

1 2002 年至 2022 年北京大气气溶胶光学特性的地基遥感连续
2 观测

3 陈洪滨^{1*} 施红蓉⁴ 范学花^{1,2,3} 夏祥鳌¹
4 1 中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京
5 2 中国气象局大气探测重点开放实验室, 北京
6 3 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京
7 4 中国科学院大气物理研究所 云降水物理与强风暴重点实验室, 北京

8 **摘要** 长时间序列的气溶胶光学特性观测资料是定量研究气溶胶辐射和气候效
9 应的重要基础, 也是空气质量和环境健康研究重要数据来源。本文系统评述了
10 全球 AERONET 观测网, 并介绍了我国最长观测时间的 AEROENT 北京站
11 (IAP) 发展状况和一些研究成果; 使用北京站长达 20 余年的观测数据, 针对
12 AERONET 光学辐射产品的多时间尺度变化特征进行系统分析, 讨论了长期观
13 测的重要性和迫切性。

14 **关键词** 气溶胶 光学特性 AERONET 北京站 气候效应

15 **文章编号** 1006-9895.2309.23320 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

16 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23320

17 **Long-term ground based remote sensing of aerosol optical properties**
18 **in Beijing**

19 CHEN Hongbin^{1*}, SHI Hongrong⁴, FAN Xuehua^{1,2,3}, XIA Xiang'ao¹

20 1. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of
21 Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

22 2. Key Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Beijing,
23 China

24 3. Research Center on Meteorological Observation Engineering Technology, China

* 收稿日期 2023-06-08; 网络预处版日期

作者简介 陈洪滨, 男, 1960 年出生, 研究员, 主要从事大气探测与大气遥感研究。E-mail:
chb@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 (42075079), 中国气象局大气探测重点开放实验室联合基金开放课
题 (U2021Z03)

Funded by the National Science Foundation of China (NSFC) (42075079) and the Opening Foundation of
Key Laboratory of Atmospheric Sounding, the China Meteorological Administration and the CMA Research
Center on Meteorological Observation Engineering Technology (U2021Z03)

4. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Long-term observations of aerosol optical properties are critical for quantifying aerosol radiative forcing and climate effects, as well as for studying air quality and environmental health. This paper provides a systematic review of the global AERONET network and introduces the development and research achievements of the AEROENT Beijing station, which has the longest observation time in China. Based on more than twenty years of observation data from the Beijing station, the multi-time scale variability of optical radiation products is analyzed. The importance and urgency of long-term observations are also discussed.

Key words: aerosol, optical property, AERONET Beijing site, climate effect

1 前言

如果在地球系统科学中选择一些热词来表征多年来备受关注的热点问题，大气气溶胶（又称悬浮颗粒物）入选应该毫无悬念。人类活动排放的大量气溶胶前体物和一次性气溶胶在地球系统中与多个重要过程密切相关（IPCC，2021）。气溶胶自身是重要的大气污染成分，在我国许多城市和地区仍是首要污染物，其人体健康效应一直是环境健康领域的热点问题（例如：Shiraiwa 等，2017；Liu，2020）。此外，气溶胶通过参与大气化学过程和辐射过程，也会影响其他污染气体成分，如目前我国广受关注的臭氧污染问题（Liu 等，2019）。

气溶胶通过影响入射太阳辐射（总量、直接和散射分配以及光谱分布等）影响生态系统光合作用，因此气溶胶时空分布与陆地生态系统碳过程相关，气溶胶影响农作物产量也一度成为热点（Chameides 等，1999；Witkowska 等，2016）；某些气溶胶（例如自然沙尘或人工的）在海洋中的沉降可起到“施肥”作用，从而影响某些海域的生物量，进而造成 DMS 和 CO₂ 通量的变化（Tan 等，2011；Zhang 等，2021；Tandule 等，2022）。太阳能是最重要的清洁能源，而影响太阳能资源以及在太阳能短临预报中如何考虑气溶胶（特别是沙尘气溶胶）的直接辐射效应，以及如何定量评估气溶胶沉积在太阳能板上产生的间接效应（影响太阳能板的吸收和温度），都需要准确的气溶胶监测与预报信息

54 (Saidan 等, 2016; Tripathi 等, 2022; Yang 等, 2022; Zhang 等, 2023)。

55 气溶胶通过直接辐射效应影响气候系统辐射收支以及太阳辐射在大气顶、
56 地表和大气中的分配, 都将对大气热动力结构和过程产生影响。更关键的是,
57 作为云凝结核或冰核, 气溶胶参与云和降水的微物理过程, 从而间接对水循环
58 以及气候变化产生十分重要也是十分不确定的影响 (Rosenfeld 等, 2008,
59 2014; Han 等, 2022; Li 等, 2022; Masrour 等, 2023)。在应对全球增温问题
60 的可能措施中, 国际上提出的地球科学工程中多项太阳辐射管控措施 (或构
61 想) 都与气溶胶效应密切相关, 如在平流层播撒细小的硫酸盐气溶胶 (Tang
62 等, 2016; 曹龙, 2019), 在海洋层云区域通过增加云凝结核增加云反照率
63 (Aswathy 等, 2015) 等, 数值模拟研究给出了冷却效应的定量估计。

64 深入研究和认识上述与气溶胶密切相关的过程的一个重要基础是获取高质
65 量的气溶胶观测数据, 由于在这些过程中需要充分考虑气溶胶浓度、成分、粒
66 径甚至形态, 加上气溶胶寿命较短, 在大气中表现出极为复杂的时空变化, 因
67 此采用合适的观测手段获取气溶胶特性参数十分重要, 这些观测方法不仅需要
68 满足对气溶胶多个特性参数的高质量测量 (或反演), 而且需要有足够能力为这
69 些特性参数多时空尺度变化规律提供观测证据。

70 气溶胶测量大体可以分为原位 (in situ) 测量和遥感测量。原位测量是通过
71 采样或者将探测仪器直接放入待测环境获得气溶胶特性参数, 如采用振荡天平
72 或 beta 射线测量颗粒物浓度, 采用黑碳仪和浊度计对气溶胶吸收和散射的测
73 量, 采用空气动力学或光散射原理测量气溶胶粒径谱, 采用吸湿性串联差分迁
74 移率分析仪对气溶胶吸湿性测量等。原位测量一般仅提供点的测量, 对于气溶
75 胶柱总量特性参数测量只能依靠遥感手段。遥感可分为被动遥感和主动遥感,
76 被动遥感主要包括地基遥感和飞机及卫星遥感, 地基遥感如本文将重点介绍的
77 地基太阳光度计遥感是反演获得气溶胶柱特性参数的最可靠手段, 通常被用于
78 验证卫星遥感和模式产品, 也被应用于主动遥感中的约束条件。卫星遥感由于
79 受到观测信息限制, 在高气溶胶浓度识别, 陆地上地表-大气信号分离等方面都
80 存在较大难度, 因此卫星遥感提供的气溶胶产品相对比较单一, 也存在较大不
81 确定度, 需要地基遥感提供关键气溶胶参数如吸收特性的气候学特征, 也需要
82 通过对比验证提升卫星遥感反演算法 (陈洪滨等, 2018)。激光雷达是获取气溶

胶消光垂直廓线的有效手段，如早期传统的 Mie 散射激光雷达（杨昭和孙东松，2004；谢晨波等，2006），或日趋成熟的拉曼激光雷达（张金业和龚威（2010）或者高光谱分辨率激光雷达（HSRL）（张冰和刘智深，2007；宋小全等，2008）。尽管后两者在雷达方程上无需假设激光雷达比（气溶胶消光系数与后向散射系数之比），提升了气溶胶消光系数廓线反演精度，但激光雷达由于存在近端盲区和远端消光影响，因此激光雷达整层气溶胶光学厚度 AOD（即气溶胶消光垂直积分量）的探测精度也不及太阳光度计。

作为最重要的遥感手段，1990 年代以来，太阳光度计长期测量取得了长足发展，其中最具代表性的成就是由世界各国科研机构 and 大学联合组建的全球气溶胶自动监测网络（AERONET），从 1993 年的仅两个台站发展到现在超过 600 个站点（Holben et al., 1998; Xia et al., 2021）。AERONET 早期由美国宇航局（NASA）和法国里尔科学技术大学主导建立，随后逐渐发展成为学术共同体自由参与，完全共享的全球性气溶胶监测网络（Goloub et al., 2008）。AERONET 的成果得益于以下机制：1）采用统一的太阳光度计，即由法国 CIMEL 公司生产的全自动太阳光度计（CE318 型）；2）采用统一的数据处理算法和质量控制方法；AERONET 气溶胶参数反演算法大体分为两个阶段，早期采用日本学者开发的 SKYRAD 反演算法，该算法主要针对气溶胶尺度谱的反演，2000 年美国宇航局在该算法基础上，增加了气溶胶折射率的反演能力；3）数据共享，所有 AERONET 数据在遵循相关数据政策基础上完全公开共享（包括观测原始数据和各种反演产品）。中国于 2001 年建立首个 AERONET 站，近 20 余年也获得了较大发展（范学花等，2013；Che et al., 2015; Xia et al., 2021）。

本文将系统评述 AERONET 发展现状，并结合我国最长的 AERONET 站（北京站）长达 20 余年的观测数据，针对 AERONET 光学辐射产品的多时间尺度变化特征开展系统分析，讨论长期观测的重要性和迫切性。

2 太阳光度计遥感测量基本原理和数据

太阳辐射从大气层顶达到地面，中间受到大气分子与气溶胶粒子的散射和吸收作用，其辐射强度和极化状态都要发生变化。地基太阳光度计在多个波段测量太阳辐射的这些变化就可以反演得到气溶胶光学特性参数。

太阳光度计集成了光电二极管、滤光片和太阳跟踪与天空扫描等技术手段，可以测量不同波长不同角度的散射辐射信号，也可直接对准太阳测量太阳光谱消光信号，这些测量数据中包含了丰富的气溶胶光学信息，连接测量信号与气溶胶参数的基础是粒子散射（Mie 散射）和辐射传输方程，因此几乎所有遥感的正问题可用如下公式表达：

$$y = F(x, b) + \varepsilon$$

式中 y 是测量信息， x 为待测大气参数，本文为气溶胶特性参数，主要包括气溶胶光学厚度、粒径谱、折射指数； F 表示辐射传输模式， b 为除气溶胶之外的其他影响参数/因子， ε 为观测误差和模式误差。显然，遥感面对的是反问题，即如何从观测的 y 中，在充分考虑观测误差和模式误差基础上获得最优的气溶胶参数 x 。自 1970 年代以来，依托数据中关于反问题的发展，结合气溶胶遥感的特殊性，大气遥感学界建立了较为完善的太阳光度计气溶胶反演算法，几个主要的里程碑工作包括 1980 年代在物理和数值试验方法论证了小角散射在粒子谱反演中的独特优势（吕达仁等，1981）；1990 年代通过引入尺度谱平滑和折射指数随波长的平滑等约束条件（或称先验信息），较好解决了非适定问题求解中如何获取具有明确物理意义且稳定的最优解（邱金桓等，1997）；2000 年代充分考虑了气溶胶非球型散射问题，较好解决了沙尘气溶胶（粗模态）尺度谱反演系统偏高等问题，形成了 AEROENT 的业务反演算法（Dubovik 等，2000）。

AERONET 站点均采用法国 CIMEL 公司生成的 CE318 型全自动太阳-天空辐射计（太阳光度计），测量太阳光谱直接辐射（大气消光）和天空散射辐射。随着探测技术的发展，CE318 型太阳光度计从早期的 4 型（模拟信号）和 5 型（数字信号），发展到现在的 CE318-T 型太阳-天空-月光辐射计，相关的技术细节可参考文献（Holben et al., 1998; Goloub et al., 2008）。CE-318 太阳光度计具有按照预定观测流程自动测量多个波长的太阳直接辐射和散射辐射的功能，采用的波长包括 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020, 1640, 2130nm。早期主要是 1020 及以下波长，除 940nm 测量大气柱水汽总量之外，其他都是气溶胶遥感波段，太阳直接辐射测量频次依赖于太阳高度角。早期大体 15 分钟测量一次，每个测量单元在一分钟内完成，直接辐射测量三组，三组测量信号

的极大极小差用于云检测。后期太阳光度计直接辐射测量时间分辨率提升到 3 分钟，测量的大气路径（大气质量因子）也从早期 5 以内延展到 7 以内，因此可以获得更多早晚时段 AOD 测量数据。在早晚太阳高度角较低时测量多组天空散射辐射，主要测量方式是地平纬圈扫描（仪器以当时太阳高度角为轴沿不同方位角 360° 扫描），测量的散射角范围从 3°（aureole，前向散射）到 150°（后向散射），此外也包括主平面扫描（仪器固定方位角沿不同高度角 180° 扫描）。

太阳光度计定标是获取气溶胶参数的最关键环节之一，AERONET 采用 Langley 外场定标方式对太阳直接辐射测量进行定标。考虑到 Langley 定标的假设是在一定太阳高度角范围内大气层洁净且稳定不变，这一苛刻要求一般只能在海拔较高的岛上或山顶上得到满足，AERONET 在美国夏威夷 Mauna Loa 和西班牙 Izana 岛上建立了太阳光度计定标场，主要对 AERONET 主仪器（Master）或参考仪器（Reference）进行定标。中国气象局在瓦里关也建立了中国气溶胶研究网络（CARSONET）的太阳光度计定标站（Che et al., 2011）。所谓参考仪器是指 CIMEL 公司选择的具有最稳定性能的太阳光度计，台站用的太阳光度计定标采用传递定标方式，即通过和主仪器平行比对测量方式进行定标，交叉定标精度达到 1%，对于太阳散射辐射测量的定标，主要采用积分球标准灯进行定标，定标精度约 3%（Dubovik 等，2000）。

基于太阳直接辐射测量，采用 Beer 定律公式便可计算各波段大气光学厚度，从中扣除大气分子散射、臭氧吸收和二氧化氮吸收，便可获得气溶胶光学厚度（AOD），最新版本（Version3）中臭氧和二氧化氮浓度均来自实时卫星遥感数据。AERONET 反演算法中输入量包括 4 波段 AOD 和 28 个角度的太阳散射辐射，还包括来自卫星测量的 4 波段地表反射率，反演的气溶胶参数包括气溶胶尺度谱和 4 波段折射指数，并由此计算得到其他重要气溶胶参数，如气溶胶单次散射反照率（SSA）、不对称因子和气溶胶谱参数等，此外基于辐射传输模式也计算得到了地表和大气顶太阳辐射用于分析气溶胶直接辐射效应。AERONET 数据包括三个级别产品（表 1），分别是 L1.0（未作任何质量控制的气溶胶产品），L1.5（通过自动云检测算法之后的产品），L2.0（通过自动云检测和人工质量控制之后的产品，最新版本采用自动质量控制方法）。AERONET

数据中包括三大类别，分别是：1）基于太阳直接辐射测量获得的各波段气溶胶光学厚度 AOD 和基于 940nm 的水汽总量（cm）；2）基于 380-870nm 波段 AOD 的光谱分布信息估算气溶胶细模态（粒径小于 600 nm）和粗模态 AOD 产品；3）基于天空辐射测量，加上 AOD 反演得到的气溶胶物理辐射特性参数，如气溶胶尺度谱（从 0.05 到 15 μ m，共 22 个粒径的体积表面柱浓度），气溶胶折射指数等。2019 年，AERONET 发布了最新的气溶胶产品（V3）（Sinyuk et al., 2020），相较于之前 V2 版，V3 在仪器定标、云检测、观测异常值检测等方面都有了更加完善的处理方式，特别是自动数据质量措施取代繁重的人工质控，使得 AERONET 高质量观测数据的实时性得到了很好保证，在反演算法方面也有一些新发展，包括辐射传输模式首次采用了全矢量辐射传输算法、新增了二氧化氮和水汽吸收并考虑多种大气成分廓线的信息、采用了双向反射分布函数（BRDF）卫星遥感产品、更新了大气顶太阳光谱辐射值并增加了光谱辐射测量的温度订正。AERONET 所有数据都重新进行了处理。

表 1 AERONET 气溶胶及相关产品一览表

Table 1 Summary of AERONET products for atmospheric aerosols and relevant parameters

气溶胶及有关参数 (中英文全称和符号/缩写)	定义	注释
气溶胶光学厚度 Aerosol Optical Depth (AOD 或 τ)	$\tau = \int_{z_0}^{z_{TOA}} \beta_{ext} dz$	从地面 z_0 至大气层顶气溶胶消光积分量；不确定度<0.02
Angstrom 指数 440-865nm Angstrom Exponent (α 或 AE)	$\alpha_{440_865} = -\frac{\ln(\frac{\tau_{440}}{\tau_{865}})}{\ln(\frac{440}{865})}$	表征 AOD 随波长的变化率
SSA Single Scattering Albedo	$\omega_0 = \frac{\sigma_{sca}}{\sigma_{sca} + \sigma_{abs}}$	表征气溶胶消光中散射所占的比例；

单次散射反照率	σ_{scd} 是气溶胶粒子的散射系数, σ_{abs} 是气溶胶粒子的吸收系数	不确定度<0.03
尺度谱参数: 粗、细模态 总的体积浓度 C_v ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) 体积中值半径 r_v 标准差 σ 和有效半径 r_{eff}	$C_v = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r,$ $\ln r_v = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \ln r \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r},$ $\sigma_v = \sqrt{\frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} (\ln r - \ln r_v)^2 \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}}.$ $r_{eff} = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^3 \frac{dN(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \frac{dN(r)}{d \ln r} d \ln r}$	尺度谱一般用多个伽马谱卷积表示; 0.439~0.992 μm 尺度范围内体积浓度最小值处作为粗细模态的分界点
复折射指数实部和虚部 Real and imaginary parts of complex refractive index	$n(\lambda) - k(\lambda)i$	$n(\lambda)$ 是实部, 反映粒子的散射能力, $k(\lambda)$ 是虚部, 反映粒子的吸收能力
水汽总量 Precipitable Water Vapor PWV	$PWV = \frac{1}{\rho g} \int_0^{p_0} \mu(p) dp$ ρ 是液态水密度, g 是重力加速度, $\mu(p)$ 是水汽混合比, p 表示气压。	大气柱水汽积分量; 不确定度 <0.1cm

气溶胶直接辐射强迫 Aerosol direct radiative forcing ADRF	$\Delta F_{T0A} = F_{T0A}^{\uparrow 0} - F_{T0A}^{\uparrow}$ $\Delta F_{BOA} = F_{BOA}^{\downarrow} - F_{BOA}^{\downarrow 0}$	计算导出量； 大气层顶和底； 不确定度<0.2Wm ⁻²
--	---	---

186

187 3 北京 AERONET 站

188 2001 年春季国际全球大气化学计划（IGAC）组织亚洲气溶胶特性实验
189 （ACE-Asia），作为该实验的重要组成部分，中国北方（北京、河北香河及内
190 蒙古桑根达来三地）首次建立了由 3 个 CE-318 太阳光度计组成的气溶胶监测网
191 并加入 AERONET，开展了为期三个月的短期观测实验。2002 年 4 月，大气物
192 理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室（LAGEO）和法国里尔大学大气
193 光学实验室（LOA）合作，在北京大气物理研究所楼顶（39.977N，116.381E）
194 建立了国内第一个长期 AERONET 站，连续观测至今。北京站是我国观测时间
195 最长的 AERONET 站，迄今积累了 20 余年观测数据。这些数据被广泛应用于认
196 识北京地区气溶胶特性的多时间尺度变化特征（例如：Xia et al., 2006; Eck et al.,
197 2012; Xia et al., 2021; Dong et al., 2023）；给出东亚发展国家城市气溶胶类型气
198 溶胶参数的气候学特征，修正了卫星遥感算法中主要基于欧美等国城市地区观
199 测建立的城市气溶胶模型，并广泛应用于国际和国内气溶胶卫星遥感产品验
200 证；作为主要验证数据提升大气化学模式 PM 模拟能力；也作为重要基础数据
201 应用于气溶胶-辐射-云相互作用研究。更为重要的是这套我国唯一的气溶胶特
202 性数据集见证了近 20 年中多次因重大活动而临时采取的短期大气环境调控措施
203 和 2013 年以来我国严格的环境管控措施对大气气溶胶的影响。

204 近十多年来由于气溶胶气候与环境效应等研究的需求，北京地区陆续建立
205 了多个 CE-318 太阳光度计观测站，其中有 3 个加入了 AERONET 观测网（Che
206 et al., 2015; Li et al., 2018），分别是中科院空天信息创新研究院位于大屯路 20 号
207 的观测站（40.005N，116.379E），观测时长 2010 年 1 月至今；中国气象局测站
208 （39.933N，116.317E），观测时长 2012 年 8 月至今；北京大学测站
209 （39.992N，116.310E），观测时长 2016 年 6 月至今。这些高质量的气溶胶光学

特性参数资料将在北京地区气溶胶时空演变特征及其气候环境效应深入研究以及有关数值模拟和卫星遥感反演产品验证与改进等方向发挥更大的作用。

4 北京 AERONET 站 20 余年数据应用分析

本节介绍基于北京 AERONET 观测数据取得的相关研究成果，并利用 2002-2022 年北京 AERONET 气溶胶特性数据，详细分析多时间尺度气溶胶特性的变化特征，重点关注环境管控措施对气溶胶特性的可能影响，特别是 2013 年以来大气环境管控气溶胶光学特性的变化。

图 1 和图 2 回顾总结了二十多年北京 AERONET 数据使用情况。AERONET 北京站提供的气溶胶测量数据和产品，受到了国内外许多研究机构和科学家的广泛关注和使用（图 1）。除了中国，美国、法国、英国、德国、日本等国家和地区的研究机构和科学家也是 AERONET 北京站数据的使用者，通过开展气溶胶光学性质、空气质量、气候变化等相关领域的研究和探索，促进了科技工作的国际合作、交流和进展。

图 2（a）给出了从 2002 年以来利用北京 AERONET 数据发表的论文情况，截至本论文撰写时，可检索统计的发表论文有 389 篇，整体趋势呈逐年增加趋势。同时看出 2017 年之后发表北京 AERONET 论文数量开始缓慢下降，这从论文发表的数量侧面反应了 2013 年我国大气十条污染管控治理以来，颗粒物污染问题有显著改善。

图 2（b）展示了北京 AERONET 数据在五个主要领域的研究应用分布。涉及 AREONET 北京站数据的论文主要内容可以分为以下几类：1. 气溶胶特性研究，包括气溶胶粒径分布、光学性质、化学成分等。2. 气溶胶气候变化研究，探讨气溶胶的辐射效应以及对气候变化的影响。3. 空气质量研究，气溶胶光学特性数据用于表征北京及其周边地区的空气质量状况，如用作 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度、沙尘、雾霾等的指标。4. 卫星遥感及模式模型验证评估，二十余年的 AREONET 北京站气溶胶数据，为卫星遥感算法及大气化学模型的准确性评估提供了可靠的地基观测数据。5. 其他应用，包括与气溶胶相关的健康、生态以及太阳能新能源等方面研究，这些研究对于推动空气质量治理、清洁能源发展和实现低碳经济等有一定的贡献。

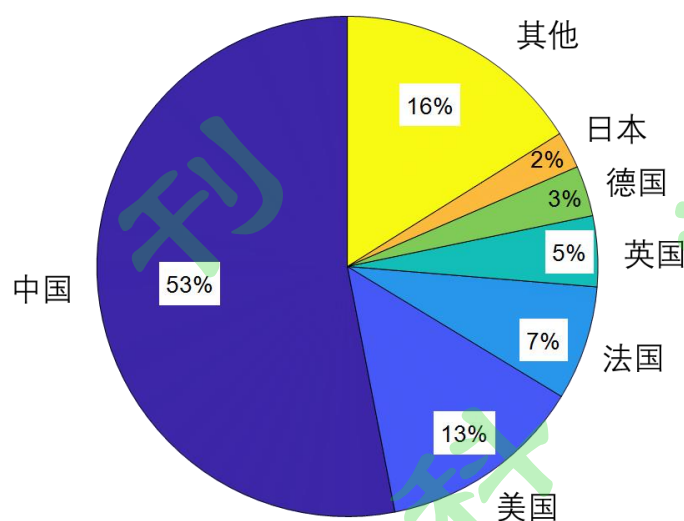


图 1. 使用北京 AERONET 数据的地区分布。

Figure 1: Distribution of regions using Beijing AERONET data

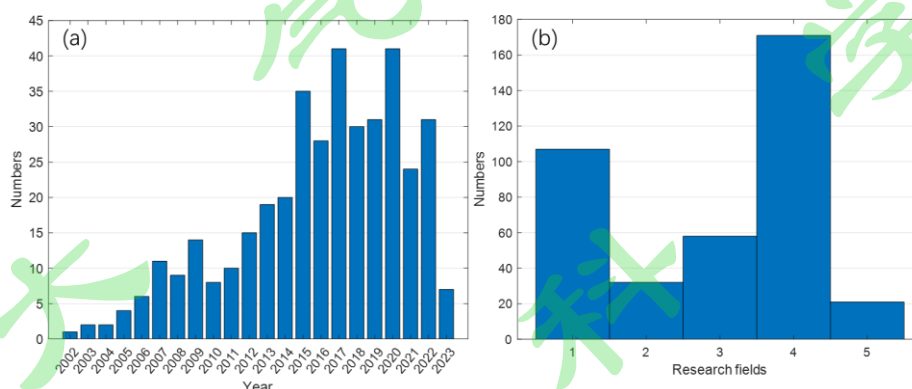


图 2. (a) 使用北京 AERONET 数据发表论文时间序列。(b) 研究应用领域：1.气溶胶特性研究，2.气溶胶—辐射及气候效应，3. 空气质量应用研究，4. 卫星/模型验证工作，5. 其他应用。

Figure 2. (a) Time series of papers published using Beijing AERONET data. (b) Research application areas: 1. aerosol characterisation studies, 2. aerosol-radiation and climate effects, 3. air quality application studies, 4. satellite/model validation work, 5. other applications.

5 北京 20 年来气溶胶光学特性的变化

图 3 给出了北京 AERONET 站 2001 年 3 月至 2023 年 4 月共 226 月 AOD 月距平 (a) 时间序列，图中标出的年月显示的是 AOD 月距平高于 97.5%分位或

者低于 2.5%分位。由图可见，北京 AOD 年际变化很大，特别是春夏季，2003 年 5 月 AOD 月距平甚至超过 1.0。另一显著特点是 2014 年以来北京绝大部分月份 AOD 距平为负，表明华北的大气环境管控措施显著减少了气溶胶含量，提升了空气质量。图 3（b）给出的是逐月 AOD 的 97.5%分位值减去 2.5%分位值之差的时间序列，2014 年以来 AOD（500 nm）月变动范围也显著下降，这主要是因为 2014 年后高 AOD 值出现频率下降。

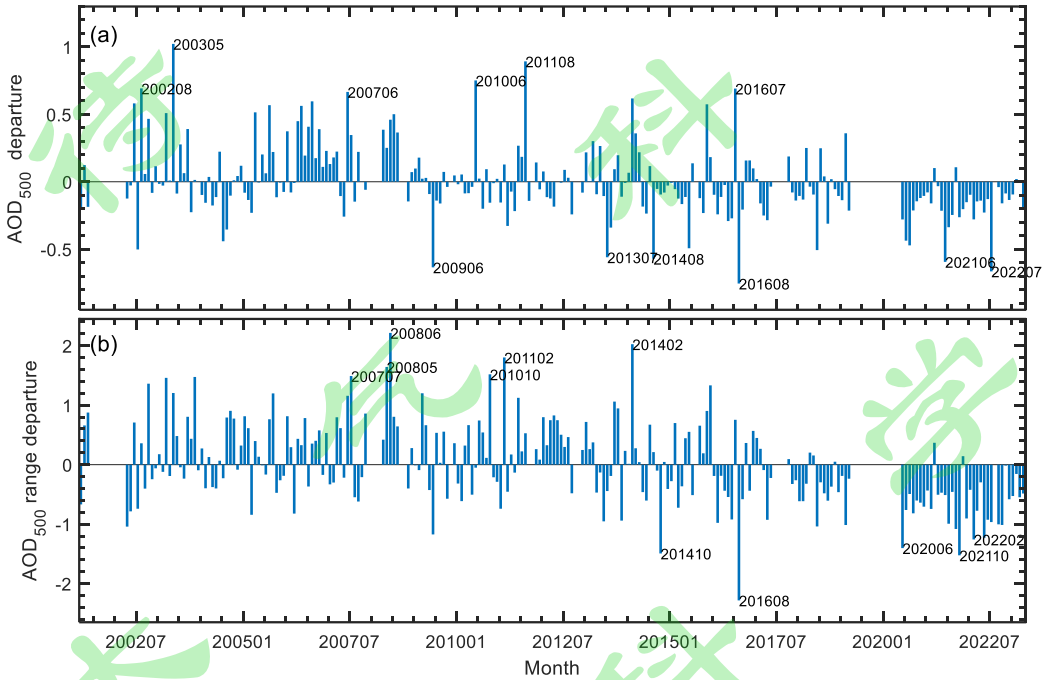


图 3. 北京 AERONET 站 AOD 月距平 (a) 和逐月 AOD 的 97.5%分位值与 2.5%分位值之差 (b) 的时间序列 (2001 年 3 月~2023 年 4 月)

Figure 3. Time series of anomaly monthly AOD (a) and the difference between the 97.5% and the 2.5% of anomaly monthly AOD (b) at the AERONET Beijing (March 2001-April 2023)

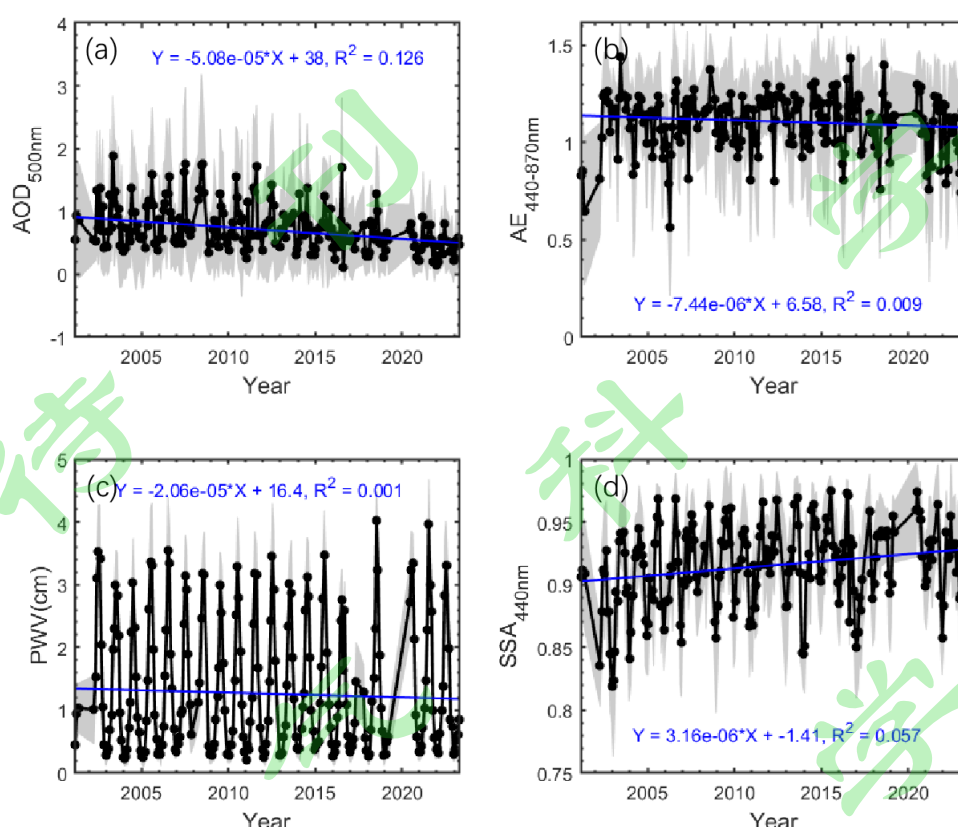


图 4. 北京 AERONET 站 2001~2022 年月均 AOD (a)、AE (b)、PWV (c)、SSA (d) 年际变化趋势

Figure 4. Inter-annual trend of monthly average AOD (a), AE (b), PWV (c), SSA (d) from 2001 to 2022 at AERONET Beijing.

图 4 给出了北京 AERONET 站 2001-2022 年月均 AOD、AE、PWV 和 SSA 年际变化趋势统计结果。北京地区的 AOD 呈现逐年下降的趋势，伴随 SSA 上升趋势，而 AE 和 PWV 的逐年变化趋势不明显。SSA 上升说明颗粒物散射能力增强，在 AOD 下降的情形下，SSA 上升说明，颗粒物的组分发生了变化，气溶胶粒子的吸收性减弱。

图 5 给出 2001-2022 (a)、2001-2013 年和 2014-2022 年 (b) 三个时间段 AOD 多年月平均统计结果，可见北京地区 AOD 季节变化明显，前后两个时间段 AOD 季节变化特征没有明显变化，但 2014-2022 年 AOD 的均值均较前期有明显下降（三月份除外），下降最明显的月份出现在 6 月和 8 月。另一个显著特点是 2014-2022 年 AOD 月变动范围显著下降，这一现象在 2 月和 5 月表现最为

明显。图 6 给出 2001-2022 (a)、2001-2013 年和 2014-2022 年 (b) 三个时间段 AE 多年月平均统计结果, 北京地区气溶胶受春季北方沙尘过程的影响, 气溶胶粒子尺度偏大, 对应 AE 值在春季最小 (~ 1.0); 夏秋季气溶胶中春季沙尘的影响减小, AE 值最大 (~ 1.2); 冬季次之 (~ 1.1)。这个变化趋势与气溶胶细模态比 FMF (图 9) 的季节变化是一致的, 即春季 FMF 最小 (< 0.8); 夏秋季 FMF 最大 (> 0.85), 7 月 FMF 达到 0.95; 冬季的 FMF 约为 0.84。此外, 春季受沙尘天气过程的影响, AE 和 FMF 的变化范围也是最大的。大气国十条实施前后的两个时间段 AE 和 FMF 的季节变化特征没有明显变化。可见, 近 20 年来北京地区的气溶胶是粗、细模态的混合, 两者的占比有明显的季节变化。

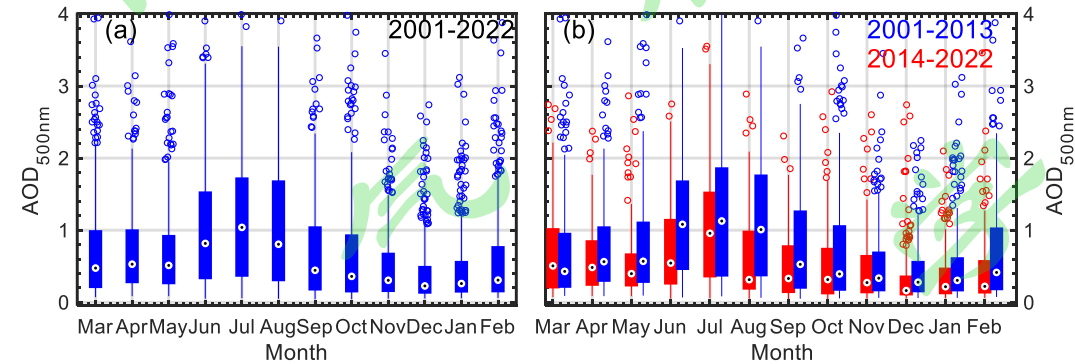


图 5. 北京 AERONET 站 2001~2022 年月均 AOD 统计图 (a), 大气国十条实施前 (2001~2013 年) 后 (2014~2022 年) 月均 AOD 统计比较图 (b)。图中的散点代表超过 95% 分位的野点。

Figure 5. Monthly average AOD statistics at AERONET Beijing from 2001 to 2022 (a), and the comparison of monthly average AOD statistics before (2001~2013) and after (2014~2022) due to the implementation of Atmospheric Article 10 (b). Scattered dots represent wild spots above the 95% quantile.

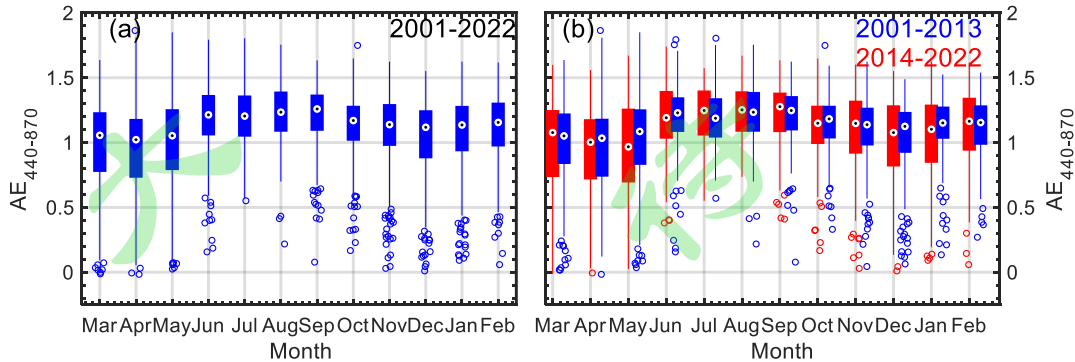


图 6. 北京 AERONET 站 2001~2022 年月均 AE 统计图 (a), 大气国十条实施前 (2001~2013 年) 后 (2014~2022 年) 月均 AE 统计比较图 (b)

Figure 6. Monthly average AE statistics at AERONET Beijing from 2001 to 2022 (a), and the comparison of monthly average AE statistics before (2001~2013) and after (2014~2022) due to the implementation of Atmospheric Article 10 (b). Scattered dots represent wild spots above the 95% quantile.

基于 AERONET 水汽产品的分析表明 2014-2022 年期间水汽总量略高于 2001-2013 年 (图 7), 特别是在 6 月、7 月和 9 月。如果以水汽的变化来简单表征天气的变化对气溶胶的可能影响, 显然水汽的变化不能支持 AOD 的变化, 也即说明北京地区 AOD 的变化与排放的降低密切相关。大气管控措施的采取不仅对表征气溶胶总浓度的 AOD 有显著影响, 也由于对一些特定排放源的管控 (对应于特定的气溶胶类型) 对气溶胶物理化学特性有所影响。

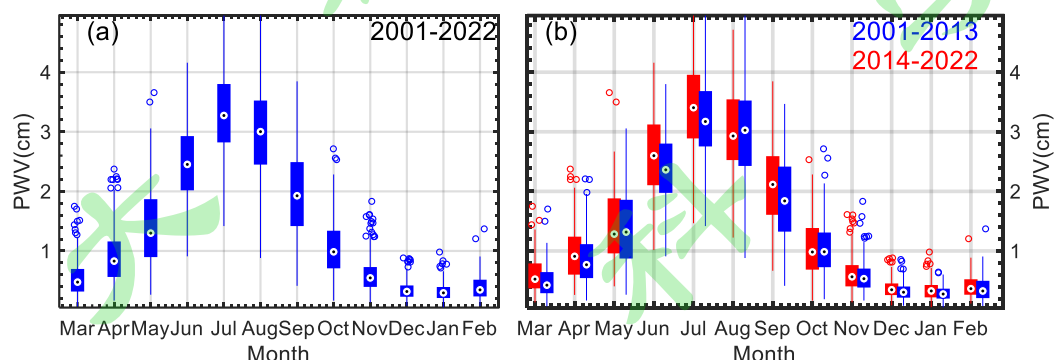


图 7. 北京 AERONET 站 2001~2022 年月均水汽总量 (PWV) 统计图 (a), 大气国十条实施前 (2001~2013 年) 后 (2014~2022 年) 月均 PWV 统计比较图 (b)

Figure 7. Monthly average PWV statistics at AERONET Beijing from 2001 to 2022 (a), and the comparison of monthly average PWV statistics before (2001~2013) and after (2014~2022) due to the implementation of Atmospheric Article 10 (b). Scattered dots represent wild spots above the 95% quantile.

基于 AEROENT 气溶胶单次散射反照率 (SSA_{440 nm}) 的分析表明, 2001-2013 年和 2014-2022 年两段时间 SSA 的变化显著 (图 8), 由图可见, 北京 SSA

的季节变化特征十分明显，冬季的含碳气溶胶的排放对气溶胶的吸收影响显著，冬季北京较低的 SSA (~ 0.90) 表明有更多的强吸收性气溶胶，而夏季气溶胶 SSA 大于 0.94 以散射性气溶胶占主导，与世界其他城市地区气溶胶的吸收能力相当。一个非常显著的特点是 2014 年以来 SSA 显著上升，在各月都是如此，在秋季和冬季表现尤为突出，SSA 的这种显著增大对于气溶胶卫星遥感而言是需要慎重加以考虑的，因为 SSA 是影响卫星遥感 AOD 的非常关键的输入参数，另外在评估气溶胶辐射效应方面也需要慎重考虑 SSA 的变化。

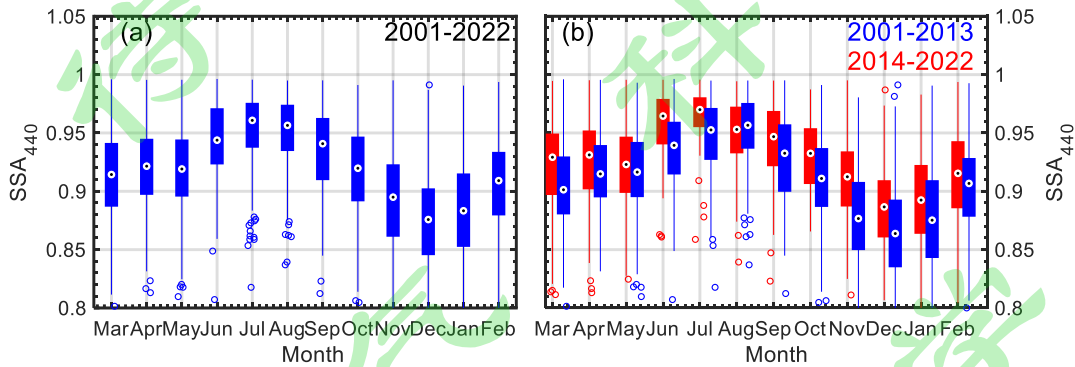


图 8. 北京 AERONET 站 2001~2022 年月均 SSA 统计图 (a)，大气国十条实施前 (2001~2013 年) 后 (2014~2022 年) 月均 SSA 统计比较图 (b)

Figure 8. Monthly average SSA statistics at AERONET Beijing from 2001 to 2022 (a), and the comparison of monthly average SSA statistics before (2001~2013) and after (2014~2022) due to the implementation of Atmospheric Article 10 (b). Scattered dots represent wild spots above the 95% quantile.

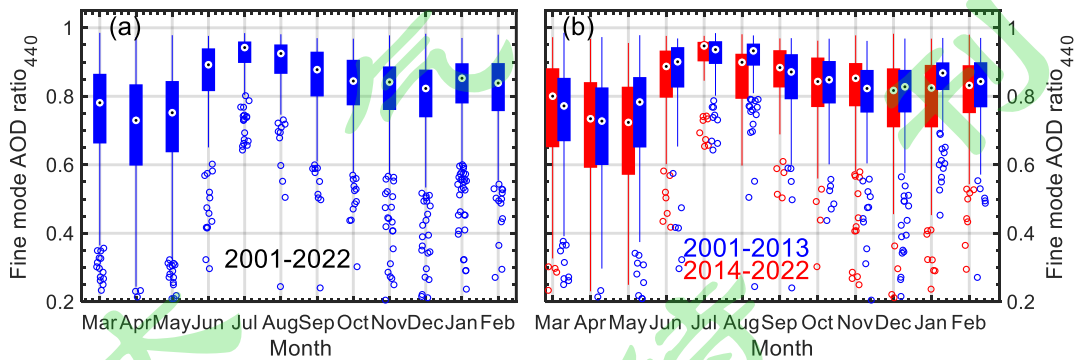


图 9. 北京 AERONET 站 2001~2022 年月均 FMF 统计图 (a)，大气国十条实施前 (2001~2013 年) 后 (2014~2022 年) 月均 FMF 统计比较图 (b)

Figure 9. Monthly average FMF statistics at AERONET Beijing from 2001 to 2022

(a), and the comparison of monthly average FMF statistics before (2001~2013) and after (2014~2022) due to the implementation of Atmospheric Article 10 (b). Scattered dots represent wild spots above the 95% quantile.

6 讨论和总结

气溶胶是连接地球系统科学诸多科学问题的关键参数，与大气化学、气候变化、水循环以及清洁能源利用等都有着密切联系，由于气溶胶存在多种自然和人为排放源，在多种大气物理和大气化学过程（例如：输送、沉降、二次有机气溶胶生成等）作用下产生了极不均匀的时空变化，表征气溶胶气候环境效应的参数也较多，因此采用稳定可靠的观测仪器设备开展长期观测并及时获取数据十分重要，这对于加深气溶胶各种效应的研究都具有重要支撑作用。

近 20 年来北京 AERONET 观测数据在气溶胶特性研究、气溶胶气候变化研究、空气质量研究、卫星遥感及模式模型验证评估以及其他应用领域进行了广泛的研究和重要的应用。北京站近 20 年数据结果表明：自 2014 年大气环境管控措施以来，北京的 AOD 在大部分月份 AOD 距平为负，气溶胶含量显著减少，空气质量改善。SSA 在 2014-2022 年高于 2001-2013 年，说明气溶胶的主导类型也发生了改变，气溶胶卫星遥感中需要考虑 SSA 的这种显著增大。

从本文的分析结果不难看出，作为人类活动的直接产物之一，环境政策的制定和执行无疑将对气溶胶排放产生深远影响。考虑到地球科学工程中有关太阳辐射管控措施中有多项设想与气溶胶的排放有密切关系，因此我国近年来的大气环境管控措施可视为自然的大气科学实验，通过与之伴随的气溶胶关键特性参数的长期测量，这对于认识人类活动气候环境效应必不可少，这也是为什么国际上针对气候和环境变化研究的重大需求，投入了大量人力和物力开展全球尺度的气溶胶长期探测，其中最重要的是地基和卫星遥感探测。AERONET 自 1990 年代建立以来，极大地推进了气溶胶相关基础科学问题和应用问题的研究，取得了大量成果，我国本世纪以来陆续有台站加入 AERONET，我国也自主建立了类似的区域气溶胶地基遥感监测网络，这些观测数据的积累的价值得到了充分体现。但也需要强调指出的是地基遥感网络的长期稳定运行是一项艰苦工作，也需要资金保障长期稳定运行。中国气象局研发了完全自主知识产权

的太阳光度计，从与 AERONET 平行比对结果来看反演产品精度已经达到同等水平（Zheng et al., 2022），有望在未来替代国外进口仪器，降低建站成本，为我国地基太阳光度计站网长期稳定运行打下了很好基础，但需要注意的是随着我国大气环境质量的日益改善，研究热点也逐渐转移，我国已经建立的气溶胶地基遥感监测网络的运行和维护存在的问题也日益凸显，政策支持和资金投入是解决长期观测困难的重要保障。建议加强对气溶胶监测网络的政策支持，提高资金投入，包括设备更新、人才培养、数据共享平台建设等方面，以确保观测网络的稳定运行和进一步发展，进一步促进气溶胶观测和环境研究的发展。

2001 年以来北京地区气溶胶浓度和特性参数受大气环境管控措施的实施发生了非常显著的变化，得益于我国最长的 AERONET 气溶胶时间序列，本研究给出了 20 多年来关于 AOD 和 SSA 的变化特征，结合卫星遥感和气溶胶再分析数据，结合模式模拟等研究手段，深入分析 AOD 等气溶胶参数变化的潜在原因以及相应的气候环境效应是十分必要的。

致谢 北京 Aeronet 站 20 余年运维过程中，P Goloub、章文星、B Chatenet、L Blarel 和张金强等都前后做出了贡献。

参考文献

- Aswathy N, Boucher O, Quaas M, et al. 2015. Climate extremes in multi-model simulations of stratospheric aerosol and marine cloud brightening climate engineering[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(16), 9593-9610. doi:10.5194/acp-15-9593-2015
- 曹龙. 2019. 小规模平流层注入气溶胶实验有助于地球工程研究[J]. *科学通报*, 2019(23):4.
- Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. 1999. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls?[J] *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(24): 13626-13633. doi:DOI 10.1073/pnas.96.24.13626
- Che H, Wang Y Q, Sun J Y, Zhang X C. 2011. Assessmeng of in-situ Langley calibration of CE-318 sunphotometer Mt. Waliguan observatory, China[J], 089-092, doi:10.2151/sola.2011-023
- Che H, Zhang X Y, Xia X, et al. 2015. Ground-based aerosol climatology of China: Aerosol optical depths from the China Aerosol RemoteSensing Network (CARSNET) 2002–2013[J]. *Atmos. Chem. Phys.* 15: 7619–7652.
- 陈洪滨, 范学花, 夏祥鳌. 2018. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用[J]. *大气科学*, 42(3): 621-633. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17272. Chen H B, Xuehua Fan X H, Xia X A. 2018. Review of Satellite Remote Sensing of Atmospheric Aerosols and Its Applications in Climate and Environment Studies[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(3): 621-633.

- Dong X F, Chen B, Yamazaki A. et al. 2023. Variations in aerosol optical characteristics from SKYNET measurements in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*. 2023: 119747.
- Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network(AERONET)sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*,105(D8): 9791-9806.
- Eck T F, B. N. Holben B N, Reid J S et al. 2012. Fog- and cloud-induced aerosol modification observed by the Aerosol Robotic Network (AERONET)[J]. *J. Geophys. Res. : Atmospheres* , 117(D07206): 1-18.
- 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. (2013). 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展[J]. *大气科学*, 27(2): 477-498.
- Goloub P, Li Z, Dubovik O, et al. 2008. PHOTONS/AERONET Sunphotometer Network Overview: Description, Activities, Results. *Proc. SPIE*, 6936.
- Han X L, Zhao B, Lin Y, et al. 2022. Type-Dependent Impact of Aerosols on Precipitation Associated With Deep Convective Cloud Over East Asia[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 127(2). doi:ARTN e2021JD03612710.1029/2021JD036127
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sens. Environ.* 1998, 66, 1–16.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pirani A, et al. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li X. 2020. Editorial of special issue on bridging aerosol chemistry and health impact[J]. *Science of the Total Environment*, 713. doi:ARTN 13669910.1016/j.scitotenv.2020.136699
- Li Z Q, Xu H, Li K T. et al., 2018. Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: an overview of sun–sky radiometer observation network (SONET) measurements[J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 99 (4): 739–755. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0133.1>.
- Li Z Q, Xiao Z N, Ding H, Cui F. 2022. Effects of precipitation, cloud cover, and aerosol on the surface shortwave radiation over northwest China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3-4), 1671-1685. doi:10.1007/s00704-022-04130-4
- Liu Q, Liu T Q, Chen Y H, Xu J M, Gao W, Zhang H, Yao Y F 2019. Effects of aerosols on the surface ozone generation via a study of the interaction of ozone and its precursors during the summer in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 675: 235-246. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.121
- 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 1981. 消光一小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验 [J]. *中国科学*, 12: 1516-1523. Lü Daren,Zhou Xiuji,Qiu Jinhuan. 1981. Theory and experimental study of remote sensing of atmospheric aerosol size distribution by combined solar extinction and forward scattering method [J]. *Science in China(in Chinese)*,12: 1516-1523.
- Masrou P F, Rezazadeh M. 2023. Aerosol-cloud-precipitation interaction during some convective events over southwestern Iran using the WRF model[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 14(2). doi:ARTN 10166710.1016/j.apr.2023.101667
- Rosenfeld D, Andreae M O, Asmi A, et al. 2014. Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions[J]. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 750-808. doi:10.1002/2013rg000441
- Rosenfeld, D., Woodley, W. L., Axisa, D., Freud, E., Hudson, J. G., & Givati, A. 2008. Aircraft measurements of the impacts of pollution aerosols on clouds and precipitation over the Sierra

- Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113(D15). doi:Artn D1520310.1029/2007jd009544
- 邱金桓. 1995. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论 [J]. *大气科学*, 19(4): 385-394. Qiu Jinhuan. 1995. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole spectral solar direct radiation. Part I: Theory [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 19(4): 385-394.
- Saidan M, Albaali A G, Alasis E, Kaldellis J K. 2016. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment[J]. *Renewable Energy*, 92, 499-505. doi:10.1016/j.renene.2016.02.031
- Shiraiwa M, Ueda K, Pozzer A, et al. 2017. Aerosol Health Effects from Molecular to Global Scales[J]. *Environmental Science & Technology*, 51(23), 13545-13567. doi:10.1021/acs.est.7b04417
- Sinyuk A, Holben B N, Eck T F et al. 2020. The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(6): 3375-3411.
- 宋小全,郭金家,闫召爱,等. 2008. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究 [J]. *自然科学进展*, 18(9): 1009-1015. Song Xiaoquan, Guo Jinjia, Yan Zhaoai, et al. 2008. Study of measuring atmospheric aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. *Progress in Natural Science(in Chinese)*, 18(9): 1009-1015.
- Tan S C, Shi G Y, Shi J H, Gao H W, Yao X H. 2011. Correlation of Asian dust with chlorophyll and primary productivity in the coastal seas of China during the period from 1998 to 2008[J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 116. doi:Artn G0202910.1029/2010jg001456
- Tandule C R, Gogoi M M, Kotalo R G, et al. 2022. On the net primary productivity over the Arabian Sea due to the reduction in mineral dust deposition[J]. *Scientific Reports*, 12(1). doi:ARTN 776110.1038/s41598-022-11231-7
- Tang M J, Keeble J, Telford P J, et al. 2016. Heterogeneous reaction of ClONO₂ with TiO₂ and SiO₂ aerosol particles: implications for stratospheric particle injection for climate engineering[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(23), 15397-15412. doi:10.5194/acp-16-15397-2016
- Tripathi, A. K., Aruna, M., Venkatesan, E. P., Abbas, M., Afzal, A., Shaik, S., & Linul, E. 2022. Quantitative Analysis of Solar Photovoltaic Panel Performance with Size-Variied Dust Pollutants Deposition Using Different Machine Learning Approaches[J]. *Molecules*, 27(22). doi:ARTN 785310.3390/molecules27227853
- Witkowska, A., Lewandowska, A. U., Saniewska, D., & Falkowska, L. M. 2016. Effect of agriculture and vegetation on carbonaceous aerosol concentrations (PM_{2.5} and PM₁₀) in Puszcza Borecka National Nature Reserve (Poland) [J]. *Air Quality Atmosphere and Health*, 9(7), 761-773. doi:10.1007/s11869-015-0378-8
- Xia X A. 2006. Significant overestimation of global aerosol optical thickness by MODIS over land[J]. *Chinese Science Bulletin*. 51(23): 367405.
- Xia X, Che H, Shi H, Chen H, Zhang X, et al. 2021. Advances in sunphotometer-measured aerosol optical properties and related topics in China: Impetus and perspectives[J]. *Atmospheric research*, 249, 105286.
- 谢晨波,毛敏娟,岳古明,等. 2006. 新型车载式激光雷达探测对流层气溶胶 [J]. *光谱学与光谱分析*, 126(11): 1973-1976. Xie Chenbo, Mao Minjuan, Yue Guming, et al. 2006. New mobile lidar for the measurements of tropospheric aerosol [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis(in Chinese)*, 26(11): 1973-1976.

- Yang H D, Wang H. 2022. Numerical simulation of the dust particles deposition on solar photovoltaic panels and its effect on power generation efficiency[J]. *Renewable Energy*, 201, 1111-1126. doi:10.1016/j.renene.2022.11.043
- 张冰. 2007. 地基与星载激光雷达探测青岛地区大气消光特性的研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Zhang Bing. 2007. Study of atmosphere extinction properties over Qingdao with ground-based and spaceborne lidar [D]. M. S. thesis(in Chinese), Ocean University of China.
- Zhang J H, Li X C, Wang J, Qiao L. 2023. CFD-DEM Simulation of Dust Deposition on Solar Panels for Desert Railways[J]. *Applied Sciences-Basel*, 13(1). doi:ARTN 410.3390/app13010004
- 张金业. 2010. 武汉上空对流层大气气溶胶 Raman/Mie 激光雷达探测研究 [D]. 武汉大学博士学位论文. Zhang Jinye. 2010. Study of tropospheric aerosols over Wuhan based on a Raman/Mie Lidar [D]. Ph. D. dissertation(in Chinese), Wuhan University.
- Zhang Q, Liu Q S, Roberts A P, Yu J M, Liu Y, Li J H. 2021. Magnetotactic Bacterial Activity in the North Pacific Ocean and Its Relationship to Asian Dust Inputs and Primary Productivity Since 8.0 Ma[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(15). doi:ARTN e2021GL09468710.1029/2021GL094687
- Zhao C F, Wang Y, Letu H. 2022. New Progress and Challenges in Cloud-Aerosol-Radiation-Precipitation Interactions: Preface for a Special Issue[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(12), 1983-1985. doi:10.1007/s00376-022-2009-2
- Zheng Y, Che H Z, Wang Y P, et al. 2022, Evaluation of aerosol microphysical, optical and radiative properties measured with a multiwavelength photometer [J], *Atmos. Mea. Tech.*, 2139-2158