

现代大气物理学研究进展*

邱金桓 吕达仁 陈洪滨 王庚辰 石广玉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 简要论述现代大气物理学的主要研究内容与发展历史, 重点介绍中国科学院大气物理研究所的科技工作者在云和辐射的相互作用、气溶胶的光学特性、气溶胶的辐射强迫、大气辐射传输、大气组分探测等方面的研究进展与成果, 特别是创新性的研究成果。

关键词: 气溶胶; 云; 辐射强迫; 辐射传输; 大气组分探测

1 引言

大气物理学主要研究地球大气参数、大气现象和过程的物理性质及其变化规律。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、生物学等学科密切相关。大气科学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。现代大气物理学为了适应地球环境与全球气候变化的深入研究需求, 产生许多新的学科分支, 如研究大气辐射特性和辐射传输过程的大气辐射学、研究中层(或高层)大气中各种物理现象和过程的中层(或高层)大气物理学、研究大气遥感原理、技术和应用的大气遥感学、研究大气边界层中物理现象和过程的大气边界层物理学等等。这些研究涉及很宽的研究内容。几十年来, 中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)的科技工作者, 瞄准国际研究前沿, 在这些研究领域取得许多重要的研究成果。考虑到本专刊的多篇论文已对现代大气物理学的多个研究领域有专门的论述, 本文将简要论述现代大气物理学的主要研究内容与发展历史, 并重点介绍大气物理研究所在云和辐射相互作用、气溶胶的光学特性、气溶胶的辐射强迫、大气辐射传输、臭氧等大气组分探测等方面的研究进展与成果。

2 现代大气物理学主要研究内容与发展史简述

现代大气物理学主要研究地球大气参数、大气现象和过程的物理性质及其变化规律^[1]。大气物理作为大气科学的基础学科, 通过对大气特征参数的系统、连续的探测和对大气现象物理本质的揭示与深入认识, 不断提高天气预报、环境与气候变化预测、航空气象保证、人工影响天气的水平, 为人类社会的进步和发展服务。气象学家也越来越认识到正确处理大气中的物理过程对数值天气预报和气候变化预测的重要性。实

际上，近年来大气物理学的研究成果越来越深入地应用到天气预报或预测模式中。这些模式中的辐射模式就是一个典型的应用例子。辐射问题涉及整个地—气系统的能量收支，但在早期的天气预报和气候预测模式中对辐射的处理是很粗糙的。大气物理学家和气象学家都认识到了这个问题的重要性和紧迫性。于是大气物理学家发展了适用于气候模式的各种辐射传输模式，并与气象学家一道为在气候模式中应用这些成果而不断努力。这个过程也极大地推动了大气物理学关于大气辐射传输的研究。因此，大气物理学必须密切结合大气科学发展中提出的重要问题和前沿研究方向，才具有前进的生命力。

从 20 世纪 30 年代至现在，是大气物理学的迅速发展的阶段。大气科学中一些重大实际应用问题的需要大大加速了这个发展过程。从 50 年代开始，大气辐射传输问题日益引起大气物理学家的重视。60 年代以来，由于人类的生产和生活活动等，大气中人为排放的气溶胶粒子和微量污染气体大量增加，并导致土地河流污染等，对生物圈和人类造成严重影响。为了充分掌握关系到人类社会发展的大气环境演变规律，大气边界层与大气湍流的研究就成为现代大气科学的一个主流之一，并促进了大气物理与大气化学的有机结合。

20 世纪 60 年代以来，随着计算机技术和卫星技术的迅速发展及日益广泛的应用，大气物理学研究另一迅速发展的领域是大气辐射与大气遥感研究。同时，气象卫星的兴起，遥感技术的飞速发展以及气候变化研究的需要，大大推动了大气辐射和大气遥感原理与反演理论的研究，并形成了现代大气信号与遥感物理学。

我国近代大气物理学起始于 20 世纪 30 年代。从那时至 1949 年，是我国近代大气物理学研究的始创时期，在我国近代气象学家创始人竺可桢的积极倡导和叶企孙、吴有训、严济慈等老一辈物理学家们的热心培植下，我国大气物理研究开始萌芽，并不断发展，赵九章、顾震潮、叶笃正、陶诗言等我国大气科学领域的开创者们为这一研究都作出了重要贡献^[1~3]。在这一时期，大气物理研究在整个气象研究中所占比重还较小，研究领域也较窄。

我国大气物理研究的迅速和全面的发展还是 1949 年（特别是 1958 年）以后的事。赵九章先生等我国大气科学领域的开创者们以科学的预见，把握住大气物理学发展的方向，密切结合国家建设任务的需要，抓住机遇，先后开创了我国大气臭氧与大气光学、边境层大气物理、云雾物理与人工影响天气及大气遥感物理等重大学科领域^[1~3]。

在新中国成立的初期，我国的大气物理研究主要集中在臭氧观测、能见度观测、雷电物理、近地面层大气结构等方面。1958 年以后，由于农业生产对人工降水的需要，全国开展了大规模人工影响天气的试验，加速了我国云雾降水物理的创建，在几年时间内，全国范围内初步形成一支科研队伍，全面开展了云降水宏观与微观结构的高山与飞机观测、云降水动力学、云降水微物理学以及雷雨云物理研究，并取得了重要的成果。20 世纪 60 年代开始，由于我国核技术发展及工业建设的需要，带动了我国大气边界层物理与大气湍流的飞速发展；由于我国卫星以及航空技术与应用的飞速发展的需要，也由于气候变化研究和大气遥感发展的要求，大气辐射、大气中辐射传输规律及其辐射气候效应、大气遥感原理及信息提取技术等研究逐渐成为重要的研究方向，并取得了一系列的研究成果。20 世纪 60 年代以来，全球气候变化研究日益升温，CO₂

等微量气体的温室效应、平流层 O₃层的变薄可能引发的环境与气候问题、气溶胶的辐射强迫与气候影响,先后成为大气科学的研究热点。这几大热点极大地推动了我国大气物理学家在大气组分探测与变化趋势、气溶胶的光学特性与辐射强迫、云—气溶胶—辐射的相互作用、中层大气等前沿领域的研究,并迅速跟上了当代大气物理学前进的步伐。

3 云和辐射相互作用研究

形态各异、尺度不一的云,覆盖着全球 50%以上的天空。对于天气和气候的变化,云不仅是指示器,而且是调节器。云在形成过程中释放的潜热对上升运动及云自生的发展与维持有极大的作用。云与辐射的相互作用,对天气变化过程有重要的影响,对气候变化的影响更不容忽视,因为云—辐射相互作用在很大程度上决定着地球大气系统的辐射收支平衡,而辐射能的收支分布是大气和海洋运动的主要驱动力。

形成云的水滴或冰晶粒子,一方面通常要比晴天大气反射回太空更多的太阳辐射;另一方面,要吸收阻挡云下向上的地气长波辐射,并以较低的温度向上辐射。这两方面相反的作用,共同决定着地气系统是被冷却还是被加热。一般,中低云对太阳辐射的反射使地面降温的效应要大于其对长波吸收再辐射的温室效应;而位于 7~8 km 以上的冰晶高云,有相当强的温室效应。

由于云在时空分布上不均匀,且变化很大,所以表征云—辐射相互作用的云辐射强迫(Cloud Radiative Forcing)随时间和地点都有很大的变化。云辐射强迫具体值取决于云粒子的相态、谱分布、云的厚度及所在高度等云参数,也还与日照条件、地表和大气状况有一定的关系。由于云和辐射参数的多变性,这给观测和定量描述都带来了极大的困难,仅靠地面常规气象观测和现有卫星云图资料难以分析研究过去几十年云的变化特征和趋势,相应的气候效应评估也就具有很大的不确定性。

云对太阳辐射的异常吸收问题,尽管在过去几年中有系统集中的研讨,但仍是悬而未决。所谓的云异常吸收是指仪器测量或反演的云吸收值显著地大于模式计算值(可以大 25~30 W m⁻²)。有云大气是否存在异常的太阳辐射吸收有着更大的争议。云—气溶胶—辐射相互作用是一个更具挑战性的问题。大气气溶胶除了其直接的辐射散射和吸收作用,而且还作为云凝结核(CCN)改变云的宏微观物理量,进而影响云—辐射相互作用及气候变化,这就是所谓的气溶胶间接气候效应。人为增加的气溶胶影响了云和降水的微物理特性,已为卫星观测和模式研究所初步揭示。云降水是清除大气气溶胶的一种重要途径。云蒸发后留下的“液化”或“冰化”后的气溶胶是否成为更加活跃的云凝结或冻结核,是值得研究的题目。

随着海气、陆气相互作用以及地球多圈层相互耦合作用研究的深入开展以及气候系统模式的不断改进,大气云—辐射相互作用及其气候效应问题变得非常特出。据最新的 IPCC 2001 报告^[4],云—辐射和气溶胶—辐射相互作用是气候变化研究中最不确定的因素。所以当前国际大气科学界已将云—辐射相互作用列为主攻方向之一。

在过去的几年中,我国学者就云—辐射相互作用问题开展了一些研究(本文主要论述大气物理研究所的研究成果)。

云的辐射特性参数化几乎是当前 GCMs 和气候模式中考虑云—辐射作用的唯一选择。Zhang 等^[5]提出了一个新的水云太阳短波辐射特性参数化方案, 其中引入了一个无量纲因子, 使得计算的云辐射通量反射率、透过率和吸收率受云滴谱变化的影响大为减小。可惜的是, 这一新方案没有应用于 GCMs 中去。

王可丽^[6]利用 1982 年 8 月~1983 年 7 月青藏高原地面热源观测资料, 分析了云量、云状对地表净辐射的影响。研究表明: 云对地表净辐射的影响有明显的季节性差异, 在春季和夏季云的影响强烈, 并且地表净辐射随云量的增多而减少, 在秋冬季, 云的影响较小, 并且地表净辐射随云量的增多而增大; 不同云状的影响有明显差异, 就年平均而言, 中云(As)对地表净辐射的影响最大, 即对地表的辐射冷却效应最强, 低云(Sc, Cb)次之, 高云(Ci)相对较小。

汪宏七和赵高祥^[7]研究了水云滴谱变化对云光学和辐射性质的影响。当粒子较大、波长较短时, 云消光系数与有效率半径 r_e 成反比, 单次散射反照率 ω_0 与 r_e 成(负)线性关系。他们用离散纵坐标方法的辐射传输计算表明, 云垂直方向的不均匀分布不仅对云层中辐射通量密度和短波加热率有影响, 而且对整层云的吸收率、反射率和透过率有影响; 当云上部有较大的云滴时, 云层的吸收率增加而反射率减小。这可以部分地解释云吸收异常, 因为在大多数云吸收太阳辐射的计算中没有考虑云垂直方向的滴谱分布差异。

刘春雷和姚克亚^[8]在计算 $0.55 \mu\text{m}$ 波长卷云的反射率和透过率时, 考虑了粒子本身的密度变化对折射率的影响, 一般冰粒子密度当其等效直径大于 $100 \mu\text{m}$ 后随尺度增大而减低, 因此其折射率实部与虚部也要减小。Monte Carlo 辐射传输模拟计算表明, 这种密度变化对卷云的反射率和透过率有一定的影响, 尤其粒子尺度较大时。

陈洪滨^[9]对云和云天大气异常吸收太阳短波辐射问题进行了综述, 并同意这样的观点: 多种现有的解释的合理组合有可能解释这一现象。

Chen 和 Lu^[10]在调研了水云吸收太阳辐射计算模式后, 发现计算输入时关于水云有关参数的不确定将产生一部分吸收异常, 其中最明显的是现有低谱分辨率的水折射指数资料的输入, 即选用现有的水折射指数汇编资料可能使计算的水云吸收太阳辐射值少 10 W m^{-2} 。他们认为有必要获得更高光谱分辨率的水和冰的折射率测量数据。

陈洪滨和孙海冰^[11]计算了水、冰和冰—水球形粒子在三个短波波长上的吸收和衰减系数, 结果表明冰面融化在微波雷达回波中产生亮带, 但在可见光和近红外波段不产生“额外”吸收, 这是因为在太阳短波段冰和水的折射指数虚部十分接近。另一方面, 尺度大得多的冰粒子其吸收要远远大于水云粒子(通常小于 $15 \mu\text{m}$)的吸收。因此, 如果在混合相云中哪怕是忽略了为数很少的大冰晶粒子, 也将使计算的云层太阳辐射吸收值显著减少。此外, 他们认为忽略了云上部的冰粒子是造成卫星遥感反演水云粒子有效半径 r_e 明显偏大的原因。

马晓燕和季国良^[12]用卫星 ERBE 资料和地面辐射观测资料分析计算了云辐射强迫比 R (即地面与大气层顶云辐射强迫的比值)和斜率 β 值(即大气透过率与行星反照率之间线性回归关系的斜率), 他们的研究表明中国大陆地区云辐射强迫比 R 小于 1.2; 云的短波辐射吸收西部较东部小, 但季节性变化较大; 在青藏高原地区 R 值约为 1.3。

邱金桓等^[13]用多通道激光雷达在晴天时探测到对流层上部存在着多层不可见云。

这些不可见云虽然光学厚度较小,但对长短波辐射的影响需要计算和评估,因此也需要更多的观测与研究,以认识其出现的频数和范围及其在长短波辐射强迫中的作用。

“云对短波辐射异常吸收”在国际上一直存在不同意见,白建辉等^[14~16]对于该问题提出另一看法,认为云对短波辐射的异常吸收主要来源于大气中的所有物质在光化学反应过程中对光化辐射能量的吸收。

今后,在我国的全局变化研究领域中,云—辐射和气溶胶—辐射相互作用无疑将是一个重要内容,这需要加大野外和空间观测试验的投入,在有气候代表性的地区建立 3~4 个设备齐全先进的云—气溶胶—辐射综合观测站,获取并积累理论研究和模式发展验证所急需的资料。协调开展观测、模式及理论的研究,增加我们对云和辐射与气候反馈问题的认识,为天气预报、气候预测以及我国可持续性发展战略的制定提供这方面的理论基础。

4 大气气溶胶的光学特性研究

在诸多影响气候变化的因子中,气溶胶是一个非常重要、但又很不确定的影响因子。由于气溶胶在气候变化中的重要作用,有关气溶胶的研究多年来一直受到高度重视,气溶胶的辐射特性及其辐射强迫与气候效应是当前大气科学的一大研究热点。然而气溶胶的辐射强迫问题至今并未得到很好解决,原因主要是两个方面的。原因之一在于气溶胶辐射强迫机制的复杂性,其物理过程远比 CO₂ 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。另一原因在于缺乏气溶胶物理化学特性与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的辐射强迫估计千差万别。由于气溶胶的时空变化比较大,加上气溶胶的一些关键参数(如单次散射反照率)的量化探测技术并未很好解决,这一问题变得更加突出。

我国科学家在气溶胶研究方面已有数十年的历史。毛节泰等^[17]曾综合论述了近 20 年来中国大气气溶胶研究状况,包括对大气气溶胶的直接采样分析,地面和卫星的遥感,大气气溶胶辐射特性及其气候效应的研究以及沙尘暴的形成、输送及气候效应的研究等。考虑到气溶胶光学特性对辐射强迫研究的重要性,本文主要论述大气物理研究所的科学家在气溶胶光学特性及其辐射强迫研究方面的主要工作与成果,特别强调近年来的研究工作以及一些有重要创新的研究成果。

对辐射强迫作用至关重要的气溶胶光学特性主要包括气溶胶的光学厚度、谱分布、折射率、消光系数垂直分布、一次散射反照率、散射相函数,后两者可由前四个参数通过 MIE 散射计算求得。下面主要论述大气物理所在中国大气气溶胶光学厚度、谱分布、折射率、消光系数垂直分布等特性及其光学遥感方法研究方面的工作与成果。

4.1 遥感气溶胶谱分布的消光—小角散射法及其应用

光谱消光法(也称 Langley 法)和小角散射法(也称华盖天空亮度法)是两个遥感气溶胶光学厚度及其谱分布的经典方法。1981 年,吕达仁等^[18]从研究气溶胶的消光系

数和散射相函数入手, 发现气溶胶消光系数和前向小角散射相函数分别对较小(如小于 $1 \mu\text{m}$) 气溶胶粒子和较大(大于 $1 \mu\text{m}$) 粒子比较敏感, 根据这一特性分析了光谱消光法和小角散射法在反演气溶胶谱分布的不同优缺点, 提出了一个综合应用气溶胶的消光系数与小角散射相函数反演谱分布的一个新方法, 即消光-小角散射法, 大大提高了气溶胶谱分布的反演精度。应用这一方法, 邱金桓等^[19,20]从光度计探测的太阳直射光强和地平纬圈天空亮度信息反演得到了北京地区的气溶胶光学厚度与谱分布, 发现了北京地区气溶胶谱分布普遍存在双峰结构。这一新方法在国内外都得到了应用, 是遥感气溶胶谱分布的一个适用而有效的方法。

4.2 从天空亮度反演气溶胶光学特性的方法及其应用

天空亮度包含气溶胶光学特性的丰富信息。邱金桓等^[21~22]基于气溶胶散射相函数对气溶胶光学特性的敏感性以及天空亮度对气溶胶光学特性和地面反照率的敏感性分析, 引入了加权散射相函数的概念, 发现约 40° 散射角的加权散射相函数对气溶胶谱分布不敏感而对气溶胶折射率虚部比较敏感, 提出了综合遥感气溶胶光学厚度、谱分布、折射率以及地面反射率的一个新方法, 即通过测量 $1^\circ \sim 30^\circ$ 的体散射函数、约 10° 的散射相函数、约 40° 的加权散射相函数以及 90° 的天空亮度综合反演气溶胶粒子谱、气溶胶折射率实部、虚部以及地面反射率的方法。邱金桓等^[23~26]还应用这一新方法探测了北京地区气溶胶光学厚度、谱分布、折射率及其地面反照率, 研究了气溶胶光学特征在不同季节下的变化特性, 建立了北京地区春夏秋冬四季气溶胶谱分布的参数化模式, 发现北京冬季气溶胶折射率虚部比较大, 平均值为 0.057。

4.3 遥感气溶胶光学厚度的宽带消光法

大气气溶胶光学厚度是表征大气浑浊度的一个基本物理量, 是确定气溶胶辐射气候效应和进行空间遥感大气订正的一个关键因子。光谱消光法是探测气溶胶光学厚度最经典也是最广泛应用的一种方法, 它应用窄带太阳光度计测量太阳的直射光强以确定气溶胶光学厚度。世界上已有少量台站或大气监测站长期坚持采用光度计测量太阳的直射光强以确定大气柱气溶胶光学厚度, 积累了十分宝贵的资料。但这类台站只占极少一部分, 许多台站只有全波段或宽波段的太阳辐射长期观测历史。为此, 邱金桓等人近年来一直致力于发展遥感气溶胶光学厚度的宽带消光法。1995 年, 邱金桓^[27,28]基于理论分析与对比试验, 提出了从宽带太阳直射辐射信息反演 $0.7 \mu\text{m}$ 大气柱气溶胶光学厚度的一个新方法。1997 年和 1998 年, 邱金桓^[29,30]进一步发展了这个方法, 它采用六个大气模式, 更深入地研究了太阳短波直接辐射对气溶胶的敏感性, 发现从宽带太阳短波直射信息更普遍适用于反演 $0.75 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度, 并建立了相应的迭代反演算法和参数化模式。这个方法应用宽带太阳消光信息, 因此称作为宽带消光法。考虑到气溶胶谱分布的不确定性对宽带消光法反演气溶胶光学厚度的影响, 2001 年邱金桓^[31]发展了一个应用多太阳天顶角的宽带太阳直接辐射信息综合反演气溶胶光学厚度与谱分布的新方法, 并建立了一个参数化的“等效”波长模式, 提出了一个更加精确的反演气溶胶光学厚度宽带消光法模式。

太阳直射表探测的宽带太阳直接辐射资料通常为小时或天累计的曝辐量。为此, 邱金桓等人近来又从两个方面进一步改进了宽带消光法。一方面, 把太阳曝辐量与“等效”的瞬时太阳直接辐射关联起来, 建立了一个与曝辐量“等效”的瞬时太阳直接

辐射的模式^[32]；应用该模式和一个“等效”波长模式，发展了一个从太阳直接曝辐量反演气溶胶光学厚度的方法。另一方面，发展了一个所谓的气溶胶光学厚度选取方法¹⁾，即应用附加的地面能见度、相对湿度以及云量信息，通过约束气溶胶光学厚度的上限，有效减小云对宽带消光法反演气溶胶光学厚度的可能影响。

此外，基于邱金桓的宽带消光法，罗云峰等^[33,34]发展了一个应用月累计的太阳直接总辐射和日照总时数反演气溶胶光学厚度的方法，李放等^[35]还发展了应用宽波段的太阳辐射信息反演气溶胶光学厚度的方法。

4.4 中国气溶胶光学厚度特性研究

在影响气溶胶直接辐射强迫的因子中，气溶胶的光学厚度、一次散射反照率等光学特性是关键因子。Menon 等^[36]最近在《Science》上发表的关于中国与印度的黑碳气溶胶气候效应的论文里，强调了两个关键的气溶胶参数，即气溶胶光学厚度的变化量与一次散射反照率。因此，研究中国气溶胶光学厚度的区域分布与中长期变化规律对科学评估气溶胶的辐射强迫是很重要的。基于这一认识，近年来，罗云峰等^[33,34,37,38]以及邱金桓等^[39,40]应用上述的遥感气溶胶光学厚度的宽带消光法，从我国气象台站的太阳直射表观测资料，反演得到了北京等地 $0.75 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度长期资料，分析了其区域变化与长期变化规律，取得了有重要国际影响的研究成果。

罗云峰等^[34,37]利用北京等 46 个甲种日射站 1961~1990 年逐日太阳直射辐射日总量和日照时数等资料，反演了 30 年来各站逐年、逐月 $0.75 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度（简称 AOD）平均值，分析了我国大气气溶胶光学厚度的年、季空间分布特征和年代际之间的变化。结果表明：我国大气气溶胶光学厚度的多年平均分布具有典型的地理特征，除个别大城市外， 100°E 以东，AOD 以四川盆地为大值中心向四周减少； 100°E 以西，南疆盆地为另一个相对大值中心。气溶胶光学厚度的各季分布具有各自的特征。20 世纪 60 年代，我国大气气溶胶光学厚度的平均分布特征是以四川盆地和南疆盆地为两个大值中心向四周减少；70 年代，绝大多数地区 AOD 值增加，其中从四川盆地到长江中下游地区以及华南沿海等地，AOD 增加较为明显，AOD 的分布和 60 年代较相似；到 80 年代，我国大范围地区 AOD 继续呈增加趋势，其中长江中下游地区，AOD 增加相当明显。

邱金桓等^[39,40]应用宽带消光法，从气象台站辐射观测资料反演得到北京、乌鲁木齐等 10 个地方 1980 到 1994 年间晴天气溶胶光学厚度，并结合能见度资料，分析了这些地方气溶胶光学厚度月变化和年变化特征，分析了影响气溶胶光学厚度变化的若干重要因子，发现 1980 至 1994 年间，这些地方的气溶胶光学厚度呈明显的上升趋势，北方冬季取暖期间，上升的趋势更强；1982 年墨西哥奇琼火山和 1991 年菲律宾皮纳图博火山爆发对我国气溶胶光学厚度有重要的影响；我国北方的广大地区，春季由于沙尘暴的影响气溶胶光学厚度较大。

李放等^[41]研究也发现北京地区气溶胶光学厚度具有增加的趋势，而且春夏季的光学厚度比较大。除了应用宽带消光法研究中国气溶胶光学特性外，一些大气物理所学

1) Qiu Jinhuan, Broadband extinction method to determine aerosol optical depth from accumulated solar direct radiation, *J. Appl. Meteor.*, accepted.

者还进行太阳光度计探测气溶胶光学厚度的研究。林海和魏重^[42]探测了北京地区太阳可见光辐射与大气透明度,张金定等^[43]探测了南极长城站气溶胶光学特性。王庚辰等^[44,45]根据实际观测资料研究了大气气溶胶的光学厚度和 Angström 公式的适用范围以及青藏高原地区可见光辐射的大气消光。

理论和观测研究都表明,强火山爆发送入平流层的气溶胶直接或间接地影响全球的气候变化。陈洪滨等^[46]利用 SAGE II 探测的气溶胶消光系数资料,分析平流层气溶胶在皮纳图博火山爆发前后(1990~1992年)一个较长期的变化特征。

此外,杨理权等^[47]还综合应用 Dobson 仪探测的 1979~1995 年北京地区臭氧总量与应用宽带消光法反演的 1980~1994 年间整层气溶胶光学厚度资料,分析气溶胶对臭氧总量年变化的影响。结果表明,奇琼火山和皮纳图博火山爆发对臭氧总量减少可能起到重要作用。

4.5 中国气溶胶折射率特性研究

气溶胶吸收信息的缺乏是气溶胶辐射气候效应研究和空间对地遥感的大气订正研究中的主要问题之一。气溶胶的吸收主要取决于气溶胶折射率虚部。因此,丰富折射率虚部信息对增进我们对气溶胶吸收的了解,促进我们对气溶胶辐射气候效应研究和空间对地遥感中大气订正的研究有重要意义。

邱金桓等从 1984 年开始就进行气溶胶折射率虚部的光学遥感研究,先后提出了角散射方法^[21]和天空亮度法^[22],首先建议应用前向散射信息反演气溶胶的折射率,并应用天空亮度法探测了北京 1983 年气溶胶折射率实部和虚部^[26]。

1988 年,王栋梁等^[48]还应用太阳漫射一直射比方法遥感了塔克拉玛干沙漠地区气溶胶折射率虚部;应用同样的方法,1988 年邱金桓等遥感了北京沙尘暴期间的气溶胶,结果都表明,在可见波长沙尘粒子的气溶胶折射率虚部在 0.002 至 0.008 之间变化。

近年来,尉东胶和邱金桓^[49,50]致力于发展遥感气溶胶虚部的宽带辐射法,他们通过敏感性分析发现:宽带太阳漫射辐射对大气气溶胶折射率虚部的变化非常敏感,而对粒子谱分布、气溶胶折射率实部、地表反射率、大气中水汽和臭氧含量的变化不很敏感或弱敏感。基于这一特性,他们提出了从宽谱太阳漫射辐射信息反演大气气溶胶折射率虚部的一个新方法,并进行了本宽带漫射法与光谱总辐射一直射比方法遥感大气气溶胶折射率虚部的对比实验,取得了较吻合的对比探测结果。

1995 年,李放和吕达仁^[51]发展了利用消光谱反演气溶胶折射率的一种新方法,并用于探测长春地区的气溶胶折射率虚部。

4.6 中国气溶胶光学特性的激光遥感研究

激光雷达是探测气溶胶光学特性时空分布的有效手段。激光探测气溶胶和云雨物理光学特性以及能见度等大气光学现象是起步最早、应用最广的激光大气遥感研究领域,主要包括探测云高、云的层次、云中消光系数分布、云的偏振特性、雨强和雨滴谱、大气气溶胶的消光系数分布、折射率和它的谱分布、沙尘暴、与气溶胶的物理光学特性有关的大气现象,如能见度、大气边界层高度、烟尘污染扩散等。这类探测都依据激光后向(弹性)散射的原理。

20 世纪 60 年代中期,大气物理所研制成功了我国第一台激光雷达,以后又研制了多台更先进的探测平流层与对流层气溶胶激光雷达,开展了一系列激光探测大气气溶

胶光学特性及其反演方法的研究^[52~77]。下面重点介绍大气物理所在激光探测对流层气溶胶、平流层气溶胶、沙尘暴和反演方法研究方面的工作与成果。

4.6.1 激光探测对流层气溶胶

早在 1976 年, 吕达仁等^[52,55] 利用一台红宝石激光雷达, 并配合同时的太阳光衰减测量, 对北京地区晴空低层 3 km 以下的大气消光系数分布及光学厚度作了定量测量和分类整理, 取得了宝贵的基本资料。结果表明, 北京地区气溶胶消光系数分布与 Elterman 模式有较大的区别, 消光系数分布与光学厚度值还具有明显的季节性, 同时又受近地逆温层结生消的强烈影响。

我国早期大力开展的另两类激光大气遥感研究是探测烟囱排放的烟羽浓度时空分布和探测斜视与水平能见度。孙景群等^[53] 不仅进行激光探测烟羽浓度时空分布的研究, 还应用激光探测结果研究烟羽粒子的污染扩散规律。吕达仁等^[56]、赵燕曾等^[57] 和邱金桓等^[58] 先后应用激光雷达探测近地面气溶胶消光系数分布, 并从该分布确定斜视与水平能见度。

1998 年, 白宇波等^[59,60] 与日本合作在西藏拉萨开展了激光雷达遥感对流层与平流层气溶胶消光系数分布与退偏振系数分布实验研究, 并与日本名古屋地区的激光探测结果作了比较。

此外, 周诗健等^[61] 还进行了对流层大气消光系数几种激光探测方法的比较。

4.6.2 激光探测平流层气溶胶

孙金辉等于 1983 年在我国最早应用一台 0.694 μm 波长激光雷达探测平流层气溶胶^[62], 接着于 1991 年 Pinatubo 火山爆发后在北京连续进行了约三年的激光探测平流层气溶胶的实验研究^[63]。探测结果表明: 因受皮纳图博火山爆发的影响, 1991 年 7 月下旬开始, 北京地区对流层上部和平流层气溶胶粒子的浓度有非常明显的增加; 在 1991 年 10 月, 10~26 km 高度范围内, 气溶胶粒子的浓度比常态约增大 2 个数量级。

孙金辉等^[64] 还在中国南极中山站应用一台波长为 0.694 μm 的激光雷达探测平流层气溶胶。探测结果表明: 因受皮纳图博火山爆发的影响, 1993 年南极地区平流层气溶胶粒子含量比 1990 年明显增加, 证实了南极冬季平流层云的存在; 平流层气溶胶为两层结构, 12 km 附近高度上始终存在着一层厚度为数公里的气溶胶层, 25 km 附近高度的一层变化较大。

4.6.3 激光探测沙尘暴

邱金桓等^[65] 于 1982 年 5 月在中国首次用激光雷达遥感了沙尘暴粒子的消光系数垂直分布特性, 探测结果表明, 沙尘暴发生时, 2 km 高度范围内气溶胶光学厚度与消光系数可以有一个量级的变化。邱金桓等^[66,67] 还应用激光雷达和光度计综合探测了 1988 年 4 月北京地区三次沙尘暴过程中大气气溶胶光学特性及其远距离输送时的垂直结构。结果表明, 在 4 月 11 日, 沙尘粒子有 3 个不同的输送带, 其中两个输送带的高度处于 2000~3000 m 和 3000~6000 m, 另一个输送带的下边界高度约为 200 m, 其高度结构密切依赖于风场的垂直结构。根据多波长太阳光度计和半球辐射计的观测结果, 尘暴期间大气柱沙尘总光学厚度在 0.3 至 15 之间变化, 峰值光学厚度比平时偏大约一个数量级, 在 0.65 μm 波长, 在 4 月 11 日测量的气溶胶一次散射反照率均值为 0.85。

4.6.4 反演方法研究

一个激光雷达方程有两个未知数,反演算法的不稳定是激光探测气溶胶光学特性的一个难题。另一难题是激光多次散射效应。国内外许多学者多年来致力于反演方法与激光多次散射问题的研究。

在激光雷达方程反演算法研究方面,大气物理所的学者发展了多个反演算法。吕达仁等^[52,55]在一次散射的条件下导出了激光雷达方程的一个解析解。邱金桓等^[68~71]发展了一个约束求解方法,一个双波长激光反演方法,一个空间激光雷达方程反演方法,发现了分子散射引起的激光雷达方程求解的不稳定性。

激光多次散射是另一重要的理论问题。在这一方面,吕达仁^[72]发展了一个考虑二次散射的激光雷达近似方程,并分析了该方程的一些普遍特性。邱金桓等^[73,74]发展了一个参数化的多次散射激光雷达方程,在该模式中首次引入了四个表征多次散射特性的因子,即几何消光因子、消光分布因子、前向散射因子和后向散射因子。该模式不仅适合于研究多次散射对激光回波信号和激光大气遥感的效应,而且对于考虑多次散射的激光大气探测而言,是一个较合适的应用模式。邱金桓等还应用这个参数化的多次散射雷达方程,分析了激光多次散射对激光回波信号和一次散射雷达方程反演结果的效应,提出了求解多次散射雷达方程的迭代前向积分法和迭代后向积分法,并根据多次散射信号对云和气溶胶的前向散射相函数的高度敏感性,提出了一个从双接收视场的多次散射激光回波信号,同时确定云和气溶胶消光系数分布和前向散射相函数的方法。

杨舒等^[75]从理论上研究了利用多波段激光雷达反演气溶胶粒子谱和复折射率的方法,吕达仁和魏重^[76]计算了气溶胶对激光的消光特性,孙景群^[77]分析了激光遥测大气消光系数的误差。

4.7 气溶胶光学特性的卫星遥感

地面遥感气溶胶可以得到较为准确的气溶胶光学特性信息,但是目前这种方法只能在有限的区域进行,不足以提供大范围的气溶胶光学特性参数。空间对地遥感是探测全球范围的气溶胶光学特性的最佳途径。近 20 多年来,在空间遥感气溶胶光学厚度研究方面已取得了重要进展。目前空间遥感气溶胶光学厚度的方法主要有两种。一是邻边扫描法,它从空间探测日出或日落时太阳透射光强以确定平流层气溶胶消光系数分布和光学厚度,但它不适于探测对流层的气溶胶特性。另一方法是从空间探测的向上天空亮度信息反演气溶胶总光学厚度,至今的应用还主要限于下垫面为海洋的情形。对陆地的情形,由于地表反射率一般大于海水反射率,使它对向上亮度的影响更大,加上地表反射率分布的复杂性,空间遥感陆上气溶胶总光学厚度的问题至今并未很好解决。因此,近年来大气物理所有些学者致力于探索一种从空间综合遥感地表反射率和气溶胶光学厚度的方法,如邱金桓^[78]提出了卫星综合遥感气溶胶光学厚度与植被反射率的一个反演方法、吕达仁等^[79]进行了卫星同时遥感大气气溶胶光学厚度与地表反射率的原理和数值试验研究、段民征^[80]提出了综合利用卫星标量辐射和偏振信息以同时确定陆地上空大气气溶胶和地表反照率的一个反演方法、韩志刚^[81]进行草地上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感——正问题模式系统和反演实验研究、阎帮华^[82]研究了地气系统中太阳辐射的偏振特性及其在遥感中的应用。此外,夏祥鳌等^[83]应用卫星观测结果,分析了中国地区沙尘气溶胶时空变化特征;邱金桓等^[84]还研究了气溶胶光

学特性的垂直分布特性对卫星遥感的影响。

4.8 遥感气溶胶光学特性的曙暮光方法

考虑到中、高层大气在曙暮光形成中起主要作用,曙暮光被人们用来遥感平流层气溶胶消光系数分布等信息。在这一研究方面,吴北婴等^[85~87]和吕达仁等^[88]作了许多有重要特色的工作。他们建立了一个球面大气的 Monte Carlo 辐射传输算法;发展了一个应用曙暮光信息反演气溶胶特性的方法;综合应用实测的曙暮光资料和激光探测的后向散射比分布反演北京地区平流层气溶胶光学厚度。此外,关虹等^[89]也提出了一个用曙暮光的光强观测资料反演平流层气溶胶垂直分布的方法,并给出了反演基本结果和误差分析。

5 大气气溶胶的辐射强迫研究

当前气溶胶研究的一个最重要目标是科学评估大气气溶胶的辐射强迫与气候影响。气溶胶对气候和环境的辐射效应研究基本上是从 20 世纪 90 年代开始的,主要包含两部分内容:一是不同地区气溶胶对周围环境的辐射效应研究,主要局限于局地范围和特定的气溶胶类型;二是气溶胶气候效应的模式研究,主要从局域和全球尺度对气溶胶的气候效应进行模拟研究,以阐明气溶胶对气候变化的影响。下面重点介绍大气物理所的学者在气溶胶的辐射强迫及其气候效应研究方面的主要工作与研究成果。

周秀骥等^[90]利用从太阳辐射信息反演得到的中国地区大气气溶胶光学厚度资料,模拟了中国地区气溶胶直接辐射强迫的大小及气候响应的季节变化特征。计算结果表明:气溶胶辐射强迫介于 $-5.3\sim 13\text{ W m}^{-2}$ 之间;辐射强迫具有春、夏季大,秋、冬季小,冬季南方偏大,夏季北方偏大的特征。气溶胶辐射强迫的分布与其光学厚度的分布基本一致。由于气溶胶的影响,中国大陆地区地面气温均有所下降,四川盆地到长江中下游地区以及青藏高原北侧到河套地区降温最为明显,分别可达 -0.4°C 和 -0.5°C 。

石广玉等^[91]系统总结和介绍了 20 世纪 90 年代以来所开展的有关人类活动对东亚和中国气候影响的研究工作与结果,包括温室气体辐射强迫及其气候效应,大气微量气体的全球增温潜能,对流层和平流层气溶胶的辐射气候效应,气候系统外部因子对中国气候影响的评估,人类活动对中国和东亚地区未来气候变化的影响等。

胡荣明等^[92,93]应用二维能量平衡模式计算了中国地区人为排放的硫酸盐气溶胶的辐射强迫,得到中国地区由于人为排放的硫酸盐气溶胶引起的辐射强迫和最大地面温度变化都集中在中国东部长江中下游地区;然后他利用该模式研究了平流层气溶胶的辐射强迫水平分布以及皮纳图博火山喷发对地面平衡温度的影响,发现平流层气溶胶辐射强迫水平分布不仅与本身的水平变化有关,而且与下垫面反照率有很大关系。

罗云峰等^[34,37,38]利用全国 42 个甲级日射站 1979~1990 年直接辐射资料,根据改进的邱金桓宽带遥感方法,计算得到了全国范围内气溶胶分布,然后把气溶胶的辐射嵌套于三维大气环流模式中,模拟了中国地区气溶胶的直接辐射强迫及其气候效应,结果显示中国地区大气气溶胶辐射强迫春季最大,冬季 1 月最小,两个明显的大值区为青藏高原北侧到黄河中上游及河套地区,四川盆地、贵州北部到长江中游以南地区。

该研究把气溶胶的辐射嵌套于三维大气环流模式中研究气溶胶的辐射强迫, 更能反应实际大气气溶胶对气候的影响, 是气溶胶气候效应研究的一个发展方向。

王喜红和石广玉^[94]利用区域气候模式对东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫及其温度影响进行了数值研究。结果表明: (1) 人为硫酸盐直接辐射强迫具有明显的季节变化和地理分布特征, 特征不仅强烈地依赖于硫酸盐柱含量的季节变化和地理分布, 而且取决于云量季节变化和地理分布。(2) 就年平均而言, 由于硫酸盐辐射强迫的影响, 模拟区域内大部分地区普遍降温。(3) 地面温度响应呈现出明显的季节变化特征。王喜红等^[95,96]还利用三维区域欧拉型硫化物输送模式, 研究了 20 世纪 90 年代中期东亚地区人为硫酸柱含量的空间分布。结果表明, 东亚地区平均的人为硫酸盐直接辐射强迫约为 -0.7 W m^{-2} 。直接辐射强迫空间分布具有明显的季节变化和区域特征, 辐射强迫的这种变化特征强烈地依赖于人为硫酸盐柱含量的季节变化和区域分布。

张立盛和石广玉^[97]采用已有的气溶胶折射指数等资料, 计算了在不同的相对湿度条件下硫酸盐气溶胶的辐射特性, 模拟估算了考虑相对湿度影响后全球硫酸盐气溶胶的辐射强迫。结果表明: (1) 随着相对湿度的增加, 硫酸盐气溶胶的质量消光效率因子在短波段有所减小, 单次散射反照率仅在长波段均有所增加; (2) 在考虑相对湿度的影响后, 硫酸盐气溶胶辐射强迫的分布类型基本相同, 但全球平均的强迫值减少了 6% 左右。张立盛和石广玉^[98]还利用已有的硫酸盐和烟尘气溶胶折射指数资料, 精确计算了这两种气溶胶从太阳短波到红外谱段的辐射特性。结果表明: (1) 西欧是全球最大的硫酸盐辐射强迫中心, 最大值出现在夏季, 达 -5.0 W m^{-2} ; (2) 烟尘强迫的最大中心出现在夏季的南美和非洲中南部, 为 4.0 W m^{-2} ; (3) 南半球大陆人为气溶胶的强迫不容忽视; (4) 某些地区人为气溶胶的强迫在量值上可与 CO_2 等温室气体引起的强迫相比拟。

于秀兰和石广玉^[99]采用一维辐射对流模式对温室气体浓度变化引起的平流层温度调整后的辐射强迫进行了计算, 并发展了一个计算瞬时辐射强迫的简化公式。

吴北婴等^[100]应用北京地区气溶胶光学特性探测资料, 研究了北半球中纬度地区 Pinatubo 气溶胶的辐射效应。结果表明, Pinatubo 气溶胶对大气加热率的影响是明显的, 在 22 km 高度, 加热率的增加可达每天 0.2 K。

此外, 邱金桓和王开祥^[101]应用北京地区气溶胶光学厚度、谱分布、折射率的遥感结果, 计算了行星反照率。结果表明, 北京冬季的气溶胶对地气系统有明显的加热作用。

6 大气辐射传输研究

现代大气辐射研究与大气遥感、气候模式发展密切相关。20 世纪 50 年代后, 大气辐射理论的一个重要应用领域是大气遥感。气象学家也越来越认识到正确处理大气中的辐射过程对数值天气预报和气候变化预测的重要性。大气遥感与气候模式发展的需求也极大地推动了大气物理所科学家们关于大气辐射传输的研究, 下面主要介绍大气物理所的学者在这一领域的研究成果^[102~119]。

6.1 k 分布方法及其应用

大气辐射透过率计算模式在大气遥感和温室气体气候效应等当代气候模式研究中

是很重要的。辐射计算所面临的基本问题是大气气体的非灰吸收与云和气溶胶粒子的吸收和散射同时存在于大气中，遇到的最大困难是逐线积分 (LBL) 方法由于耗费太多的计算时间无法用于气候研究，而通常的带模式方法又不能处理多次散射问题。特别是对于温室气候效应研究中的长波辐射计算，必须同时处理频率积分、大气非均匀路径、天顶角角度积分以及不同气体吸收带重叠等问题。为此，许多科学家致力于寻求精确而又快速的大气透过率函数的计算方法，计算大气透过率的 k 分布方法是这一研究的一个重要突破。在这一研究中，大气物理所学者作出了重要的贡献。

石广玉^[102]在其博士论文中深入研究了大气透过率函数特性，巧妙地利用吸收系数的重排与高斯积分，创新了 k 分布函数的一个快速的直接数值计算方法。石广玉^[103,104]还应用这一方法计算大气的冷却率和研究大气重叠带对热辐射计算的影响。

近年来，石广玉^[105]和张华等^[106~108]基于 k 分布方法，进一步发展了精确计算大气气体吸收系数及其冷却率的快速数值新方法，对影响逐线积分精度和计算时间的各种因子进行了详细研究，并解释了为什么相关 k 分布方法能够精确计算辐射冷却率。以大气吸收气体 CO_2 的 $15 \mu\text{m}$ 带的 $500\sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 波段为例，将新方法计算的吸收系数、大气透过率和冷却率结果与经典的积分逐线积分方法进行了比较。对从地面到 100 km 范围的整层大气，大气透过率的误差不超过 0.0004 ；对 70 km 以下的大气，大气冷却率的误差不超过 0.004 K d^{-1} ，而计算时间却节省 $1\sim 2$ 个数量级。

6.2 大气辐射传输方程求解算法发展

一个准确、快速的大气辐射传输方程求解算法对大气遥感与气候模式都是重要的。

由于云和气溶胶散射相函数的高度不对称，要对其进行精确的勒让德展开，需要很大展开项数，甚至几百项。这不仅大大增加辐射计算的时间，而且可引起数值求解的不稳定。1985年，邱金桓^[109]发现当展开项数较低时，所引起的亮度计算误差主要来自于一次散射的计算误差，因此，他首先提出在太阳短波辐射亮度计算中进行一次散射订正的方法，大大提高了辐射计算的速度与精度。

大气物理所的学者还发展了如下 11 个有特色的大气辐射传输算法：

- (1) 新的双向反射地表—大气辐射耦合模式^[110,111]；
- (2) 计算辐射通量的调制的 Delta-Eddington 近似^[112]；
- (3) 一个计算辐射通量的半经验、高精度的计算模式^[113]；
- (4) 一个参数化的天空亮度模式^[114]；
- (5) 地平纬圈天空亮度的一个参数化模式^[115]；
- (6) 一个应用离散坐标法计算各向异性散射大气中辐射强度的改进算法^[116]；
- (7) 卫星对地观测中大气与地表辐射贡献的参数化模式^[117]；
- (8) 卫星遥感地面紫外辐射的参数化方法^[118]；
- (9) 一个海洋—大气耦合辐射传输模式^[119]；
- (10) Delta-Eddington 近似加经验订正计算天空亮度的一个模式^[120]；
- (11) 一个三维 Monte Carlo 地气耦合辐射传输模式^{[121,1)}。

6.3 若干其他的研究进展

由于电子计算机应用的普及，从 20 世纪 60 年代开始，经许多科学家十多年的努

1) 刘广员、邱金桓，一个三维 Monte Carlo 地气耦合辐射传输模式，大气科学，2003，待发表。

力，建立了数个大型的大气光谱参数数据库，为工程设计和科学研究建立了大气透过率和大气辐射波长覆盖范围广的计算程序，如 LOWTRAN 和 MODTRAN，这些程序及附带的数据库有很大的通用性。吴北婴等^[122]进行了 LOWTRAN 7 汉化工作，大大推动了它在中国的应用。

为研究大气气体的吸收特性，王庚辰等^[123~125]和孔琴心等^[126]还利用长光程样品池对大气中 CO₂ 等主要温室气体的分子吸收光谱特征进行了实验研究，获得了计算这些气体总吸收及其变化的经验参数。

王庚辰等^[127~131]和周凤仙^[132]等根据对太阳光谱的观测研究了大气红外窗区范围内的辐射传输及对遥感探测的影响问题。

随着激光技术在大气中的应用，不同波长激光在地球大气中的传输成为激光遥感和某些军事应用的重要问题。孔琴心等^[133~135]和王庚辰等^[136]在实验室内用长光程模拟方法研究了 He-Ne 激光、CO 激光等激光谱线的大气传输特征，为这些激光在大气中的实际应用提供了科学数据。

7 大气组分探测研究

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，人们逐渐发现大气中的某些组分正在发生明显的变化，并由此会导致全球环境和气候的相应变化。从而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。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，其中已被人们认为对大气环境和气候变化有重要影响的微量气体大约有 30 多种。这些微量气体中，有的属于温室气体（如 CO₂、CH₄、N₂O、O₃、HFCs、PFCs、SF₆ 等等），它们在大气中的变化会对温室效应的增强产生重要影响；有的则对大气中的物理、化学和动力学过程有重要作用（如 H₂O、CO₂、O₃ 等等）；还有一类属于污染气体（如 SO₂、NO_x、CO、O₃、VOC 等等），它们会直接影响大气中的化学过程、空气质量，会直接危害人们的身体健康和生存环境。因此，对大气组分的研究是现代大气科学研究中的核心内容之一。其中定量获取和认识大气中主要微量组分的变化特征则是研究它们环境、气候效应的基础。

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。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。

大气中的绝大部分微量气体组分都有着自已明显的特征光谱，这些光谱分布在从紫外到红外的各个波区，这就为利用光谱法从卫星或地基遥测这些气体组分提供了理论基础。近些年来我们在大气组分的遥感和直接探测理论、方法和技术方面取得了明显的进展。

7.1 大气气溶胶探测

作为大气中的重要组分，大气气溶胶始终是大气物理和大气探测研究中的重要对象，但是由于其时空变化较大，而且受人类活动影响较大，因此，虽然建立了多种参

数化模式,但其物理、化学以及光学特性仍然是研究的最基本内容。作为一种大气组分,重点是了解其物理、化学特征。

王庚辰等^[137~140]、游荣高等^[141,142]和孔琴心等^[143]对不同地区近地层大气中的气溶胶浓度、谱及变化特征进行了研究,任丽新等^[144~146]和谢骅等^[147]对不同地区大气中的气溶胶元素组分进行了分析。王庚辰等^[148]利用光学方法对城市大气中的黑碳气溶胶的浓度及变化特征进行了研究。所有这些为认识不同地区大气中的气溶胶理化特征及估计其辐射效应提供了最基础的资料。任丽新等^[149,150]、游荣高等^[151]和石广玉等^[152]等利用高空气球获得了 0~30 km 高度范围内的气溶胶分布廓线。

7.2 大气中水汽 (H₂O) 柱总量探测

水汽是大气中最重要而且时空变化最在的组分。科学工作者利用地基遥感,卫星遥感以及直接探测等方法来获得大气中水汽含量的信息。孔琴心等^[153]、Xiong 等^[154]和王庚辰等^[155]利用太阳作光源在地面对大气中的水汽总量进行地基遥测获得了很好的结果。对北京地区上空水汽柱总量的测量结果表明,夏季的变化范围约 2.330~5.000 g m⁻²,其平均值约为 3.442 g m⁻²,而冬季相应的变化范围和平均值分别为 0.180~1.270 g m⁻²和 0.586 g m⁻²,反映了夏季北京地区大气中含水量大,但变化幅度相对较小,而冬季则是相对干燥,大气中的水汽变化幅度较大。秋季的探测结果表明,大气中水汽柱总量平均值约为 0.914 g m⁻²,其变化范围为 0.160~3.47 g m⁻²。

杨景梅和邱金桓^[156,157]发展了用近地面湿度参数计算大气整层大气水汽含量的方法,取得了较好的结果。

为探索微波辐射计探测大气水汽的能力,周秀骥等^[158]开展了一系列理论和实验工作。黄润恒等^[159]实验研究了用地基微波辐射计遥感大气的分层水汽含量,薛永康等^[160,161]在国内外首先将蒙特卡洛方法用在微波遥感水汽廓线上,并用大气物理所自制的 1.35 cm 微波辐射计进行四季的观测验证,表明了该方法在测水汽廓线方面的独特能力。之后,魏重等^[162~168]用自制的双波长微波辐射计多次赴热带西太平洋“暖池”考察。得到西太平洋“暖池”上空大气水汽(和云液水)含量的季节统计分布特征及水汽的日、季、年和年际等多尺度变化特征,比较了这些特征与中纬度北京地区的差异,为大气水汽研究提供宝贵资料。

孔琴心等^[169]发展了利用长程吸收法测量大气中水汽含量的光学方法并在实际大气中进行了验证。王庚辰^[170]研究了用喇曼散射法测量水汽含量的潜力。

7.3 大气臭氧 (O₃) 探测

大气臭氧在大气物理、化学和动力学过程中有着特殊的作用,因此,长期以来一直是大气科学中研究的重要内容。20 世纪 80 年代以来,人们在全球范围内大气臭氧层正在受到破坏,尤其是在南极地区上空出现了臭氧洞,这使得人们对臭氧这一大气组分更为关注。中国科学家们为此也加大了对大气臭氧的研究力度。中国学者积极利用卫星臭氧探测资料发现了青藏高原上空季节性臭氧亏损的存在并长期坚持地基臭氧业务观测研究。与此同时,积极发展大气臭氧直接探测系统,成功研制了 GPS 大气臭氧探空系统,从而结束了中国没有大气臭氧直接探测手段的历史,为在中国开展大气臭氧高空探测业务化创造了条件。利用自行研制的大气臭氧探空系统曾在南极中山站和北京地区等地进行了施放,获得了宝贵的大气臭氧资料,目前这种施放正在继续进行

中。

我国在大气臭氧研究方面有较长的历史^[171]，魏鼎文等^[172]于上个世纪 60 年代初研究了遥感臭氧垂直分布逆转法 B 中的解不唯一性问题，并提出了方法“C”。随后，先后在我国河北香河和云南昆明陆续建立了臭氧观测站，在我国开展了大气臭氧总量的规范观测。王庚辰等^[173]发展了利用大气光学厚度变化来推断大气臭氧柱总量的方法。孔琴心等^[174,175]对日蚀期间大气臭氧的变化进行了研究。在此期间，大气物理所研究人员还结合相关研究项目对我国不同地区近地面大气中的臭氧进行了研究，并发展了一些计算大气臭氧总量的经验方法^[176~179]。

大气中臭氧含量的垂直分布是大气臭氧研究中人们所关心的核心问题，近 10 多年来，大气物理所研究人员在激光雷达大气臭氧探测和臭氧探空直接探测方面做出了显著的研究结果。邱金桓等^[180~182]成功研制了遥测臭氧垂直廓线的多波长激光雷达系统，王庚辰等^[183~185]、孔琴心等^[186~189]和赵永净等^[190]发展了大气臭氧探空系统并已在北北京、南极中山站等地区进行了实际应用。图 1 给出了我国学者在南极中山站获得的大气臭氧典型垂直廓线，可以发现南极臭氧洞期间中山站上空臭氧含量的明显耗损。

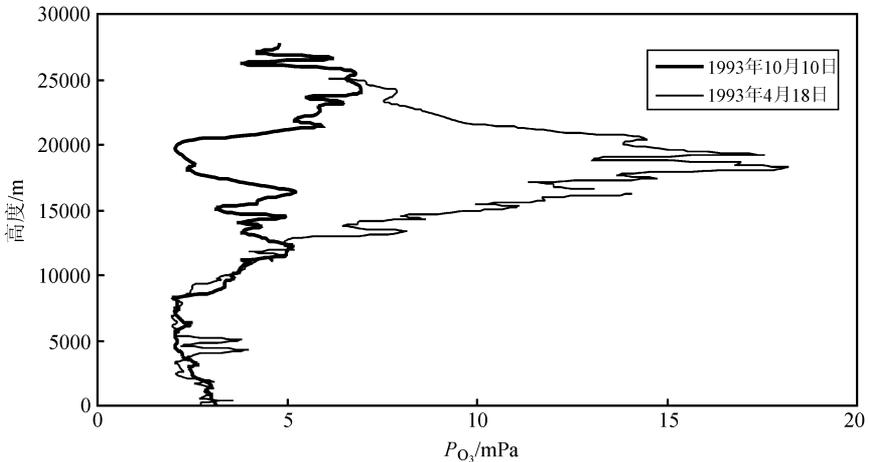


图 1 南极臭氧洞期间中山站上空臭氧的典型垂直廓线

7.4 其他气体组分的探测

除了水汽和臭氧之外，大气中其他一些微量气体组分，如 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 NO_x 、 N_2O 、 VOC 等，也受到了极大重视，发展对这些气体组分的探测手段无疑是现代大气物理研究中的重要内容。王庚辰等^[191~193]对中国大陆地区 CO_2 、 CH_4 等气体的背景浓度进行了较长期的观测研究，获得了这些气体浓度的变化特征。王庚辰等^[194~196]利用太阳光谱对大气中的 CO 、 CH_4 和 N_2O 等微量气体柱总量开展了高光谱分辨率的研究。 CO 是大气中的重要污染气体，又是化学活性气体。因此，它在大气中的浓度变化不仅直接影响空气质量而且对大气中的化学和光化学过程有着重要影响。由于大气中的 CO 主要来源于化石燃料的燃烧过程，因此在采暖期前后，对北京地区大气中的 CO 柱总量进行了长期的地基遥感探测研究。结果表明，北京地区大气中 CO 的柱总量的均值在夏季和秋季很接近，分别为 0.147 cm 和 0.146 cm ，而冬季，这个值为 0.160 cm ，反映了冬季空气中 CO 污染水平显著上升。应当指出的是在秋季和冬季，随着气象条件的变化

这个 CO 柱总量值在很大范围内变化,其日均值变化范围约为 0.079~0.356 cm。对北京地区大气中 CO 柱总量的变化特征的分析发现,尽管在某些天气条件下,大气中 CO 的含量可以达到很高的水平,但就平均而言,近十余年来变化不大,始终维持在 0.150 cm 左右。探测资料显示,北京地区上空 CH₄ 柱总量相对比较稳定,秋冬季节没有明显的差异,其平均柱总量值约为 1.278 cm。近两年来似乎有减少的趋势。孔琴心等^[197,198]和王庚辰等^[199~202]还发展了利用激光监测大气中 NO_x, CH₄ 等气体浓度的方法。与此同时,由于人类活动和自然生态系统对大气中的某些气体组分有着重要影响,为此,杜睿等^[203~207]和白建辉等^[208,209]对草原、森林等自然生态系统 N₂O、CO₂、CH₄ 以及某些 VOC 的排放进行了测量和模式研究,这些研究结果对认识大气中这些微量组分的变化以及认识相关的大气物理、化学过程等均有重要价值。

8 结束语

在这篇论文里,我们力求比较全面地论述大气物理所的科研工作者在“云和辐射相互作用”、“气溶胶的光学特性”、“气溶胶的辐射强迫”、“大气辐射传输”、“大气组分探测”等现代大气物理学几个重要研究方面的研究进展与成果。由于水平的限制,可能有不少不妥之处和不全面的地方。

参 考 文 献

- 1 周秀骥等编著,高等大气物理学(下册),北京:气象出版社,1991.
- 2 周秀骥、吕达仁、周明煜,中国大气物理学的发展与赵九章,赵九章纪念文集,叶笃正主编,北京:科学出版社,1997,87~92.
- 3 吕达仁,我国大气物理研究进展,物理,1999,28(11),654~661.
- 4 IPCC 2001, *Climate Change: The Scientific Basis* (edited by Houghton et al.), Cambridge University Press, 2001.
- 5 Zhang G. T., Xu L. S., and Chen H. B., A new parameterization schemes for shortwave radiative properties of water clouds, *J. Appl. Meteor.*, 1995, 34(1), 101~106.
- 6 汪宏七、赵高祥,云微物理特性对云光学和辐射性质的影响,应用气象学报,1996,7(1),36~44.
- 7 王可丽,青藏高原地区云对地表净辐射的影响,高原气象,1996,15(3),269~275.
- 8 刘春雷、姚克亚,卷云中粒子的密度变化对可见光波段能量传输的影响,大气科学,1997,21(5),599~606.
- 9 陈洪滨,关于云和云天大气对太阳辐射的异常吸收,大气科学,1997,21(6),750~757.
- 10 Chen Hongbin, and Lu Daren, An explanation for anomalous absorption of solar radiation by water clouds, in *IRS' 96: Current Problems in Atmospheric Radiation* (Eds. Smith and Stamnes), A. Deepak Publishing, 1997, 1042~1045.
- 11 陈洪滨、孙海冰,冰-水球形粒子在太阳短波段的吸收与衰减,大气科学,1999,23,233~238.
- 12 马晓燕、季国良,中国地区云对太阳短波辐射吸收的研究,大气科学,2000,24(4),527~539.
- 13 邱金桓、郑斯平、黄其荣等,北京地区对流层上部云和气溶胶的激光雷达探测,大气科学,2003,27(1),1~7.
- 14 白建辉、王庚辰等,参与光化学反应的物质对 UV 能量吸收的估算,环境科学研究,2002年,15(4),24~26.
- 15 白建辉、王庚辰等,太阳紫外辐射在大气中衰减的探讨,气候与环境研究,2002,7(4),440~446.

- 16 白建辉、王庚辰, 大气中的水汽对太阳紫外辐射消光的可能机制分析, *大气科学*, 1995, **19** (3), 380~384.
- 17 毛节泰等, 中国气溶胶研究综述, *气象学报*, 2002, **60** (5), 625~634.
- 18 吕达仁、周秀骥、邱金桓, 消光一小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验, *中国科学*, 1981, **12**, 1516~1523.
- 19 邱金桓、汪宏七、周秀骥等, 消光一小角散射法遥感气溶胶谱分布的实验研究, *大气科学*, 1983, **7**, 33~41.
- 20 Qiu Jinhuan, Wang Hongqi, Zhou Xiuji et al., Experimental study of remote sensing of atmospheric aerosol size distribution by combined solar extinction and forward scattering method, *Adv. Atmos. Sci.*, 1985, **2** (3), 307~315.
- 21 邱金桓、周秀骥, 角散射法遥感气溶胶折射率的理论分析, *中国科学*, 1984, 962~970.
- 22 Qiu Jinhuan, and Zhou Xiuji, Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—part I: Theory, *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3** (2), 162~171.
- 23 Qiu Jinhuan, Sun Jinhui, Xia Qiling et al., Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—Part II: Application, *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3**, 341~348.
- 24 Qiu Jinhuan, Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—Part III: Parameterization and application, 1988, *Adv. Atmos. Sci.*, **5** (3), 312~323.
- 25 Qiu Jinhuan, Zhou Xiuji, Sun Jinghui et al., Simultaneous determination of the aerosol size distribution, refractive index, and surface albedo from radiance data, in *Atmospheric Radiation: Progress and Process*, edited by K. -N. Liou and Zhou Xiuji, Science Press, 1987, 550~556.
- 26 邱金桓、孙金辉、夏其林等, 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析, *气象学报*, 1988, **46** (1), 49~58.
- 27 邱金桓, 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论, *大气科学*, 1995, **19** (3), 385~394.
- 28 邱金桓、杨景梅、潘继东, 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 II: 实验研究, *大气科学*, 1995, **19** (4), 586~596.
- 29 Qiu Jinhuan, A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation, 1998, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 734~758.
- 30 邱金桓, 大气气溶胶光学厚度的宽带消光遥感方法及其应用, *遥感学报*, 1997, **1** (1), 15~23.
- 31 Qiu Jinhuan, Broadband Extinction Method to Determine Atmospheric Aerosol Optical Properties, *Tellus*, 2000, **53B**, 72~82.
- 32 邱金桓、杨理权, 从宽带太阳直接辐射小时或日曝辐量反演气溶胶光学厚度研究, *大气科学*, 2002, **26** (4), 449~458.
- 33 罗云峰、周秀骥、李维亮, 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状, *地球科学进展*, 1998, **13** (6), 572~581.
- 34 Luo Yunfeng, Lu Daren, Zhou Xiuji et al., Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D13), 14501~14513.
- 35 李放、吕达仁, 珠穆朗玛峰地区大气气溶胶光学特性, *大气科学*, 1995, **19** (6), 755~763.
- 36 Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko et al., Climate effects of black carbon aerosols in China and India, *Science*, 2002, **297**, 2250~2253.
- 37 罗云峰、吕达仁、周秀骥等, 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征析, *大气科学*, 2002, **26**, 721~730.
- 38 罗云峰、李维亮、周秀骥, 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析, *气象学报*, 2001, **59** (1), 77~86.
- 39 Qiu Jinhuan, and Yang Liquan, Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980—1994, *Atmospheric Environment*, 2000, **34**, 603~609.
- 40 邱金桓、潘继东、杨理权等, 中国 10 个地方大气气溶胶 1980~1994 年间变化特征研究, *大气科学*, 1997, **21** (6), 725~733.

- 41 李放、吕达仁, 北京大气气溶胶光学厚度中长期变化特征, 大气科学, 1996, **20**, 385~398.
- 42 林海、魏重, 北京地区太阳可见光辐射与大气透明度的初步测量, 大气科学, 1976, (2), 52~61.
- 43 张金定、邱金桓、汪宏七, 南极长城站云和气溶胶光学特性的遥感和分析, 南极研究, 1991, **3** (1), 47~53.
- 44 王庚辰、许黎、吕位秀等, 高山地区太阳可见光辐射大气消光的观测研究, 大气科学, 1979, **3** (4), 343~351.
- 45 王庚辰, 大气气溶胶光学厚度和 Angström 公式的适用范围, 大气科学, 1982, **6** (1), 52~57.
- 46 陈洪滨、吕达仁、许丽生, 利用 SAGE II 资料分析皮纳图博火山爆发前后平流层气溶胶的变化特征, 科学通报, 1994, **39** (22), 2084~2087.
- 47 杨理权、邱金桓、赵延亮, 火山气溶胶对北京地区臭氧总量变化趋势的影响, 大气科学, 1998, **22**, 286~292.
- 48 王栋梁、邱金桓, 塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶光学特性研究, 大气科学, 1988, **12** (1), 75~81.
- 49 尉东胶、邱金桓, 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 I. 理论, 大气科学, 1998, **22** (5), 677~685.
- 50 尉东胶、邱金桓, 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 II. 对比实验与应用研究, 大气科学, 2000, **24** (2), 677~685.
- 51 李放、吕达仁, 利用消光谱反演气溶胶折射率的一种新方法及其应用, 遥感技术与应用, 1995, **10** (2), 168~174.
- 52 中国科学院大气物理所集刊第 1 号, 激光在气象探测中的应用, 北京: 科学出版社, 1973.
- 53 孙景群, 激光大气遥感, 第一版, 北京: 科学出版社, 1986, 269pp.
- 54 Qiu Jinhuan, and Lu Daren, On Lidar application for remote sensing of the atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1991, **8**, 369~378.
- 55 吕达仁、魏重、林海等, 低层大气消光系数分布的激光探测, 大气科学, 1977, (3), 199~205.
- 56 吕达仁、魏重、张健国, 激光探测能见度的实验研究, 大气科学, 1976, (1), 55~61.
- 57 赵燕曾、陶丽君、郝南军, 激光探测斜视能见度的初步实验, 大气科学, 1980, **4** (2), 168~175.
- 58 邱金桓、黄其荣、赵红接等, 激光探测机场斜视跑道视程的实验研究, 大气科学, 1988, **12** (3), 291~300.
- 59 白宇波、石广玉、田村耕一等, 拉萨上空大气气溶胶光学特性的雷达探测, 大气科学, 2000, **24** (4), 559~567.
- 60 白宇波, 拉萨上空气溶胶激光雷达与臭氧高空气球探测, 北京大学博士学位论文, 2000.
- 61 周诗健、陶丽君、朱文琴, 几种激光探测大气消光系数方法的比较, 大气科学, 1981, **5** (4), 444~448.
- 62 孙金辉、邱金桓、夏其林等, 激光探测平流层气溶胶层后向散射系数分布, 大气科学, 1986, **10** (4), 431~436.
- 63 孙金辉、邱金桓、夏其林、张金定, 激光探测平流层火山云, 科学通报, 1993, **38** (7), 631~633.
- 64 孙金辉、夏其林、邱金桓等, 激光雷达探测南极平流层云, 南极研究, 1995, **7** (1), 62~68.
- 65 邱金桓、赵燕曾、汪宏七, 激光探测沙暴过程中的气溶胶消光系数分布, 大气科学, 1984, **8** (2), 205~210.
- 66 邱金桓、孙金辉, 沙尘暴的光学遥感及分析, 大气科学, 1994, **18** (1), 1~10.
- 67 Qiu Jinhuan, and Yang Liquan, Lidar monitoring of Aerosol and Yellow sand in Beijing, *IEEE*, 1999, **37**, 1056~1057.
- 68 Qiu Jinhuan, Sensitivity of Lidar Equation Solution to Boundary values and determination of the values, *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **5**, 229~241.
- 69 Qiu Jinhuan, Constraint inversion algorithm of lidar equation for deriving aerosol optical property, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (2), 215~228.
- 70 Qiu Jinhuan, Two-wavelength lidar measurement of cloud-aerosol optical properties, *Adv. Atmos. Sci.*, 1995, **12** (2), 176~177.
- 71 邱金桓、吕达仁, 空间激光雷达遥感大气气溶胶分布的反演算法初步研究, 大气科学, 1998, 特刊, 258~270.
- 72 吕达仁, 考虑二次散射的激光雷达近似方程与低能见度的激光探测, 地球物理学报, 1982, **25** (1), 1~9.

- 73 邱金桓、H. Quenzel、M. Wiegner, 参数化的多次散射雷达方程和它的反演理论 I. 方程, 大气科学, 1992, **16** (3), 229~239.
- 74 邱金桓、吕达仁, 参数化的多次散射雷达方程和它的反演理论 II. 反演理论, 大气科学, 1992, **16** (4), 415~426.
- 75 Yang Shu, Zhou Xiujie, and Zhao Yangzeng, A theoretical study of multi-wavelength Lidar exploration of optical Properties of atmospheric aerosol, *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3**, 23~38.
- 76 吕达仁、魏重, 大气气溶胶对激光的消光的理论计算, 大气科学, 1978, **2**, 145~152.
- 77 孙景群, 激光遥测大气消光系数的误差分析, 气象学报, 1989, **47**, 332~336.
- 78 Qiu Jinhuan, A method for spaceborne synthetic remote sensing of aerosol optical depth and vegetation reflectance, *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15** (1), 17~30.
- 79 吕达仁、李卫、章文星, 地球环境和气候变化探测与过程研究: 大气气溶胶光学厚度与地表反射率的同时遥感—原理和初步数值试验, 北京: 气象出版社, 1998.
- 80 段民征, 陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演——卫星标量辐射和偏振信息的联合利用, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2001.
- 81 韩志刚, 草地上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感——正问题模式系统和反演初步实验, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999.
- 82 阎帮华, 地气系统中太阳辐射的偏振特性及其在遥感中的应用研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1997.
- 83 夏祥鳌、王明星、张仁健, 基于卫星观测的中国地区沙尘气溶胶时空变化特征分析, 过程工程学报, 2002, **2**, 264~267.
- 84 Qiu Jinhuan and Nobuo Takeuchi, Effects of aerosol inhomogeneity on satellite optical remote sensing, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (4), 539~553.
- 85 吴北婴、吕达仁, 用 Monte-Carlo 方法模拟火山爆发后的曙暮光特征, 大气科学, 1989, **13**, 204~213.
- 86 Wu Beiyong, and Lu Daren, Retrieval of stratospheric background aerosol scattering coefficient from twilight polarization, *Appl. Opt.*, 1988, **27**, 4899~4906.
- 87 Wu Beiyong, and Lu Daren, Monitoring the evolution of 1991 Pinatubo aerosols over Beijing by combined twilight observation with lidar detection, *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**, 22995~23001.
- 88 Lu Daren, Liu Jinli, and Li Fang, Ground-based remote sensing of the size distribution of the Pinatobu's volcanic cloud, *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, **8**, 117~120.
- 89 关虹、吕达仁、吴北婴, 用曙暮光时的天光光强反演平流层气溶胶散射系数廓线, 大气科学, 1992, **16**, 225~230.
- 90 周秀骥、李维亮、罗云峰, 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟, 大气科学, 1998, **22**, 418~427.
- 91 石广玉、王喜红、张立盛等, 人类活动对气候影响的研究对东亚和中国气候变化的影响, 气候与环境研究, 2002, **7** (2), 255~266.
- 92 胡荣明、石广玉, 中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应试验大气科学, 1998, **22** (6), 919~925.
- 93 胡荣明、石广玉, 平流层气溶胶的辐射强迫及其气候响应的水平二维分析, 大气科学, 1998, **22** (1), 18~24.
- 94 王喜红、石广玉, 东亚地区云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响, 高原气象, 2001, **20** (3), 258~263.
- 95 王喜红、石广玉, 东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫, 气象学报, 2002, **60** (6), 758~765.
- 96 王喜红、石广玉、马晓燕, 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应, 大气科学, 2002, **26** (6), 752~760.
- 97 张立盛、石广玉, 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算, 大气科学, 2001, **25** (2), 231~242.
- 98 张立盛、石广玉, 相对湿度气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响, 气象学报, 2002, **60** (2), 230~237.

- 99 于秀兰、石广玉, 平流层温度调整后的辐射强迫的简化计算, 高原气象, 2001, **20** (3), 271~274.
- 100 Wu Beiyang, Lu Daren, and Fu Qiang, Radiative effect of Pinatubo aerosols in the middle latitudes of the Northern hemisphere, *Theor. PPL. Climatol.*, 1995, **51**, 13~23.
- 101 Qiu Jinhuan, and Wang Kaixiang, A study of the radiation-climate effect of aerosol over Beijing area, *Adv. Atmos. Sci.*, 1993, **10**, 147~154.
- 102 Shi Guangyu, An Accurate Calculation and Representation of the Infrared Transmission Function of the Atmospheric Constituents, Ph. D. Thesis, 1981, Tohoku University of Japan, 191pp.
- 103 石广玉, 计算 9.6 μm 臭氧带冷却率的一种新方法, 中国科学 (B 辑), 1984, (4), 378~385.
- 104 Shi Guangyu, Effect of atmospheric overlapping bands and their treatment on the calculation of thermal radiation, *Adv. Atmos. Sci.*, 1984, **2**, 246~255.
- 105 石广玉, 大气辐射计算的吸收系数分布模式, 大气科学, 1998, **22** (4), 659~676.
- 106 Zhang Hua, and Shi Guangyu, An improved approach to diffuse radiation, *J. Quant. Spec. Rad. Trans.*, 2001, **70**, 367~372.
- 107 Zhang Hua, and Shi Guangyu, Numerical explanation for accurate radiative cooling rates resulting from the corrected k-distribution hypothesis, *J. Quant. Spec. Rad. Trans.*, 2002, **74**, 299~306.
- 108 张华、石广玉, 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法, 大气科学, 2002, **24** (1), 111~121.
- 109 邱金桓, 辐射传输方程的一个改进算法, 大气科学, 1985, **10**, 150~257.
- 110 Qiu Jinhuan, An improved model of surface BRDF- atmospheric coupled radiation, *IEEE Trans. Remote Sensing*, 2001, **39**, 181~187.
- 111 邱金桓, 一个新的双向反射地表-大气辐射耦合模式, 中国科学, 2000, **30**, 656~662.
- 112 Qiu Jinhuan, Modified Delta-Eddington approximation for solar reflectance, transmission, and absorption calculation, *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**, 2955~2961.
- 113 Qiu Jinhuan, A simple yet more accurate method to calculate solar radiative flux in the inhomogeneous atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (3), 433~447.
- 114 邱金桓, 用于空间对地遥感的一个参数化辐射传输计算模式, 大气科学, 1998, **22**, 649~658.
- 115 Qiu Jinhuan, An approximate expression of the sky radiance in almucantar and its application, *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3** (1), 1~9.
- 116 王宏七、赵高祥, 在各向异性散射大气中用离散坐标法进行辐射强度计算, 中国科学 (B), 1989, **19**, 1330~1339.
- 117 吕达仁、段民征, 卫星对地观测中大气与地表辐射贡献的参数化, 大气科学, 1998, **22**, 638~648.
- 118 王普才、吕达仁, 卫星遥感地面紫外辐射的参数化方法, 大气科学, 2001, **25** (1), 1~13.
- 119 段民征、吴北婴、吕达仁, 海洋-大气耦合辐射传输模式, 大气科学, 1997, **21**, 734~742.
- 120 Yang Jingmei, and Qiu Jinhuan, An easy algorithm for solving radiative transfer equation in clear atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1992, **9** (4), 483~490.
- 121 刘广员, 卫星对地遥感应用中的邻近效应问题, 中科院大气物理研究所博士学位论文, 2002.
- 122 吴北婴等编著, 大气辐射传输实用算法, 北京: 气象出版社, 1998.
- 123 王庚辰、张文、孔琴心, 长光程变温样品池的研制, 仪器仪表学报, 1988, **4**, 431~435.
- 124 王庚辰、孔琴心等, CO₂ 2.7 μm 和 4.3 μm 带总吸收的实验研究, 中国气候与海平面研究进展 (一), 北京: 海洋出版社, 1990, 84~85.
- 125 王庚辰、孔琴心等, 大气中温室气体的光谱特征, 全球气候变暖, 施雅风等主编, 济南: 山东科学技术出版社, 1992, 62~169.
- 126 孔琴心、王庚辰, 大气臭氧 9.6 μm 带和 4.8 μm 带的总吸收研究, 大气科学文集, 北京: 科学出版社, 1990, 303pp.
- 127 王庚辰、王明星等, 8-13 微米红外辐射大气传输研究的一些结果, 红外物理与技术, 1981, **10** (5), 7~12.
- 128 一室 103 组, 8-14 微米红外辐射大气衰减的研究, 大气物理所集刊, 第 5 号, 北京: 科学出版社, 1977.

- 129 王庚辰、任丽新, 环境遥感中的大气效应, 遥感文选, 北京: 科学出版社, 1981.
- 130 王庚辰, 大气气溶胶对 8—13 μm 窗区辐射的衰减, 大气科学, 1982, **6** (3), 333~337.
- 131 王庚辰, 红外窗区范围内的大气光学特性, 红外研究, 1983, **2** (3), 205~218.
- 132 周凤仙、任丽新、赵高祥等, 大气对红外窗区遥感的影响, 大气科学, 1978, **2** (2), 153~158.
- 133 孔琴心、张文等, 6328 \AA 激光大气衰减的实验研究, 应用激光, 1982, **2** (3), 31~33.
- 134 孔琴心、张文等, 选支 CO 激光器谱线强度及其变化, 应用激光, 1982, **2** (6), 19~20.
- 135 孔琴心、王庚辰, 选支 CO 激光 86 条发射谱线大气透过率的研究, 大气科学, 1983, **7** (1), 102~108.
- 136 王庚辰、孔琴心, CO 激光大气传输的某些特征, 红外研究, 1984, **3** (4), 354.
- 137 王庚辰, 大气气溶胶浓度及其谱分布的某些特征, 大气科学, 1982, **6** (2), 211~216.
- 138 王庚辰, 大气气溶胶浓度及其日变化特征, 环境科学情报, 1984, **9**, 28~34.
- 139 雷文芳、任丽新等, 黑河地区沙漠气溶胶浓度和谱分布特征, 高原气象, 1993, **12** (2), 170~179.
- 140 王庚辰、孔琴心等, 秋末冬初大气中颗粒物的变化, 大气环境科学技术进展, 1998, 11, 210~215.
- 141 游荣高、任丽新, 北京采暖期间和采暖期前大气气溶胶物理特性的对比研究, 大气科学, 1990, **14** (3), 345~363.
- 142 You Ronggao, Ren Lixin et al., The measurements and analysis of the physical characteristics of atmospheric aerosol on the surface of the west pacific ocean, Annual Report, Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, 1990, 9 (2), 126~129.
- 143 Kong Qinxin, Xiong Xiaozhen et al. Direct solar spectral measurements in desert area, *Advances in HEIFE Research*, Special Issue 1 (1987-1994), China Meteorological Press, 1994.
- 144 任丽新、J. W. 温彻斯特等, 北京冬春季节大气气溶胶化学成分的研究, 大气科学, 1982, **6** (1), 11~17.
- 145 任丽新、王明星、邬虹等, 重庆地区大气气溶胶的物理化学特性及其对酸雨形成的作用, 大气科学, 1988, 特刊, 236~244.
- 146 Ren Lixin, Lei Wenfang et al. The Physical and Chemical Characteristics of Desert Aerosols in the HEIFE Region, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1995, **73** (6), 1263~1268.
- 147 谢骅、王庚辰等, 北京市大气中细粒态气溶胶的化学成分研究, 中国环境科学, 2001, **21** (5), 432~435.
- 148 王庚辰、孔琴心等, 北京地区大气中黑碳气溶胶及其变化特征, 过程工程学报, 2002, 增刊.
- 149 Ren Lixin, You Ronggao et al. Vertical distribution of atmospheric aerosol at altitudes from 0 to 30 km, *Kexue Tongbao*, 1985, **30** (6), 781~785.
- 150 任丽新、游荣高等, 0—30 公里大气气溶胶的垂直分布, 科学通报, 1984, **18**, 1121~1124.
- 151 You Ronggao, Ren Lixin et al., The balloon observations and study of continental atmospheric aerosols in the during 1984—1986, Annual Report, Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, 1990, 9 (2), 126~129.
- 152 Shi Guangyu, Li Xu et al., Balloon observation of vertical distribution of ozone and aerosol in atmosphere from 0 to 30 km, *Kexue Tongbao*, 1987, **32** (16), 1125~1129.
- 153 孔琴心、任丽新, 由太阳近红外直接辐射强度遥测大气水汽总含量, 大气科学, 1983, **7** (3), 341~346.
- 154 Xiong Xiaozhen, Kong Qinxin et al., Computation of the total ozone amount and water vapor content of atmosphere in column above Ningchuan district by the direct solar spectrum, *Advances in HEIFE Research*, Special Issue 1 (1987-1994), China Meteorological Press, 1994.
- 155 Wang Gengchen, Kong Qinxin et al., Remote sensing of H₂O and CO in the atmosphere by ground-based solar spectrophotometer, In: *Current Problem in Atmospheric Radiation*, Edit by William L. Smith and Y. M. Timofeyev, A. Deepak Pub. Hampton, Virginia, 2001, 893~896.
- 156 杨景梅、邱金桓, 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式, 大气科学, 1996, **20** (5), 620~626.
- 157 杨景梅、邱金桓, 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究, 2002, **26** (1), 9~22.
- 158 周秀骥等, 大气微波辐射及遥感原理, 北京: 科学出版社, 1982.
- 159 黄润恒、魏重, 地面 1.35 厘米辐射计系统实时遥感分层水汽总量的实验研究, 大气科学, 1986, **10** (3),

232~239.

- 160 薛永康等, 蒙特卡洛法在微波遥感水汽垂直廓线上的应用, 中国科学, 1981, **11**, 1367~1375.
- 161 薛永康等, 地对空微波遥感水汽垂直廓线的方法, 大气科学, 1983, **8**, 115~124.
- 162 魏重、薛永康、朱晓明等, 1.35 厘米波长地面微波辐射计探测大气中水汽含量和分布, 大气科学, 1984, **8** (4), 418~426.
- 163 Wei Chong, Lin Hai et al., Microwave remote sensing of atmospheric water vapor and cloud liquid water over equatorial Western Pacific Ocean with a ship-borne dual-wavelength, in: *Microwave Remote Sensing of the Earth System*, Ed. By Alain Chedin, Deepak publishing, 1989, 111~126.
- 164 魏重、林海等, 微波遥感海上大气可降水和云液态含水量, 大气科学, 1989, **13** (1), 101~107.
- 165 魏重、忻妙新、林海等, 西太平洋热带海域水汽和云中液态水含量的统计特征, 大气科学, 1989, **13** (2), 199~203.
- 166 魏重、忻妙新、王普才等, 西太平洋赤道海域上空可降水和云液态水的遥感分析, 大气科学, 1992, **16** (1), 1~10.
- 167 魏重、宣越健, TOGA COARE IOP 期间西太“暖池”上空大气水的统计特征, 科学通报, 1996, **41** (21), 1973~1976.
- 168 魏重、吴玉霞、王普才等, 西太暖池和北京地区大气水特征的地基遥感测量, 大气科学, 2000, **24** (5), 703~714.
- 169 孔琴心、王庚辰, 用长程吸收法测量大气中的水汽含量, 气象学报, 1984, **42** (1), 116~124.
- 170 王庚辰, 喇曼散射法测量大气中水汽含量的潜力分析, 大气科学, 1988, 特刊, 310~317.
- 171 王庚辰, 我国大气臭氧探测技术的进展现状, 地球科学进展, 1991, **6** (6), 31~36.
- 172 魏鼎文, 魏鼎文论文选集, 武汉: 武汉大学出版社, 1995.
- 173 王庚辰、孙秀兰, 根据大气光学厚度的变化来推断臭氧总含量, 气象学报, 1983, **40** (2), 234~241.
- 174 孔琴心, 日环食期间地面臭氧和太阳辐射, 中国日环食观测研究文集, 北京: 科学出版社, 1990.
- 175 孔琴心、刘广仁, 温室气体的日食效应, 日全食与近地环境 (1997年3月9日全食观测文集), 北京: 科学出版社, 1999.
- 176 孔琴心、刘广仁等, 华北兴隆地区地面 O₃ 浓度及其变化特征, 温室气体浓度和排放监测及相关过程, 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- 177 白建辉、王庚辰, 大气臭氧总量的一个统计计算方法, 环境科学学报, 1994, **14** (4), 397~402.
- 178 白建辉、王明星、陈辉等, 地面臭氧的变化规律和计算方法的初步研究 I. 紫外波段, 气候与环境研究, 2002, **7** (1), 49~60.
- 179 白建辉、王庚辰、陈辉等, 地面臭氧的变化规律和计算方法的初步研究 II. 可见光波段, 气候与环境研究, 2002, **7** (3), 311~320.
- 180 Qiu Jinhuan, Zheng Siping et al., Lidar measurements of atmospheric aerosol and ozone over Beijing and Antarctic, ILRC99, Japan, Abstracts of paper, 1999, 73~74.
- 181 Qiu Jinhuan, Error of DIAL-measured ozone concentration and a three-wavelength inversion technique, *Science in China*, 1993, **36**, 1381~1390.
- 182 Qiu Jinhuan, Zheng Siping et al., A four-wavelength lidar measurements of uppertropospheric and stratospheric aerosol and ozone in Beijing, ILRC21, Canada, Proceedings, 2002, 401~402.
- 183 王庚辰, 我国中层大气臭氧研究的某些进展, 科技导报, 1996, **8**, 35~37.
- 184 王庚辰, 大气臭氧垂直分布的直接测量, 科学通报, 1992, **37** (9), 863~864.
- 185 王庚辰、孔琴心等, 我国大气臭氧探空系统的研制和应用, 地球科学进展, 2003, **18** (3), (印刷中).
- 186 孔琴心、王庚辰等, 大气臭氧垂直分布的电化学测量, 大气科学, 1992, **16** (5), 636~640.
- 187 孔琴心、王庚辰等, 球载电化学 O₃ 探测系统, 气象水文海洋仪器, 1996, **1**, 26~33.
- 188 孔琴心、刘广仁等, 南极中山站上空大气臭氧的直接测量, 南极研究, 1996, **8** (1), 59~64.
- 189 孔琴心、刘广仁等, 1993 年春季南极中山站上空大气臭氧的观测分析, 大气科学, 1996, **20** (4), 395~400.

- 190 赵永净、孔琴心等, 南极昭和站上空 O_3 变化与 NAT 凝结温度的关系, 应用气象学报, 1996, **7** (1), 116~123.
- 191 王庚辰, 大气中 CO_2 浓度的全球监测现状, 地球科学进展, 1994, **9** (4), 70~77.
- 192 王庚辰、温玉璞等, 中国大陆上空 CO_2 本底浓度及其变化, 科学通报, 2002, 47 (10), 780~783.
- 193 Wang Gengchen, Wen Yupu et al., CO_2 background concentration in the atmosphere over the Chinese mainland, *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47** (14), 1217~1220.
- 194 Wang Gengchen, Kong Qinxin et al., Monitoring of total CO amount in the atmosphere using solar spectroscopy, In: *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds*, Edit. Jinxue Wang, Publish by SPIE, 1998.
- 195 Wang Gengchen, E. I. Grechko et al., Results of simultaneous measurements of CO in the atmosphere and submicron aerosol in the surface layer over Beijing, *Atmospheric and Ocean Physics*, 2001, **37**, 1~9.
- 196 Wang Gengchen, E. I. Grechko et al., Measurements of CO and aerosol in the atmosphere in Beijing, *Optics of Atmosphere and Ocean*, 2002, **15** (12), 1~7 (in Russian).
- 197 孔琴心、王庚辰等, 双波长 He-Ne 激光甲烷探测系统, 环境科学丛刊, 1992, **13** (4), 33~37.
- 198 孔琴心、王庚辰等, 大气中甲烷浓度的差分吸收测量, 应用气象学报, 1993, **4** (2), 24~28.
- 199 Wang Gengchen, and Kong Qinxin, A study on NO and NO_2 absorption properties by using line-tunable CO_2 laser, *Adv. Atmos. Sci.*, 1987, **4** (2), 218~224.
- 200 王庚辰、孔琴心, 用选支 CO 激光研究 NO, NO_2 气体的吸收特性, 大气科学, 1984, **8** (2), 219~226.
- 201 王庚辰、孔琴心等, 用选支 CO 激光器测量大气中 NO 的浓度, 环境科学, 1984, **1**, 19~21.
- 202 Wang Gengchen, and Kong Qinxin, An experimental study on absorption properties of NO, NO_2 , NH_3 , CO_2 and H_2O by using CO laser, *Adv. Atmos. Sci.*, 1984, **1** (1), 112~118.
- 203 杜睿、王庚辰、吕达仁等, 内蒙古羊草草原温室气体交换通量的日变化特征研究, 草地学报, 1998, **6** (4), 258~264.
- 204 杜睿、王庚辰、吕达仁, 内蒙古典型草原土壤 N_2O 产生的机理探讨, 中国环境科学, 2000, **20** (5), 387~391.
- 205 杜睿、王庚辰、吕达仁等, 放牧对草原土壤 N_2O 产生及微生物的影响, 环境科学, 2001, **22** (4), 11~15.
- 206 杜睿、王庚辰、吕达仁等, 内蒙古温带半干旱羊草草原温室气体 N_2O 和 CH_4 通量变化特征, 自然科学进展, 2001, **11** (6), 595~601.
- 207 杜睿、王庚辰、吕达仁等, 静态箱法原位观测草原 CO_2 通量的探讨, 生态学报, 2002, **22** (12), 2167~2174.
- 208 白建辉、王明星、JohnGraham and Ronald G. Prinn, 黄忠良, 森林排放非甲烷碳氢化合物的初步研究, 大气科学, 1998, **12** (2), 247~251.
- 209 白建辉、王庚辰等, 内蒙古草地挥发性有机物的预研究, 科学技术与工程, 2003, **3** (12), 179~181.

Modern Research Progresses in Atmospheric Physics

Qiu Jinhuan, Lu Daren, Chen Hongbin, Wang Gengchen, and Shi Guangyu

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

Abstract This paper briefly summarizes modern research content of the atmospheric physics and its development history, and it emphatically treats out research progresses and results (especially innovate results) in five fields of the atmospheric physics, contributed by scientists in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. These research fields include interaction between cloud and radiation, aerosol optical properties and its radiative forcing, atmospheric radiative transfer, and atmospheric composition measurements.

Key words: aerosol; cloud; radiation forcing; radiation transfer; atmospheric composition measurements