第 20 卷 第 5 期
2025 年 9 月

大 气 与 环 境 光 学 学 报
JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND ENVIRONMENTAL OPTICS

Vol.20 No.5
Sep. 2025

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.002
CSTR: 32220.14.gk202505002

北京市区气溶胶光学厚度特征及其与空气质量等级的关系研究

杨世莉*， 李 林， 孟 磊， 夏芸洁

(北京市气象探测中心, 北京 100875)

摘 要: 利用位于北京市区5个观测站点2021年1月至12月的气溶胶光学厚度 (AOD) 数据和该区域的空气质量等级数据，研究了AOD与空气质量等级之间的定量关系，并分析了煤烟型气溶胶 (BC)、城市污染气溶胶 (UI)、沙尘气溶胶 (DD) 和混合型气溶胶 (MT) 在不同空气质量等级下的演变特征。结果表明：(1) 2021年北京市区空气质量以良 (50.7%) 和轻度污染 (21.9%) 为主，AOD的月变化特征与空气质量等级变化具有明显的相关性，空气质量较差的3月和7－8月分别对应AOD的月主峰值和次峰值；(2) 按空气质量等级从优到严重污染的顺序，对应5个站点AOD的均值分别为0.10、0.51、0.68、0.87和1.23；(3) 不同空气质量等级下主导气溶胶粒子类型天数的占比不同，总体来说，空气质量为优的情况下，以BC为主导的天数占比超过80%，剩余为MT，随着污染增加，以UI、DD和MT为主导的天数占比增加，而以BC为主导的天数占比降低，轻度污染下以MT为主导的天数的占比最高，而重度污染下以DD为主导的天数占比最高。

关 键 词: 太阳光度计; 气溶胶光学厚度; 空气质量等级; 气溶胶粒子种类

中 图 分 类 号 : X513　　**文 献 标 识 码 :** A　　**文章编号:** 1673-6141(2025)05-571-011

Aerosol optical depth characteristics and its relationship with air quality grades in Beijing urban area

YANG Shili, LI Lin, MENG Lei, XIA Yunjie*

(Beijing Meteorological Observation Centre, Beijing 100875, China)

Abstract: Using the aerosol optical depth (AOD) data of five observation stations located in Beijing, China, urban area and the air quality grades data in the region from January to December 2021, the quantitative relationship between AOD and air quality grades was studied, and the evolution characteristics of different types of aerosol particles, including black carbon (BC), urban-industrial aerosols (UI), desert dust (DD), and mixed aerosols (MT) under different air quality grades were analyzed. The results show that: (1) In 2021, the air quanlity in the urban area of Beijing was predominantly classified as moderate (50.7%) and light pollution (21.9%), the monthly variations in AOD exhibited a significant correlation with changes in

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42075044), 国家自然科学基金青年项目 (42205124)
作者简介: 杨世莉 (1985-), 女, 甘肃白银人, 博士, 高级工程师, 主要从事大气探测、预报服务和气候变化方面的研究。
E-mail: yangshli2005@163.com
收稿日期: 2023-08-08; **修改日期:** 2023-10-20
*通信作者。

air quality grades, the months with poor air quality including March, July and August, corresponded to the monthly peak and sub-peak values of AOD. (2) In the order of air quality from good to heavily polluted grades, the average AOD values for the five sites were 0.10, 0.51, 0.68, 0.87, and 1.23, respectively. (3) The dominant aerosol particle types varied with different air quality grades. In general, under good air conditions, the majority of days were dominated by BC, accounting for over 80%, and the remaining days were dominated by MT. As the air pollution increased , the proportions of days dominated by UI, DD, and MT increased, while the proportion of days dominated by BC decreased. Under lightly polluted level, the proportion of days dominated by MT was the highest, while under the heavily polluted level, the proportion of days dominated by DD was the highest.

Key words: solar radiometers; aerosol optical depth; air quality grades; aerosol particle types

0 引 言

大气气溶胶是悬浮在大气中的固体和液体微粒的总称，其大小在0.001～100 μm之间。气溶胶不仅会通过吸收和散射等直接效应对地球大气的能量辐射收支平衡产生影响，还会通过影响云的形成、演变和降水过程等间接效应对地表温度和水循环产生影响[1-3]。另外，气溶胶与空气质量监测、污染物的溯源以及人体健康等也密切相关[4]。长期以来，气溶胶的辐射效应、气溶胶与云的相互作用机制与过程、气溶胶的来源与成分以及地区特性等研究一直是天气和气候变化领域中的前沿和热点问题[5-7]。

气溶胶光学厚度 (AOD) 是气溶胶消光系数在垂直方向上的积分，是表征气溶胶光学特性最重要的参数之一，其大小与气溶胶的浓度和粒径分布密切相关。AOD对于反演气溶胶的浓度，评估空气质量、大气透明度和能见度，以及研究气溶胶的辐射效应具有重要的作用和意义。目前学者们利用地面观测和再分析资料[8-14]、卫星遥感监测数据[15-20]以及多元数据融合产品[21-23]等，对AOD在在不同空间和时间尺度上的演变特征及影响因素做了大量的研究并取得显著进展。如谢丽凤等[9]利用太阳光度计的站点数据研究了西亚地区的AOD特性，发现AOD呈现春夏季大、秋冬季小的特征；贺欣等[13]研究了中国地区典型站点气溶胶类型的时空变化特征，发现中国华北、华南、华东区域站点以大陆型和城市工业型气溶胶为主，而西北区域站点以大陆型气溶胶为主；Zheng 等[22]利用卫星数据结合其他气象和经济等数据的研究结果表明黄河流域中下游多年平均AOD高于上游，且黄河流域AOD的空间格局主要受当地气象、地形和社会经济的综合影响；王伟齐等[23]利用地面逐小时$PM_{2.5}$观测数据和卫星AOD遥感产品研究了不同时段$PM_{2.5}$和AOD的统计特征和相关性，结果表明$PM_{2.5}$和AOD的相关性在城区较高，郊区较低；刘玉婷等[14]利用北京地区近14年的站点数据对北京地区AOD的变化趋势进行研究，并分析了数据的完整性以及相关环保政策和措施对气溶胶的影响，发现奥运会前后的环保工作和相关的政策措施使北京AOD明显下降，北京空气质量得到改善。

可以看出，上述研究主要集中在揭示AOD在不同空间和时间尺度上的特征和演变趋势，很少有研究进一步探索这种特征变化与空气质量等级变化的定量关系。总体来说，AOD和空气质量等级在一定程度上都能反映区域的空气污染状况，但是前者是根据光学仪器观测计算得到的反映整层大气透明度的变量，而后者是对空气质量指数 (AQI) 进行大小划分得到的，反映了近地面污染物浓度的情况，由于两种变量的算法和概念不同，很少有研究将两者的关系进行定量化研究，但是这种定量化的研究又是很有必要的，一方面

有利于我们从更加多元的角度来理解和认识空气质量等级和AOD以及两者之间的关系；另一方面对于了解空气质量状况、评估污染物的来源与传输以及制定环境政策和减排措施等都具有重要的意义。

本文根据2021年北京市区5部太阳光度计观测的AOD和波长指数数据结合空气质量等级数据，在分析空气质量等级和AOD统计变化特征的基础上，研究了两者的定量关系，并且进一步分析了不同空气质量等级下的主导气溶胶类型。

1　仪器和数据介绍

1.1　CE-318太阳光度计

太阳光度计能够测量太阳光在大气传输过程中的吸收和散射情况，经过日常的标定，可以将太阳直接辐射数据转化为精度较高的AOD值，其测量的AOD误差范围约为0.01～0.02。由于太阳光度计可以直接获得连续的AOD，并且成本较低、操作相对简单，因此是测量AOD的首选仪器之一，目前大多数地面观测的AOD也都来自于太阳光度计[13-15]。本文使用的CE-318太阳光度计来自于法国CIMEL Électronique公司制造的自动跟踪扫描太阳光度计，该仪器在可见光至近红外波段设有8个观测通道，分别是：340、380、440、500、670、870、936、1020 nm，带宽均为10 nm。CE-318太阳光度计也是气溶胶自动观测网 (AERONET)[24]指定选用的仪器。AERONET是由全球数百个太阳光度计组成的用于监测大气中气溶胶浓度和光学特性的自动观测网，为研究者提供长期和实时的高质量全球气溶胶数据。

1.2　数据介绍

本文采用的数据包括北京市区2021年1月1日－12月31日的空气质量等级数据、500 nm波长的AOD数据和440～870 nm的Ångström波长指数数据。其中空气质量等级数据来自于北京市环境监测中心，由国际空气质量历史数据平台 (https://aqicn.org/data-platform/register) 提供。AOD和波长指数数据来自北京市区5个站点的太阳光度计，这5个站点分别为：Beijing (BJ) 站、Beijing_PKU (PKU) 站、Beiing_CAMS (CAMS) 站、Beijing_RADI (RADI) 站和观象台 (GXT) 站。其中前4个站点 (BJ、PKU、CAMS、RADI) 的数据从AERONET网站获取，站点GXT的数据由北京市南郊观象台 (54511站) 提供。但是由于GXT站点提供的定标文件只适用于2021年1月1日—10月30日的观测数据，因此该站的数据时间从1月1日至10月30日。这5部太阳光度计的数据均经过了初步的质量控制和滤云筛选，为标准的Level1.5数据。5部太阳光度计更详细的站点信息和空间分布分别见表1和图1。

表1　5部太阳光度计的站点信息

Table 1　The site information of the five solar radiometers

Site	Latitude/(°N)	Longitude/(°E)	Altitude/m	Location	Surroundings
BJ	39.98	116.38	92	30 m high roof	Street, office and residential areas
PKU	39.99	116.31	53	6th floor roof	Ring road, street, school
CAMS	39.93	116.32	106	Roof	Streets, residential areas
RADI	40.00	116.38	59	Near the ring road	Ring road, street, residential areas, 1 km away from park
GXT	39.79	116.47	33	2 m high cabin roof	Ring road, residential areas

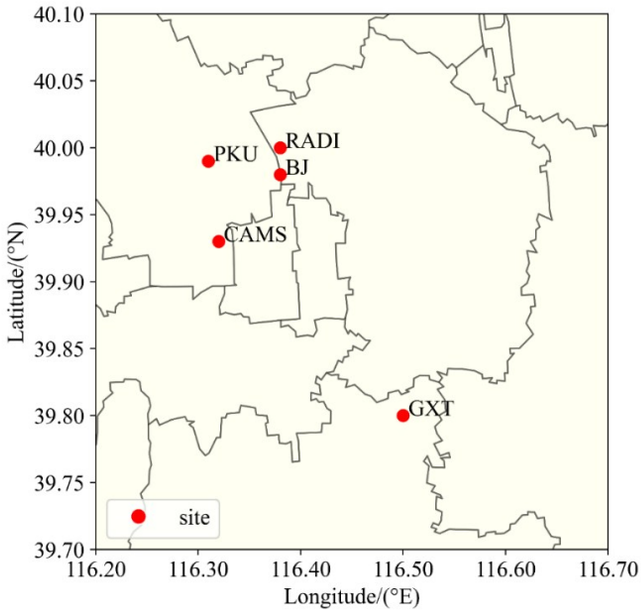

图 1 5部太阳光度计的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of the five solar radiometers

2 空气质量等级划分和气溶胶粒子分类

空气的污染状况可以用空气质量等级表示，一般来说，等级越高，则污染越重，对人体的健康影响也越大。本文采用的空气质量等级划分标准参照我国的《环境空气质量标准》(GB 3095－2012)[25]，即根据 AQI 的大小将空气质量的等级划分为优 (0～50)、良 (51～100)、轻度污染 (101～150)、中度污染 (151～200)、重度污染 (201～300) 和严重污染 (> 300) 6 个等级。AQI 是一个无量纲的数值，其具体的计算方法参见《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行) 》(HJ 633－2012)[26]。

AOD 反映了气溶胶粒子和其他分子对太阳辐射的吸收和散射，而波长指数 α 反应了气溶胶粒子的尺度，由于不同来源和特性的气溶胶粒子对太阳辐射的吸收和散射以及其颗粒大小都具有一定的差异，因此可以根据 AOD 和 α 的大小对大气中的气溶胶进行简单的分类，如较高的 AOD 和低的波长指数表示大气中存在较多的沙尘或粗的颗粒物。目前根据 AOD 和 α 大小进行气溶胶分类的研究很多，如 Gobbi 等[27]利用 AOD 和 α 结合其他物理量，识别了沙尘、生物质燃烧和矿物尘等气溶胶；Kumar 等[28]则基于 AOD 和 α 将气溶胶分类为生物质燃烧、城市工业、沙尘、清洁海洋和混合型。本文同样利用 AOD 和 α 的临界值来划分气溶胶的类型，划分的原则参照高嵩等[29]提出的标准，该标准在已有的划分标准上，针对北京市气溶胶特点对 AOD 和 α 的临界值做了调整，最终的划分标准如下：

1) AOD < 0.15、α < 1.4 时，表示煤烟型气溶胶 (BC)。

2) AOD > 0.20、α > 1.3 时，表示城市污染气溶胶 (UI)。

3) AOD > 0.30、α < 1.2 时，表示沙尘气溶胶 (DD)。

4) 剩余部分表示难以简单识别的气溶胶类型，统称为混合型气溶胶 (MT)。

3　结果分析

3.1　空气质量等级和AOD的统计特征

图2给出了2021年北京市6种空气质量等级天数的占比情况。由图可以看出，各空气质量等级天数占全年总天数的比例有较大的差异，总体来说良和轻度污染的天数比例较高，分别达到50.7%和21.9%，而优、重度污染和严重污染的天数占比较少，分别为12.6%，3.0%和0.8%。另外，从不同空气质量等级天数在各月份的占比情况 (图3) 来看，不同月份的空气质量具有明显差异，其中3月一直处于污染状态，并且出现了重度污染和严重污染的天气，总体空气质量最差；而6—9月出现轻度污染以上的天数较少，整体空气质量较好；10—12月由于出现优的天数最多，整体空气质量也较好。除3月份外，2月、4月、5月和11月也出现了重度污染的天气。

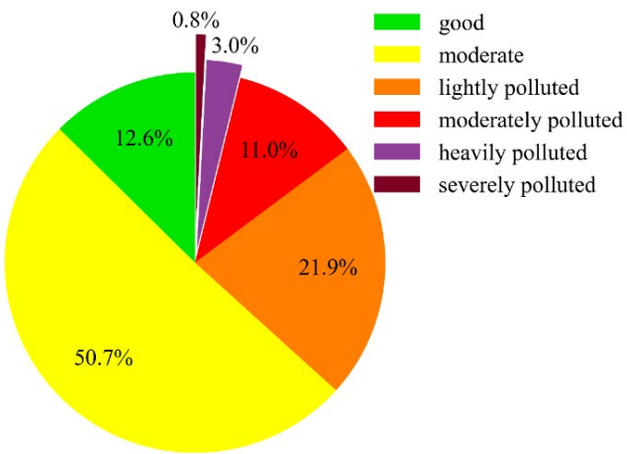

图 2　不同空气质量等级的天数占比

Fig. 2　Percentage days for different air quality grades

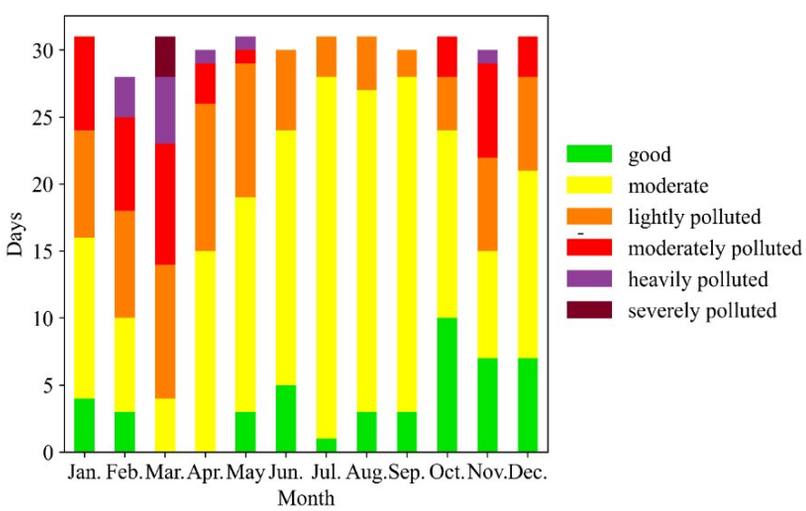

图 3　各月不同空气质量等级的天数分布

Fig. 3　Distribution of days with different air quality grades for each month

结合各站点AOD的月变化特征 (图4) 可以看出，尽管不同站点观测的AOD月平均存在一定的差异，例如站点PKU在1月、3月、6月和11月的AOD明显高于其他站点，但是整体上各站点都表现出了相似的月变化特征，即AOD的主峰值 (大于0.8) 和次峰值 (大于0.6) 分别出现在3月、7月和8月，而AOD的最低值则出现在10月和12月。很明显AOD的这种月变化特征与各月的空气质量等级的变化息息相关，污染最严重的3月对应AOD的最大值，而空气质量较好的10月和12月则对应AOD的最小值。另外，从AOD的日变化特征 (图5) 来看，其表现出弱的双峰特征，AOD的第1个弱高峰出现在上午6～8时，该时段内AOD在0.36～0.40之间小幅波动，15时之后AOD逐渐增加，到下午16～17时，AOD出现较大的高峰值 (大于0.47)，18时AOD小幅回落。AOD的这种日变化特征可能与当地的上下班高峰活动有关，研究表明，交通早高峰 (6～9时) 和晚高峰 (16～19时) 会引起$PM_{2.5}$质量浓度的小幅增加[30]；另外，由于PKU站点和GXT站点均位于环路附近，且周围大多为街道和居民区，因此其测得的AOD要略高于其他站点的AOD。

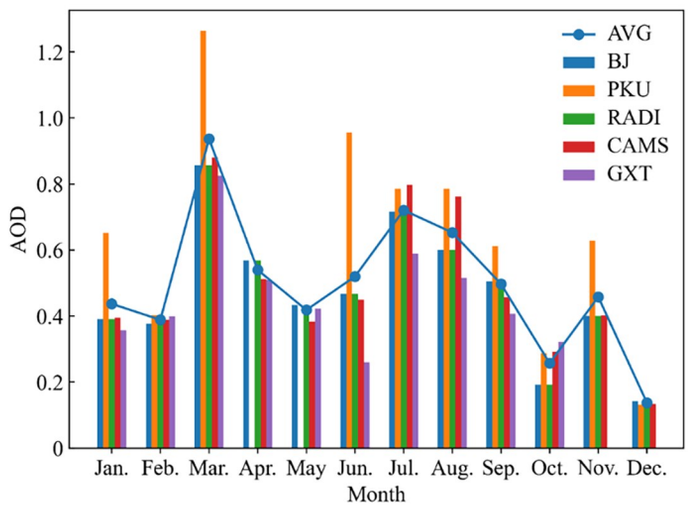

图4 不同站点AOD的月变化

Fig. 4 The monthly variations of AOD for different sites

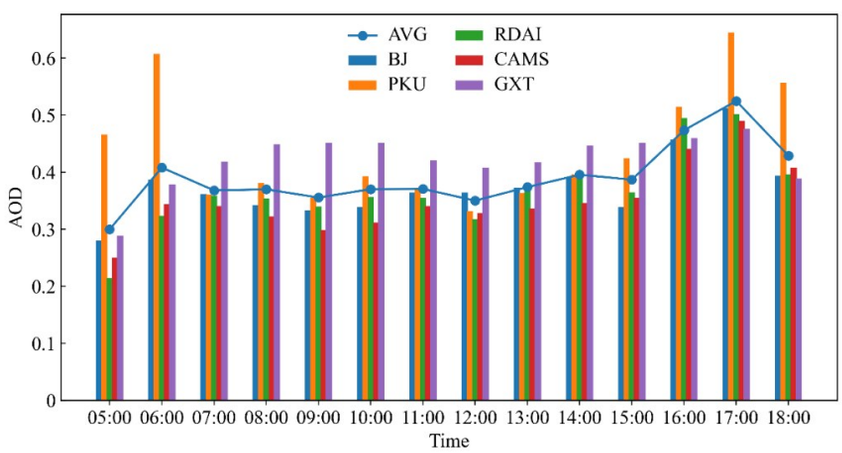

图5 不同站点AOD的日变化

Fig. 5 The daily variations of AOD for different sites

3.2　AOD与空气质量等级的关系

为研究AOD与空气质量等级的关系，本文计算了不同空气质量等级对应的AOD的平均值 (图6)。由图可以看出，空气质量等级与AOD的均值大小之间有很好的对应关系，在空气质量等级为优的情况下，AOD的均值很低，5个站点的值均低于0.1，随着空气质量等级的上升，AOD的均值也逐渐增大，在重度污染情况下，AOD的均值大于1.1。但是由于2021年北京市区严重污染的天数只有3天，而除站点GXT外，其他4个站点在这3天的值均为缺省，因此无法获得除GXT以外其他站点在严重污染条件下AOD的结果。但是仅从严重污染条件下站点GXT的结果 (AOD的均值为2.47) 来看，该结果依然符合AOD越大、空气质量越差的特征。

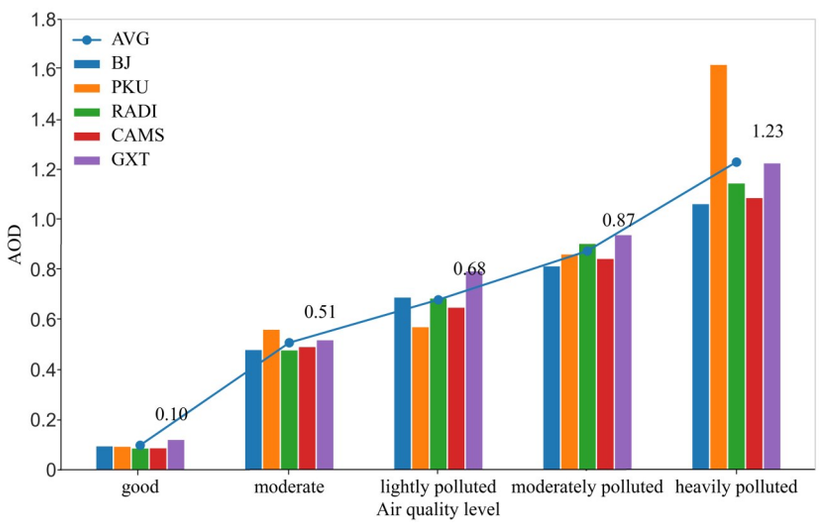

图 6　不同空气质量等级AOD的定量关系

Fig. 6　Quantitative relationships between AOD and different air quality grades

另外，结合AOD和相应波长指数的大小，通过判定不同空气质量等级下存在的气溶胶粒子类型，可以初步分析造成空气污染的主要原因。图7给出了4种主导气溶胶粒子天数占某一特定空气质量等级总天数的比例。由图可以看出，不同空气质量等级下4种主导粒子天数占比具有明显的差异。总体来说，空气质量为优的情况下，以BC为主导的天数占80%左右 (站点BJ达到90%以上)，剩余20%左右 (站点BJ小于10%) 的天数以MT为主导，而以UI和DD为主导的天数则为零，说明空气质量为优的情况下，基本不存在污染型和大颗粒的气溶胶粒子。

随着空气质量等级逐渐上升，以BC为主导的天数比例逐渐下降，同时以UI、DD和MT为主导的天数比例逐渐上升。在空气质量为良的情况下，以BC、UI、DD和MT为主导的天数比例相当，各占20%左右，说明造成空气质量为良的原因比较复杂，任何一种粒子为主导时，对应的空气状况都可能为良；当空气质量达到轻度污染时，则大部分天数以DD和MT为主导，说明DD和MT在一定程度上会造成大气的轻度污染。以BC为主导的天数在中度和重度污染时为零，以DD为主导的天数在重度污染时占比最高，说明DD是造成北京市区重度污染的主要气溶胶粒子。

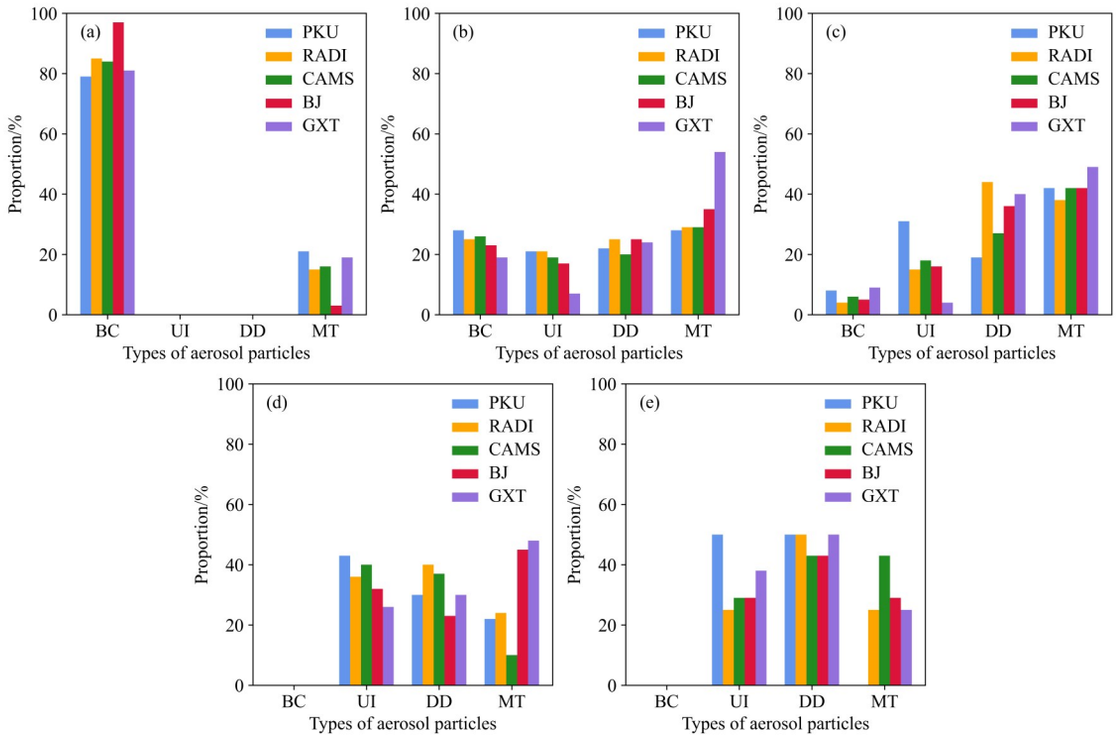

图 7 不同空气质量等级下以BC、UI、DD和MT为主导气溶胶粒子的天数占比。

(a) 优; (b) 良; (c) 轻度污染; (d) 中度污染; (e) 重度污染

Fig. 7 Proportion of BC, UI, DD, and MT particles days under different air conditions. (a) Good; (b) moderate; (c) lightly polluted; (d) moderately polluted; (e) heavily polluted

4 结 论

利用位于北京市区5部太阳光度计获取的AOD和空气质量等级数据，探索和分析了2021年北京市区AOD与空气质量等级的关系，并且研究了不同空气质量等级下4种气溶胶粒子 (BC、UI、DD和MT) 主导的天数占比的变化情况。结果发现尽管AOD和空气质量等级的定义和算法具有本质的区别，但是北京市区AOD的大小与空气质量等级的高低具有很好的对应关系，具体为AOD值越小，则空气质量越好，反之亦然。AOD的月变化特征基本能够反应出当月不同空气质量等级的占比情况，例如高的AOD往往显示该月出现过重度或严重污染的情况，而低的AOD显示该月空气质量为优的占比较高。另外，不同空气质量等级下主导气溶胶粒子类型天数的占比不同，在空气质量为优的情况下，以BC为主导的天数占比较高，超过80%，随着空气质量等级的增加，以UI、DD和MT为主导的天数占比增加，而BC为主导的天数占比则降低；轻度污染下MT为主导的天数占比最高，而严重污染下DD为主导天数的占比最高，这也表明沙尘是造成北京市区出现严重污染的主要原因。

另外，本文虽然分析了空气质量等级与AOD之间的对应关系，并通过分析4种粒子主导天数占比在不同空气质量等级下的演变情况，初步揭示了造成北京市区严重污染的主要原因，但是由于本文使用资料的时空覆盖度较低，上述研究也存在明显的不足和局限性。例如本文中的结论只是在2021年这1年的数据基础上得到的，没有考虑更长时间段内空气质量等级与AOD的演变情况，其结论在更长时间尺度上的代表性

还有待进一步的验证；另外，本文中的空气质量等级数据来自于单一的站点，只能从宏观尺度上反映北京市区空气质量等级的总体变化情况，而空气质量等级由于受到台站周围地形、环境和污染源等的影响，在空间上会存在一定的差异，因此未来的研究还需要进一步考虑更为精细的空气质量等级变化情况。

参考文献:

[1] Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al*. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840.
石广玉, 王 标, 张 华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.

[2] Huang J P, Liu Y Z, Wang T H, *et al*. An overview of the aerosol and cloud properties and water vapor budget over the Qinghai -Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(6): 1225-1240.
黄建平, 刘玉芝, 王天河, 等. 青藏高原及周边地区气溶胶、云和水汽收支研究进展 [J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1225-1240.

[3] Liu Y Z, Luo R, Zhu Q Z, *et al*. Advances in researches on properties and interactions of aerosols and clouds over drylands of East Asian [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2023, 51(1): 124-133.
刘玉芝, 罗 润, 祝清哲, 等. 东亚旱区气溶胶、云及其相互作用研究进展 [J]. 气象科技, 2023, 51(1): 124-133.

[4] Wang P L, Dai C L, Zhang C J. The study progress in the research for the particular in city air and its effect on human health [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(1): 83-87.
王平利, 戴春雷, 张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应 [J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 83-87.

[5] Li Z Q. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: An overview [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(1): 76-92.
李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述 [J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 76-92.

[6] Wang M X, Zhang R J. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2001, 6(1): 119-124.
王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119-124.

[7] Wang X Y, Zhao D F, Ouyang H L, *et al*. International project of monitoring, analysis, and prediction of air quality and some essential questions [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(1): 130-132.
王晓妍, 赵德峰, 欧阳慧灵, 等. 空气质量监测、分析、预报国际研究计划及前沿问题 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 130-132.

[8] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近30年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. 科学通报, 2000, 45(5): 549-554.

[9] Xie L F, Xu X F, Pan S X, *et al*. Study on aerosol optical properties over the West Asia region using AERONET data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(1): 148-160.
谢丽凤, 许潇锋, 潘诗娴, 等. 基于AERONET的西亚地区气溶胶光学特性 [J]. 大气科学学报, 2022, 45(1): 148-160.

[10] Wang Y P, Yu X, Xie G Q. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15years [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(2): 426-434.
王银牌, 喻 鑫, 谢广奇. 中国近15年气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 426-434.

[11] Liu H Z, Guo H Y, Ma Z F, *et al*. Temporal-spatial characteristics and variability in aerosol optical depth over China during 2001–2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 3886-3897.

刘海知, 郭海燕, 马振峰, 等. 2001－2017年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 [J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3886-3897.

[12] Wang X Y, Ji T T, Wang Y X, *et al*. Analysis of long-term pattern change of aerosol optical thickness over the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(2): 118-125.
王细元, 吉婷婷, 王月香, 等. 长三角地区气溶胶光学厚度长时间格局变化分析 [J]. 环境科学与技术, 2023, 46(2): 118-125.

[13] He X, Zhou R, Yao Y, *et al*. The spatiotemporal variations of aerosol types in representative sites of China basing on the Aerosol Robotic Network (AERONET) [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 485-496.
贺 欣, 周 茹, 姚 媛, 等. 基于AERONET的中国地区典型站点气溶胶类型变化特征 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 485-496.

[14] Liu Y T, Wu M Q, Niu Z, *et al*. Trend analysis of ground-based aerosol optical thickness in Beijing from 2005 to 2018 [J]. *Remote Sensing Information*, 2022, 37(4): 73-79.
刘玉婷, 邬明权, 牛 铮, 等. 2005－2018年北京市地基气溶胶光学厚度趋势分析 [J]. 遥感信息, 2022, 37(4): 73-79.

[15] Yang P, Chen J, Gao Q, *et al*. Retrievals of aerosol optical depths and their spatial distributions over Jing-Jin-Ji region [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, 33(3): 52-58.
杨 鹏, 陈 静, 高 祺, 等. 京津冀地区气溶胶光学厚度反演及其空间分布特征 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33(3): 52-58.

[16] Li C C, Mao J T, Liu Q H, *et al*. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(5): 869-880.
李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用MODIS光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. 大气科学, 2003, 27(5): 869-880.

[17] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用MODIS研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征 [J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2094-2100.

[18] Li C C, Mao J T, Liu Q H. Remote sensing of high spatial resolution aerosol optical depth with MODIS data over Hong Kong [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(3): 335-342.
李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用MODIS资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度 [J]. 大气科学, 2005, 29(3): 335-342.

[19] Yue H, Liu Y, Zhang Y M. Study on temporal and spatial variability of aerosol optical depth in China region based on MODIS data [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(1): 89-93.
岳 辉, 刘 英, 张元敏. 基于MODIS数据的中国地区气溶胶光学厚度时空变化特征 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(1): 89-93.

[20] Tian X M, Tang C L, Wu X, *et al*. The global spatial-temporal distribution and EOF analysis of AOD based on MODIS data during 2003–2021 [J]. *Atmospheric Environment*, 2023, 302: 119722.

[21] Liu Y Q, Lin T, Hong J, *et al*. Multi-dimensional satellite observations of aerosol properties and aerosol types over three major urban clusters in Eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(16): 12331-12358.

[22] Zheng Y R, Wang X H, Zhang X, *et al*. Multi-spatiotemporal patterns of aerosol optical depth and influencing factors during 2000–2020 from two spatial perspectives: The entire Yellow River Basin region and its urban agglomerations [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 106: 102643.

[23] Wang W Q, Zang Z L, Song B, *et al*. Correlation between averaged $PM_{2.5}$ concentrations and MODIS aerosol optical depth during different periods in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(8): 2794-2802.
王伟齐, 臧增亮, 宋 彬, 等. 北京地区不同时段平均$PM_{2.5}$浓度与MODIS气溶胶光学厚度相关性分析 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2794-2802.

[24] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al*. AERONET: A federated instrument network and data archive for aerosol

characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16.

[25] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095－2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

[26] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行): HJ 633－2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

[27] Gobbi G P, Kaufman Y J, Koren I, *et al*. Classification of aerosol properties derived from AERONET direct Sun data [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2007, 7(2): 453-458.

[28] Kumar K R, Sivakumar V, Reddy R R, *et al*. Identification and classification of different aerosol types over a subtropical rural site in Mpumalanga, South Africa: Seasonal variations as retrieved from the AERONET sunphotomete [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, 14(1): 108-123.

[29] Gao S, Zhou Z C, Xu X F, *et al*. Identification and classification of different aerosol types based on ground-based sunphotometer observation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(Sup1): 117-123.
高 嵩, 周志成, 许潇锋, 等. 利用地基太阳光度计分类识别气溶胶类型 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(增刊 1): 117-123.

[30] Li X F, Chu H H, Yu L D, *et al*. Variational characteristics of $PM_{2.5}$ concentration in a monitoring site in Beijing urban area [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2011, 47(3): 258-261.
李旭芳, 初钧晗, 于令达, 等. 北京市城区单监测点 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2011, 47 (3): 258-261.