

邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 近年来大气遥感研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 841~853

Qiu Jinhuan, Wang Pucai, Xia Xiang'ao, et al. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 841~853

近年来大气遥感研究进展

邱金桓 王普才 夏祥鳌 段民征 宗雪梅

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

摘 要 本文着重介绍中国科学院大气物理研究所 2003 年以来在大气遥感研究方面的主要进展与成果, 内容包括: (1) 遥感技术与设备的发展; (2) 大气气溶胶遥感; (3) 云遥感; (4) 大气微量气体遥感; (5) 反演方法发展; (6) 大气辐射传输算法研究。气溶胶的光学特性遥感研究是近年来热点之一, 本文简要论述在气溶胶光学特性地基和卫星遥感反演算法、中国大气气溶胶光学特性时空分布特性、气溶胶辐射强迫遥感研究等方面所取得的成果。

关键词 大气遥感 技术与设备 气溶胶 云 反演方法

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0841-13

中图分类号 P407

文献标识码 A

Recent Progresses in Atmospheric Remote Sensing Researches

QIU Jinhuan, WANG Pucai, XIA Xiang'ao, DUAN Minzheng, and Zong Xuemei

Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Research progresses in atmospheric remote sensing (RS) in the Institute of Atmospheric Physics of Chinese Academy of Sciences since 2003 are introduced, emphasizing on such six aspects as: (1) RS technologies and facilities; (2) RS of atmospheric aerosol; (3) RS of cloud; (4) atmospheric trace gas measurements; (5) retrieval methods; (6) atmospheric radiative transfer algorithms. Some research developments on RS of atmospheric aerosol are presented, including: (1) retrieval algorithms of ground-based and satellite measurements of aerosol optical properties; (2) temporal-spatial distributions of aerosol optical properties in China; (3) aerosol radiative forcing measurements.

Key words atmospheric remote sensing, technologies and facilities, aerosol, cloud, retrieval methods

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。40 多年来, 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。从 20 世纪 60 年代开始, 中国科学院大气物理研究所 (IAP) 的科学工作者紧密结合国家需求与国际学术前沿, 在大气遥感理论、技术、反演方法与应用研究方面卓有成效^[1~6]。吕达仁等^[1]系统介绍了 2003 年以前 IAP 在大气遥感研究方面的主要进展; 郅秀书等^[6]进一步综述了 IAP 近 5 年来在地面大气探测高技术研发及相关研究领域所取得的

主要进展。本文综述 2003 年以来 IAP 在大气遥感研究方面的进展与成果, 侧重介绍大气遥感应应用研究进展, 主要包括: (1) 遥感技术与设备系统的发展; (2) 大气气溶胶遥感; (3) 云的遥感; (4) 大气微量气体成分遥感; (5) 大气遥感反演方法; (6) 大气遥感应用的辐射传输算法。

2 遥感技术与设备系统的发展

大气遥感技术和设备经过最近几十年的发展, 获得了巨大进步, 为当前全球高度关注的气候、环境和生态监测研究提供了重要技术手段和基础研究数据。从物理上来说, 大气遥感技术主要是辐射光谱测量技术及其分析技术和地球物理参数反演技术, 从紫外、可见光到红外、微波都是具有重要应用价值的波段, 不同辐射光谱与大气物质的相互作用机理包括吸收、散射和发射过程及其传输过程是遥感大气物理参数的理论基础, 不同大气物质的特征吸收、发射或散射光谱的组合应用以及许多观测站点的组网观测为获取气候、环境和生态基础信息提供了技术途径。

从 1999 年实施中国科学院知识创新工程以来, IAP 的大气遥感技术与设备系统获得了很大发展。2004 年, 在国家自然科学基金重大国际合作项目的资助下, IAP 与美国马里兰大学合作, 依托中国科学院香河大气综合观测实验站建立了一个非常先进的气溶胶和辐射观测系统。观测系统由自动太阳光度计、太阳短波和天空红外辐射仪器、全天空成像仪、激光雷达、多波段遮挡太阳辐射计等组成, 观测项目包括太阳光谱直接和散射辐射、紫外、可见光和太阳宽带辐射、红外辐射、天气状况等。自该站建立以来, 一直连续稳定运行, 积累了 3 年以上高质量的气溶胶、云和辐射观测数据。香河站于 2004 年 10 月加入世界气溶胶自动监测网络 (AERONET), 于 2006 年加入世界地面基准辐射观测网络 (BSRN), 成为亚洲内陆地区首个也是唯一的 BSRN 站。2005 年 8 月和 2006 年 7 月, 分别建立了太湖和西藏纳木错气溶胶辐射观测系统并加入 AERONET^[7, 8]。另外, 依托中国科学院生态研究网络, IAP 建立了首个覆盖中国的中国手动太阳光度计监测网 (CSHNET)。此网络统一采用手动太阳光度计, 按照统一的观测规范, 采用 Bouguer-Langey 标定方法和与 CIMEL 自动太阳光度计比

对两种方式标定光度计。每日选取装载 MODIS (中分辨率成像光谱仪) 的 Terra 和 Aqua 卫星过境时段 (10:00~14:00) 观测 405 nm、500 nm 和 650 nm 三个波段的太阳直接辐射, 并同时记录天气状况。与 CIMEL 自动太阳光度计气溶胶光学厚度 (AOD; Aerosol Optical Depth) 对比表明, 手动光度计观测 AOD 误差小于 6%, 两年内手动太阳光度计灵敏度衰减小于 2%。目前, 这三个气溶胶和辐射重点观测站和中国手动太阳光度计监测网仍处于良好运行状态, 已经并继续提供覆盖全国的高质量气溶胶-云-辐射观测数据, 在中国气溶胶特性时空分布及其辐射强迫、卫星中分辨率成像光谱仪的气溶胶特性产品的验证方面产出了一批科研成果。IAP 还与法国里尔科技大学大气光学实验室合作, 在 IAP 实验楼顶和中国科学院兴隆站设置了自动跟踪太阳光度计, 并加入了全球 AERONET 观测网, 对外共享观测数据^[8]。

在“十五”期间, IAP 发展了具有自主知识产权的地基全天空成像仪。该成像仪具有广泛的应用价值, 能够在很大程度上替代现在气象台站观测员的部分工作, 获得更客观、可靠性更高、可回放的观测数据, 因此, 在全国许多气象部门获得了推广应用。针对该地基全天空成像仪, 研究人员发展了系统的标定方法, 解决了确定仪器的绝对辐射标定、相对辐射标定、均匀性、线性性、以及余弦特性的问题, 发展了确定云量的计算方法, 同时正在开展反演气溶胶和云特性参数的深入研究。一套可见光全天空成像观测仪安置在 IAP 实验楼顶, 长期进行天空状况监测, 积累了大量资料, 为发展反演大气气溶胶和云特性参数的方法提供了数据基础^[9~12]。IAP 在 2005 年研制成功的先进地基扫描式全天空红外亮温仪^[12], 可用来获取天空的热红外分布图像。第一批实验全天空红外亮温仪被安置在 IAP 实验楼顶和中国科学院香河大气综合观测试验站, 开展长时间的观测研究, 观测数据被用于发展反演云底高度的算法, 取得了较好的效果。2006 年, 一台全天空红外亮温仪被安置在西藏羊八井观测站里, 开展高原大气云特性的长期观测研究。

卫星大气遥感是大气遥感的重要组成部分, 具有非常广泛的用途, 涉及气候变化研究、大气环境监测、地表生态状况调查、天气预报等领域。IAP

在中国科学院知识创新工程二期项目的资助下, 在 2004 年建立了一个以 MODIS(中分辨率成像光谱仪)资料研发平台设备为主要内容的卫星遥感资料应用分析实验室, 拥有美国 Terra 和 Aqua 卫星 MODIS 数据以及日本 MTSAT、我国 FY-1D 和 FY-2C 等多种卫星资料的接收装置, 每天接收超过 20 GB 的观测数据。Terra 和 Aqua 卫星分别于上午 10:30 和下午 01:30 过顶。MODIS 仪器是目前非常先进的卫星观测仪器, 设置了 36 个紫外/可见光/红外光谱波段, 空间分辨率达到 250~1000 m, 基本上实现了每日全球覆盖, 在气候与环境研究领域中的大气气溶胶、水循环、地表生态监测、云和辐射观测中发挥了重要作用。该研究平台的建立, 为 IAP 开展大气气溶胶研究和空气污染监测发挥了重要作用^[13~17]。

3 大气气溶胶特性遥感研究

中国地区是全球气溶胶浓度高值区之一, 对区域气候和环境产生了重大影响, 气溶胶的探测对研究气溶胶的环境与气候效应是至关重要的。如上节所述, 近几年来, IAP 地基气溶胶特性遥感监测网络建设有了很大发展。基于这些地基遥感监测资料, 结合卫星遥感气溶胶和辐射收支数据, IAP 科技工作者在气溶胶光学特性地基和卫星遥感反演算法和资料分析、气溶胶辐射强迫遥感研究等领域开展了卓有成效的研究。

3.1 气溶胶地基遥感研究

近年来, IAP 的气溶胶地基遥感研究主要聚焦于 AOD、单次散射反照率 (SSA; Single Scattering Albedo) 和消光系数垂直分布 3 个关键的参数, 特别是前两者。

基于 2001 年春季我国北方 4 个 AERONET 站气溶胶特性资料和 8 个气象辐射台站宽带辐射资料反演获得的 AOD 资料, Xia 等^[18]揭示了我国北方地区气溶胶时空分布特征以及沙尘活动对我国北方地区气溶胶特性的影响。沙尘活动不仅使下游地区气溶胶浓度显著上升, 同时由于人为气溶胶和沙尘气溶胶的吸收特性差别很大, 沙尘活动导致下游地区气溶胶的吸收能力下降。人为污染期间, 北京地区 SSA 约 0.90, 且随波长变化不大, 而沙尘期间该值从 0.92 (440 nm) 上升到 0.97 (1020 nm)。观测表明, 北京(城市)和香河(郊区)两站 AOD 和

Ångström 指数无论是人为污染还是沙尘活动期间均十分接近, 这说明我国北方地区气溶胶污染已呈现出区域污染的特点。

基于 2004 年 8 月至 2005 年 9 月 CSHNET 观测资料, Xin 等^[19]分析了中国地区 AOD 和 Ångström 指数时空分布特征, 东部地区年平均 500 nm 波长 AOD 达到 0.50, 而且城市和农村地区差别很小, 区域污染特征十分明显, 青藏高原地区 AOD 约 0.15。

宗雪梅等^[20, 21]在宽带消光法反演 AOD 的应用中, 以月平均 AOD 作为约束条件, 发展了一个云影响甄别算法, 并应用这一方法提取了中国地区 16 个气象台站 1993~2002 年 AOD 值, 表明该时段部分站点 AOD 明显上升, 如沈阳和郑州, 而部分站点有明显下降趋势, 如兰州和北京。

宋磊和吕达仁^[22]分析了上海地区大气气溶胶光学特性, 揭示该地区 AOD 夏季最大, 春季次之, 冬季最小的季节变化特征。

基于北京地区近 5 年太阳光度计和空气污染指数资料, Xia 等^[23, 24]分析了北京气溶胶光学特性气候特征, 结果表明北京地区年平均 AOD (500 nm)、气溶胶单次散射反照率和不对称因子 (440 nm) 分别为 0.75、0.88 和 0.71, 气溶胶光学特性季节变化明显, 春夏高, 秋冬相对较低。春季受沙尘活动影响, AOD 高, Ångström 指数偏小, SSA 偏高; 夏季水汽充沛, 气溶胶吸湿增长, 散射效率增加, SSA 偏高。后向轨迹聚类分析表明, 除春季沙尘活动之外, 气团移动缓慢往往对应高 AOD, 且水汽和气溶胶单次散射反照率偏高, 这说明稳定天气条件不利于污染物扩散, 且气溶胶吸湿增长、散射效率增强是导致北京地区高 AOD 的主要原因^[25]。结合北京地区 1980 年代和 2000 年代太阳光度计 AOD 观测资料, 表明北京地区 AOD 显著增加, 从 1980 年代的 0.32 增加到 2000 年代的 0.60。太湖地区气溶胶年平均光学厚度 (500 nm) 约 0.77, 年平均 SSA 和不对称因子 (440 nm) 分别为 0.90 和 0.72。Xia 等^[25]太湖地区气溶胶光学特性遥感资料, 结果表明: AOD、SSA 和不对称因子夏季都高于冬季, 但季节变化幅度显著小于华北地区; AOD、SSA 和不对称因子均与大气相对湿度显著正相关, 表明气溶胶吸湿增长是影响该地区气溶胶光学特性的重要因子。

Qiu 等^[26]应用反演 SSA 宽带漫辐射法,从气象站的太阳辐射观测资料获取了我国北方 6 个地方 1993~2001 年气溶胶折射指数虚部和 $1\ \mu\text{m}$ 波长 SSA,结果表明年平均气溶胶折射指数虚部有增加趋势,相应 SSA 有下降趋势。Qiu 和 Yang^[27]进一步发展了反演 SSA 宽带漫辐射法,并应用这一方法从我国 11 个气象台站 1998~2003 年间辐射资料反演得到了折射率虚部和 SSA。反演结果表明:年平均折射率虚部在 0.0054 (武汉)至 0.0203 (兰州)之间变化,对应的 SSA 在 0.941 至 0.849 之间变化,11 个地方总平均的 SSA 值为 0.9;多数地方冬季 SSA 较低;SSA 与 AOD 存在正相关;SSA 与地面相对湿度通常存在正相关,但在我国西北格尔木、乌鲁木齐、喀什等几个地方,反而存在负相关。Qiu 等^[28]还应用 AOD 与能见度资料获取我国 11 个地方对流层气溶胶标高与年、季平均消光系数分布,发现 1994~2001 年间标高有增大趋势、气溶胶粒子有抬升趋势,年平均的标高在 1.3 km (沈阳)至 2.67 km (武汉)之间变化,11 个地方总平均的标高从 2004 年的 1.88 km 至 2004 年的 2.11 km 之间变化。

3.2 气溶胶卫星遥感研究

陆地上空 AOD 遥感反演方法及其应用是近年来大气遥感领域的一个前沿研究课题,对环境与气候变化研究、卫星对地遥感的大气订正都有重要意义。范学花等^[29, 30]从偏振信息独有的优势和潜力出发,以新一代多光谱、多角度偏振探测卫星 PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar) 资料为基础,结合地面 AERONET 观测资料,研究了北京地区对流层气溶胶的光学特性,并验证卫星遥感结果,获得了以下结论:(1) 2 种典型天气条件(细粒子污染和沙尘暴)下,PARASOL 卫星观测的总反射率和偏振反射率、地表偏振反射率等信息与模式计算值比较吻合,沙尘暴事件时卫星观测的大气顶偏振反射率要比细粒子污染时小很多;(2) PARASOL 气溶胶业务产品可以很好地表征气溶胶粒径小于 $0.3\ \mu\text{m}$ 的细粒子气溶胶贡献;(3) 利用 PARASOL 多角度偏振辐射资料反演了几个典型天气条件下(晴空、轻霾、沙尘暴和重污染)北京和香河 AOD、Ångström 指数和有效半径,并与 PARASOL 业务

反演产品进行了对比相比,反演结果更接近于地基 AERONET/PHOTONS 的结果。

利用地表太阳光度计观测资料,Xia 等^[31, 32]开展了东亚地区乃至全球气溶胶卫星遥感产品——MODISAOD (MODIS/AOD) 的验证工作。研究结果表明就东亚地区而言,由于地表类型复杂,气溶胶特性时空变化很大,而地面气溶胶观测资料相对欧美地区而言比较匮乏,MODIS 气溶胶反演算法中对东亚地区气溶胶特性的设置有待改进,这些原因导致东亚地区 MODIS/AOD 反演精度要低于欧美地区^[31];全球陆地上空 MODIS 气溶胶版本 4 产品除非洲和东南亚少数 AERONET 站点 MODIS/AOD 偏低之外,其他站点 MODIS 均显著高估了 AOD,平均而言,蓝光和红光波段 MODIS/AOD 分别比 AERONET 光学厚度高 0.041 和 0.090。研究表明红光波段 MODIS/AOD 偏高与地表反射率显著相关,表明 MODIS 气溶胶算法中红光波段地表反射率估算偏低是导致这一结果的主要原因^[32];基于我国香河和太湖 AERONET 资料,对比研究结果表明 MODIS 气溶胶版本 5 算法中由于红外与可见光地表反射率比率不再固定,而是依赖于地表植被指数和散射角,MODIS 新版本 AOD 反演精度有显著改进^[33],MODIS AOD 与 AERONET 产品线性拟合斜率和截距分别为 1.03 和 0.02。利用 25 个分布在全国各地的 CSHNET 手动太阳辐射计资料对比分析 MODIS 版本 4 和版本 5 AOD 产品,证实 MODIS 版本 5 无论是系统误差还是随机误差都显著降低^[8],和 MODIS 版本 4 产品相比,版本 5 资料与 CSHNET 产品线性拟合相关系数从 0.66 上升到 0.84,拟合斜率从 0.74 上升到 0.98,而截距从 0.179 下降到 0.047。但由于我国气溶胶特性变化很大,因此在卫星遥感算法中充分描述这一特点仍然值得进一步探索,也需要更多地面观测资料支持。

王莉莉等^[34]对比结果表明中国地区因地表和氣溶胶特性空间变化很大,导致 MODIS 气溶胶反演精度在不同地区有很大差别,中国北部干旱和半干旱仪器青藏高原地区 MODIS 气溶胶光学厚度仅有 15%~54%落在预期误差范围内,而在中南部农业地区该比例达到 72%。我国渤海和黄海近海岸水域为二类水体,反射率显著高于深海。董海鹰等^[35]研究表明:由于 MODIS 气溶胶算法中没有考

虑这一差别,可导致 MODIS 的 AOD 反演值偏高。

3.3 气溶胶辐射强迫遥感研究

区分气溶胶和云辐射强迫的关键步骤是识别天气状况(云天、晴天清洁或污染),这对于中国来说是一个具有挑战性的问题,因为当气溶胶含量很大时,很难同云区分开来。基于地面高时间分辨率太阳辐射观测资料,发展了多个识别天气状况的方法,该方法综合应用直接/散射短波辐射测量,短波辐射通量的时间导数,利用云天和晴空天气太阳辐射时空变化特征的显著差异区分天气状况,该方法已成功运用于我国东北辽中、华北香河和华东太湖三站^[8, 36]。基于三站点气溶胶和太阳辐射观测资料,开发了气溶胶直接辐射效应评估参数化方法,该方法首先利用辐射传输模式将晴空条件下辐射观测资料进行水汽订正,然后利用 AOD 和太阳天顶角参数化订正后地表太阳辐射。利用该参数化方法分析了三地区气溶胶对地表和大气顶辐射收支的影响,以及气溶胶对地表太阳直接和散射辐射分配的影响^[37]。结果表明高气溶胶浓度不仅导致地表和大气顶太阳辐射收支显著变化,也显著改变了地表太阳直接和散射辐射分配。东北辽中地区春季单位 AOD 导致瞬时地表太阳直接辐射下降达 404 W/m^2 ,其中 63.8% 的能量转换为太阳散射辐射到达地表,气溶胶导致地表净太阳能量收支下降超过 30 W/m^2 ^[36]。华北香河地区气溶胶导致地表年平均太阳净辐射下降 32.8 W/m^2 ,该值接近云直接辐射效应 (41 W/m^2)^[8],其中光合有效辐射 (400 ~ 700 nm) 下降 16.6 W/m^2 ,气溶胶导致年平均散射辐射增加 37.4 W/m^2 。长江三角洲地区气溶胶导致地表太阳净辐射下降 38.4 W/m^2 ,其中光合有效辐射下降 17.8 W/m^2 ,气溶胶导致地表年平均散射辐射增加 67.1 W/m^2 ^[36]。气溶胶对气候系统的总效应是冷却作用,气溶胶导致大气顶太阳净辐射增加,但增加量值仅占地表太阳净辐射下降的 $1/5 \sim 1/10$,二者差额被大气吸收,表明低层大气被气溶胶强烈加热,从而可能影响大气稳定性和降水。利用地基和卫星气溶胶和辐射资料,柳晶等^[38]分析了 2004 年秋季华北地区一次人为污染过程气溶胶光学特性及辐射强迫,大气稳定和氣溶胶吸湿增长导致 AOD 从 0.1 上升到 3.0 以上,瞬时大气顶和地表辐射强迫分别达到 50 W/m^2 和 350 W/m^2 ,气溶胶导致大气吸收太阳辐射 300 W/m^2 。基于北京

地区太阳光度计气溶胶光学特性反演资料以及辐射传输模式,车惠正等^[39]计算了气溶胶直接辐射强迫并分析了季节变化特征。

4 云特性遥感研究

云是影响地气系统辐射平衡的重要因子,也是气候系统中气候变化反馈机制最不确定的因子之一,云的参数化问题目前依然是天气和气候模式研究中的重点和难点,仍然有赖于大量云物理和辐射特性资料的积累。地基和卫星遥感观测是获取全球与区域云物理和辐射特性的重要手段。如参考文献^[6]所述,IAP 自主研制和开发了全天空可见光成像系统,该系统的成功开发和应用为云特性的观测提供了一个新平台和方法。基于该系统探测的全天空云图像资料并结合模式运算,霍娟等建立了一个优化云识别算法^[9],进行云的移动轨迹成像模拟及云量变化分析^[10],并利用全天空数字图像分析北京上空云况分布特征^[11]。主要研究结果与结论包括:(1)不同能见度和不同云型分布条件下蓝红 (450 nm, 650 nm) 波段辐亮度比值的模拟计算结果表明:云识别辐射比的最优阈值蓝红比为 1.30,近地平天空云识别误差较大,能见度小于 2 km 时,阈值法不适用于云识别;(2)相同太阳高度角情况下,无云及有云大气中蓝红比值随能见度的下降呈单调下降趋势,在特定的云光学厚度和能见度情况下,天空色度彼此呈现出类似的分布状况,全天空图像阈值判断云识别自适应算法的建立需要与太阳高度角、地面能见度联系起来;(3)基于近两年北京全天空数字图像资料的分析结果表明:北京无云 (云量 < 1) 与全天空有云天气 (云量 > 9) 情况各占总量的 36% 和 46%,两年中北京上空多以晴好天气 (包含薄卷云) 和阴天为主,西北天空云的分布略多,头顶上空云的出现概率较其它位置低,且概率有随天顶角变大而增大的趋势。

全天空成像仪工作在可见光波段,仅适合于白天观测,为此,IAP 开发了工作在红外波段的红外云天仪^[6, 12],并依据云顶亮温与地表温度、地表水汽压和云底高度之间的非线性关系,从红外云天仪观测的天空亮温提取天空云量和云底高度两个重要云宏观物理参数。2005 年春季,章文星等^[12]对比了红外云天仪观测的云底高度与微脉冲激光雷达 (MPL) 观测值,结果表明两者有很好的-致性,

相关系数达 0.93, 但红外云天仪反演的云底高度系统偏高于 MPL 观测, 主要原因包括视场角差异、红外云天仪反演算法中云黑体发射近似以及气溶胶影响。

云的光学厚度与有效粒子半径是云光学属性参数化方案中的重要参数, 空基及地基反演是目前获得这两个参数的主要手段, 但对现行反演方法的验证及完善依然需要开展大量工作。王越等^[40]系统分析了云非均匀性对云光学厚度和有效粒子半径卫星遥感反演的影响, 主要结论包括: (1) 云非均匀性会造成双向反射率异常, 光学厚度与有效粒子半径存在负相关关系, 高估或低估现象成“簇”出现; (2) 提出了以光学厚度为权重来确定云场的“真实”有效粒子半径的方法, 确定三维云场各格点真实有效粒子半径及对云场进行尺度平均的方法; (3) 系统的数值模拟分析表明尺度平均对反演结果整体高估或低估趋势没有影响, 高估或低估现象成“簇”出现, 表明即使在较低水平分辨率情况下, 云非均匀性也将使反演值系统偏离实际值, 因此, 为了获取更为准确的卫星反演的云产品, 对于现有的卫星反演云参数的算法, 包括 MODIS 算法, 必须订正云的三维非均匀性影响。

丁守国等^[41]利用国际卫星云气候计划 (ISCCP) D2 版云气候资料集, 分析了总云量及高、中、低云在全球的分布特征及近 20 年间全球不同云类云量的变化趋势, 结果表明全球平均总云量有下降趋势, 但 1987 年以前总云量略有增加, 此后转为下降, 减少量约占全球平均云量的 4%。低云和高云量均呈减少态势, 而中云量稍有增加。不同云量变化趋势具有显著的区域性, 初步分析指出, 在全球增温气候背景下, 云量的变化对当前气候可能是一个正反馈过程, 即近年来云量的减少可能促使全球气候更加趋于变暖。

王旻燕等^[42]通过比较研究 2000 年地面观测总云量和国际卫星云气候计划 ISCCP 总云量, 分析了东亚地区总云量的空间分布特征及季节变化特征, 并讨论地面与卫星观测获取云量两套数据集因观测方式不同使东亚不同地区出现云量偏差及偏差产生原因, 以及两种观测方式的特点。建立了一个基于云的光谱属性物理基础和图像模式识别方法提取强对流云的方法, 研究了 1996~2002 年东亚地区强对流云云顶温度和发生频率的空间分布及其季

节变化规律。结合分析 2000~2004 年对流层顶温度、对流层顶气压的季节变化, 定量揭示了强对流云的发展受对流层顶的制约作用。

5 大气微量气体的遥感研究

大气微量气体成分对于气候和生态环境系统来说是极其重要的。世界正在经历全球工业化进程, 规模工业和现代交通消耗大量的化石燃料, 向大气排放大量的废气, 如 CFCs、NO₂、SO₂、VOCs 等, 这些物质或直接或作为污染物质的前体物间接地严重污染了大气环境, 同时影响了气候。最早受到强烈关注的是称为生命保护伞的大气臭氧层, 自从 1985 年英国 Farman 发现南极臭氧洞以来, 大气臭氧的变化就成为一个科学研究热点^[43~45]。科学家为了保护地球人类赖以生存的大气臭氧层, 从探索臭氧层变薄的原因到如何防止大气臭氧层进一步变薄付出了巨大努力。对流层大气微量气体如 O₃、NO₂、SO₂、VOCs 是造成大气环境污染的重要成分, 形成的光化污染造成严重的视线障碍, 同时严重地影响了人们的身体健康。近年来, 随着中国经济的高速发展, 大气环境污染问题日益突出, 从气候和环境两个方面, 对大气微量气体的监测都受到很大的重视。

对大气微量气体的监测主要有两类方法, 一类是先采样后进行化学或光学分析的方法, 如目前各大气环境监测站采用的 O₃、NO₂ 和 SO₂ 气体分析仪; 一类是测量光信号传输过程中的吸收光谱通过特征分析获得大气微量气体的含量, 其中差分吸收光谱分析方法是一种普遍采用的方法。气体分析仪适合监测仪器附近通常是近地面大气微量气体的浓度, 而差分吸收光谱方法可广泛用于测量近地面一段路径的污染物平均浓度或大气路径总量。

早在 20 世纪 70、80 年代, IAP 就开展了利用差分吸收技术反演大气微量气体浓度的研究, 并研制了多种相关设备, 包括开放路径 DOAS 系统, 以 He-Ne、CO 和 CO₂ 可调谐红外激光器为工作光源的测量大气微量气体成分的实验 DOAS 系统, 以及以钨灯和氙灯为紫外光源的开放路径 DOAS 系统。这些设备被用来监测北京近地面大气微量气体如 CO、NO_x、O₃、CH₄、C₂H₂ 等。从 2006 年起, 受北京市 2008 奥运空气质量保障任务牵引, IAP 再次加强了 DOAS 技术在大气微量气体特别是大气

污染气体的监测研究。IAP 与俄罗斯 Obninsk 光电技术研究所和天津大学三博公司合作研制了两台 DOAS-M1 系统, 该系统采用氙灯作为光源, 可检测到 190~540 nm 从几百米距离折返的大气吸收光谱, 光谱分辨率可以达到 0.34 nm, 具有检测 NO₂、SO₂、O₃ 等几十种大气微量气体的能力。IAP 大气与环境遥感研究组把两台 DOAS-M1 系统分别安置在 IAP 主楼和香河大气综合观测试验站内, 对主要大气污染气体浓度进行长时间的连续监测, 获得了对华北地区污染气体变化规律的认识。还特别在 2007 年 8 月 17~20 日北京市机动车单双号交通管制期间参与了机动车限行削减污染排放效果评估监测试验, 取得了 NO₂ 减少、O₃ 反而有所增加的重要观测结果。

自从 1992 年以来, IAP 还同俄罗斯科学院大气物理所进行了长期合作, 利用高分辨率太阳分光光谱仪开展了对北京地区上空 CO、CH₄ 和 N₂O 等大气微量气体柱总含量的实时监测, 获得了北京地区上空 CO、CH₄ 和 N₂O 等气体柱总量的变化特征和近 10 年来的变化趋势^[46]。我们采用大型古典式红外光栅光谱仪, 跟踪采集太阳直射红外光谱, 通过分析吸收光谱计算 CO、CH₄ 等气柱含量。太阳红外光谱仪的观测波段范围为 2.7~5.3 μm, 探测器采用半导体制冷的 PbSe, 观测采用的光谱分辨率在 3.3~4.7 μm 范围内是 0.23~0.30 cm⁻¹, 观测时每 0.2 秒记录一次太阳辐射值, 得到有效测量范围内的一条太阳光谱约需 7 分钟。

目前, IAP 正在与比利时高空大气所合作研制 MaxDOAS 系统, 准备部署在华北地区香河站或者兴隆站, 开展大气 NO₂、SO₂ 等污染气体柱总量的观测, 以获得关于华北地区 NO₂ 变化规律的认识, 对卫星遥感的 NO₂ 等产品进行有效性验证。IAP 也同时在与美国威斯康星大学合作, 开发利用傅里叶变换红外光谱仪遥感大气微量气体(如 CO₂、CH₄ 等)的相关技术, 为我国开展卫星遥感大气成分的研究打下重要基础, 为追赶发达国家的先进遥感水平做出重要贡献。紫外 DOAS 技术与红外 DOAS 技术加一起, 将大大促进大气微量气体的全面发展。

在大气臭氧遥感研究方面, 杨景梅等^[47]利用北京地区 1990~2002 年 Dobson 仪器逆转观测资料, 反演计算出臭氧垂直分布, 结合 Dobson 仪器

臭氧总量资料, 分析了 1990~2002 年北京地区臭氧垂直分布特征和变化情况。结果表明, 在 1992 年秋季和 1993 年春季, 季节平均臭氧含量在 2~4 层, 即 10.3~23.5 km 范围内有较大幅度降低, 同时月平均臭氧总量比常年明显偏低; 1990 年到 2002 年期间, 臭氧总量的变化呈现出缓慢下降趋势, 但不同高度臭氧含量的变化趋势有所不同。

6 遥感反演方法研究

几十年来, 遥感反演方法研究一直是大气遥感定量化发展的重要一环。近年来, IAP 学者在大气气溶胶和云的光学特性、大气微量气体浓度垂直分布等遥感反演方法研究方面取得一些重要研究成果。下面予以介绍。

SSA 是评估气溶胶辐射强迫的关键影响因子之一。几十年来, 国内外许多学者致力于发展 SSA 的反演方法, 其中的一类方法是利用地基探测的窄带或宽带太阳漫射信息反演 SSA。现在有大量的太阳总辐射观测资料, 可从这些资料提取 SSA 信息的有效反演方法是有重要应用价值的。基于太阳总辐射信息对气溶胶光学特性的敏感性分析, 邱金桓^[48]最近发展了一个从窄带或宽带太阳总辐射反演气溶胶折射率虚部和 SSA 的方法, 通过数值模拟分析了辐射误差、AOD 和谱分布误差、水汽含量误差和和平面大气假设所引起的 SSA 反演误差, 并把从北京气象台站总辐射资料反演的 SSA 与 AERONET 北京站的 SSA 产品进行比较。对 4 个 AERONET 波长, 应用本方法的 SSA 平均值对 AERONET 结果的最大偏差为 0.032; 均方根偏差都在 0.052 以内。两者有较好的吻合。邱金桓^[49]还引入了辐射加权平均的宽带气溶胶一次散射反照率(SSA)和 Ångström 指数的定义, 发展了一个从宽带的漫射信息反演该 SSA 的方法, 并通过模拟反演分析了 SSA 反演的主要误差因子。

陆地上空标量辐射对地表反射率和大气气溶胶散射都具有很强的敏感性, 而偏振反射只对大气气溶胶敏感, 对地表不敏感。根据这个原理并结合 POLDER 资料的特点, 段民征和吕达仁^[50, 51]提出综合利用标量辐射和偏振反射信息来实现陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演。首先利用多角度偏振辐射观测提取大气气溶胶光学参数, 再利用标量辐射测量对偏振反演结果进行作进一步筛选

和订正,同时获得地表反射率。数值模拟试验结果证明,仅利用偏振信息只能获取大气气溶胶信息,反演误差也较大,特别是对于散射作用较强的短波长通道,但经过标量辐射订正后的结果得到明显改善,AOD和地表反射率与真实值之间相关系数都达到0.99以上。

宗雪梅^[52]提出了联合反演AOD与地表反射率的一个方法。这一方法应用一个气溶胶标准高度模式和地面能见度资料,估计AOD,从中挑选AOD相对较小的样本确定地表反射率,再应用该反射率反演AOD。

国内外通常采用太阳入射方向的太阳直接辐射反演AOD。但我国只有少量气象台站有这类探测资料,大多数资料为日累积的水平面太阳直接辐射。许潇锋等^[53]发展了一个利用水平面太阳直接辐射日曝辐量反演大气AOD的方法,建立一个“等效”的瞬时太阳天顶角模型,并提出了一个基于气溶胶标高的云影响甄别方法。对该光学厚度反演方法的数值模拟和误差分析表明:“等效”瞬时太阳天顶角模型的不稳定性引起的光学厚度反演误差平均为3.66%;光学厚度日变化对一段较长时间的平均光学厚度的影响不显著;订正造成的散射辐射误差 $\leq 20\%$ 时,光学厚度平均偏差 $\leq 4\%$ 。

云的光学厚度与有效粒子半径是2个重要的云光学特性参数,空基及地基反演是目前获得这两个参数的主要手段。王越等^[54]提出了一种利用地基观测的太阳透射光信息反演云光学厚度及有效粒子半径的方法。数值模拟反演表明:当水云光学厚度大于1、有效粒子半径大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,利用 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 的太阳透射辐射信息可同时反演云的光学厚度及有效粒子半径;随着云光学厚度的增大,光学厚度和有效半径的反演误差均单调减小;结合 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.65\text{ }\mu\text{m}$ 的太阳透射值也可以反演水云的光学厚度和有效粒子半径。王越等^[55]还对积云场与层积云场计算了 $0.67\text{ }\mu\text{m}$ 及 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 的天底方向的双向反射率,探讨了云的非均匀性对双向反射率(BRDF)的影响。研究结果表明:随着太阳天顶角的增大,积云场有约6%格点的 $0.67\text{ }\mu\text{m}$ 的BRDF值出现 >1 的异常值;BRDF值异常聚集出现于云顶的局地低谷;云的非均匀性有可能造成卫星的观测值出现与平面平行辐射传输理论不相符的状况,提示高分辨率的卫星资料的像素点的辐射值

可能会因云非均匀性的影响而被增强,对应用其反演的产品要有清醒的认识,中高纬度地区的优势太阳天顶角均较大,云非均匀性对于这些区域的反演结果的影响更大。

我国有90多个气象观测站,40多年来进行太阳总辐射的常规观测。为了应用这些宝贵的辐射资料,邱金桓^[56]近年来致力于发展云光学厚度的太阳总辐射反演方法及其应用。当云光学厚度较大时,太阳总辐射主要依赖于云光学厚度的变化。基于该特性,邱金桓^[56]提出了一个应用太阳总辐射和地面能见度资料反演云光学厚度的方法,分析了影响云光学厚度反演精度的主要误差因子、指出AOD与SSA对反演结果的重要影响,提出一个应用能见度资料确定云天AOD的方法、并把应用这一方法的云光学厚度反演结果与ISCCP和MODIS云光学厚度产品进行比较。成都2001年应用本方法的年平均光学厚度为20.56,对应的ISCCP和MODIS光学厚度为19.01和19.55,偏差在1.55以内。邱金桓^[57]还应用这一方法研究了北京、郑州两地云光学厚度在1960~2000年间变化特征,结果表明北京云光学厚度呈增加趋势、郑州呈下降趋势。

地球紫外临边散射辐射大气探测技术,具有高空覆盖率高和高垂直分辨率等优点,逐渐成为中层大气遥感的重要手段。在该技术应用中,发展反演中层大气密度、臭氧等垂直分布的先进方法,对动态监测与理解中高层大气过程及控制因子等方面都是很重要的。为此,郭霞和吕达仁^[58,59]多年来致力于研究基于紫外临边技术的反演方法,建立了从多波长地球紫外临边散射辐射信息综合反演中层大气密度(温度/压力)和臭氧垂直分布的一个新算法。在该算法中,大气密度的反演高度为22~90 km,反演精度为1%~2%,臭氧的反演高度比相应的单参数臭氧反演结果有较大拓展,为20~90 km(后者的反演高度为20~70 km),反演精度为3%~5%。

全球卫星定位系统(GPS)掩星遥感技术是一种探测全球大气与海洋参数的新手段、新途径,具有全天候、高垂直分辨率等优点。它利用地基、机载或LEO卫星上搭载的接收机,接收穿过大气的掩星信号及来自海面的反射信号反演大气温度、压力、湿度等廓线,无论对大气物理、海洋学、全球

气候变化等研究还是对数值天气预报、海上交通、海洋开发等实际应用,都是极为重要的。王鑫等^[60~63]瞄准国际研究前沿,在发展这类遥感的反演方法与应用方面取得重要进展,主要有如下几个方面:

(1) 发展了一个从无线电掩星探测数据提取对流层水汽压廓线的一维非线性反演方法。该方法先定义了一个一维目标函数,以几何光学假设为前提,反演出电波弯曲角,并将电波弯曲角作为掩星探测量、大气模式输出的温、湿参量作为初始场,代入目标函数,再对目标函数求最优反演出水汽压廓线。反演结果表明:采用非线性方法反演水汽压对初始场的精度依赖较小,能够同时反演出大气温度、水汽压廓线及相应的误差分布。

(2) 研究了 GPS 掩星技术中菲涅耳及几何光学方法的反演原理,利用 GPS/MET 数据反演得到了大气折射率及温度廓线。对比分析了菲涅耳衍射方法在 10 Hz、25 Hz 和 50 Hz 三个采样频率下不同的反演结果,通过与几何光学反演结果及相应探空数据的对比分析,表明菲涅耳衍射反演得到的结果在对流层,特别是水汽含量丰富的区域中更为准确可靠。

(3) 基于电波弯曲角对水汽的高度敏感性,发展了一个基于人工神经网络反演对流层水汽分布的方法。应用 CHAMP 掩星数据的反演结果表明:人工神经网络方法可以在降低温度初始场依赖的条件下,较为准确地反演出对流层中的水汽廓线。

(4) 应用 GPS 无线电掩星数据研究青藏高原上空对流层顶变化,验证高原地区掩星温度廓线的准确性,分析了 ($25^{\circ}\text{W}\sim 40^{\circ}\text{W}$, $75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 青藏高原及 ($25^{\circ}\text{W}\sim 40^{\circ}\text{W}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 对比区域,对流层顶高度及温度随时间及空间的变化。

7 大气辐射传输算法

辐射传输方程是描述电磁波在介质中传播的基本方程,从形式上看只是一个简单的数学离散化求解问题,事实上远没有那么简单,这是因为辐射传输研究的对象为具有半边界条件的物理问题,为非线性的微分积分方程,除简单的二流或四流近似外还无法找到其分析解,只能用数值方法来逼近求得近似解。随着计算机技术的发展,各种数值离散求解方法也不断涌现出来并得到完善和发展。IAP 的

一些学者瞄准国际研究前沿,长期致力于发展遥感和气候动力模式适用的辐射传输参数化模式和高精度辐射传输快速计算方案^[2]。近年来,Min 等^[64]、段民征等^[65~68]和 Guo 等^[69]进一步发展了一些适用于遥感应用的先进辐射传输数值算法,并应用于 POLDER 资料的的对地遥感等应用^[30, 50, 51]。

基于逐次散射法,Min 和 Duan^[64]建立了全矢量的大气辐射传输模式核心算法,该算法采用散射相矩阵的傅立叶分析展开方法和多个相似关系式,大大提高了计算速度。基于此算法,段民征等提出了适用于超高光谱分辨率遥感探测技术的半分析式快速模拟方法^[65],该算法可用少量计算实现较高精度的海量光谱计算,并成功应用于氧气 A 带超高光谱分辨率大气遥感原理^[66]。针对大粒子气溶胶和云(包括卷云)的强前向散射特性,段民征和吕达仁提出相应的全矢量 δ -M 变换方法^[67],并对目前所常用的快速算法进行比较分析^[68]。郭霞和吕达仁^[69]基于单次散射近似提出适用于掩星和临边探测方式的紫外临边辐射传输模式,应用于 O_3 廓线的模拟分析及遥感反演计算。

8 结束语

在本文中,我们力求比较全面地介绍 IAP 近年来在大气遥感研究方面主要进展。从这些介绍可以看出,基于大气科学研究和国民经济与国防发展需求,2003 年以来 IAP 不仅在大气遥感技术发展还是在大气遥感实验、应用与反演方法研究方面,都取得一些重要的研究成果。

尽管大气遥感已取得很大发展与成果,但仍然存在一些重要问题有待研究和突破。这些问题包括:(1)一些重要大气参数垂直分布的遥感新原理、技术与反演方法;(2)卫星遥感云和气溶胶光学特性(如光学厚度、单次散射反照率与谱分布)的定量化;(3)从星载激光雷达探测的激光大气回波信号反演大气气溶胶与云消光系数垂直分布等特性的方法;(4)不同大气遥感产品的整合、同化与应用;(5)地基网络探测与卫星遥感相结合,研究我国云和气溶胶光学特性的时空分布;(6)基于非球形粒子散射、地基和卫星遥感云和气溶胶光学特性的反演方法;(7)高精度、高空间(特别是水平)分辨率、全天候的 GPS 大气遥感原理与反演方法。继往开来,IAP 一定能够在研究这些问题上,有所创

新与突破,在大气遥感研究方面取得更大的发展。

参考文献 (References)

- [1] 吕达仁,王普才,邱金桓,等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 2003, **27** (4): 552~565
Lü Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhuan, et al. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27** (4): 552~565
- [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** (4): 628~653
Qiu Jinhuan, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. Modern research progresses in atmospheric physics. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27** (4): 628~653
- [3] Qiu Jinhuan, Chen Hongbin. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 475~484
- [4] 邱金桓,陈洪滨,王普才,等. 大气遥感研究展望. 大气科学, 2005, **29** (1): 131~136
Qiu Jinhuan, Chen Hongbin, Wang Pucai, et al. A prospect on future atmospheric remote sensing. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29** (1): 131~136
- [5] Qiu Jinhuan, Chen Hongbin, Wang Pucai, et al. Recent progress in atmospheric observation research in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24** (6): 940~953
- [6] 徐秀书,吕达仁,陈洪滨,等. 大气探测高技术及相关研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 867~881
Xie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2008, **32** (4): 867~881
- [7] Li Z, Chen H, Cribb M, et al. Overview of the East Asian studies on tropospheric aerosols, an international regional experiment (EAST-AIRE). *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D22S00, doi: 10. 1029/2007JD008853
- [8] Xia X, Li Z, Wang P, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze delta region of China. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D22S12, doi: 10. 1029/2007JD008859
- [9] 霍娟,吕达仁,王越. 全天空云识别阈值法的数值模拟初步研究. 自然科学进展, 2006, **16** (4): 480~484
Huo J, Lü D, Wang Y. Simulation of cloud detection threshold in all-sky images. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16** (4): 480~484
- [10] 霍娟,吕达仁. 云的移动成像轨迹模拟及云量变化分析. 南京气象学院学报, 2006, **29** (2): 209~214
Huo Juan, Lü Daren. Track-simulation of cloud's motion and analysis of variation of the cloud-fraction. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2006, **29** (2): 209~214
- [11] 霍娟,吕达仁. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用. 气象学报, 2006, **64** (1): 31~38
Huo Juan, Lü Daren. Characteristics and distribution of all-sky radiance by libradtran modeling: For cloud determination algorithm in all-sky images. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (1): 31~38
- [12] 章文星,吕达仁,常有礼. 地基热红外温度遥感云底高度可行性的模拟研究. 地球物理学报, 2007, **50** (2): 354~363
Zhang W X, Lü D R, Chang Y L. A feasibility study of cloud base height remote sensing by simulating ground based thermal infrared brightness temperature measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50** (2): 354~363
- [13] Wang Kaicun, Wan Zhengming, Wang Pucai, et al. Estimation of surface long wave radiation and broadband emissivity using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land surface temperature/emissivity products. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D11109, doi: 10. 1029/2004JD005566
- [14] Wang K, Wang P, Li Z, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D15107, doi: 10. 1029/2006JD008351
- [15] Wang K, Wan Z, Wang P, et al. Evaluation and improvement of the MODIS land surface temperature/emissivity products using ground-based measurements at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau. *International J. Remote Sens.*, 2007, **28**: 2549~2565
- [16] 韩庆红,王普才,王玉昆,等. 利用 MODIS 产品分析东北地区积雪覆盖状况及冬季气候特征. 南京气象学院学报, 2007, **30** (3): 396~401
Han Qinghong, Wang Pucai, Wang Yukun, et al. Characters of winter snow-cover and climate in northeast China revealed by MODIS products. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, **30** (3): 396~401
- [17] 王建凯,王开存,王普才. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析. 遥感学报, 2007, **11** (3): 330~338
Wang Jiankai, Wang Kaicun, Wang Pucai. Urban heat (or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2007, **11** (3): 330~338
- [18] Xia X A, Chen H B, Wang P C, et al. Aerosol properties and their spatial and temporal variations over North China in spring 2001. *Tellus*, 2005, **57B**: 28~39
- [19] Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, et al. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosol observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D05203, doi: 10. 1029/2006JD007075
- [20] 宗雪梅,邱金桓,王普才. 宽带消光法反演气溶胶光学厚度

- 与 AERONET 北京站探测结果的对比分析. 大气科学, 2005, **29** (4): 645~653
- Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucui. A comparison study of aerosol optical depths retrieved from broadband extinction method and aerosol robotic network observation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (4): 645~653
- [21] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站气溶胶光学厚度的变化特征分析. 气候与环境研究, 2005, **10** (2): 201~208
- Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucui. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 201~208
- [22] 宋磊, 吕达仁. 上海地区大气气溶胶光学特性的初步研究. 气候与环境研究, 2006, **11** (2): 203~208
- Song L, Lü D R. Investigating of atmospheric optical characteristics over Shanghai region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (2): 203~208
- [23] Xia X A, Chen H B, Goloub P, et al. A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D12203, doi: 10. 1029/2006JD008119
- [24] Xia X A, Chen H B, Li Z Q, et al. Significant reduction of surface solar irradiance induced by aerosols in a suburban region in northeastern China. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D22S02, doi: 10. 1029/2006JD007562
- [25] Xia X A, Li Z Q, Holben Brent, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze delta region of China. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D22S12, doi: 10. 1029/2007JD008859
- [26] Qiu J H, Yang L Q, Zhang X Y. Characteristics of imaginary part and single scattering albedo of urban aerosol in northern China. *Tellus*, 2004, **53**: 72~82
- [27] Qiu Jinhuan, Yang Jingmei. Absorption properties of urban/suburban aerosols in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, **25**: 1~10
- [28] Qiu Jinhuan, Zong Xuemei, Zhang Xiaoye. A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile. *J. Aerosol Sci.*, 2005, **36**: 361~371
- [29] Fan X H, Goloub P, Deuzé J L, et al. Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112** (3): 697~707, doi: 10. 1016/j. rse. 2007. 06. 010
- [30] 范学花, 陈洪滨, 林龙福, 等. POLDER-2/PARASOL 卫星气溶胶业务产品在北京地区的验证分析. 遥感学报, 2008 (待发表)
- Fan Xuehua, Cheng Hongbin, Lin Longfu, et al. Validation of POLDER-2/PARASOL aerosol products over Beijing area. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2008, in press
- [31] Xia X A. Significant overestimation of aerosol optical thickness by MODIS over global land. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51** (23): 2905~2912
- [32] Xia X A, Chen H B, Wang P C, et al. Variation of column-integrated aerosol properties in a Chinese urban region. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, D06204, doi: 10. 1029/2005JD006203
- [33] Mi Wei, Li Z Q, Xia X A, et al. Evaluation of the MODIS aerosol products at two AERONET stations in China. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D22S08, doi: 10. 1029/2007JD008447
- [34] 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性. 科学通报, 2007, **52** (4): 477~486
- Wang Lili, Xin Jinyuan, Wang Yuesi, et al. The assessment of MODIS aerosol data using CSHNET observations. *Chinese Sci. Bull.*, 2007, **52**: 1708~1718
- [35] 董海鹰, 刘毅, 管兆勇. MODIS 遥感中国近海气溶胶光学厚度的检验分析. 南京气象学院学报, 2007, **3**: 328~337
- Dong H Y, Liu Y, Guan Z Y. Validation of MODIS aerosol optical depth retrievals over East China Sea. *J. Nanjing Institute Meteor.*, 2007, **3**: 328~337
- [36] Xia X A, Chen H B, Zhang W X. Analysis of the dependence of column-integrated aerosol properties on long-range transport of air masses in Beijing. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**: 7739~7750
- [37] Chen H B, Xia X A, Wang P C, et al. Ground-based measurements of aerosol optical properties and radiative forcing in North China. *China Particuology*, 2007, **5**: 202~205
- [38] Liu J, Xia X A, Wang P C, et al. Significant aerosol direct radiative effects during a pollution episode in northern China. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L23808, doi: 10. 1029/2007GL030953
- [39] 车惠正, 石广玉, 张小曳. 北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究. 中国科学院研究生院学报, 2007, **24** (5): 699~704
- Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y. Aerosol optical characteristics and its direct radiative forcing in Beijing. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2007, **24** (5): 699~704
- [40] 王越. 云光学厚度与有效粒子半径地基反演方法发展及云非均匀性对卫星反演的影响. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 2006
- Wang Yue. Cloud optical thickness and effective particle radius: the method developing of ground based retrieval and the impact of cloud inhomogeneity on the satellite retrieval. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 2006
- [41] Ding S G, Shi G Y, Zhao C S. Analyzing global trends of different cloud types and their potential impacts on climate by u-

- sing the ISCCP D2. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49** (12): 1301~1306
- [42] 王旻燕, 吕达仁. 东亚强对流云的季节变化及其与对流层顶关系初探. *大气科学*, 2007, **31** (5): 937~949
Wang Minyan, Lü Daren. Preliminary analysis on seasonal variation of deep convective clouds and its association with the tropopause in East Asia. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2007, **31** (5): 937~949
- [43] Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 1985, **315**: 207~210
- [44] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. *科学通报*, 1995, **40** (15): 1396~1398
Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. Lower center of total ozone amount over Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 1995, **40** (15): 1396~1398
- [45] Zou Han, Zhou Libo, Gao Yongqi, et al. Total ozone variation between 50°N and 60°N . *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L23812, doi: 10. 1029/2005GL024012
- [46] 吴宏议, 王普才, 王庚辰, 等. 北京地区秋季大气 CO 柱总量的变化. *气候与环境研究*, 2005, **10** (1): 72~79
Wu Hongyi, Wang Pucui, Wang Gengchen, et al. Variation of the atmospheric CO column amount over Beijing urban area in the fall. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (1): 72~79
- [47] 杨景梅, 邱金桓, 赵延亮. 1990~2002 年北京地区大气臭氧垂直分布 Umkehr 观测反演研究. *大气科学*, 2005, **29**: 709~716
Yang Jingmei, Qiu Jinhuan, Zhao Yanliang. A study of Umkehr vertical ozone profiles of Beijing during 1990-2002. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), **29** (5): 709~716
- [48] 邱金桓. 从窄带或宽带太阳总辐射反演气溶胶一次散射反照率研究. *自然科学进展*, 2008, **18** (7): 98~104
Qiu Jinhuan. A method to retrieve aerosol single scattering albedo using narrow or broadband global solar radiation. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2008, in press
- [49] 邱金桓. 宽带太阳漫射辐射法反演辐射加权平均的气溶胶一次散射反照率研究. *大气科学*, 2006, **30** (5): 767~777
Qiu Jinhuan. Broadband diffuse radiation method to retrieve radiation weighted mean aerosol single scattering albedo. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 767~777
- [50] 段民征, 吕达仁. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演 I. 理论与模拟. *大气科学*, 2007, **31** (5): 757~765
Duan Minzheng, Lü Daren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurement. I: Theory and simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (5): 757~765
- [51] 段民征, 吕达仁. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演 II. 实例分析. *大气科学*, 2008, **32** (1): 27~35
Duan Minzheng, Lü Daren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurement. II: A case study. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (1): 27~35
- [52] 宗雪梅. 中国陆地上空气溶胶光学厚度遥感方法及其应用. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 2005
Zong Xuemei. Development of methods of retrieving atmospheric aerosol optical depth over China and its application. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 2005
- [53] 许潇锋, 邱金桓, 牛生杰. 利用水平面太阳直射日曝辐量反演大气气溶胶光学厚度的方法研究. *大气科学*, 2008(待发表)
Xu Xiaofeng, Qiu Jinhuan, Niu Shengjie. A study of retrieving aerosol optical depth from daily horizontal broadband direct solar radiation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, in press
- [54] 王越, 吕达仁, 霍娟. 利用透射太阳辐射反演云光学厚度及有效粒子半径: 方法研究. *自然科学进展*, 2006, **16** (7): 850~858
Wang Yue, Lü Daren, Huo Juan. Cloud optical thickness and its effective radii retrievals from transmitted solar radiation. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16** (7): 850~858
- [55] 王越, 吕达仁, 霍娟. 云的非均匀性对双向反射率的影响. *科学通报*, 2007, **17**: 2064~2069
Wang Yue, Lü Daren, Huo Juan. Effect of cloud inhomogeneity on bi-directional reflectance. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2007, **17**: 2064~2069
- [56] Qiu Jinhuan. Cloud optical thickness retrievals from ground-based pyranometer measurements. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, D22206, doi: 10. 1029/2005JD006792
- [57] Qiu Jinhuan. A method to retrieve cloud optical depth from pyranometer data and its validation and application. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5652**: 9~16
- [58] Guo X, Lü Y, Lü D R. Feasibility study for retrieval of air density and ozone concentration profiles in the mesosphere using an ultraviolet limb-scan technique. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2004, **14**: 504~510
- [59] Guo X, Lü D R. Feasibility study for joint retrieval of air density and ozone in the stratosphere and mesosphere using limb-scan technique. *Applied Optics*, 2006, **45** (35): 9021~9030
- [60] 王鑫, 吕达仁, 薛震刚. GNSS 掩星中大气水汽的非线性反演. *地球物理学报*, 2005, **48** (1): 32~38
Wang X, Lü D R, Xue Z G. A non-linear inversion method for retrieval of water vapour from radio occultation measure-

- ments. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48** (1): 32~38
- [61] Wang Xin, Lü Daren. Retrieval of water vapor profiles with radio occultation measurements using an artificial neural network. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (5): 759~764
- [62] 王鑫, 吕达仁. GPS 无线电掩星技术反演大气参数方法对比. *地球物理学报*, 2007, **50** (2): 346~353
Wang Xin, Lü Daren. Comparative analysis of inversion methods of retrieving atmospheric profiles with occultation measurements. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50** (2): 346~353
- [63] 王鑫, 吕达仁. 利用 GPS 掩星数据分析青藏高原对流层顶结构变化. *自然科学进展*, 2007, **17** (7): 913~918
Wang Xin, Lü Daren. Tropopause structure analysis using occultation measurements over Qinghai-Tibet Plateau. *Progress in Natural Science* (in Chinese), **17** (7): 913~918
- [64] Min Qilong, Duan Minzheng. A successive order of scattering model for solving vector radiative transfer in the atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2004, **87**: 243~259
- [65] Duan Minzheng, Min Qilong. Asemi-analytic technique to speed up successive order of scattering model for optically thick media. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005, **95**: 21~32
- [66] Duan Minzheng, Min Qilong, Li Jiangnan. A fast radiative transfer model for simulating high-resolution absorption bands. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D15201, doi: 10.1029/2004JD005590
- [67] 段民征, 吕达仁. 矢量辐射传输方程求解中的 δ -M 方法. *自然科学进展*, 2007, **17** (3): 65~70
Duan Minzheng, Lü Daren. δ -M method for vector radiative transfer. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2007, **17** (3): 65~70
- [68] 段民征, 吕达仁. 适用于遥感应用的辐射传输高精度快速计算方法. *遥感学报*, 2007, **11** (3): 359~366
Duan Minzheng, Lü Daren. Rapid yet accurate radiative transfer algorithm for remote sensing application. *J. Remote Sens.* (in Chinese). 2007, **11** (3): 359~366
- [69] Guo X, Lü D R, Lü Y. A simple but accurate ultraviolet limb-scan spherically-layered radiative transfer model based on single-scattering physics. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24** (4): 619~630