(light atmospheric propagation code) 和光学遥感成像模拟应用软件 ORSIS(optical remote sensing imaging simulation code)。为我国激光技术应用、对地观测光学成像、遥感等应用提供了初步的数值仿真分析手段。在通用软件中耦合了三个典型地区的大气目标背景光学特性模式, 这三个软件相互联系、可相互调用、也可独立运行。它们具有显著的特点, 包括:

光谱范围  $0.4\sim 14\ \mu\text{m}$ ;

功能全面: 涉及大气目标背景光学特性的广泛问题;

设计合理: 模块化设计、详细诠释;

物理可靠: 数理基础可靠、物理图像清晰, 考虑了折射、散射、吸收、衰减、湍流效应、热晕效应, 以及大气湍流和散射介质的光学传递函数;

结果可靠: 输入参量检验; Benchmark 结果检验;

使用方便: 用户友好、最新操作系统;

移植方便: 面向各种工程应用。

并根据应用需求, 针对激光大气传输演示验证和遥感光学成像图像解析应用示范研究, 利用光辐射大气传输综合测量系统在各典型地区进行观测, 和利用大气光学特性模式进行计算的结果相比较, 进行了大气光学模式的验证。

激光大气传输数值仿真和演示验证在一个典型地区结合有关任务的实际系统结构和技术参数进行。对光学遥感成像全过程进行分解及合理简化, 确定各子过程的敏感参数, 分别建立各子过程的仿真模型, 对这些子过程仿真模型进行集成, 实现了遥感光学成像仿真。

关于上述各种成果的具体情况, 本期后面的多篇文章将予以详细介绍。值得一提的, 在本项目的

研究进程中, 我们获得了多项创新的科研成果, 在国际高水平刊物上发表<sup>[15]</sup>。

## 8 讨 论

中国各典型地区的大气光学特性具有无可争议的重要性, 我们虽然在中国科学院知识创新工程的支持下在很少几个典型地区开展了工作, 获得了初步可资应用的数据库和大气光学参数模式, 开发了通用大气辐射传输软件 CART、光波大气传播应用软件 CLAP 和光学遥感成像模拟应用软件 OR-SIS, 迈出了可喜的一步。但无庸讳言, 这仅是万里长征走完了第一步, 无论是科研人力、物力的投入, 还是已建立的模式的完善程度都与先进国家差距甚远。要建立全国各个典型地区的大气光学特性应用模式, 需要大量的人力、物力, 需要国家的大力支持。我们期待早日开展并尽早完成这项艰巨而意义深远的任务, 为祖国的科研事业和国民经济建设服务。

### 参考文献:

- [1] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. San Diego: Elsevier Sciences, 2002.
- [2] Shi Guangyu. *Atmospheric Radiation* [M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese).  
石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] Rao Ruizhong. Modern atmospheric optics and its applications[J]. *J. Atmo. Envir. Opt.*, 2006, 1(1): 2-11(in Chinese).  
饶瑞中. 现代大气光学及其应用 [J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(1): 2-11.
- [4] Rao Ruizhong. Introduction to the special issue on laser propagation in atmosphere [J]. *Chinese J. Quant. Elect.*, 2006, 23: 273(in Chinese).
- [5] Pries T H. High-energy laser meteorology [C]. *Proc. of SPIE*, 1990, 1221: 254-293.
- [6] Kneisys F X, Robertson D C, Abreu A W, et al. *The Modtran 2/3 and Lowtran 7 Model* [M]. Ontar Corporation, North Andover, MA, USA, 1995.
- [7] Berk A, Anderson G P, et al. MODTRAN 5: a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options:update [C]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5806: 662-667.
- [8] McClatchey R A, Benedict W S, Clough S A, et al. *AFCRL Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation* [M]. AFCRL.TR-73-0096, 1973.
- [9] Ridgway W L, Moose R A, Cogley A C. *Atmospheric Transmittance/Radiance Computer Code Fascod2* [M]. Sonicaid, Chicago, 1982.
- [10] NOAA. *US Standard Atmosphere 1976* [M]. NOAA, Washington D C, 1976.
- [11] McClatchey R A, Fenn R W, Selby J E A, et al. *Optical Properties of the Atmosphere* [M]. 3rd edition, AFCRL, Bedford MA, 1972.
- [12] Anderson G P, Clough S A, Kneisys F X, et al. *AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0-120 km)* [M]. AFGL, Hanscom AFB, MA, 1986.
- [13] Rothman L S, Jacquemart D, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quan. Spec. Rad. Trans.*, 2005, 96: 139-204.
- [14] China Meteorological Administration. *China Atlas of Climate Resource* [M]. Beijing: Map press, 1994(in Chinese).  
中国气象局. 中国气候资源地图集 [M]. 北京: 地图出版社, 1994.
- [15] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. *Optics Express*, 2007, 15: 8360-8370.

作者简介: 饶瑞中 (1963-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为大气光学。