

中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述



通信作者简介:黄建平,国家杰出青年基金获得者,教育部“长江学者”特聘教授,国家创新研究群体学术带头人,国家重大科学研究计划项目首席科学家, *Atmospheric Chemistry and Physics* 和《中国科学:地球科学》《大气科学学报》等杂志编委。长期专注于半干旱气候变化研究,带领团队历经十余年建成了半干旱气候综合观测系统,并在半干旱气候变化及其机理研究等方面取得了一系列基础性强、具有国际影响力的原创性研究成果。在 *Nature Climate Change* 发表论文3篇,其中1篇被选为封面文章,并入选2016年中国科学十大进展TOP30。作为第一完成人获得国家自然科学奖二等奖,甘肃省科技进步奖一等奖,甘肃省自然科学奖一等奖,“2016年全国优秀科技工作者”获得者,2017年获得全国创新争先奖,2018年黄建平教授团队被教育部认定为全国高校黄大年式教师团队。

* 联系人, E-mail: hjp@lzu.edu.cn

2019-11-20 收稿, 2019-12-07 接受

国家自然科学基金资助项目(41521004;
91937302;41775022;41430425)

王天河,孙梦仙,黄建平*

兰州大学 半干旱气候变化教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000

摘要 激光雷达作为一种新兴的主动遥感探测工具,被广泛应用于大气遥感、环境监测等领域。星载激光雷达由于其较广的探测范围、较高的时空分辨率、可获得连续的廓线数据等优势,已经成为全球及区域气溶胶和云特性观测研究的强有力工具。本文总结了自2006年CALIPSO卫星发射以来,中国科学家在利用其开展沙尘气溶胶及污染研究方面的工作,重点阐述了沙尘气溶胶的时空分布、远距离传输、分类识别、光学特性、沙尘释放、辐射与气候效应,以及灰霾和烟尘特性等方面的最新研究成果。对以上研究成果的梳理,有助于深入理解中国在利用星载激光雷达开展沙尘与污染研究的水平,也为未来开拓中国自主研发星载激光雷达的遥感应用领域奠定了基础。

关键词 星载激光雷达;沙尘气溶胶;灰霾;烟尘

激光雷达是一种传统雷达技术与现代激光技术结合的新兴主动遥感工具,与被动遥感相比,具有探测范围大、分辨率和灵敏度高、独特优势,被广泛应用于大气探测、环境监测、地形测绘等领域。根据其运载平台不同,可以分为地基、车载、机载、空载、星载激光雷达等。星载激光雷达结合了激光雷达的独特优势和卫星高轨道、覆盖范围大等特点,能够获取包括高山、海洋、沙漠等无人区的全球覆盖的探测数据,大大弥补了地基激光雷达网的不足。

美国是星载激光雷达研究和应用的先行者,早在1994年9月就完成了世界上第一次激光雷达空间技术试验(LITE),首次提供了从地表至平流层中层的全球云和气溶胶垂直结构,证明了空间激光雷达在研究气溶胶和云方面的潜力(Winker et al., 1996)。2003和2018年分别发射了冰、云与陆面高度系列卫星(ICESat-1和ICESat-2),它们分别搭载了世界上第一台地球科学激光测高系统(GLAS)和改进的先进激光测高系统(ATLAS),对冰、陆地和海洋高度、森林和大气气溶胶等进行精确探测(Zwally et al., 2002; Abdalati et al., 2010)。2006年4月,美国国家航空航天局(NASA)和法国国家航天中心(CENS)合作研制的世界上首台应用型云-气溶胶激光雷达和红外探测卫星(CALIPSO)成功发射,搭载的云-气溶胶正交偏振激光雷达(CALIOP)可用以探测全球气溶胶和云光学性质与形态的垂直分布(Winker et al., 2003),与CloudSat卫星搭载的云剖面雷达形成互补,涵盖从薄卷云到深对流云等各种云类型的探测(Poole et al., 2003)。此外,2014年12月搭载在国际空间站上的第一台云-气溶胶传输系统

引用格式:王天河,孙梦仙,黄建平,2020.中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述[J].大气科学学报,43(1):144-158.

Wang T H, Sun M X, Huang J P, 2020. Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 144-158. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191120007. (in Chinese).

激光雷达(CATS)成功发射,为 CALIPSO 退役后和下一代星载激光雷达发射做好衔接工作。CATS 能够获取近实时的云和气溶胶观测数据,用于污染物传输过程及特殊大气环境事件(沙尘暴、火山喷发等)的监测,实现更精确的气溶胶建模和预测(McGill et al., 2015; Rodier et al., 2016)。近年来,星载测风激光雷达的研究也取得了重大突破,欧洲航天局的大气动力学任务-风神(ADM-Aeolus)卫星搭载的大气多普勒激光雷达(ALADIN)于2018年8月成功发射,它不仅是全球首个星载测风激光雷达,也是首个气溶胶/云光学特性高光谱分辨率星载激光雷达(HSRL)(Reitebuch et al., 2009),首次实现了从太空对全球大气风场的三维观测(McMahon, 2019)。综上所述,具有精细时空分辨率、高探测精度和实时快速数据获取能力的星载激光雷达,在环境监测和气候变化研究等方面起着非常重要的作用。

目前在轨稳定运行时间最长、发展最成熟、应用最广泛的星载激光雷达是搭载在 CALIPSO 卫星上的 CALIOP,已被大量地基观测和被动卫星遥感所验证(Bibi et al., 2015; Liu et al., 2018)。CALIOP 由于其主动遥感探测和退偏监测技术的优势,它的气溶胶分类和垂直结构是迄今为止最为全面和准确的气溶胶产品,被广泛应用于气溶胶-云相互作用、光学特性、气候效应等方面的研究。沙尘作为我国最主要的气溶胶类型之一,严重影响了空气质量、人类健康和地球气候(Huang et al., 2014),而且大气污染问题近年来也引起了社会的高度关注,我国科学家在星载激光雷达的应用方面也做出了突出的贡献。尽管我国目前还没有在轨的星载激光雷达,但是深入梳理我国科学家在沙尘气溶胶与污染相关方面的研究成果,将为未来我国自主研发星载激光雷达的遥感应用拓展有重要的科学意义。

因此,本文以 CALIPSO 卫星为主,对我国科学家在利用其开展东亚沙尘气溶胶及污染研究方面的工作进行梳理总结,重点阐述东亚沙尘气溶胶的时空分布、远距离传输、分类识别、光学特性、沙尘释放、辐射与气候效应,以及其他污染物(如灰霾和烟尘)特性等方面的最新研究进展。最后,简单总结和探讨了星载激光雷达在沙尘气溶胶与污染研究方面的优势以及国内外未来星载激光雷达的发展规划。

1 东亚沙尘气溶胶的时空分布和传输特征

沙尘是大气气溶胶的重要组成部分,世界范围

内有中亚、北美、中非和澳大利亚四大沙尘天气多发区(张鹏等, 2018),我国北方地区是中亚沙尘源的重要组成部分,来自沙尘源地的沙尘气溶胶可以通过远距离传输对全球及区域大气环境与气候变化产生显著的影响(Kinne and Pueschel, 2001; Huang et al., 2014)。因此,研究沙尘气溶胶的时空分布及传输特征,对于理解其区域辐射强迫机制、全球物质循环以及气候环境影响具有重要意义。

1.1 水平分布特征

被动卫星传感器,如中等分辨率成像光谱仪(MODIS)、多角度成像光谱仪(MISR)和臭氧监测仪(OMI)等,由于其低轨道、高空间分辨率、宽刈幅的特点,长期以来成为气溶胶水平分布特征研究的重要工具(Qi et al., 2013; Kang et al., 2017)。激光雷达主动探测和退偏技术的优势,可以探测到气溶胶和大气分子等直径较小的微粒,尤其对不规则形状的沙尘粒子有更加准确的高分辨能力(Liu et al., 2008a),因此基于星载激光雷达的观测更能准确呈现沙尘气溶胶的水平分布特征。

Liu et al. (2008b)利用 CALIPSO 夜间无云数据获取了高分辨率的全球沙尘气溶胶分布,发现北非和阿拉伯半岛的干旱和半干旱地区拥有最持久和最丰富的沙尘源。Huang et al. (2015a)通过对自然沙尘和人为沙尘的识别,给出了全球总沙尘气溶胶(自然沙尘+人为沙尘)的水平分布特征(图1),发现北非和阿拉伯半岛沙尘在夏季最为活跃,印度次大陆和塔克拉玛干沙漠在春季最活跃。针对东亚地区的沙尘,徐成鹏等(2014)从沙尘发生频率、抬升高度等方面分析了沙尘气溶胶的时空分布特征,发现在 $38^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$ 之间存在一条明显的沙尘带,这一类似现象也被其他学者发现(Xu et al., 2018; Liu et al., 2019)。青藏高原由于其独特的地形且毗邻塔克拉玛干沙漠,其上空及周边的沙尘分布也受到广泛关注。Liu et al. (2008a)利用 CALIPSO 数据第一次对青藏高原及周边地区沙尘分布的季节变化特征进行了系统分析, Xu et al. (2015)结合 MISR 和 CALIPSO 观测数据,研究了青藏高原气溶胶光学厚度的区域分布特征,都发现沙尘是高原上最显著的气溶胶类型,且北部的气溶胶通常多于南部,这可能与高原北部毗邻沙尘源区和大气环流驱动有关。

1.2 垂直分布特征

造成气溶胶辐射强迫很大不确定的原因在于对其垂直分布的了解不够(Meloni et al., 2005)。尽管被动卫星能够较好地观测气溶胶水平分布和传输特

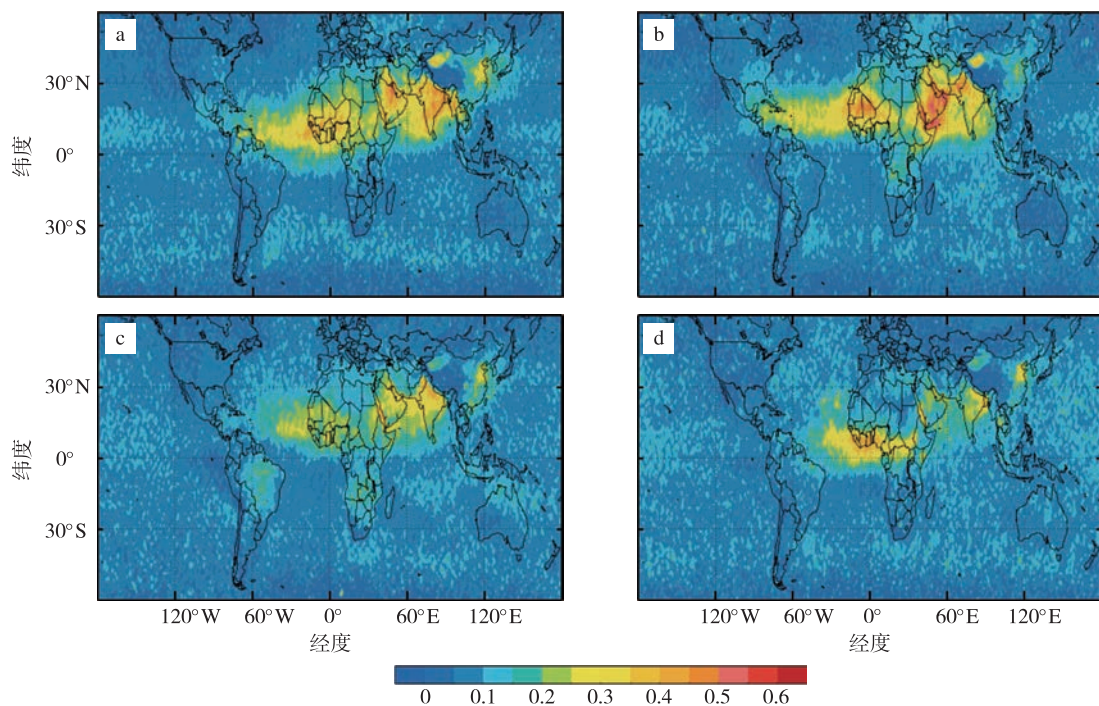


图 1 CALIPSO 测得的 2007—2010 年全球总沙尘(包括污染沙尘)光学厚度分布(Huang et al., 2015a):(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig.1 Optical depth distributions of global total dust(including polluted dust) derived from CALIPSO measurements during 2007—2010 (Huang et al., 2015a):(a) spring;(b) summer;(c) autumn;(d) winter

征,但无法提供垂直特征信息。过去气溶胶垂直分布只能依赖地基激光雷达、飞机及探空等观测手段,但是这些单站或多站观测结果的空间代表性仍然较差。星载激光雷达能够弥补以上缺陷,获取全球范围内最高垂直分辨率(约几十米)的云和气溶胶垂直结构(Winker et al., 2003),对我们理解沙尘气溶胶的垂直分布及辐射强迫意义重大。

针对东亚沙尘源区及传输路径上沙尘气溶胶的垂直分布特征我国科学家开展了大量工作。例如,针对塔克拉玛干沙漠,Liu et al. (2008b)利用星载激光雷达数据研究了沙尘气溶胶的纬向和经向垂直结构(图 2),发现 $38^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 沙尘最为丰富,全年存在高达 6 km 的密集沙尘层,这与其地形和局地大气环流有关,在经向方向上也发现了多个沙尘频发位置,位于 81°E 附近及 84°E 和 86°E 之间。Ge et al. (2014)结合卫星和再分析场的综合分析,研究了塔克拉玛干沙漠及周边地区的沙尘释放及三维分布特征。Nan and Wang (2018)利用 2007—2016 年塔克拉玛干地区海平面以上每公里沙尘消光的年际变化,探讨了确保沙尘向东传输的充分必要条件。针对东亚沙尘传输路径,Huang et al. (2008)结合 CALIPSO 和 2008 年太平洋沙尘试验(PACDEX)地基综合观测,研究了亚洲沙尘气溶胶在自由对流层

中的远距离传输和垂直分布特征,发现传输中的沙尘在中国东部和西太平洋地区呈双层或多层结构。Xu et al. (2019)通过比较气溶胶光学厚度,发现跨北太平洋的气溶胶传输路径上 2 km 以下气溶胶居多,但是从沙尘发生频率和层顶高度来看,沙源区上空约 2 km 处沙尘发生频率达到峰值,在传输区则随高度增加而降低,沙尘层顶高度则随传输距离增加逐渐抬升。

1.3 远距离传输特征

从大尺度远距离传输的角度来看,影响全球大气环流的沙尘源地主要集中在北非撒哈拉和中亚地区。沙尘气溶胶的远距离输送不仅影响陆地、大气和海洋的生物地球化学循环(Bergametti, 1998),甚至还影响全球的碳循环(Ridgwell, 2002),对区域辐射平衡及气候产生重要影响(Huang et al., 2014)。非洲撒哈拉沙漠的沙尘气溶胶可以横跨大西洋,对亚马孙雨林产生显著的“施肥作用”(Yu et al., 2015a, 2015b),影响遥远的加勒比海和美国,向北传输影响地中海甚至欧洲各地(Arimoto et al., 1997; Prospero et al., 2002)。东亚沙尘的远距离传输同样也是地球上最大尺度的沙尘传输过程,可以横跨太平洋到达北美或更远的地方,对大气环境、生态系统、区域和全球气候变化等产生深远影响。近年来,

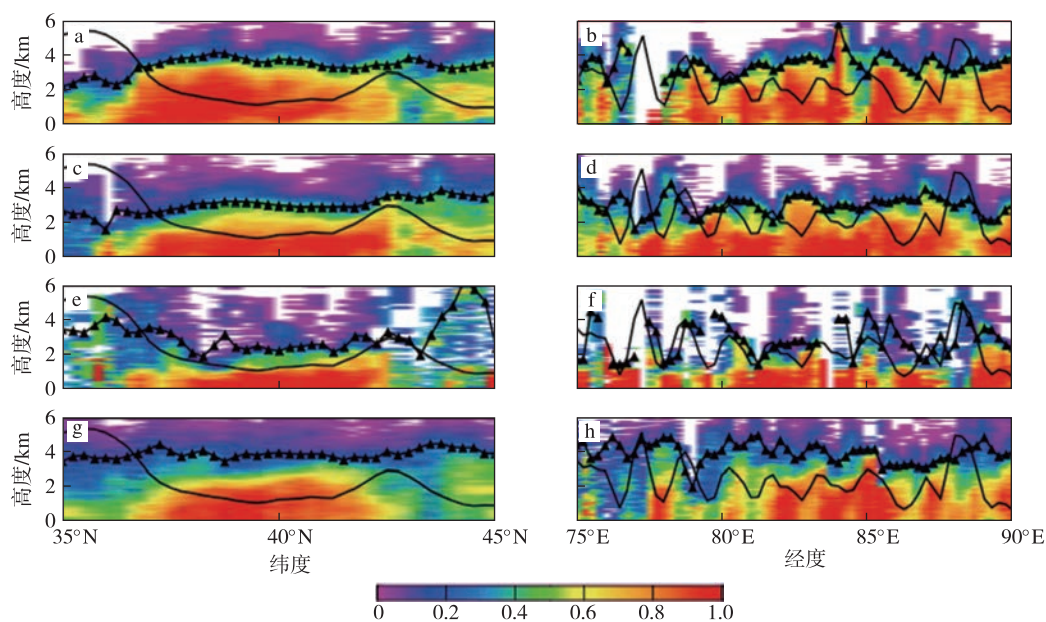


图2 塔克拉玛干地区沙尘发生频率的高度-纬度(a,c,e,g)和高度-经度(b,d,f,h)剖面(Liu et al., 2008b):(a,b)夏季;(c,d)秋季;(e,f)冬季;(g,h)春季

Fig.2 (a,c,e,g) Altitude-latitude and (b,d,f,h) altitude-longitude cross-sections of dust occurrence frequency in Taklamakan region (Liu et al., 2008b):(a,b) summer;(c,d) autumn;(e,f) winter;(g,h) spring

我国科学家在结合星载激光雷达的东亚沙尘远距离输送研究方面取得重大进展。

1.3.1 跨太平洋传输

早在20世纪80年代初期,Duce et al.(1980)就认为来源于亚洲的春季粉尘主要被500 hPa西风急流所携带并沉积在北太平洋,春季向西北太平洋的主要输送路径位于40°N左右(Zhao et al., 2003),且主要发生在自由对流层(Chen et al., 2017a)。目前,东亚沙尘的跨太平洋传输得到了星载激光雷达观测资料的证实。Huang et al.(2008)结合CALIPSO和PACDEX地基综合观测,发现中国东部和西太平洋上空8~10 km处有一个非常明显的退偏层,经后向轨迹分析证实,这与塔克拉玛干沙漠和戈壁地区沙尘的远距离输送密切相关(图3),沙尘气溶胶可从近地面漂浮至约9 km的高度,然后在对流层高空西风急流作用下远距离传输,而低空的传输路径则取决于区域天气系统和地形(Huang et al., 2008)。日本和我国科学家结合星载激光雷达观测、三维气溶胶传输模型以及后向轨迹综合分析,发现2007年5月塔克拉玛干沙漠爆发的沙尘过程在大约13 d的时间里远距离输送超过了一个完整的环球线路(Unno et al., 2009)。Guo et al.(2017)通过对2015年春季一次跨太平洋沙尘事件的多源观

测和数值模拟分析,展示了沙尘事件的发展和传输过程,发现沙尘气溶胶主要沿盛行西风急流运动,在很大程度上受阿留申低压的位置和强度控制。上述研究进一步加深了我们对东亚沙尘跨太平洋传输的认识。

1.3.2 向青藏高原的输送

随着青藏高原气候暖干化以及人类活动的影响,该地区生态环境出现了不同程度的恶化。研究发现,青藏高原已成为新的不可忽视的沙尘源区,主要分布在青藏高原北部的柴达木盆地等地区(韩永翔等, 2004)。此外,其北侧塔克拉玛干沙漠常年沙尘频发,500 hPa强反气旋异常和850 hPa强东风有利于沙尘的垂直上升和水平传输(Ge et al., 2014),对青藏高原天气气候产生影响。星载激光雷达的观测研究首次证实了塔克拉玛干沙漠沙尘气溶胶向青藏高原输送的现象。Huang et al.(2007)利用CALIPSO卫星的观测资料,首次发现夏季青藏高原北坡存在一个从地面延伸至海平面以上5~9 km的沙尘层,并经后向轨迹证实这些沙尘源于塔克拉玛干沙漠(图4),受沙漠热低压影响,沙尘经过向东-向南-向西的移动路径最后堆积在高原北坡和高原上空。Jia et al.(2015)的研究进一步发现夏季气象条件和地形也有利于高原附近排放粉尘向高原

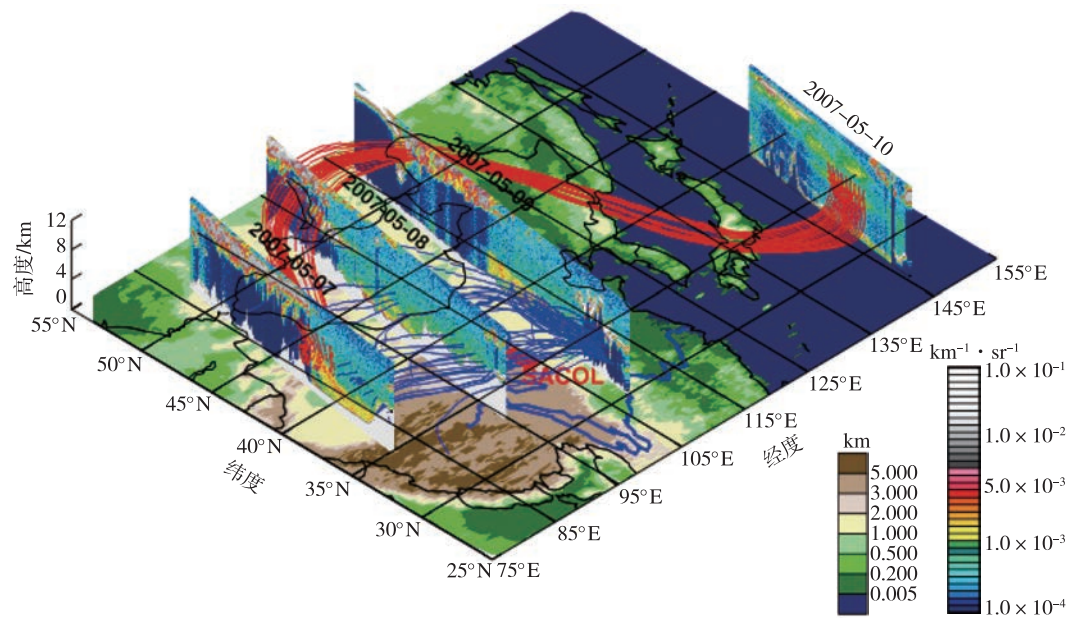


图 3 起源于塔克拉玛干沙漠的沙尘跨太平洋传输过程 (Huang et al., 2008)
Fig.3 A trans-Pacific transport process of dust originating in Taklamakan Desert (Huang et al., 2008)

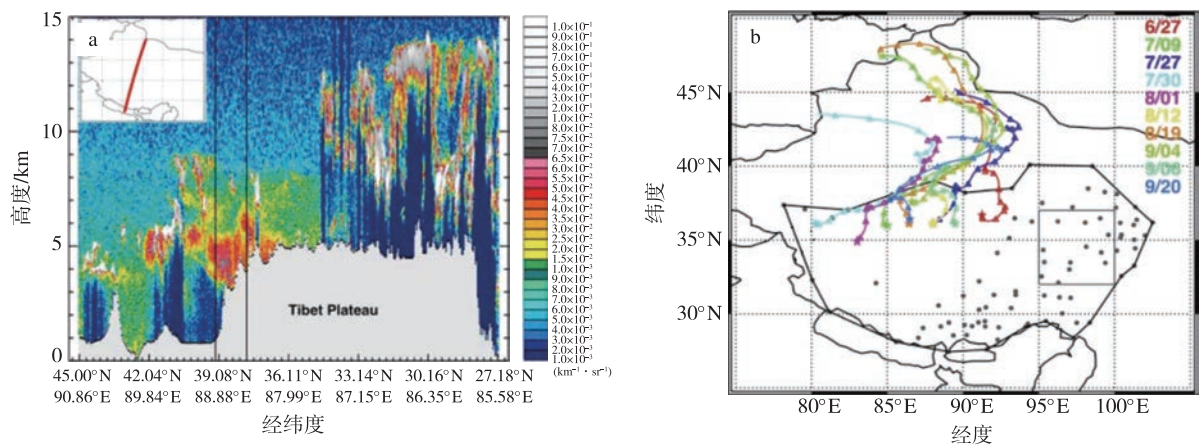


图 4 塔克拉玛干-青藏高原总衰减后向散射强度的高度-轨道横截面 (a) 和爬升到青藏高原气块的四天后后向轨迹 (b)
(Huang et al., 2007)
Fig.4 (a) Altitude-orbit cross-section of total attenuated backscattering intensity over Taklamkan-Tibetan Plateau and (b) four-day back trajectories of air parcels climbing upon the Tibetan Plateau (Huang et al., 2007)

的输送,即当冷平流或冷锋过境时,沙漠释放的尘粒在阿尔泰山和天山东北风作用下向高原北坡移动,夏季感热的增强导致更多的沙尘被抬升到更高的高度,进而在北风及地形强迫作用下输送到高原北坡。青藏高原除了受塔克拉玛干沙漠沙尘气溶胶影响外,其中纬度的关键地理位置以及巨大的高度效应,对沙尘的垂直输送以及远距离纬向传输也产生了重要的影响。Xu et al. (2018) 结合激光雷达测量的沙尘光学厚度和沙尘通量,研究发现青藏高原是将沙尘气溶胶从低层大气输送到高层对流层的重要通道,春季盛行的干燥深对流过程起到了关键作用,

促进了北半球沙尘气溶胶的远距离纬向传输。
1.3.3 向北极的传输
亚洲沙尘的远距离输送已是不争的事实,除跨太平洋输送影响下游及北美地区外,也会伴随天气系统东南向输送影响我国台湾地区 (Liu et al., 2009)。此外,亚洲沙尘气溶胶也会北上影响北极地区,在北极格林兰地区的冰芯和雪芯等物质中也发现了亚洲沙尘的远距离传输证据 (Bory et al., 2003),但是对其传输路径的直接观测证据还是有限的。我国科学家基于星载和地基激光雷达等多源观测以及后向轨迹分析也证明了这一观测事实。

Huang et al. (2015b) 针对 2010 年 3 月 19 日一次大尺度东亚强沙尘暴事件, 研究发现亚洲沙尘气溶胶可在 5 d 内跨越中国东部、日本和西伯利亚进而传输至北极地区 (图 5)。这是一条过去未见报道的亚洲沙尘向极地的传输路径。这次亚洲沙尘之所以能够北上进入北极, 归结于东亚地区常见的天气系统气旋和东亚大槽的增强, 也意味着亚洲沙尘可能会沿这条路径在上述天气系统异常增强时向北极远距离输送, 进而影响北极的气候和生态系统, 对于我们理解北极地区的气候变化和反馈机制至关重要。

2 沙尘气溶胶的分类识别、光学特性及释放

2.1 沙尘的分类识别

根据沙尘气溶胶来源地的不同,可简单区分为自然沙尘和人为沙尘。关于沙尘气溶胶的分类过去多采用被动遥感的手段,通常既考虑沙尘粒子粗模态的特征,也考虑深蓝和红光波段沙尘吸收特性的显著差异,再根据源地土地利用属性进一步区分为自然或人为沙尘(Ginoux et al., 2012)。然而,在远距离传输过程中,沙尘与其他污染物的混合增加了

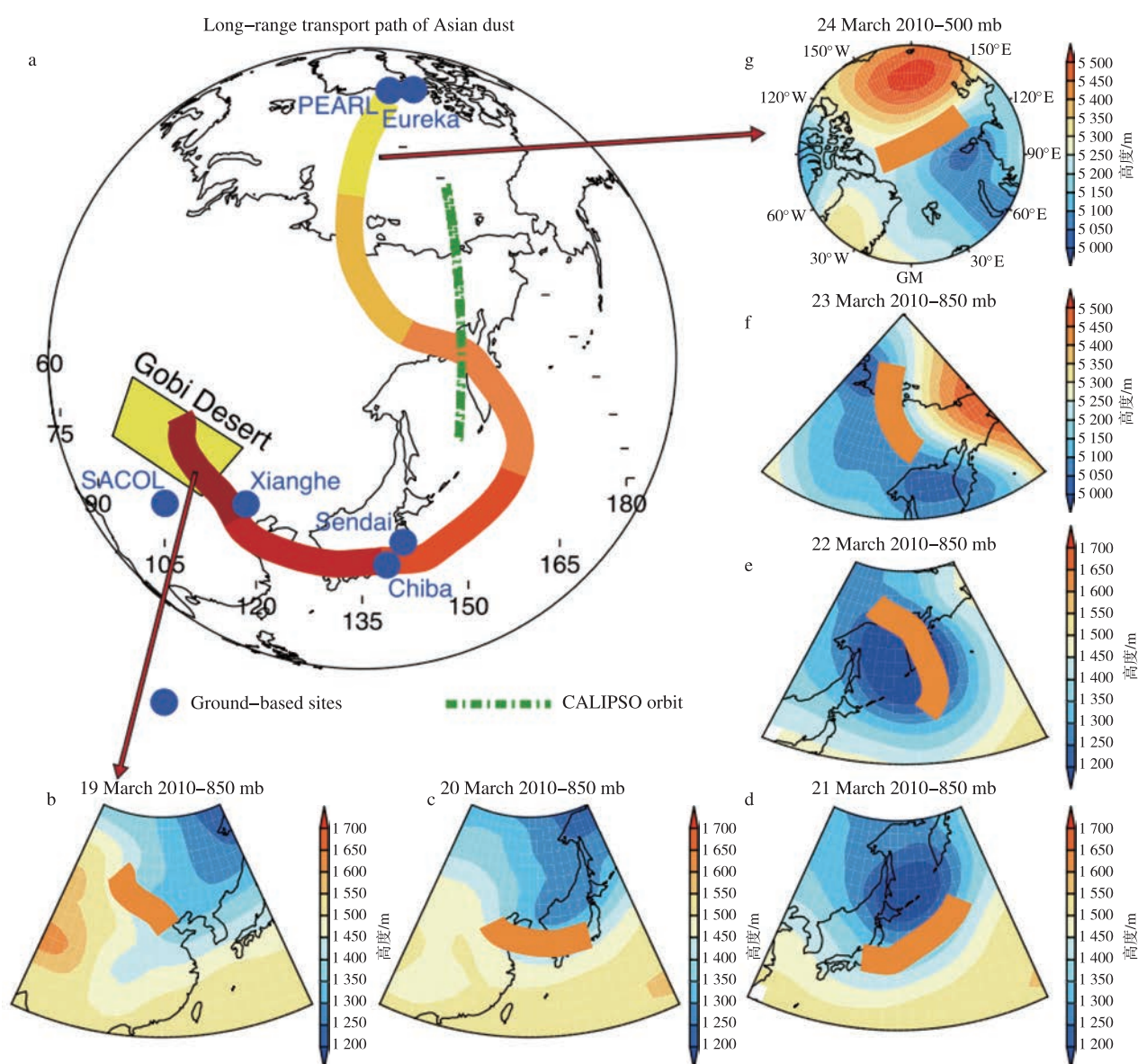


图5 2010年3月19日东亚强沙尘期间亚洲沙尘从戈壁沙漠到北极的远程输送路径(Huang et al., 2015b)

Fig.5 Long-range transport path of Asian dust from the Gobi Desert to the Arctic during the strong dust period over East Asia on 19 March 2010 (Huang et al., 2015b)

被动遥感进行沙尘气溶胶分类识别的难度。

CALIPSO 卫星气溶胶和云的官方分类识别算法经历了多个版本的改进,第二版算法(V2-CAD)容易将厚沙尘层误分类为云(Liu et al., 2004)。针对算法的缺陷,Chen et al. (2010)结合激光雷达和红外亮温差技术的优势,发展了 CALIOP 和被动三通道红外成像仪(IIR)相结合的沙尘气溶胶识别方法(CLIM),将误判率从 43%减少到 7%。Liu et al. (2014)发展的第三版算法显著改进了沙尘源区厚沙尘和烟尘层的识别,但容易将低空气溶胶层误认为薄云,通过比较上述三种算法,发现 CLIM 方法的沙尘误分类率均低于 V2-CAD (16.39%)和 V3-CAD (2.01%)算法。目前的最新版(第四版)算法增加了污染性海洋和抬升烟尘的分类(Kim et al., 2018),对气溶胶的分类更加完善合理。此外,我国科学家也尝试提出并改进了区别于官方概率密度分布函数的支持向量机(SVM)的气溶胶-云分类方法(Ma et al., 2011, 2015)。

针对人为沙尘气溶胶,过去多采用 MODIS 深蓝气溶胶光学厚度和土地利用数据联合分类识别(Ginoux et al., 2012),我国科学家 Huang et al. (2015a)创新性地提出了人为沙尘气溶胶识别的新方法(图 6),该方法融合了星载激光雷达获得的边界层高度、MODIS 地表类型、土地利用等多元数据,根据自然与人为沙尘后向散射以及退偏比等光学特性的差异,进行自然和人为沙尘的识别。该方法的提出,进一步拓展了星载激光雷达在沙尘分类识别领域的应用,为深入理解自然和人为沙尘的光学特性、评估其沙尘释放通量、研究沙尘循环具有至关重要的作用。

2.2 光学特性

理解气溶胶的光学特性是正确评估其辐射强迫及气候影响的重要前提。我国已有大量针对气溶胶光学厚度、Ångström 指数、单次散射反照率等光学特性的地基(Xin et al., 2010; Che et al., 2013)和卫星(Xia et al., 2013; Cao et al., 2014)遥感研究,也有针对沙尘云光学特性的主被动联合反演方法的尝试(Wang and Huang, 2009)。这里重点讨论基于星载激光雷达的沙尘粒子不规则性光学厚度等特性的研究。

气溶胶粒子退偏比能够很好地反映粒子的不规则性,沙漠源地的沙尘气溶胶通常具有较大的退偏比,伴随沙尘气溶胶的远距离传输以及抬升高度增加,受自身重力沉降作用以及其他污染物的吸附和

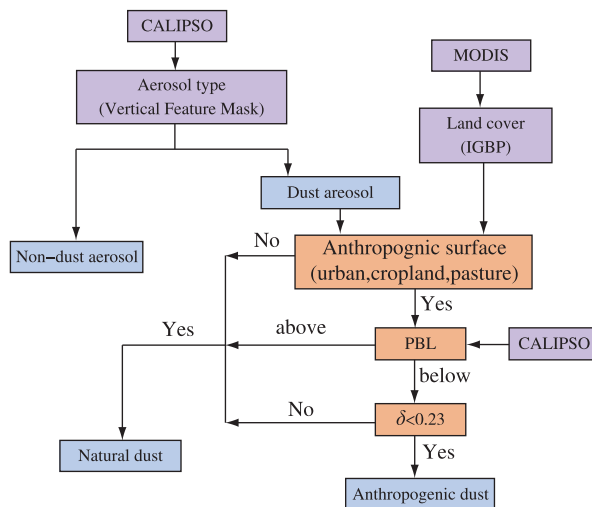


图 6 结合 CALIPSO 与 MODIS 提供的地表类型数据识别人为沙尘的流程图(Huang et al., 2015a)

Fig.6 Flow chart of identifying anthropogenic dust by combining CALIPSO and land cover data set provided by MODIS (Huang et al., 2015a)

包裹影响,其不规则程度降低(茹建波, 2017)。针对青藏高原夏季的沙尘气溶胶, Huang et al. (2007)发现不同海拔高度上沙尘气溶胶的体退偏比具有显著的差异,柱平均体退偏比约 21%, 3~5 km 内绝大多数沙尘颗粒体退偏比小于 10%。He and Yi (2015)针对下游地区(武汉)多次沙尘事件的综合分析,发现冬季沙尘层的平均消光和光学厚度相比春季较大,平均体退偏比和粒子退偏比则较小。Yi et al. (2014)结合 MODIS 和 CALIOP 观测也证实了东亚沙尘流经西北太平洋时粒子退偏比减小。类似的工作在塔克拉玛干沙漠(Nan and Wang, 2018)和柴达木盆地、戈壁及华北地区(徐成鹏等, 2014)也有开展。

弹性散射激光雷达气溶胶光学厚度(或消光系数廓线)反演的准确性直接依赖于所采用雷达比的准确性(Omar et al., 2009)。为了减少雷达比引入误差, Huang et al. (2010b)发展了太阳光度计和地基激光雷达相结合的气溶胶消光和后向散射系数反演方法。茹建波等(2018)也对比分析了东亚沙尘源区晴空和云上沙尘的垂直分布特征、消光系数和光学厚度。Xu et al. (2019)通过积分 CALIOP 的消光系数得到了跨太平洋传输过程中地表层和自由对流层的气溶胶光学厚度(AOD),发现夏季由东亚至东太平洋自由对流层 AOD 下降了 8 倍。这些观测结果对于我们理解沙尘传输过程中光学特性的演变具有重要的指导意义。

2.3 沙尘释放

如何有效评估沙尘释放是全球沙尘循环研究的重点(Shao et al., 2011)。过去由于观测手段等的限制,模式模拟是沙尘释放及沙尘循环研究最流行的方法。我们科学家针对东亚沙尘气溶胶的释放、输送通量的模式模拟开展了大量研究工作(Zhao et al., 2003; Mao et al., 2019),但是由于相关模式参数及大气动力场数据的缺陷导致模式评估具有较大的不确定性(Chen et al., 2017b),仍需要地基和卫星遥感观测的检验和验证。由于篇幅所限,这里仅讨论与遥感相关的沙尘排放通量估算研究。

关于沙尘通量的遥感估算得益于气溶胶卫星遥感技术的进展,通常借助粒子性质(如大小和形状)分离沙尘气溶胶,进而通过光学厚度和沙尘质量消光系数转化为沙尘通量(Kaufman et al., 2005; Ansmann et al., 2011; Yu et al., 2015b)。我国科学家利用上述研究方法,对我国和东亚沙尘气溶胶的输送通量进行了估算。例如, Huang et al. (2015a) 通过利用 CALIPSO 识别沙尘气溶胶的优势,发展了自然沙尘和人为沙尘的区分方法,进而估算了全球自然和人为沙尘的年平均柱含量,发现人为沙尘占全球陆地沙尘排放总量的 24.8%,其中 52.5% 来自半干旱和半湿润地区。华雯丽等(2018)利用地基激光雷达通过分离粗(沙尘)、细(背景气溶胶)粒子,在实时反演沙尘质量消光系数的基础上,反演了敦煌地区沙尘的消光系数和质量浓度垂直分布特征。Liu et al. (2019) 利用了和 Yu et al. (2015b) 类似的方法评估了东亚沙尘在塔克拉玛干沙漠、戈壁沙漠、华北、华南和日韩地区的沙尘通量。此外,将卫星观测资料同化进数值模式,也能达到优化沙尘通量的模式估算(Sekiyama et al., 2010; 李蒙蒙等, 2014; Chen et al., 2018)。

3 沙尘气溶胶的气候效应

3.1 沙尘气溶胶的辐射强迫

沙尘气溶胶作为地球系统主要的气溶胶类型,是影响气候变化的最不确定的关键性因子。过去通常采用模式模拟(王宏等, 2007; Zhang et al., 2010)或模式与观测相结合的方法(Chen et al., 2018)开展沙尘气溶胶的辐射和气候效应研究,但是由于缺乏沙尘垂直分布的信息,模拟结果具有很大的不确定性。星载激光雷达高精度的垂直廓线观测对准确评估沙尘气溶胶的辐射和气候效应具有重要意义。

为了准确评估沙尘气溶胶的辐射强迫和加热

率, Huang et al. (2009) 第一次引入 CALIPSO 沙尘气溶胶消光系数廓线,结合辐射传输模式定量评估了塔克拉玛干沙漠沙尘层对大气的加热和辐射强迫。研究发现,沙尘层对大气的加热率可以从 1 K/d 增加至 3 K/d,最强时甚至可达 5.5 K/d,造成大气层顶、地表和大气中日平均净辐射强迫分别为 $44.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $-41.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $86.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。针对我国西北地区沙尘暴事件, Wang et al. (2013) 和 Ge et al. (2010) 结合地基观测和模式模拟也开展了类似的研究。针对青藏高原地区, Jia et al. (2018) 利用 CALIPSO 最新版气溶胶产品,结合辐射传输模式研究了沙尘气溶胶对青藏高原的辐射强迫作用,发现青藏高原上厚沙尘层的瞬时加热速率可以高达 5.5 K/d,且短波辐射效应为 $16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,红外辐射效应为 $-4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Liu et al. (2011) 也利用类似的方法评估了长三角地区传输沙尘气溶胶的直接辐射强迫(效率)、感热加热速率和最大加热率高度。当沙尘层位于云上时, Xu et al. (2017) 的研究发现,沙尘层的增暖效应与重叠云分数和云光学厚度呈线性正相关,即重叠云分数每增加 1%,增暖效应将扩大 $1.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \tau^{-1}$ 。

3.2 沙尘气溶胶对云和气候的影响

沙尘气溶胶能够吸收和散射太阳辐射影响辐射收支(Sekiguchi et al., 2003),也可作为云凝结核和冰核改变云的微物理性质(如云水含量、云粒子大小等)(Huang et al., 2009, 2010a),影响降水速率,也可以通过吸收太阳辐射来加热大气,加速低层水汽和云滴蒸发(Hansen et al., 1997; Huang et al., 2006a),抑制降水并影响地气之间的水分交换。我国北方干旱和半干旱区拥有大量的沙尘源,局地释放的沙尘气溶胶对该地区云和降水相互作用产生了重要的影响,开展沙尘气溶胶-云-气候相互作用研究具有重要的科学意义(Huang et al., 2014)。

我国科学家针对东亚沙尘以及干旱与半干旱气候变化开展了大量工作, Huang et al. (2014) 全面综述了沙尘气溶胶对东亚干旱与半干旱气候的影响机理,重点强调了沙尘气溶胶的直接、间接和半直接效应在影响区域尺度天气气候过程中的重要贡献(图7)。基于星载激光雷达对沙尘和云特性三维分布特征、传输机理等方面的观测认识起到了关键的作用, Huang et al. (2010a) 利用 A-Train 卫星的观测数据对比分析了中国和美国半干旱地区的气溶胶和云特性,发现中国半干旱区气溶胶平均光学厚度更大,自然沙尘占比更高,对云和气候的影响更加显著。

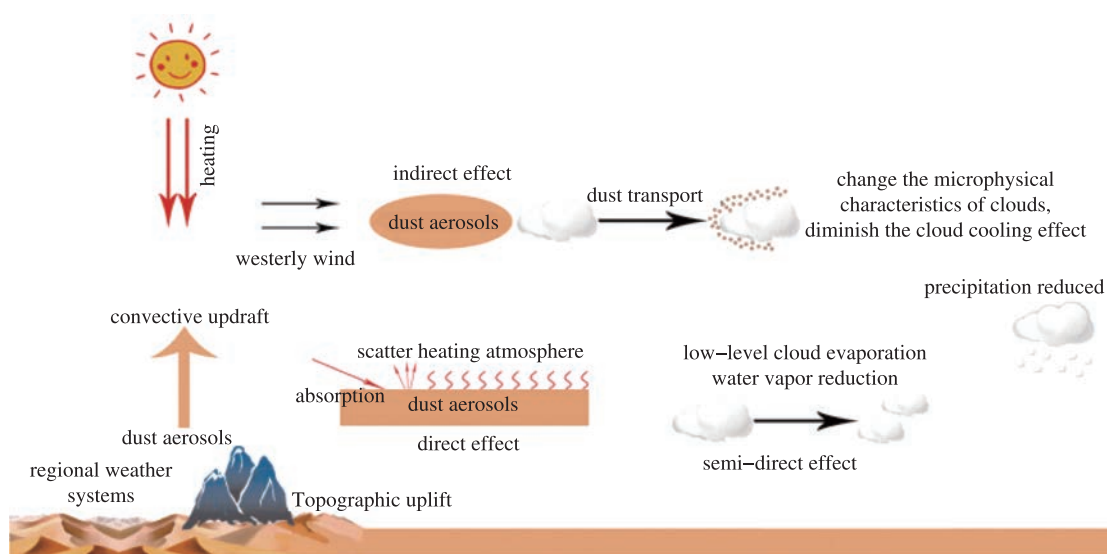


图 7 干旱/半干旱和下风(湿润)地区沙尘-云-降水相互作用的示意图 (Huang et al., 2014)

Fig.7 Schematic diagram of dust-cloud-precipitation interactions in arid/semi-arid and downwind (wet) regions (Huang et al., 2014)

云下有沙尘出现时,沙尘会明显减弱云在大气层顶的冷却效应 (Huang et al., 2006b)。Su et al. (2008) 利用结合云和地球辐射能系统 (CERES) 资料和辐射传输模型,评估了受亚洲沙尘影响时云的瞬时短波、长波和净辐射强迫分别为 $-138.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $69.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $-69.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Wang et al. (2010) 也评估了 PACDEX 期间我国西北地区(沙尘源区)和西北太平洋地区(传输区)沙尘云的性质和辐射强迫,瞬时净云冷却效应分别为 43.4% 和 16.7%。以上研究所采用的模式模拟和主被动遥感相结合的方法,为理解沙尘-云-气候影响起到了关键作用。

4 对灰霾和烟尘的研究

4.1 灰霾

随着工业化和城市化的快速发展,我国大气污染日益严重。特别是大范围长时间的区域性灰霾事件,严重影响了空气质量、人体健康、生态系统和全球气候。为了探析重霾污染的原因,理解灰霾期间气溶胶物理化学特征、光学特性、垂直分布及气象条件具有重要的作用。

激光雷达探测对于理解其垂直分布特征、传输过程有重要的意义。Qin et al. (2016) 结合地基和星载激光雷达的观测数据,分析了 2015 年冬季一次大范围灰霾事件期间气溶胶的传输现象,发现受冬季风影响灰霾从华北至华东的跨区域输送成为一种普遍现象,表明跨区域跨城市联合治理的重要性。针对长三角地区强灰霾事件, Sun et al. (2018) 综合气

溶胶光学特性、垂直分布、边界层高度等数据,强调了不同类型气溶胶跨区域传输影响的重要性。我国不同地区灰霾期气溶胶特征显著不同,例如:在西北地区,霾影响最严重的气层距地面 2~4 km,随高度增加后向散射系数增大,粒子不规则性减弱(颜娇珑等, 2016);在长江三角洲地区, 2 km 以下的气层受污染最严重,以球形大粒径气溶胶为主 (Geng et al., 2011; 刘璇等, 2015);在上海地区,中度干霾情况下气溶胶的散射能力和不规则性最强,粒径也最大(刘琼等, 2012);在京津冀地区,其霾污染与本地和外地气溶胶输送有关,细颗粒污染更严重,与局地人为污染为主的长三角地区有很大差异。其他地区类似研究,由于篇幅所限不再赘述。

4.2 烟尘

烟尘是目前除灰霾外另外一种重要的污染物,主要由森林火灾、农作物秸秆燃烧、生物燃料燃烧等产生 (Westphal and Toon, 1991)。它不仅能通过抑制云层的形成来影响局地的气候效应 (Koren et al., 2004),而且对大气中的化学反应也起着重要作用 (Crutzen and Andreae, 1990),也可以通过远距离传输、吸湿增长对区域尺度空气质量和辐射平衡产生重要影响 (Brioude et al., 2009; Mill et al., 2011; Kar et al., 2018)。

基于被动卫星遥感观测的结果发现,烟尘气溶胶主要发生在中欧、俄罗斯、印度半岛、南美洲和非洲南部 (Amiridis et al., 2010; Rosário et al., 2013)。利用星载激光雷达的烟尘遥感研究也是一个重要的

研究方向(Kar et al.,2018),已有研究证实了污染性大陆/烟尘是中东及印度半岛的主要气溶胶类型(陈怡璇,2019)。我国学者也开展了不少研究工作。Xu et al.(2015)通过 CALPSO 的观测发现青藏高原春季和冬季烟尘很少,在夏季和秋季,由于季风对南亚烟尘输送的影响,高原南部烟尘发生频率高于北部地区。Zhu et al.(2017)结合化学传输模式和 MODIS、CALIPSO 卫星遥感数据,对发生在春季华南地区一次远距离烟尘传输事件的传输过程及后续对气溶胶光学厚度的影响进行了定量研究。针对我国华南地区农业烟尘事件,Wu et al.(2017)联合地基和多源卫星观测,讨论了农业烟尘事件的时空分布、光学特性、源及传输路径、以及对空气质量的影响。针对西伯利亚地区森林大火,Zhu et al.(2018)结合 MODIS 和 CALIPSO 卫星观测及后向轨迹模拟,确定了俄罗斯森林火灾产生的烟尘影响中国的两条主要输送路径,一条自俄罗斯途径中亚到达中国新疆西南部,另一条由西伯利亚向蒙古国东南地区移动输送到中国东北地区。但值得注意的是,上述研究采用 CALIPSO 第三版数据,存在烟尘层误分类问题,第四版数据对此有了重大改进(Kim et al.,2018)。

5 总结与讨论

本文简单回顾了国际上主要星载激光雷达的发展历程及其主要用途和优势。以运行时间最长、发展最成熟、应用最广泛的星载激光雷达 CALIOP 为例,针对沙尘气溶胶的时空分布特征、远距离传输、分类识别、光学特性、沙尘释放、辐射与气候效应以及其他污染(灰霾和烟尘)等几个方面的研究,总结了我国科学家在利用星载激光雷达开展相关研究的成果,得到以下几点认识:1)由于主动探测和退偏技术的优势,星载激光雷达具有比被动星载传感器更好的气溶胶分类识别能力,能够准确刻画源区、传输区甚至全球沙尘气溶胶的三维时空分布特征;2)结合星载激光雷达观测,更加清晰了东亚沙尘气溶胶的跨太平洋输送、向北极输送以及向青藏高原的输送机理和传输路径,有助于沙尘气溶胶对陆地、大

气、海洋的生物地球化学循环以及碳循环的研究;3)从不同于星载被动传感器的视角,星载激光雷达能够观测粒子的不规则性和消光系数廓线等光学特性,这有助于我们理解沙尘及霾事件期间气溶胶种类及光学特性的变化,解析霾污染的跨区域输送;4)星载激光雷达沙尘气溶胶分类识别方法的改进和发展以及沙尘释放通量的定量估算,进一步拓宽了国际上关于人为沙尘的识别方法,也加深了我们对全球沙尘气溶胶自然和人为源相对贡献的认识;5)沙尘消光系数廓线的引入显著改进了沙尘气溶胶辐射强迫、加热率以及沙尘-云-气候影响的评估,主动和被动遥感相结合、多源观测与模拟相结合成为今后气溶胶-云-气候相互作用研究的主要方向。

此外,科学界对全球环境和气候变化等方面的深入研究,也迫切需求相关仪器设备在探测精度和准确度方面的快速发展。近年来,伴随激光雷达探测技术的迅速发展,星载激光雷达的探测能力及应用领域也越来越广。除本文重点讨论的沙尘气溶胶及其他污染的观测研究之外,CALIPSO 星载激光雷达已经广泛应用于云特性(Nazaryan et al.,2008)、边界层高度(McGrath-Spangler et al.,2013)、海表风速(Hu et al.,2008)、海洋碳储量(Behrenfeld et al.,2013)、极地雪/冰盖测量(Lu et al.,2017)等多个领域的研究。ADM-Aeolus 也将实现从太空对全球大气风场的三维观测(Reitebuch et al.,2009)。世界各航天大国都制定了自己的研究计划,如欧洲航天局和日本宇航局合作在研的云和气溶胶分布及辐射性质探测卫星(EarthCARE)计划于2021年发射,作为CALIPSO 和 CloudSat 卫星的延续和改进(Illingworth et al.,2015)。我国也非常重视星载激光雷达探测卫星的研制与发展,在国家相关研究计划的支持下,重点发展聚焦于大气气溶胶、云、二氧化碳和地形探测体制的高能量星载激光雷达,以及高重频体制的气溶胶探测星载激光雷达。因此,梳理星载激光雷达过去的研究成果,开拓新的应用研究领域,将为未来我国自主研发星载激光雷达的遥感应用奠定重要的基础。

参考文献(References)

- Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al., 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. *Proc IEEE*, 98(5): 735-751.
- Amiridis V, Giannakaki E, Balis D S, et al., 2010. Smoke injection heights from agricultural burning in eastern Europe as seen by CALIPSO[J]. *Atmos Chem Phys*, 10(23): 11567-11576.
- Ansmann A, Tesche M, Seifert P, et al., 2011. Ash and fine-mode particle mass profiles from EARLINET-AERONET observations over central Europe

- after the eruptions of the Eyjafjallajökull volcano in 2010[J]. *J Geophys Res*, 116: D00U02.
- Arimoto R, Ray B J, Lewis N F, et al., 1997. Mass-particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean[J]. *J Geophys Res*, 102(D13): 15867-15874.
- Behrenfeld M J, Hu Y X, Hostetler C A, et al., 2013. Space-based lidar measurements of global ocean carbon stocks[J]. *Geophys Res Lett*, 40(16): 4355-4360.
- Bergametti G, 1998. Mineral aerosols: Renewed interest for climate forcing and tropospheric chemistry studies[J]. *IGAC News Letter*, 11: 13-17.
- Bibi H, Alam K, Chishtie F, et al., 2015. Intercomparison of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical depth retrievals for four locations on the Indo-Gangetic Plains and validation against AERONET data[J]. *Atmos Environ*, 111: 113-126.
- Bory A J M, Biscaye P E, Grousset F E, 2003. Two distinct seasonal Asian source regions for mineral dust deposited in Greenland (NorthGRIP)[J]. *Geophys Res Lett*, 30(4). doi: 10. 1029/2002gl016446.
- Brioude J, Cooper O R, Feingold G, et al., 2009. Effect of biomass burning on marine stratocumulus clouds off the California coast[J]. *Atmos Chem Phys*, 9(22): 8841-8856.
- Cao C X, Zheng S, Singh R P, 2014. Characteristics of aerosol optical properties and meteorological parameters during three major dust events (2005—2010) over Beijing, China[J]. *Atmos Res*, 150: 129-142.
- Che H Z, Wang Y Q, Sun J Y, et al., 2013. Variation of aerosol optical properties over the Taklimakan desert in China[J]. *Aerosol Air Qual Res*, 13(2): 777-785.
- Chen B, Huang J P, Minnis P, et al., 2010. Detection of dust aerosol by combining CALIPSO active lidar and passive IIR measurements[J]. *Atmos Chem Phys*, 10(9): 4241-4251.
- Chen S Y, Huang J P, Li J X, et al., 2017a. Comparison of dust emissions, transport, and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011[J]. *Sci China Earth Sci*, 60(7): 1338-1355.
- Chen S Y, Huang J P, Qian Y, et al., 2017b. An overview of mineral dust modeling over East Asia[J]. *J Meteor Res*, 31(4): 633-653.
- Chen S Y, Yuan T G, Zhang X R, et al., 2018. Dust modeling over East Asia during the summer of 2010 using the WRF-Chem model[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 213: 1-12.
- 陈怡璇, 2019. 泛第三极地区气溶胶光学特性及变化趋势研究[D]. 兰州: 兰州大学. Chen Y X, 2019. Aerosol optical properties and trends over the Pan-Third Pole Region[D]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese).
- Crutzen P J, Andreae M O, 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[J]. *Science*, 250(4988): 1669-1678.
- Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al., 1980. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability[J]. *Science*, 209(4464): 1522-1524.
- Ge J M, Su J, Ackerman T P, et al., 2010. Dust aerosol optical properties retrieval and radiative forcing over northwestern China during the 2008 China-U.S. joint field experiment[J]. *J Geophys Res*, 115: D00K12.
- Ge J M, Huang J P, Xu C P, et al., 2014. Characteristics of Taklimakan dust emission and distribution: a satellite and reanalysis field perspective[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(20): 11772-11783.
- Geng F H, Liu Q, Chen Y H, et al., 2011. Preliminary study of vertical distribution of aerosols during dry haze periods around Shanghai based on CALIPSO[J]. *Procedia Earth Planet Sci*, 2: 217-222.
- Ginoux P, Prospero J M, Gill T E, et al., 2012. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products[J]. *Rev Geophys*, 50(3). doi: 10. 1029/2012rg000388.
- Guo J P, Lou M Y, Miao Y C, et al., 2017. Trans-Pacific transport of dust aerosols from East Asia: Insights gained from multiple observations and modeling[J]. *Environ Pollut*, 230: 1030-1039.
- 韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 等, 2004. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. *中国沙漠*, 24(5): 588-592. Han Y X, Xi X X, Song L C, et al., 2004. Spatio-temporal sand-dust distribution in Qinghai-Tibet Plateau and its climatic significance[J]. *J Desert Res*, 24(5): 588-592. (in Chinese)
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, 1997. Radiative forcing and climate response[J]. *J Geophys Res*, 102(D6): 6831-6864.
- He Y, Yi F, 2015. Dust aerosols detected using a ground-based polarization lidar and CALIPSO over Wuhan (30. 5°N, 114. 4°E), China[J]. *Adv Meteor*, 1-18.
- Hu Y, Stamnes K, Vaughan M, et al., 2008. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements[J]. *Atmos Chem Phys*, 8(13): 3593-3601.
- 华雯丽, 韩颖, 乔瀚洋, 等, 2018. 敦煌沙尘气溶胶质量浓度垂直特征个例分析[J]. *高原气象*, 37(5): 1428-1439. Hua W L, Han Y, Qiao H Y, et al., 2018. Profiling of dust aerosol mass concentration over Dunhuang: case studies[J]. *Plateau Meteor*, 37(5): 1428-1439. (in Chinese).
- Huang J P, Lin B, Minnis P, et al., 2006a. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia[J]. *Geophys Res Lett*, 33(19): L19802.
- Huang J P, Minnis P, Lin B, et al., 2006b. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES[J]. *Geophys Res Lett*, 33(6): L06824.

- Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al., 2007. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau [J]. *Geophys Res Lett*, 34 (18): L18805.
- Huang J P, Minnis P, Chen B, et al., 2008. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. *J Geophys Res*, 113 (D23): D23212.
- Huang J, Fu Q, Su J, et al., 2009. Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints [J]. *Atmos Chem Phys*, 9 (12): 4011-4021.
- Huang J, Minnis P, Yan H, et al., 2010a. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements [J]. *Atmos Chem Phys*, 10 (14): 6863-6872.
- Huang Z W, Huang J P, Bi J R, et al., 2010b. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U.S. joint dust field experiment [J]. *J Geophys Res*, 115: D00K15.
- Huang J P, Wang T H, Wang W C, et al., 2014. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions [J]. *J Geophys Res Atmos*, 119 (19): 11398-11416.
- Huang J P, Liu J J, Chen B, et al., 2015a. Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements [J]. *Atmos Chem Phys*, 15 (20): 11653-11665.
- Huang Z W, Huang J P, Hayasaka T, et al., 2015b. Short-cut transport path for Asian dust directly to the Arctic; a case study [J]. *Environ Res Lett*, 10 (11): 114018.
- Illingworth A J, Barker H W, Beljaars A, et al., 2015. The EarthCARE satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 96 (8): 1311-1332.
- Jia R, Liu Y Z, Chen B, et al., 2015. Source and transportation of summer dust over the Tibetan Plateau [J]. *Atmos Environ*, 123: 210-219.
- Jia R, Liu Y Z, Hua S, et al., 2018. Estimation of the aerosol radiative effect over the Tibetan Plateau based on the latest CALIPSO product [J]. *J Meteor Res*, 32 (5): 707-722.
- Kang L T, Chen S Y, Huang J P, et al., 2017. The spatial and temporal distributions of absorbing aerosols over East Asia [J]. *Remote Sens*, 9 (10): 1050.
- Kar J, Vaughan M, Tackett J, et al., 2018. Swelling of transported smoke from savanna fires over the Southeast Atlantic Ocean [J]. *Remote Sens Environ*, 211: 105-111.
- Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, et al., 2005. Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean [J]. *J Geophys Res*, 110 (D10): D10S12.
- Kim M H, Omar A H, Tackett J L, et al., 2018. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *Atmos Meas Tech*, 11 (11): 6107-6135.
- Kinne S, Poeschel R, 2001. Aerosol radiative forcing for Asian continental outflow [J]. *Atmos Environ*, 35 (30): 5019-5028.
- Koren I, Kaufman Y J, Remer L A, et al., 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation [J]. *Science*, 303 (5662): 1342-1345.
- 李蒙蒙, 黄昕, 李建峰, 等, 2014. 基于 MODIS 地表数据对 2006 年中国北方沙尘排放的估算 [J]. *高原气象*, 33 (6): 1534-1544. Li M M, Huang X, Li J F, et al., 2014. Estimation of dust emissions from northern China in 2006 with MODIS land surface data [J]. *Plateau Meteor*, 33 (6): 1534-1544. (in Chinese).
- Liu Z Y, Vaughan M A, Winker D M, et al., 2004. Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data [J]. *J Geophys Res*, 109 (D15): D15202.
- Liu Z Y, Liu D, Huang J, et al., 2008a. Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations [J]. *Atmos Chem Phys*, 8 (16): 5045-5060.
- Liu D, Wang Z E, Liu Z Y, et al., 2008b. A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements [J]. *J Geophys Res*, 113 (D16): D16214.
- Liu T H, Tsai F, Hsu S C, et al., 2009. Southeastward transport of Asian dust: Source, transport and its contributions to Taiwan [J]. *Atmos Environ*, 43 (2): 458-467.
- Liu J J, Zheng Y F, Li Z Q, et al., 2011. Transport, vertical structure and radiative properties of dust events in Southeast China determined from ground and space sensors [J]. *Atmos Environ*, 45 (35): 6469-6480.
- 刘琼, 耿福海, 陈勇航, 等, 2012. 上海不同强度干霾期间气溶胶垂直分布特征 [J]. *中国环境科学*, 32 (2): 207-213. Liu Q, Geng F H, Chen Y H, et al., 2012. Vertical distribution of aerosols during different intense dry haze periods around Shanghai [J]. *China Environ Sci*, 32 (2): 207-213. (in Chinese).
- Liu J J, Chen B, Huang J P, 2014. Discrimination and validation of clouds and dust aerosol layers over the Sahara desert with combined CALIOP and IIR measurements [J]. *J Meteor Res*, 28 (2): 185-198.
- 刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等, 2015. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析: 以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例 [J]. *中国环境科学*, 35 (3): 641-651. Liu X, Zhu B, Hou X W, et al., 2015. Analysis of haze events based on satellite remote sensing and field observations: a case study.

- y of severe haze pollution over the Yangtze River Delta[J]. *China Environ Sci*, 35(3):641-651. (in Chinese).
- Liu C S, Shen X X, Gao W, 2018. Intercomparison of CALIOP, MODIS, and AERONET aerosol optical depth over China during the past decade[J]. *Int J Remote Sens*, 39(21):7251-7275.
- Liu D, Zhao T L, Boiyi R, et al., 2019. Vertical structures of dust aerosols over East Asia based on CALIPSO retrievals[J]. *Remote Sensing*, 11(6):701.
- Lu X M, Hu Y X, Liu Z Y, et al., 2017. Observations of Arctic snow and sea ice cover from CALIOP lidar measurements[J]. *Remote Sens Environ*, 194:248-263.
- Ma Y Y, Gong W, Wang P C, et al., 2011. New dust aerosol identification method for spaceborne lidar measurements[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 112(2):338-345.
- Ma Y Y, Gong W, Mao F Y, 2015. Transfer learning used to analyze the dynamic evolution of the dust aerosol[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 153:119-130.
- Mao R, Hu Z Y, Zhao C, et al., 2019. The source contributions to the dust over the Tibetan Plateau: a modelling analysis[J]. *Atmos Environ*, 214:116859.
- McGill M J, Yorks J E, Scott V S, et al., 2015. The Cloud-Aerosol Transport System (CATS): a technology demonstration on the International Space Station[C]//Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XV. International Society for Optics and Photonics, 96120A.
- McGrath-Spangler E L, Denning A S, 2013. Global seasonal variations of midday planetary boundary layer depth from CALIPSO space-borne LIDAR[J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(3):1226-1233.
- McMahon B B, 2019. Measuring winds from space: the European Space Agency's Aeolus mission[J]. *Weather*, 74(9):312-315.
- Meloni D, di Sarra A, di Iorio T, et al., 2005. Influence of the vertical profile of Saharan dust on the visible direct radiative forcing[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 93(4):397-413.
- Miller D J, Sun K, Zondlo M A, et al., 2011. Assessing boreal forest fire smoke aerosol impacts on US air quality: A case study using multiple data sets[J]. *J Geophys Res*, 116(D22). doi:10.1029/2011jd016170.
- Nan Y, Wang Y X, 2018. De-coupling interannual variations of vertical dust extinction over the Taklimakan Desert during 2007—2016 using CALIOP[J]. *Sci Total Environ*, 633:608-617.
- Nazaryan H, McCormick M P, Menzel W P, 2008. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data[J]. *J Geophys Res*, 113(D16):D16211.
- Omar A H, Winker D M, Vaughan M A, et al., 2009. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 26(10):1994-2014.
- Poole L R, Winker D M, Pelon J R, et al., 2003. CALIPSO: global aerosol and cloud observations from lidar and passive instruments[C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI. International Society for Optics and Photonics, 4881:419-426.
- Prospero J M, Ginou X P, Torres O, et al., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product[J]. *Rev Geophys*, 40:1002.
- Qi Y L, Ge J M, Huang J P, 2013. Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET[J]. *Chin Sci Bull*, 58(20):2497-2506.
- Qin K, Wu L X, Wong M S, et al., 2016. Trans-boundary aerosol transport during a winter haze episode in China revealed by ground-based Lidar and CALIPSO satellite[J]. *Atmos Environ*, 141:20-29.
- Reitebuch O, Lemmerz C, Nagel E, et al., 2009. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. part I: instrument design and comparison to satellite instrument[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 26(12):2501-2515.
- Ridgwell A J, 2002. Dust in the Earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea[J]. *Philos Trans Royal Soc Lond Ser A: Math Phys Eng Sci*, 360(1801):2905-2924.
- Rodier S, Palm S, Vaughan M, et al., 2016. Laser remote sensing from ISS: CATS cloud and aerosol level 2 data products (heritage edition)[C]//EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 119:04012.
- Rosário N E, Longo K M, Freitas S R, et al., 2013. Modeling the South American regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation[J]. *Atmos Chem Phys*, 13(6):2923-2938.
- 茹建波, 2017. 基于星载激光雷达的东亚地区沙尘气溶胶特性研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- Ru J B, 2017. Dust aerosol properties over East Asia derived from satellite-based lidar[D]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese).
- 茹建波, 王天河, 李积明, 等, 2018. 东亚沙尘源区晴空和云上沙尘气溶胶特征[J]. *中国沙漠*, 38(2):372-383.
- Ru J B, Wang T H, Li J M, et al., 2018. Characteristics of dust aerosol in both clear-sky and above-cloud conditions over East Asia[J]. *J Desert Res*, 38(2):372-383. (in Chinese).
- Sekiguchi M, Nakajima T, Suzuki K, et al., 2003. A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite data sets of aerosol and cloud parameters[J]. *J Geophys Res*, 108(D22):2002JD003359.
- Sekiyama T T, Tanaka T Y, Shimizu A, et al., 2010. Data assimilation of CALIPSO aerosol observations[J]. *Atmos Chem Phys*, 10(1):39-49.
- Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al., 2011. Dust cycle: an emerging core theme in Earth system science[J]. *Aeolian Res*, 2(4):181-204.

- Su J, Huang J P, Fu Q, et al., 2008. Estimation of Asian dust aerosol effect on cloud radiation forcing using Fu-Liou radiative model and CERES measurements[J]. *Atmos Chem Phys*, 8(10): 2763-2771.
- Sun T Z, Che H Z, Qi B, et al., 2018. Aerosol optical characteristics and their vertical distributions under enhanced haze pollution events: effect of the regional transport of different aerosol types over eastern China[J]. *Atmos Chem Phys*, 18(4): 2949-2971.
- Uno I, Eguchi K, Yumimoto K, et al., 2009. Asian dust transported one full circuit around the globe[J]. *Nature Geosci*, 2(8): 557-560.
- 王宏, 石广玉, 王标, 等, 2007. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及北太平洋地区大气辐射加热的影响[J]. *大气科学*, 31(3): 515-526. Wang H, Shi G Y, Wang B, et al., 2007. The impacts of dust aerosol from deserts of China on the radiative heating rate over desert sources and the North Pacific region[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(3): 515-526. (in Chinese).
- Wang T H, Huang J P, 2009. A method for estimating optical properties of dusty cloud[J]. *Chin Opt Lett*, 7(5): 0368.
- Wang W C, Huang J P, Minnis P, et al., 2010. Dusty cloud properties and radiative forcing over dust source and downwind regions derived from A-Train data during the Pacific Dust Experiment[J]. *J Geophys Res*, 115: D00H35.
- Wang W C, Huang J P, Zhou T, et al., 2013. Estimation of radiative effect of a heavy dust storm over northwest China using Fu-Liou model and ground measurements[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 122: 114-126.
- Westphal D L, Toon O B, 1991. Simulations of microphysical, radiative, and dynamical processes in a continental-scale forest fire smoke plume[J]. *J Geophys Res*, 96(D12): 22379.
- Winker D M, Couch R H, McCormick M P, 1996. An overview of LITE: NASA's Lidar In-space Technology Experiment[J]. *Proc IEEE*, 84(2): 164-180.
- Winker D M, Pelon J R, McCormick M P, 2003. CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[C]// *Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III. International Society for Optics and Photonics*, 4893: 1-11.
- Wu Y H, Han Y, Voulgarakis A, et al., 2017. An agricultural biomass burning episode in eastern China: transport, optical properties, and impacts on regional air quality[J]. *J Geophys Res Atmos*, 122(4): 2304-2324.
- Xia X G, Chen H B, Goloub P, et al., 2013. Climatological aspects of aerosol optical properties in North China Plain based on ground and satellite remote-sensing data[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 127: 12-23.
- Xin J Y, Du W P, Wang Y S, et al., 2010. Aerosol optical properties affected by a strong dust storm over central and northern China[J]. *Adv Atmos Sci*, 27(3): 562-574.
- 徐成鹏, 葛颀铭, 黄建平, 等, 2014. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的中国沙尘气溶胶观测[J]. *中国沙漠*, 34(5): 1353-1362. Xu C P, Ge J M, Huang J P, et al., 2014. Observations of dust aerosol over China based on CALIPSO spaceborne lidar[J]. *J Desert Res*, 34(5): 1353-1362. (in Chinese).
- Xu C, Ma Y M, You C, et al., 2015. The regional distribution characteristics of aerosol optical depth over the Tibetan Plateau[J]. *Atmos Chem Phys*, 15(20): 12065-12078.
- Xu H, Guo J P, Wang Y, et al., 2017. Warming effect of dust aerosols modulated by overlapping clouds below[J]. *Atmos Environ*, 166: 393-402.
- Xu C, Ma Y M, Yang K, et al., 2018. Tibetan Plateau impacts on global dust transport in the upper troposphere[J]. *J Climate*, 31(12): 4745-4756.
- Xu J, Jia J R, Han F, et al., 2019. Trans-Pacific aerosol vertical structure revealed by spaceborne lidar CALIOP[J]. *Atmos Environ*, 201: 92-100.
- 颜娇珑, 张武, 单云鹏, 等, 2016. 西北东部霾的时空特征与天气特征研究[J]. *高原气象*, 35(4): 1073-1086. Yan J L, Zhang W, Shan Y P, et al., 2016. Spatio-temporal distribution of aerosol and weather characteristics during haze over the Eastern northwest China[J]. *Plateau Meteor*, 35(4): 1073-1086. (in Chinese).
- Yi B Q, Yang P, Baum B A, 2014. Impact of pollution on the optical properties of trans-Pacific East Asian dust from satellite and ground-based measurements[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(9): 5397-5409.
- Yu H B, Chin M, Yuan T L, et al., 2015a. The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations[J]. *Geophys Res Lett*, 42(6): 1984-1991.
- Yu H B, Chin M, Bian H S, et al., 2015b. Quantification of trans-Atlantic dust transport from seven-year (2007—2013) record of CALIPSO lidar measurements[J]. *Remote Sens Environ*, 159: 232-249.
- Zhang H, Ma J H, Zheng Y F, 2010. Modeling study of the global distribution of radiative forcing by dust aerosol[J]. *J Meteor Res*, 24(5): 558-570.
- 张鹏, 王春姣, 陈林, 等, 2018. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J]. *气象*, 44(6): 725-736. Zhang P, Wang C J, Chen L, et al., 2018. Current status of satellite-based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. *Meteor Mon*, 44(6): 725-736. (in Chinese).
- Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al., 2003. Modeled size-segregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE-Asia 2001: implications for trans-Pacific transport[J]. *J Geophys Res*, 108(D23): 8665.
- Zhu J, Xia X G, Wang J, et al., 2017. Impact of Southeast Asian smoke on aerosol properties in Southwest China: first comparison of model simulations with satellite and ground observations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 122(7): 3904-3919.
- Zhu Q Z, Liu Y Z, Jia R, et al., 2018. A numerical simulation study on the impact of smoke aerosols from Russian forest fires on the air pollution over Asia[J]. *Atmos Environ*, 182: 263-274.
- Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al., 2002. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land[J]. *J Geodyn*, 34(3/4): 405-445.

Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China

WANG Tianhe, SUN Mengxian, HUANG Jianping

Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

As a new active remote sensing detection tool, lidar is widely used in many fields, such as atmospheric remote sensing, environmental monitoring and so on. With the advantages of large detection range, high spatial and temporal resolutions and continuous profile data, the spaceborne lidar has become a powerful tool for observing and studying aerosol and cloud properties at global and regional scales. This paper summarized the progresses of dust aerosols and pollution made by Chinese scientists since the launch of CALIPSO satellite in 2006. The results mainly focused on the following aspects: the spatial and temporal distributions and long-distance transmission of dust aerosols, the classification of natural and anthropogenic dust, the optical properties and emissions of dust aerosols, the dust-radiation-climate effects, as well as the haze and smoke characteristics. The review of the above research results will help us to have a deep understanding of the research level of dust and pollution in China by using the spaceborne lidar, and also will lay a research foundation for exploring the remote sensing application field of satellite-borne lidar independently researched and developed by China in the future.

spaceborne lidar ; dust aerosol ; haze ; smoke

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20191120007

(责任编辑:张福颖)