

基于AERONET数据的气溶胶光学特性分析

周佩^{1,2}, 汪洋^{1,2,3}, 徐玲琳^{1,2}, 程志强^{1,2}, 盖宸德^{1,2}, 庄留文^{1,2}

1. 福建师范大学 地理研究所, 福州 350007;
2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 大气气溶胶的监测对全球气候变化、区域空气质量和公共健康等研究具有重要的意义, 而中国台湾岛四面环海, 地理位置特殊, 若忽略其大气环流和局地排放源造成的气溶胶特征时空异质性将会导致气溶胶参数反演误差。因此本研究使用中国台湾岛多个具有代表性的AERONET (Aerosol RObotic NETwork) 观测站历史数据和MODIS气溶胶光学厚度AOD (Aerosol Optical Depth) 反演产品, 分析5个典型站点气溶胶参数及其类型的时空变化特征及差异, 分析结果表明: (1) 各站点AOD年平均值逐年下降, 呈现春季最高 (0.5257) 的季节变化特征和双峰结构的日变化规律, 主导气溶胶类型为城市工业型 (仅鹿林站点为海洋型)。(2) 中国台湾地区风向多为东北风, 风速越大, AOD值越低, 海洋型气溶胶占比越高; 反之则以城市工业型气溶胶为主。(3) Ångström 波长指数(AE)、单次散射比(SSA)、复折射指数虚部、不对称因子平均值分别为1.3283、0.9564、0.0054、0.7292; 相比于北京(39.9768°N, 116.3813°E)站, 台湾“中央大学”AOD年平均值、季节变化、主导气溶胶类型均存在较大的差异。(4) MODIS AOD分站点验证精度较高, 而在高山鹿林站的验证精度稍低 ($R^2=0.5925$); 而利用不同气溶胶类型的分类验证结果显示, 城市工业 ($R^2=0.7238$)、生物质燃烧 ($R^2=0.6161$) 和次大陆型 ($R^2=0.5116$) 精度较高, 但海洋型 ($R^2=0.1585$)、大陆型 ($R^2=0.1111$) AOD验证精度显著降低。本研究表明, 中国台湾岛气溶胶类型呈现西南沿岸站点秋冬季次大陆型占比上升, 西北沿岸大陆型上升的时空特征差异, 细化气溶胶参数的时间差异和时间动态变化信息将对气溶胶卫星反演算法在环流特征明显的近海区域有着重要指导作用。

关键词: 大气遥感, 气溶胶, AERONET, 气溶胶光学特性, 时空分布

引用格式: 周佩, 汪洋, 徐玲琳, 程志强, 盖宸德, 庄留文. 2022. 基于AERONET数据的气溶胶光学特性分析. 遥感学报, 26(5): 953-970

Zhou P, Wang Y, Xu L L, Cheng Z Q, Ge C D and Zhuang L W. 2022. Study of aerosol optical properties based on AERONET data. National Remote Sensing Bulletin, 26(5): 953-970 [DOI: 10.11834/jrs.20221191]

1 引言

气溶胶在全球和区域气候变化中具有重要的角色, 通过多次吸收和散射太阳辐射, 改变地-气系统辐射平衡 (Ehn等, 2014); 又作为凝结核, 参与云微物理过程, 从而影响区域降水 (Wang等, 2021; Rosenfeld等, 2014)。卫星遥感和地基观测是气溶胶监测的主要方式, 其中卫星遥感具有不受时空限制、监测范围广、连续快速的优点, 弥补了地基观测站点的不足。而地基观测能够获

取到具有代表性的气溶胶光学特性参数, 可用于揭示各地区各参数长时间序列的气溶胶变化规律, 也常用于检验卫星遥感得到的气溶胶光学特性的准确性 (Holben等, 1998)。因此地基气溶胶区域联网观测备受重视, 国内外已经发展多种观测网络, 如澳大利亚的AGSNet (Aerosol Ground Station Network)、日本的Skynet (Aerosol/Radiation Observation Network)、中国地区太阳分光观测网CSHNET (Chinese Sun Hazemeter Network) (Xin等, 2007; 王跃思等, 2006)、中国气溶胶遥感观测网络

收稿日期: 2021-04-15; 预印本: 2022-01-20

基金项目: 福建省公益类科研院所专项 (编号: 2020R11010009-1); 国家自然科学基金 (编号: 42001295); 遥感科学国家重点实验室开放基金 (编号: OFSLRSS202011)

第一作者简介: 周佩, 研究方向为大气气溶胶。E-mail: zhoupei915@163.com

通信作者简介: 汪洋, 研究方向为大气遥感与大气污染监测。E-mail: Wangyang@fjnu.edu.cn

CARSNET (China Aerosol Remote Sensing Network) (Che 等, 2009) 和扩展多波长偏振测量的太阳—天空辐射计观测网 SONENT (Sun-sky radiometer Observation NETwork) (李正强 等, 2015)。

地基观测网中, 气溶胶自动观测网 AERONET (AErosol RObotic NETwork) 是目前站点数量最多、全球分布最广泛的观测网。中国多个地基气溶胶观测站点也已加入 AERONET, 并已有较长时间序列的观测数据。国内外众多学者利用 AERONET 站点数据对内陆地区卫星气溶胶数据进行了验证 (Bilal 等, 2017; Levy 等, 2013), 但内陆地区的验证对于中国台湾岛各卫星气溶胶产品的验证不具有参照性, Si 等 (2020) 指出中国台湾岛 MISR 数据产品精度较高, 但存在“夏季高估, 春季低估”的现象。王峰等 (2020)、Wang 等 (2020b) 和贾亮亮等 (2018) 反演 Sentinel-3A OLCI 可见光通道、GF-1 WFV 的气溶胶光学厚度值 AOD (Aerosol Optical Depth), 发现两者在不同季节、不同站点精度皆存在一定的差异。而少有学者单独整体验证中国台湾地区 MODIS 产品, 仅有针对世界及单独站点验证, 如台湾成功大学站, 发现 MODIS 反演的 AOD 值误差较小, 其结果大部分落在期望误差内, 但存在“小值高估, 大值低估”的现象, 且 3 个沿海站点相比鹿林天文台的岛内站点, 其相关系数较高 (王宏斌 等, 2016; 赵阳和孙学金, 2016)。此外, 还有众多学者利用 AERONET 的观测数据, 针对气溶胶光学厚度和其光学参数的变化特征, 讨论地区的大气气溶胶光学特性及其时空分布状况, 揭示各参数长时间序列的变化规律 (张喆 等, 2021; Jin 等, 2019; Kumar 等, 2014; 齐冰 等, 2014; 饶加旺 等, 2012; Eck 等, 2005)。但对于中国台湾岛气溶胶光学特性及其时空变化特征的相关研究鲜少见闻, 如许黎等 (1997) 仅对比了阿里山及台南站点的 Ångström 波长指数 (AE) 值, 表明当大气中大粒径的气溶胶浓度增大, AE 值减小, 浑浊度系数值增大, 反之亦然。Wang 等 (2020a) 发现中国台湾“中央大学”站点 2、3 月粒子的粒径最小, 主要是自由大气中远距离输送的生物质燃烧气溶胶, 而 4 月由于亚洲沙尘从戈壁沙漠输送, 导致沙尘气溶胶的存在, 使其 AOD 值较高, AE 值较低。Chen 等 (2009) 利用去极化激光雷达和太阳光度计在中国台湾台北同时

测量了气溶胶的垂直消光剖面 and 柱状光学特性。Kishcha 等 (2018) 利用 AERONET 和 MERRA 的 AOD 值分析了中国台湾岛污染源及偏远污染源的差异。总体而言, 台湾岛的气溶胶相关研究对其光学特性认识不足, 缺乏系统的地面观测分析和多站点卫星产品验证, 难以发现卫星 AOD 产品在气溶胶来源复杂的海岛地区的反演误差。

因此, 本研究基于中国台湾岛 AERONET 观测站历史数据, 选取 5 个具有区域代表性且观测数据时序较长的 AERONET 典型站点的气溶胶光学参数, 首先计算不同时间尺度的 AOD 平均值并分析变化趋势, 分析各气溶胶光学参数特征, 不同风向、风速和 AOD 条件下的气溶胶类型分布规律和变化特征; 其次以北京站 (39.9768°N , 116.3813°E) 和台湾“中央大学”两个城市站点为例, 对比分析其气溶胶特征的差异性; 最后根据站点及气溶胶类型分类, 探究气溶胶类型对 MODIS AOD 反演精度的影响。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

台湾 ($21^{\circ}53'\text{N}$ — $25^{\circ}18'\text{N}$, $120^{\circ}08'\text{E}$ — $122^{\circ}01'\text{E}$) 作为中国第一大岛, 总面积约 35873 km^2 , 平原约占 30%, 其余皆为山地和丘陵。岛上中部偏东由于高山峻岭, 形成的气候的屏障, 使得山区气候与平原不同, 且东西南北的风雨型态及出现期间也因高山而不同 (萧长庚, 2008)。中国台湾岛地处热带及亚热带气候交界处, 形成了兼有热、温、寒 3 带的气候特点, 虽然, 气候的形成受海洋和大陆两方面的影响, 但海洋性气候更为明显, 呈现高温、多雨、多风的特点, 使得台湾具有丰富的自然景观及生态资源 (贾亮亮 等, 2018)。

2.2 AERONET 观测网

AERONET 是由 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 与 LOA-PHOTONS (CNRS) 共同建立的全球地基气溶胶观测网络, 其主要设备为法国 CIMEL 公司生产的 CE-318 型太阳光度计, 通过观测太阳、天空和地面的反射等信息来反映大气的光学特性 (Holben 等, 1998), 可提供 340、380、440、500、675、870、936、1020、

1640 nm 光谱通道。AERONET AOD 产品分为 3 个质量等级: L1.0 级代表未做去云处理的原始数据; L1.5 级代表云掩膜数据; L2.0 级代表云掩膜和质量控制数据 (Smirnov 等, 2000)。AOD 观测精度为 ± 0.01 (Holben 等, 2001), 因而被较多地应用为卫星 AOD 验证的基准数据。AERONET 为区域和全球的气溶胶光学特性研究、卫星反演及数值模式产品的验证和评估、环境和辐射效应的研究以及与其他数据库的协同, 提供了长期的、易获取的气溶胶光学、微物理及辐射特性。目前, 中国地区已有 50 多个 AERONET 站点, 集中分布在东部地区, 而北方地区、南方地区和西部地区站点数量相对较少 (戴一帆等, 2018)。

中国台湾岛拥有中国最为丰富的 AERONET 观测站点, 覆盖了台湾绝大多数区域, 下垫面类型多样, 包括城市、郊区、森林、高山、滨海、海岛等不同区域的观测站点, 对全面研究不同区域气溶胶特性大有帮助。本研究统计了截至 2020-

06-30 中国台湾岛共 20 个 AERONET 站点的 L2.0 级别数据, 数据集包括直接从太阳辐射观测中获得的 AOD, 以及依赖于太阳散射辐射观测中反演的单次散射比 (SSA)、粒子谱分布、AE、复折射指数、不对称因子等气溶胶光学、微物理参数。综合站点数据跨度覆盖时长和数据量, 本研究选取了样本量大于 1 万, 主导风向由春季的东北季风逐渐向夏季的西南季风转换, 秋冬季节主要以东北风为主的 6 个站点 (表 1), 中部阿里山地区的鹿林 (Lulin) 背景站, 西南地区嘉义站 (Chaiyi) 和成功大学站 (Cheng-Kung_ Univ), 靠近西北海岸地区的气象局站 (Taipei_CWB) 和位于台湾“中央大学”的两个站点 (EPA-NCU (24.96753°N, 121.18548°E)、NCU_Taiwan (24.96766°N, 121.18751°E)) 进行分析, 其中 EPA-NCU 和 NCU_Taiwan 两个站点基本在同一地点, 因此合并两个站点的数据进行分析 (后文中统称为“中央大学”站)。

表 1 AERONET 站点观测资料

Table 1 Observation data from AERONET site

类型	站点	位置	时间范围	样本量/条
农田	嘉义站(Chaiyi)	(23.49598°N, 120.49598°E)	2013-09—2018-04	18107
森林	鹿林站(Lulin)	(23.46861°N, 120.87361°E)	2006-03—2019-02	36004
	成功大学站(Cheng-kung_ Univ)	(22.99342°N, 120.20466°E)	2002-02—2018-09	47471
	气象局站(Taipei_CWB)	(25.01468°N, 121.53837°E)	2002-03—2019-04	32699
城市	台湾“中央大学”(NCU_Taiwan)	(24.96766°N, 121.18751°E)	1998-04—2013-03	17526
	台湾“中央大学”(EPA-NCU)	(24.96753°N, 121.18548°E)	2004-12—2020-02	46145

2.3 卫星观测数据

MODIS 传感器搭载在 Terra (Kaufman 等, 1998) 和 Aqua (Parkinson, 2003) 上, 工作波段涵盖了 0.553—14.235 μm 范围内的可见光、近红外和红外的 36 个波段 (King 等, 1992), 其 AOD 反演算法包括 Kaufman 等 (1997) 和 Tanré 等 (1997) 分别提出适用于浓密植被覆盖区域和海洋上空的暗目标 DT (Dark Target) 陆地和海洋算法, Hsu 等 (2004, 2006) 针对沙漠、戈壁等亮背景表面提出的深蓝算法 DB (Deep Blue), 以及将 DT 和 DB 算法的优点结合到一个新的气溶胶数据集 DTB (The Combined DT and DB) 中 (Levy 等, 2013)。其气溶胶产品经历了 7 次更新, 包括 C2、C3、C4、C5、C5.1、C6 及 2017 年发布的 C6.1 产品, Wei 等

(2019) 指出 C6.1 产品在各站点、区域和全球范围内都比 C6 产品有了全面的改进, 在东亚地区具有较 DT、DTB 数据集更高的反演精度及样本量, 并由增强 DB 算法 (Hsu 等, 2013) 生成, 减少了真实的云污染, 不同地形的异质性。因此, 本研究所使用的气溶胶卫星产品为 MODIS Aqua 卫星 C6.1 DB 版本产品。

2.4 气象数据

本文风向风速数据采用美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 提供的近地面 uwind、vwind 的逐日再分析资料 (Kalnay 等, 1996), 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 基于 AERONET 站点的经纬度和样本观测时间, 将地面数据与气象数据进行匹配, 用于气溶胶特性与

风向风速关系的分析当中。

2.5 数据处理方法

2.5.1 地基气溶胶光学厚度数据内插计算

卫星反演计算得到的是 550 nm 的 AOD 值，而太阳光度计不直接提供 550 nm 处的 AOD 值。为了保证 AOD_AERONET 与 AOD_MODIS 数据间通道的一致性和不同研究之间的可比性，本研究利用水汽影响较小的 440 nm 和 870 nm 波段的数据，使用 Ångström 指数内插获取 550nm Ångström 指数，进而求得 550 nm 的 AOD (Ångström, 1929; Eck 等, 1999)，其相应的计算公式如式 (1)、(2) 所示。若无特别说明后文中的 AOD 值皆指代 550 nm 处的 AOD 值。

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\tau_{440}}{\tau_{870}}\right)}{\ln\left(\frac{440}{870}\right)} \quad (1)$$

$$\tau_{550} = \tau_{870} \left(\frac{440}{870}\right)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中， τ_{440} 和 τ_{870} 分别为波长 440 nm 和 870 nm 的 AOD 值， α 为 440—870 nm 的 Ångström 指数， τ_{550} 为内插所得 550 nm 的 AOD 值。

2.5.2 卫星数据与地基数据匹配

MODIS 数据可提供过境时刻的区域性 AOD 值，而 AERONET 提供的是基于单点的连续观测数据，因此为了保证卫星遥感数据与地基观测数据的可比性，本研究以 AERONET 站点为中心，设置 25 km×25 km 的空间窗口计算卫星 AOD 空间均值，匹配卫星过境时刻±30 min 的地基 AOD 时间均值 (Ichoku 等, 2002)，进行线性回归分析，利用相关系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 对卫星气溶胶产品进行验证评估。

2.5.3 气溶胶图形分类法

由于不同气溶胶的 AOD 光谱差异较大，气溶胶相对光学厚度 ($AROT = \frac{AOD_{1020}}{AOD_{440}}$) 在其他光学参数数值缺失的情况下，可用于气溶胶类型识别 (Chen 等, 2016)。基于先前的研究，气溶胶图形分类法能够准确的实现地面和卫星观测气溶胶类型的分类 (贺欣 等, 2020; Chen 等, 2017, 2018,

2019; Mao 等, 2019)。因此本研究采用 Chen 等 (2016) 开发的气溶胶图形分类法 (图 1)，以不同类型气溶胶光学特征的差异为依据，对各个站点的日均值观测数据进行分类，再根据分类结果，研究中国台湾岛站点气溶胶类型的时间及空间变化特征。此气溶胶分类方法通过 AOD 和 AROT 将气溶胶分为 6 个类型：海洋、大陆、沙尘、次大陆、城市工业、生物质燃烧型气溶胶。其中海洋型气溶胶属于洁净型气溶胶类型；沙尘型气溶胶主要源于沙尘天气，AROT 较高 (>0.81)；大陆型气溶胶 AOD 相对较小，空气质量相对比较洁净；次大陆型气溶胶主要是自然和人为排放的共同影响，污染较为严重；城市工业型气溶胶是燃料的燃烧、工农业生产以及人类活动形成的典型的污染型气溶胶；生物质燃烧型气溶胶主要来自于秸秆燃烧等。

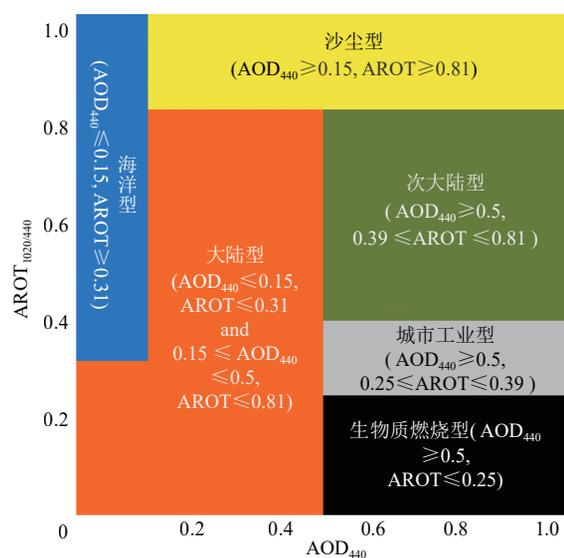


图 1 气溶胶图形分类法

Fig. 1 The graphical aerosol classification method

3 结果与分析

3.1 中国台湾岛气溶胶特性分析

3.1.1 气溶胶光学厚度的时间变化趋势

本研究基于 AOD_AERONET 数据集进行计算，获取 5 个站点截至 2020-06-30 的平均 AOD (年际、季节、月度、日变化)。图 2 (a) 为各站点 AOD 年际变化图，使用线性拟合的方法获取其年际变化

趋势。成功大学站共17年(2002年—2018年)的数据,其中有效观测天数2355 d,年平均值、最大值、最小值、斜率、 R^2 分别为0.4863、0.7534(2002年)、0.3590(2018年)、 -0.0162 、0.5437。嘉义站有效观测天数共853 d(2013年—2018年),年平均值为0.5954, AOD整体下降速度最快(斜率为 -0.0164)。气象局站从2002年—2019年共18 a的数据,有效观测天数为2011d,在2010年达到峰值(0.6688),随后逐渐下降趋于稳定。“中央大

学”站观测时间序列较长,从1998年—2020年共23 a的数据,有效观测天数共3133 d,最大值、最小值分为0.5662(2002年)、0.2606(2020年),23 a间存在多次波动,变化与其他站点相比较小。鹿林站位于中国台湾岛中部阿里山区内,有相关研究指出中国台湾岛中东部山区及丘陵地区的AOD值较低(Wang等, 2020b),本研究得出结论与其基本一致。总体而言,中国台湾岛的AOD年平均值呈现明显下降的趋势。

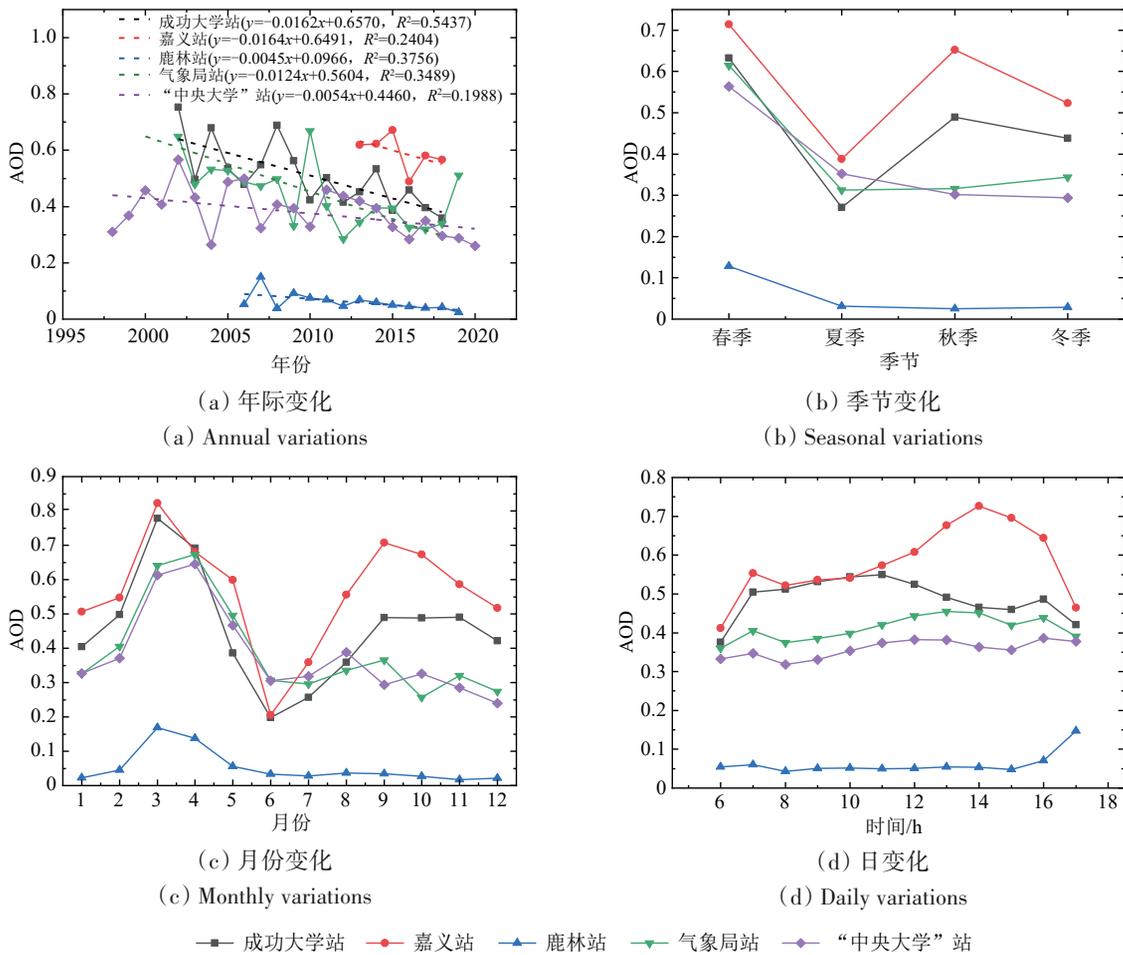


图2 各站点AOD的时间变化特征图

Fig. 2 The AOD temporal variation characteristics at AERONET sites

针对季节、月份的AOD值平均变化趋势(图2(b)(c)),中国台湾岛5个典型站点的气溶胶特征明显不同,其中春季AOD平均值最高,分别为成功大学站(0.6324)、嘉义站(0.7142)、鹿林站(0.1277)、气象局站(0.6149)、“中央大学”站(0.5549)。具体而言,成功大学站和嘉义站季节AOD变化趋势较一致,春秋季节受东北风的影响,大量气溶胶由外部输送,呈现“春秋高、夏

冬低”的双峰结构;月份趋势则在3月和9月分别达到峰值,6月和1月达到年度最低。有研究表明,中国台湾地区夏季受到海洋清洁气团的影响(Wai等, 2017),因此两站点AOD值达到最低,分别为0.2705、0.3876。与之相比,鹿林站、气象局站、“中央大学”站3个站点AOD的变化表现出明显差异,AOD值从春季到夏季快速下降,而后保持相对稳定,波动较小;月份变化以4月和6月

为分界点, 1—6月 AOD 值呈现先升高后降低的趋势, 6 月后保持相对稳定, 略有起伏。

将所有数据根据小时平均, 得到 AOD 值日变化结果 (图 2 (d))。嘉义站相较于其他 4 个站点, 其 AOD 日变化幅度和变化趋势均表现出明显差异; 首先是日变化幅度最大, 最大值为 14 时 (0.7261), 最小值为 6 时 (0.4121), 变化幅度达 0.314; 其次日变化趋势以 14 时为界, 6—14 时呈现先快速上升后增速放缓, 14—17 时持续下降。而其余 4 个站点变化幅度较小, 相对稳定, 但也存在差异; 具体而言, 成功大学站 AOD 值从 6 时—7 时变化速率较大, 11 时达到日最大值; 另外 3 个站点变化相对稳定, 但鹿林站 AOD 值在 16—18 时呈现出与其他 4 个站点相反的趋势, 即其余 4 个站点 AOD 值下降, 而该站呈现上升趋势。

3.1.2 其他气溶胶光学参数的特征分析

本研究将各个站点的光学参数值按照季节平均 (表 2), 各站点在不同季节其光学参数具有较大的差异。中国台湾岛 5 个典型站点的 AE 季节平均值整体大于 1.0, 表明中国台湾岛的气溶胶粒子的粒径较小, 应多为人为污染的硫酸盐气溶胶。不同地区的 SSA 会受到当地燃料燃烧类型、长途传输和气候状况等多种因素影响, 相同地区由于年特征与季节变化也可能出现波动, 统计结果表明成功大学站、“中央大学”站、气象局站点在夏季时 SSA 值最大, 复折射指数虚部值最小, 其中 SSA 值分别为 0.9843、0.9701、0.9680, 复折射指数虚部分别为 0.0019、0.0039、0.0041, 而嘉义站在秋季时最大, SSA 为 0.9664, 复折射指数虚部为 0.0036。不对称因子中成功大学站和嘉义站点在秋季值最大, 分别为 0.7483、0.7573; “中央大学”站、气象局站在夏季时最大, 分别为 0.7324、0.7425; 鹿林站位于高山, 其不对称因子在冬季时达到最大值为 0.6820。

整体分析各个站点的平均粒子谱值 (图 3), 主要以细粒子为主。嘉义站由于城市的快速发展, 平均粒子谱值最大, 表明气溶胶中含有大量粒子半径较小的硫酸盐、黑碳等人为污染产生的物质。而鹿林站位于中国台湾中部阿里山区, 污染程度较低, 呈现出较低的平均值; 气象局站和“中央大学”站位于中国台湾岛西北处, 其粒子谱值变化较为一致。

表 2 气溶胶光学参数的季节变化

Table 2 Seasonal variations of aerosol optical parameters

参数	站点	春季	夏季	秋季	冬季
单次 散射比	成功大学站	0.9532	0.9843	0.9809	0.9622
	嘉义站	0.9544	0.9557	0.9664	0.9556
	“中央大学”站	0.9427	0.9701	0.9571	0.9397
	鹿林站*	0.9373	—	—	—
	气象局站	0.9528	0.9680	0.9602	0.9386
复折射 指数 (虚部)	成功大学站	0.0063	0.0019	0.0020	0.0044
	嘉义站	0.0057	0.0059	0.0036	0.0054
	“中央大学”站	0.0073	0.0039	0.0052	0.0076
	鹿林站*	0.0115	—	—	—
	气象局站	0.0060	0.0041	0.0047	0.0082
Ångström 波长指数	成功大学站	1.3466	1.4773	1.2810	1.3003
	嘉义站	1.3168	1.4114	1.2693	1.3056
	“中央大学”站	1.3233	1.3953	1.3141	1.277
	鹿林站	1.4667	1.3942	1.5231	1.428
	气象局站	1.3323	1.4048	1.3087	1.3216
不对称 因子	成功大学站	0.7312	0.7342	0.7483	0.7330
	嘉义站	0.7399	0.7382	0.7573	0.7361
	“中央大学”站	0.7246	0.7324	0.7288	0.7196
	鹿林站	0.6789	0.6773	0.6590	0.6820
	气象局站	0.7289	0.7425	0.7391	0.7261

注: *鹿林站的单次散射比和复折射指数(虚部)仅有春季数据, 其他季节无相应数据。

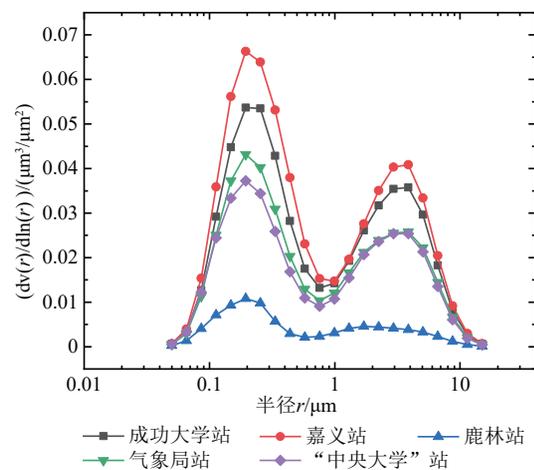


图 3 各站点粒子谱分布

Fig. 3 Data of aerosol size distribution at each site

3.2 气溶胶类型的特征

3.2.1 不同站点气溶胶类型差异

利用不同类型气溶胶光学特性的差异, 对中国台湾不同区域典型站点的气溶胶进行分类, 基

于分类结果研究中国台湾岛气溶胶类型长期的时空变化特征。图4表明, 中国台湾岛5个代表站点的气溶胶类型整体占比差异较为显著。因为台湾岛远离欧亚大陆主要沙尘源区, 难以受到沙尘的影响, 其沙尘型气溶胶整体占比小于1%。鹿林站(图4(c))位于阿里山区, 远离城市, 且海拔较高(2868 m), 大多以海洋型气溶胶为主, 占整体的69.97%, 其次为城市工业型和生物质燃烧型气溶胶, 分别占19.56%和9.71%, 其余类型均占比小于1%。成功大学站(图4(a))、嘉义站(图

4(b))、气象局站(图4(d))、“中央大学”站(图4(e))城市化进展快, 城市工业型气溶胶占比最高, 分别为72.19%、78.26%、66.88%、66.81%。气象局站、“中央大学”站位于中国台湾岛西北海岸地区, 其海洋型占比高分别为11.96%、13.37%, 其次为大陆型气溶胶占比分别为9.5%和10.03%, 同时5个站点都具有由于秸秆燃烧等产生的生物质燃烧型气溶胶, 占比分别为10.11%、5.84%、9.71%、7.94%、7.22%。

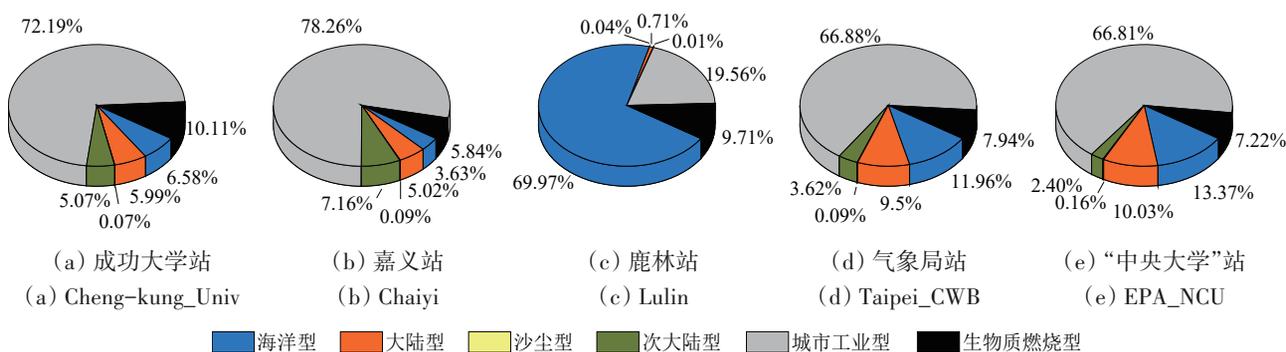


图4 各站点气溶胶类型占比图

Fig. 4 The average proportions of the six aerosol types at each site

3.2.2 不同季节气溶胶类型差异

各站点气溶胶类型季节变化特征如图5。成功大学站(图5(a))位于中国台湾岛西南部, 春季、冬季城市工业型气溶胶占比最高, 分别为81%、84%, 而夏季(36%)较春季下降了45%, 海洋型及生物质燃烧型气溶胶占比上升, 分别上升了19%、25%。嘉义站(图5(b))四季均存在大比例的城市工业型气溶胶, 春季、秋季、冬季均达到80%以上, 而夏季由于西南季风的影响, 大气气溶胶粒子输送广、易扩散, 使占比下降至44%。气象局站(图5(d))和“中央大学”站(图5(e))位于中国台湾岛西北岸, 具有一致的气候条件, 使两个站点四季气溶胶类型变化基本相似, 春季(79%, 81%)和冬季(75%, 74%)城市工业型气溶胶占比最大; 而在夏季受到季风及降雨的影响, 导致半径较小的人为污染的气溶胶粒子被冲散, 因此两个站点在夏季城市工业型气溶胶占比最小, 分别为51%、52%, 生物质燃烧型、大陆型和海洋型气溶胶都在夏季上升, 随后季节内又逐渐降低。而对于高山鹿林(图5(c))背景站, 四季内主要

以海洋型气溶胶为主。

3.2.3 气溶胶类型占比的年际变化

各站点气溶胶类型占比年际变化特征如图6。西南岸的成功大学站(图6(a)), 生物质燃烧型气溶胶占比增加明显, 城市工业型气溶胶占比逐渐下降, 大陆型、海洋型、次大陆型气溶胶占比各年有所波动, 且2018年后有上升的趋势。嘉义站(图6(b))随着年际的变化, 城市工业型、大陆型、次大陆型气溶胶占比在逐渐的上升。西北岸的气监局站(图6(d))、“中央大学”站(图6(e))具有不同的变化差异, 近十年以来, 气象局站的生物质燃烧型气溶胶在逐渐的上升, 次大陆型气溶胶占比在逐渐消失, 进而被城市工业型气溶胶代替; 中央大学, 生物质燃烧型气溶胶占比逐渐降低, 海洋型气溶胶占比保持稳定。鹿林站(图6(c))近十几年以来, 海洋型气溶胶整体占比比较大, 生物质燃烧型气溶胶次之, 但其占比也在逐渐的降低。图形分类法定量研究了中国台湾岛气溶胶类型的时空变化, 但是不同气溶胶类型的具体来源还需进一步研究。

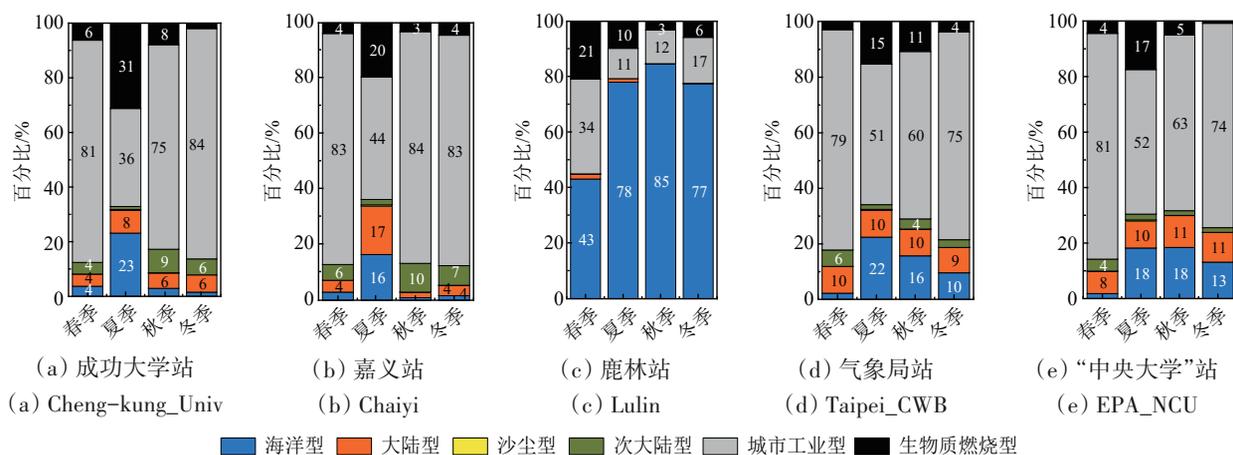


图5 各站点不同气溶胶类型占比季节变化特征
 Fig. 5 The seasonal variations in the proportions of different aerosol types at each site

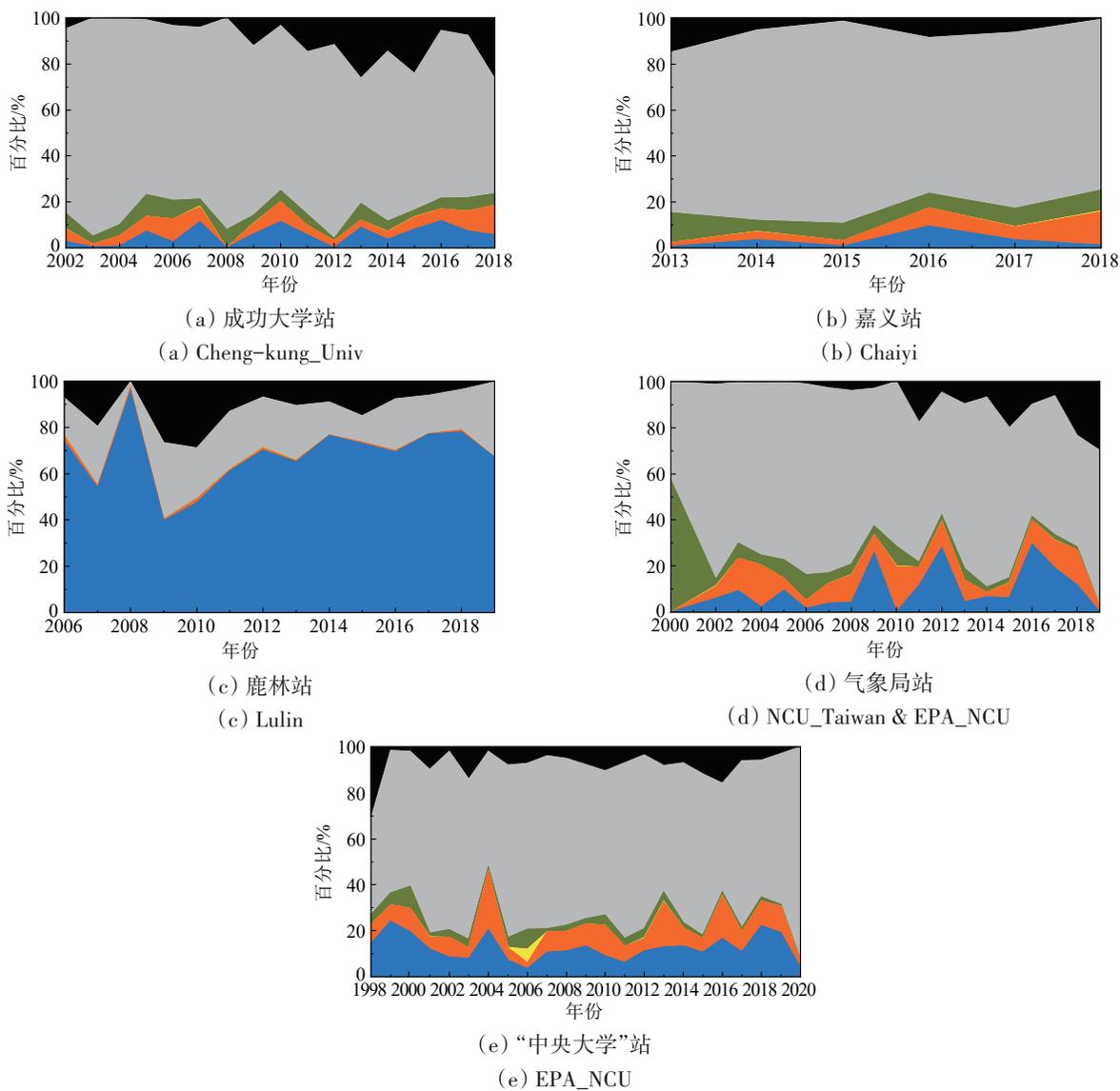
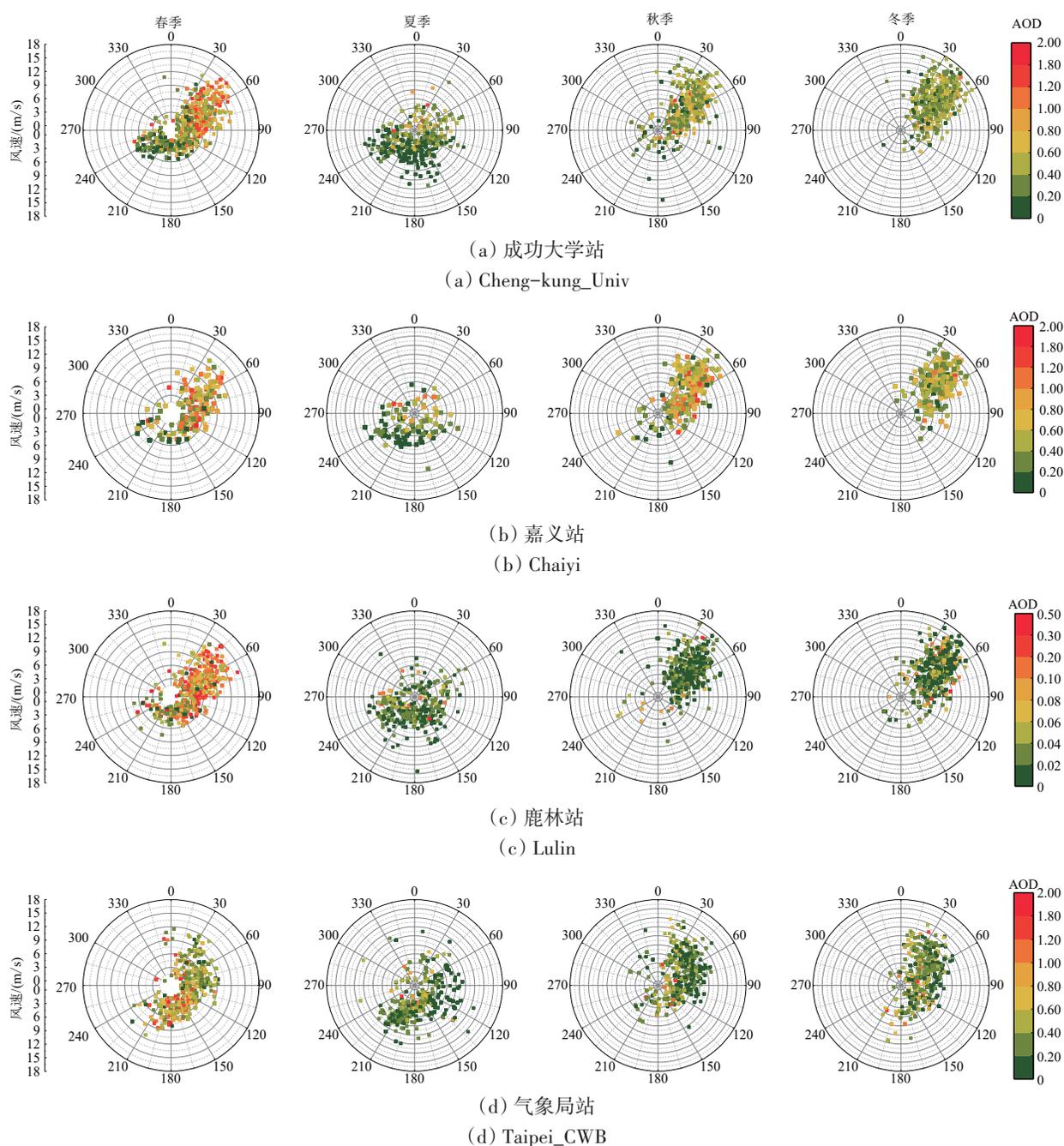


图6 各站点不同气溶胶类型占比年际变化特征
 Fig. 6 The interannual variations in the proportions of different aerosol types at each site

3.3 气溶胶特征与风向风速的关系

中国台湾岛各典型站点的风向、风速对气溶胶的影响如图7所示, 其中散点代表AOD值, 纵坐标为风速, 极径代表风向。近10年中国台湾岛平均风速几乎未变, 但近30年数据则显示直线趋势减少0.5 m/s, 以秋季及西部市镇减少较多, 各地盛行风向改变不多, 冬季多东北风, 夏季多西南风(萧长庚, 2008)。对于5个典型站点而言, 其1—5月和9—12月以东北到偏北风为主, 而4月起偏西、西南和偏南风向逐渐增多, 夏季主要以这3个

风向为主, 风速越大, AOD值越小, 反之亦然。西南部嘉义站(图7(b)), 受当地农业、工业活动及东北风的影响下, AOD值普遍较高。西北岸的气象局站(图7(d))和“中央大学”站(图7(e))一年四季的AOD值变化基本相似, 春季受东北风和西南风的影响, 以及大陆气溶胶的影响, AOD值偏大; 秋季、冬季受东北风的影响, 以及海洋清洁气团的影响, AOD值降低。鹿林站(图7(c))受风向风速的影响较小, AOD值也较小。



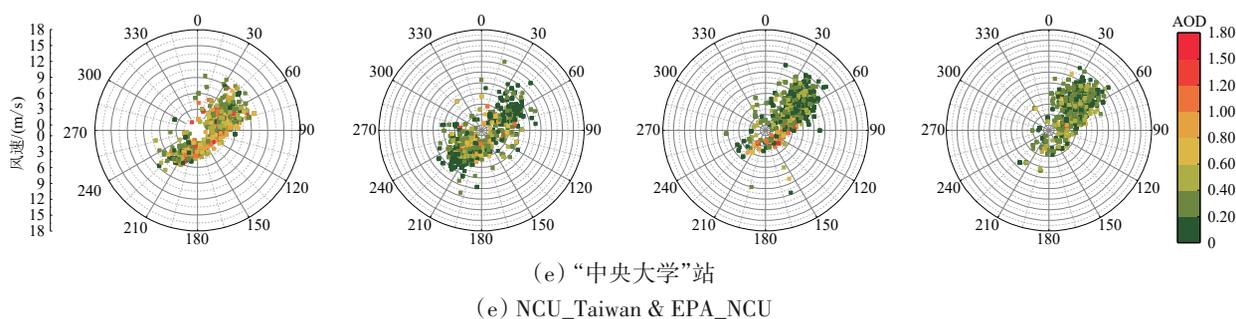


图7 各站点AOD与风向风速的季节变化特征
Fig. 7 The seasonal variations of AOD and wind direction and wind speed at each site

进一步探究风向、风速与气溶胶类型的关系(图8),其中散点代表了气溶胶类型,纵坐标为风速,极径代表风向。5个典型站点的主导风向是东北风,其次是西南风。位于西南岸和东北风下风向的成功大学站(图8(a)),东北风向上以城市工业型气溶胶为主,受到海洋及大陆影响的西南风向上,以海洋型气溶胶为主。嘉义站(图8(b))东北风影响显著,城市工业型气溶胶为主,西南风向上含有海洋型和大陆型气溶胶。西北岸的气象

局站(图8(d))和“中央大学”站(图8(e)),气象局站点三面环海,东北风,东风、西南风向上上都存在一定的海洋型气溶胶,而“中央大学”站仅在东北风和西南风上存在海洋型气溶胶,两个站点在风速较小时,都含有较多不易被扩散的生物物质燃烧型气溶胶。鹿林站(图8(c))以东北和西南风向上的海洋型气溶胶为主,风速较小时含有部分生物物质燃烧型和城市工业型气溶胶。

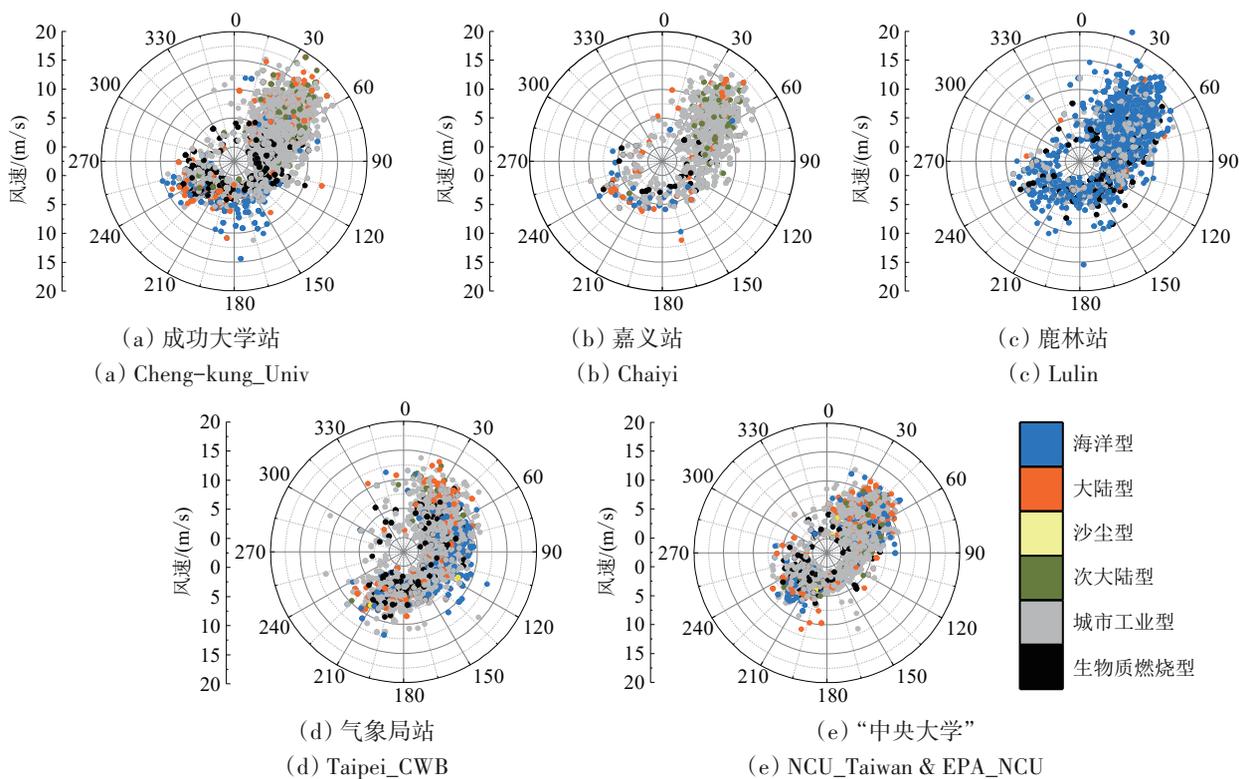


图8 各站点不同气溶胶类型与风向风速的关系
Fig. 8 The variations of different aerosol types and wind direction and wind speed at each site

3.4 台湾“中央大学”站与北京站对比分析

本研究使用AERONET站点历史数据分析了中

国台湾岛主要几个站点的气溶胶特性和时间变化规律。相比于其他站点观测到气溶胶特性,中国

台湾岛在气溶胶的季节变化、气溶胶类型和主要几个参数上存在一定的差异。四面沿海的台湾被北回归线划分为亚热带季风和热带季风气候, 北京属于温带季风性气候, 气候变化导致气溶胶不

同, 北京站点具有长时间的数据, 为此, 本研究将中国台湾岛和北京地区具有相同下垫面及城市化发展速度的“中央大学”站和北京站进行对比, 表3按季节统计了各光学参数的差异。

表3 台湾“中央大学”站与北京站点气溶胶光学参数的季节变化

Table 3 Seasonal variations of aerosol optical parameters at NCU and Beijing sites

季节	AOD		Ångström 波长指数		单次散射比		复折射指数(虚部)	
	北京站	“中央大学”站	北京站	“中央大学”站	北京站	“中央大学”站	北京站	“中央大学”站
春季	0.5412	0.5634	1.0107	1.3222	0.9135	0.9427	0.0081	0.0073
夏季	0.7823	0.3519	1.2375	1.3963	0.9421	0.9701	0.0069	0.0038
秋季	0.4653	0.3023	1.1792	1.3141	0.9143	0.9571	0.0106	0.0052
冬季	0.3467	0.2941	1.1611	1.2774	0.8978	0.9397	0.0136	0.0076

北京站 AE 值整体大于 1.0, 且“中央大学”站的 AE 值整体大于北京站, 说明中央大学的气溶胶粒子粒径较北京站更小, 且 Chan (Chan and Chan, 2017) 指出台北市约有 60% 的有机碳气溶胶来自亚洲的人为源, 而其他大陆的人为排放量影响较小。对于北京站而言, 夏季时 AOD、AE、SSA 值是四季中最大的, 反映了北京站在夏季是硫酸盐等粒子半径较小, 散射特性比较强的气溶胶光学情况。“中央大学”站 AOD 在春季时最高, 而 AE、SSA 在夏季时达到最大值, 复折射指数(虚部)值最低, 说明夏季主要是城市本地工业、生物质燃烧等导致。

图9统计对比了4组气溶胶光学参数的差异。图9(a)可以发现, 两个站点的AOD均值都呈现明显的下降趋势, 但北京站的均值较高, 下降幅度更大。在图9(b) AOD的季节变化方面, 北京站的最高值出现在夏季, 而“中央大学”站最高值出现于春季。北京站的特征与多数大陆地区的AOD季节变化特征相近, 由于夏季高温、高湿和低风速的气象条件, 非常有利于SO₂污染物向硫酸盐气溶胶转化(Zhao等, 2013), 新生成的硫酸盐气溶胶属于无机细颗粒物, 容易吸湿增长, 对光的消光作用增强, 导致AOD值变大(He等, 2012)。而中国台湾地区地处亚热带、热带季风区, 夏季时降水充沛, 加速了气溶胶的冲刷, 导致此站点的AOD值在夏季较小。在图9(c)粒子谱分布方面, 北京站的粗粒子占比明显更高, 主要受到西北地区频繁的沙尘影响和局地城市扬尘所造成的粗颗粒物。图9(d)北京站春季沙尘气溶胶占比较高(4%)的结果, 解释了华北区域主

要受到西北及偏西气流影响, 沙尘暴、扬沙天气使空气中粗粒子较多的现象(晏利斌和刘晓东, 2009)。从北京站的气溶胶类型季节变化可看出, 从夏季至冬季城市工业型气溶胶占比逐渐下降(15%), 而大陆型气溶胶占比逐渐上升(9%)。但“中央大学”站却与北京站呈现出极大的差异, 春季城市工业型气溶胶占比81%, 由于此站点具有密集的人口, 燃料燃烧、工农业生产等导致此类气溶胶占比较高。“中央大学”站夏季海洋型气溶胶较春季增高(15%), 因为在夏季主要盛行西南季风, 此时台湾海峡及周边区域的气溶胶类型以海洋型气溶胶为主(赵阳和孙学金, 2016)。进入冬季后, 市区周围的山地与丘陵地较易形成地形雨, 对气溶胶具有一定的冲刷作用, 因此秋季、冬季时城市工业型气溶胶较春天降低, 分别占比为63%、74%, 与北京站点呈现相反的现象, 北京站点夏季之后, 城市工业型气溶胶逐渐降低, 而中央大学却逐渐升高。

3.5 中国台湾岛 AOD 数据验证

前文基于 AERONET 数据研究了中国台湾岛的气溶胶光学特性、气溶胶类型的平均特征及时空演变特征, 并且定量研究了各站点各气溶胶类型的占比, 分析了风向风速对气溶胶的影响, 对比了台湾岛与北京站点气溶胶的差异, 发现气溶胶光学特性及气溶胶类型在不同的风向风速的影响下, 其不同站点不同季节气溶胶内部具有较大的差异性, 因此进一步结合 MODIS 卫星观测资料与 AERONET 地基数据分站点及气溶胶类型进行验证。

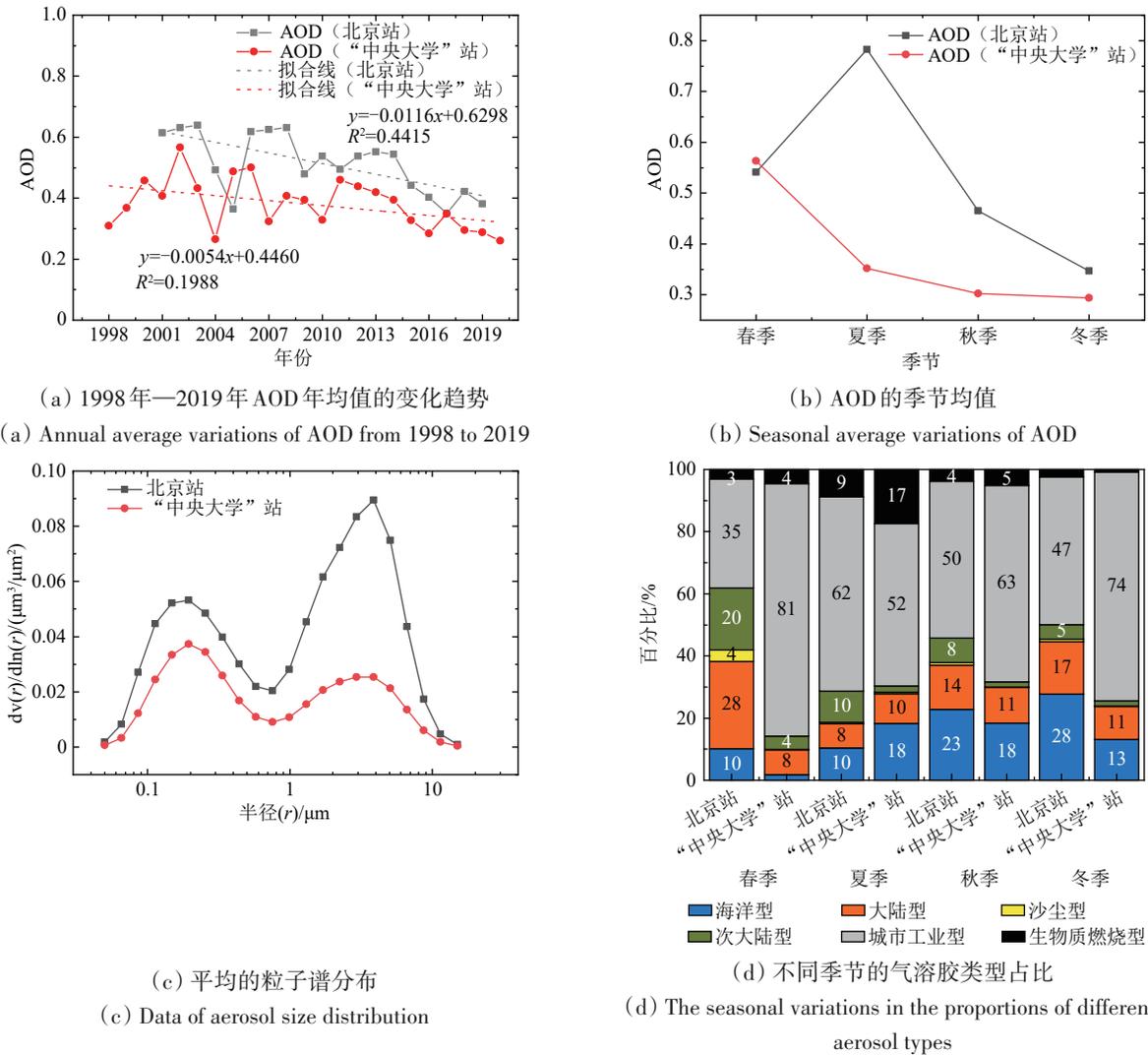


图9 台湾“中央大学”站和北京站点气溶胶特性差异
Fig. 9 Differences in aerosol characteristics between NCU and Beijing sites

地基自动太阳光度计可以通过太阳直射和天空散射两种观测方式较为准确地测量和研究局地气溶胶光学参数，其气溶胶光学厚度数据的一个重要作用便是作为观测真值标定卫星气溶胶反演产品。本研究利用 AERONET 站点 AOD 数据 (AOD_AERONET)，验证 MODIS 深蓝算法的 AOD 产品 (AOD_MODIS)，分析气溶胶卫星产品在中国台湾地区的反演精度。图 10 为 5 个站点 AOD 验证的散点图及相关的回归统计参数。其中嘉义站 (图 10 (b)) 的反演精度较高， R^2 、RMSE、斜率、截距数值分别为 0.8632、0.1368、0.8763、0.0567；而成功大学站 (图 10 (a)) 的反演精度较低，在低值条件下卫星反演结果明显偏高，RMSE 值到达 0.2589；气象局站 (图 10 (d)) 和“中央大学”站 (图 10 (e)) 精度基本在一个水平，斜率分别为 0.6553、0.7459，存在一定程度的高值偏低，低

值偏高。鹿林站 (图 10 (c)) 建于中部阿里山区，是典型的高山背景站，远离人为排放，大气较为洁净，AOD 的观测值基本不超过 0.5。在多数情况下，鹿林站的 AOD 在 0.1 以下，由于数值较低，具有最低的 RMSE (0.0394)，回归方程 $y=0.7524x+0.0231$ ，跟其他站点相比具有明显差异。

在 AOD 的病态反演过程中，气溶胶光学参数作为先验信息隐含在气溶胶类型中，气溶胶类型参数的误差势必传递到 AOD 反演过程，造成偏差。为分析卫星产品在不同气溶胶类型条件下的反演精度，本研究采用 2.5.3 中介绍的气溶胶图形分类法将 AERONET 的观测样本点分为海洋型、大陆型、沙尘型、次大陆型、城市工业型、生物质燃烧型 6 类，并分类验证卫星反演精度，结果如图 11 所示 (样本点与图 10 相同)。

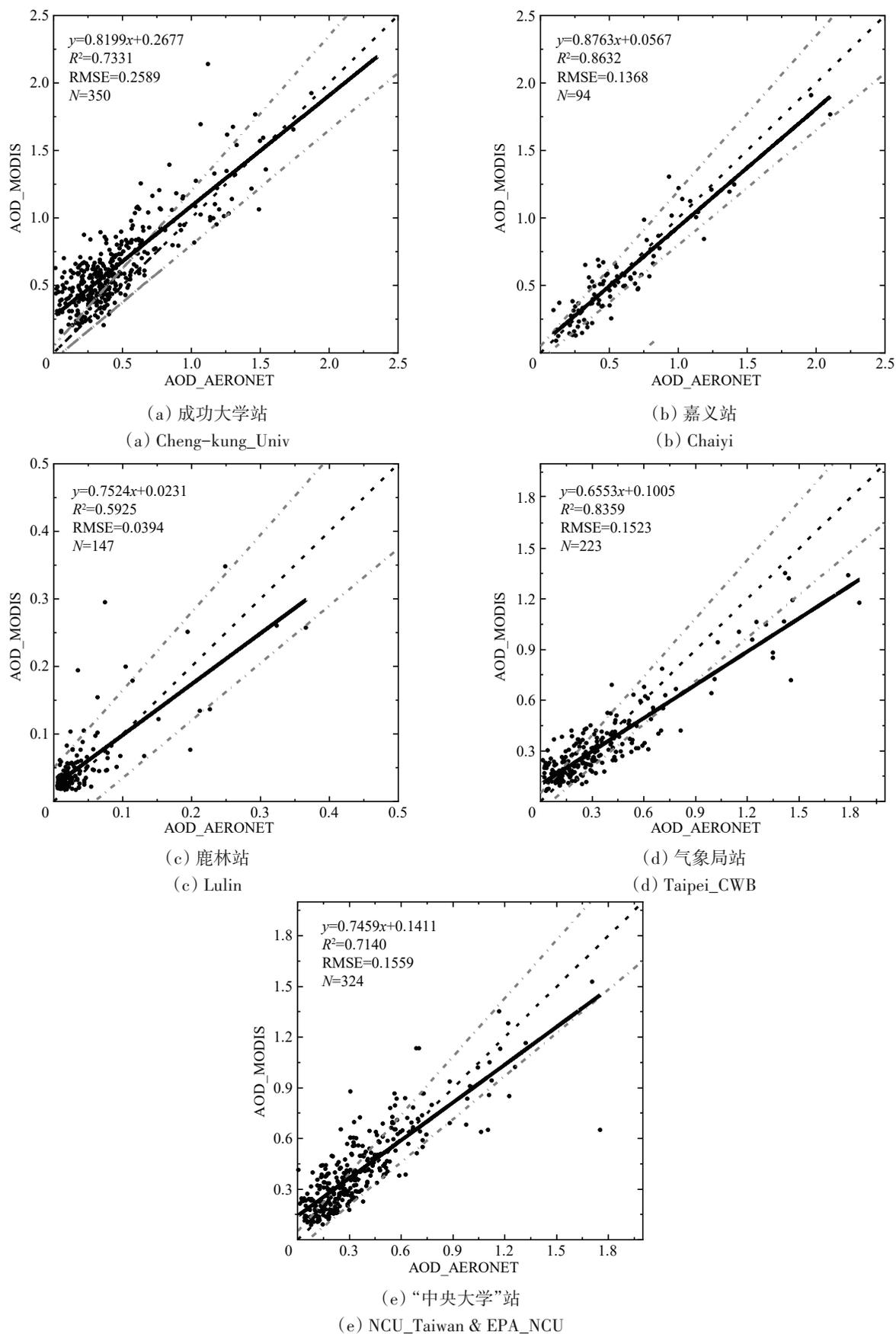


图 10 AOD_MODIS 与 AOD_AERONET 散点对比图

Fig. 10 Scatter plot from AOD of MOIDS data at 550 nm against AERONET AOD

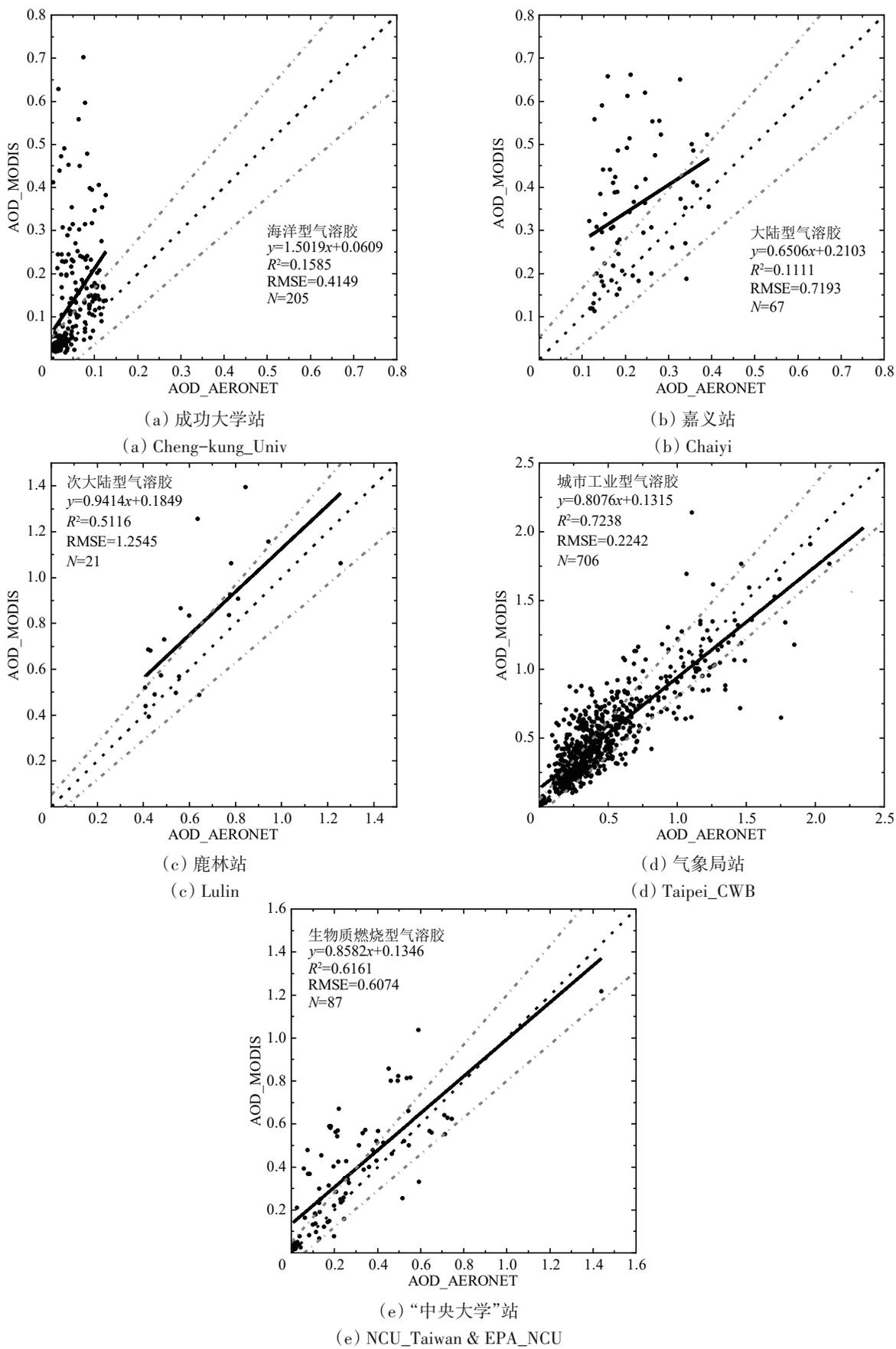


图 11 不同类型气溶胶光学厚度的散点对比图
 Fig.11 Scattered comparison chart of different types of AOD

图 10 中根据站点分类其验证结果较好, 但图 11 中将所有站点数据按照气溶胶图形法分类后, 气溶胶反演误差被显著放大。特别是在海洋型 (图 11 (a)) 和大陆型 (图 11 (b)) 两种气溶胶类型当中, 其验证精度较差, R^2 仅为 0.1585、0.1111, RMSE 分别为 0.4149、0.7193。海洋型气溶胶类型条件下, 卫星 AOD 产品呈现明显的高估, 部分样本在地面观测中 AOD 值小于 0.1, 却被卫星反演得到近 0.7 的偏差。而对于大陆型, 虽然回归方程的斜率为 0.6506, 但其截距高达 0.2103, 散点基本落于 1: 1 线以上, 卫星 AOD 产品高估严重。其他几个站点, 次大陆型 (图 11 (c))、生物质燃烧型 (图 11 (e)) 样本点较少没有代表性, 城市工业型 (图 11 (d)) 占多数样本 (706 个), 反演精度合理, R^2 、RMSE 分别为 0.7238 和 0.2242。

从分类型的验证结果可以看出, 在海洋和大陆型条件下, 卫星的 AOD 反演呈现较大的偏差, 说明在反演算法中以时空限定气溶胶类型的方法在气溶胶成分高频变化的条件下存在较大误差。中国台湾岛四面环海, 而地域有限, 人类活动密集, 其气溶胶特性受排放源和季风环流的影响较大, 在此背景下, 更为准确的气溶胶特性研究和气溶胶类型的动态描述对气溶胶卫星反演工作愈显关键, 且本文的气溶胶类型研究并不能区分本地源和外来源, 因此下一步工作有必要考虑各种气象条件与不同类型气溶胶的关联及对各种气溶胶输送所起到的作用, 完善气溶胶分类标准和阈值的选择, 提高卫星反演数据的精度。

4 结 论

本研究首先分析气溶胶光学参数的变化趋势、气溶胶类型差异、风向风速对 AOD 和气溶胶类型的影响, 并与北京站气溶胶光学参数对比, 其次根据 AERONET 数据验证 MODIS 数据, 主要研究结论如下:

(1) 中国台湾岛 5 个典型站点的 AOD 年际变化至今呈现整体下降的趋势; AOD 存在季节性差异, 春季 AOD 较高且日变化规律呈现双峰结构, 各站点的气溶胶光学参数也呈现出较大的差异性。

(2) 鹿林站点气溶胶类型以海洋型气溶胶为主, 其余站点都以城市工业型气溶胶为主。春季、秋季、冬季时主要受到东北风的影响, 其城市工业型气溶胶类型较多, 而夏季时为西南风, 主要

为海洋型和大陆型气溶胶。且风速越大, AOD 值越小, 反之亦然。

(3) 北京站与“中央大学”站对比, 北京站的 AOD 年际平均值整体大于“中央大学”站, 但两者都呈现下降的趋势。“中央大学”站春季 AOD 值高, 而北京站为夏季。两个站点气溶胶类型都主要为城市工业型气溶胶, 但其内部季节变化差异较大。

(4) 中国台湾岛 5 个典型站点的 AOD_AERONET 和 AOD_MODIS 数据之间验证精度较好, 但以气溶胶类型分类后, 海洋型和大陆型验证精度显著降低, 而其他类型精度与站点类型精度相当, 说明台湾海岛复杂多变的气溶胶类型会显著影响卫星气溶胶反演的精度。

(5) 本文分析中国台湾岛气溶胶光学特性差异及其时间变化特征, 但对这些差异的影响因素分析较为不足, 后续工作需要结合气象因素和排放源信息进行更加深入的探讨。

参考文献 (References)

- Ångström A. 1929. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, 11(2): 156-166 [DOI: 10.2307/519399]
- Bilal M, Nichol J E and Wang L C. 2017. New customized methods for improvement of the MODIS C6 Dark Target and Deep Blue merged aerosol product. *Remote Sensing of Environment*, 197: 115-124 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.028]
- Chan K L and Chan K L. 2017. Aerosol optical depths and their contributing sources in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 148: 364-375 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.11.011]
- Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, Damiri B, Goloub P, Li Z Q, Zhang X C, Wei Y, Zhou H G, Dong F, Li D P and Zhou T M. 2009. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D3): D03206 [DOI: 10.1029/2008jd.011030]
- Chen Q X, Shen W X, Yuan Y and Tan H P. 2019. Verification of aerosol classification methods through satellite and ground-based measurements over Harbin, Northeast China. *Atmospheric Research*, 216: 167-175 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.09.022]
- Chen Q X, Yuan Y, Huang X, He Z H and Tan H P. 2018. Assessment of column aerosol optical properties using ground-based sun-photometer at urban Harbin, Northeast China. *Journal of Environmental Sciences*, 74: 50-57 [DOI: 10.1016/j.jes.2018.02.003]
- Chen Q X, Yuan Y, Huang X, Jiang Y Q and Tan H P. 2017. Estimation of surface-level $PM_{2.5}$ concentration using aerosol optical thickness through aerosol type analysis method. *Atmospheric Environment*, 159: 26-33 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.050]
- Chen Q X, Yuan Y, Shuai Y and Tan H P. 2016. Graphical aerosol classification method using aerosol relative optical depth. *Atmospheric*

- Environment, 135: 84-91 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.061]
- Chen W N, Chen Y W, Chou C C K, Chang S Y, Lin P H and Chen J P. 2009. Columnar optical properties of tropospheric aerosol by combined lidar and sunphotometer measurements at Taipei, Taiwan. *Atmospheric Environment*, 43(17): 2700-2708 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.02.059]
- Dai Y F, Zhang G H and Wei X. 2018. Overview of the use of AERONET site data in China. *Science and Technology Innovation Herald*, 15(6): 153-156 (戴一帆, 张广何, 韦旭. 2018. 中国地区 AERONET 站点数据的使用概述. *科技创新导报*, 15(6): 153-156) [DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.06.153]
- Eck T F, Holben B N, Dubovik O, Smirnov A, Goloub P, Chen H B, Chatenet B, Gomes L, Zhang X Y, Tsay S C, Ji Q, Giles D and Slutsker I. 2005. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D6): D06202 [DOI: 10.1029/2004jd005274]
- Eck T F, Holben B N, Reid J S, Dubovik O, Smirnov A, O'Neill N T, Slutsker I and Kinne S. 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24): 31333-31349 [DOI: 10.1029/1999JD900923]
- Ehn M, Thornton J A, Kleist E, Sipilä M, Junninen H, Pullinen I, Springer M, Rubach F, Tillmann R, Lee B, Lopez-Hilfiker F, Andres S, Acir I H, Rissanen M, Jokinen T, Schobesberger S, Kangasluoma J, Kontkanen J, Nieminen T, Kurtén T, Nielsen L B, Jørgensen S, Kjaergaard H G, Canagaratna M, Dal Maso M, Berndt T, Petäjä T, Wahner A, Kerminen V M, Kulmala M, Worsnop D R, Wildt J and Mentel T F. 2014. A large source of low-volatility secondary organic aerosol. *Nature*, 506(7489): 476-479 [DOI: 10.1038/nature13032]
- He Q S, Li C C, Geng F H, Yang H Q, Li P R, Li T T, Liu D W and Pei Z. 2012. Aerosol optical properties retrieved from Sun photometer measurements over Shanghai, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D16): D16204 [DOI: 10.1029/2011JD017220]
- He X, Zhou R, Yao Y, Shen Z X and Zhu J. 2020. The spatiotemporal variations of aerosol types in representative sites of China basing on the Aerosol Robotic Network (AERONET). *China Environmental Science*, 40(2): 485-496 (贺欣, 周茹, 姚媛, 沈子宣, 朱君. 2020. 基于 AERONET 的中国地区典型站点气溶胶类型变化特征. *中国环境科学*, 40(2): 485-496) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2020.02.003]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenu F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/s0034-4257(98)00031-5]
- Holben B N, Tanré D, Smirnov A, Eck T F, Slutsker I, Abuhassan N, Newcomb W W, Schafer J S, Chatenet B, Lavenu F, Kaufman Y J, Castle J V, Setzer A, Markham B, Clark D, Frouin R, Halthore R, Karneli A, O'Neill N T, Pietras C, Pinker R T, Voss K and Zibordi G. 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D11): 12067-12097 [DOI: 10.1029/2001JD900014]
- Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, Sayer A M, Hansell R, Seftor C S, Huang J and Tsay S C. 2013. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: the second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16): 9296-9315 [DOI: 10.1002/jgrd.50712]
- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3): 557-569 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.824067]
- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2006. Deep blue retrievals of asian aerosol properties during ACE-asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3180-3195 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.879540]
- Ichoku C, Chu D A, Mattoo S, Kaufman Y J, Remer L A, Tanré D, Slutsker I and Holben B N. 2002. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products. *Geophysical Research Letters*, 29(12): 1616 [DOI: 10.1029/2001GL013206]
- Jia L L, Wang X Q, Su H and Wang F. 2018. Validation of retrieving aerosol over Taiwan Island using GF-1 satellite WFV data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(3): 1117-1127 (贾亮亮, 汪小钦, 苏华, 王峰. 2018. 台湾岛高分一号卫星 WFV 数据气溶胶反演与验证. *环境科学学报*, 38(3): 1117-1127) [DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0431]
- Jin S K, Ma Y Y, Zhang M, Gong W, Lei L F and Ma X. 2019. Comparison of aerosol optical properties and associated radiative effects of air pollution events between summer and winter: a case study in January and July 2014 over Wuhan, Central China. *Atmospheric Environment*, 218: 117004 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117004]
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R and Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-472 [DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2]
- Kaufman Y J, Herring D D, Ranson K J and Collatz G J. 1998. Earth observing system AM1 mission to earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1045-1055 [DOI: 10.1109/36.700989]
- Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, Gao B C, Li R R and Flynn L. 1997. The MODIS 2.1- μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1286-1298 [DOI: 10.1109/36.628795]
- King M D, Kaufman Y J, Menzel W P and Tanre D. 1992. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1): 2-27 [DOI: 10.1109/36.124212]
- Kishcha P, Wang S H, Lin N H, da Silva A, Lin T H, Lin P H, Liu G R, Starobinets B and Alpert P. 2018. Differentiating between local and remote pollution over Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(7): 1788-1798 [DOI: 10.4209/aaqr.2017.10.0378]
- Kumar K R, Sivakumar V, Reddy R R, Gopal K R and Adesina A J.

2014. Identification and classification of different aerosol types over a subtropical rural site in mpumalanga, south africa: seasonal variations as retrieved from the AERONET sunphotometer. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1): 108-123 [DOI: 10.4209/aaqr.2013.03.0079]
- Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, Remer L A, Sayer A M, Patadia F and Hsu N C. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11): 2989-3034 [DOI: 10.5194/amt-6-2989-2013]
- Li Z Q, Li D H, Li K T, Xu H, Chen X F, Chen C, Xie Y S, Li L, Li L, Li W, Lv Y, Qie L L, Zhang Y and Gu X F. 2015. Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements. *Journal of Remote Sensing*, 19(3): 495-519 (李正强, 李东辉, 李凯涛, 许华, 陈兴峰, 陈澄, 谢一淞, 李莉, 李雷, 李伟, 吕阳, 伽丽丽, 张莹, 顾行发. 2015. 扩展多波长偏振测量的太阳—天空辐射计观测网. *遥感学报*, 19(3): 495-519) [DOI: 10.11834/jrs.20154129]
- Mao Q J, Zhang H X, Chen Q X, Huang C L and Yuan Y. 2019. Satellite-based assessment of direct aerosol radiative forcing using a look-up table established through AERONET observations. *Infrared Physics and Technology*, 102: 103017 [DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103017]
- Parkinson C L. 2003. Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 173-183 [DOI: 10.1109/tgrs.2002.808319]
- Qi B, Du R G, Yu Z F and Zhou B. 2014. Aerosol optical depth in urban site of Hangzhou. *China Environmental Science*, 34(3): 588-595 (齐冰, 杜荣光, 于之锋, 周斌. 2014. 杭州市大气气溶胶光学厚度研究. *中国环境科学*, 34(3): 588-595) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2014.03.008]
- Rao J W, Ma R H, Duan H T, Jiang G J, Shang L L and Zhou L. 2012. Aerosol optical thickness of the atmospheric aerosol over taihu lake and its features: results of in-site measurements. *Chinese Journal of Environmental Science*, 33(7): 2158-2164 (饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳. 2012. 太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析. *环境科学*, 33(7): 2158-2164) [DOI: 10.13227/j.hjcx.2012.07.016]
- Rosenfeld D, Andreae M O, Asmi A, Chin M, de Leeuw G, Donovan D P, Kahn R, Kinne S, Kivekäs N, Kulmala M, Lau W, Schmidt K S, Suni T, Wagner T, Wild M and Quaas J. 2014. Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions. *Reviews of Geophysics*, 52(4): 750-808 [DOI: 10.1002/2013RG000441]
- Si Y D, Chen L F, Xiong X Z, Shi S Y, Husi L and Cai K. 2020. Evaluation of the MISR fine resolution aerosol product using MODIS, MISR, and ground observations over China. *Atmospheric Environment*, 223: 117229 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117229]
- Smirnov A, Holben B N, Eck T F, Dubovik O and Slutsker I. 2000. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sensing of Environment*, 73(3): 337-349 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00109-7]
- Tanré D, Kaufman Y J, Herman M and Mattoo S. 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14): 16971-16988 [DOI: 10.1029/96JD03437]
- Wai K M, Ng E Y Y, Wong C M S, Tan T Z, Lin T H, Lien W H, Tanner P A, Wang C S H, Lau K K L, He N M H and Kim J. 2017. Aerosol pollution and its potential impacts on outdoor human thermal sensation: East Asian perspectives. *Environmental Research*, 158: 753-758 [DOI: 10.1016/j.envres.2017.07.036]
- Wang F, Wang X Q and Ding Y. 2020. Retrieval of aerosol optical depth over taiwan island using visible channels of sentinel-3A OLCI. *Journal of Geo-Information Science*, 22(10): 2038-2050 (王峰, 汪小钦, 丁宇. 2020. 利用 Sentinel-3A OLCI 可见光通道反演台湾岛气溶胶光学厚度. *地球信息科学学报*, 22(10): 2038-2050) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190394]
- Wang H B, Zhang L, Jiao S M, Zhang Z W, Zhu Y Y and Zhu C Y. 2016. Evaluation of the MODIS aerosol products and analysis of the retrieval errors in China. *Plateau Meteorology*, 35(3): 810-822 (王宏斌, 张镭, 焦圣明, 张志薇, 朱毓颖, 朱承瑛. 2016. 中国地区 MODIS 气溶胶产品的验证及反演误差分析. *高原气象*, 35(3): 810-822) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00043]
- Wang S H, Lei H W, Pani S K, Huang H Y, Lin N H, Welton E J, Chang S C and Wang Y C. 2020a. Determination of lidar ratio for major aerosol types over western north pacific based on long-term MPLNET data. *Remote Sensing*, 12(17): 2769 [DOI: 10.3390/rs12172769]
- Wang X Q, Wang F, Jia L L and Ding Y. 2020b. Retrieval and validation of aerosol optical depth using GF-1 WFV cameras data. *Advances in Space Research*, 65(3): 997-1007 [DOI: 10.1016/j.asr.2019.10.023]
- Wang Y, Xia W W, Liu X H, Xie S C, Lin W Y, Tang Q, Ma H Y, Jiang Y Q, Wang B and Zhang G J. 2021. Disproportionate control on aerosol burden by light rain. *Nature Geoscience*, 14(2): 72-76 [DOI: 10.1038/s41561-020-00675-z]
- Wang Y S, Xin J Y, Li Z Q, Wang P C, Wang S G, Wen T X and Sun Y. 2006. AOD and Ångström parameters of aerosols observed by the chinese sun hazemeter network from August to December 2004. *Chinese Journal of Environmental Science*, 27(9): 1703-1711 (王跃思, 辛金元, 李占清, 王普才, 王式功, 温天雪, 孙扬. 2006. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Ångström 参数联网观测(2004-08—2004-12). *环境科学*, 27(9): 1703-1711) [DOI: 10.3321/j.issn:0250-3301.2006.09.002]
- Wei J, Li Z Q, Peng Y R and Sun L. 2019. MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. *Atmospheric Environment*, 201: 428-440 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.004]
- Xiao C G. 2008. An overview of climate change of Taiwan in the last hundred years // *Proseminar of meteorological science and technology between both sides of Taiwan Straits*. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2008. (萧长庚. 2008. 近百年来台湾气候变化概述//2008年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 中国气象学会)
- Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, Wang P C, Hao W M, Nordgren B L, Wang S G, Liu G R, Wang L L, Wen T X, Sun Y and Hu B. 2007. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D5): D05203 [DOI: 10.1029/2006JD007075]
- Xu L, Liu Z M and Shi G Y. 1997. Measurement and analysis of atmospheric aerosol optical characteristics in Taiwan area. *Journal of Applied Meteorology Science*, 8(2): 252-253 (许黎, 柳中明, 石广

- 玉. 1997. 台湾地区大气气溶胶光学特性的测量与分析. 应用气象学报, 8(2): 252-253
- Yan L B and Liu X D. 2009. Seasonal variation of atmospheric aerosol and its relation to cloud fraction over Beijing-Tianjin-Hebei region. *Research of Environmental Sciences*, 22(8): 924-931 (晏利斌, 刘晓东. 2009. 京津冀地区气溶胶季节变化及与云量的关系. 环境科学研究, 22(8): 924-931) [DOI: 10.13198/j.res.2009.08.52.yanlb.019]
- Zhang Z, Ding J L, Wang J J, Chen X Y, Liu X T and Osman A. 2021. Temporal and spatial distribution characteristics of aerosol optical properties in urban agglomerations on the North Slope of the Tianshan mountains. *Environmental Science*, 42(5): 2202-2212 (张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼. 2021. 天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征. 环境科学, 42(5): 2202-2212) [DOI: 10.13227/j.hjkk.202009083]
- Zhao P S, Dong F, He D, Zhao X J, Zhang X L, Zhang W Z, Yao Q and Liu H Y. 2013. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9): 4631-4644 [DOI: 10.5194/acp-13-4631-2013]
- Zhao Y and Sun X J. 2016. Analysis and research on aerosol optical depth in Taiwan based on MODIS and sun photometers. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 33(1): 37-45 (赵阳, 孙学金. 2016. 基于MODIS和太阳光度计对台湾地区气溶胶光学厚度的分析研究. 气象水文海洋仪器, 33(1): 37-45) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-009X.2016.01.008]

Study of aerosol optical properties based on the AERONET data

ZHOU Pei^{1,2}, WANG Yang^{1,2,3}, XU Linglin^{1,2}, CHENG Zhiqiang^{1,2}, GE Chende^{1,2}, ZHUANG Liuwen^{1,2}

1. Institute of geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;
2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: The study of atmospheric aerosols lays the foundation of global climate change, air quality, and public health research. Different from those in the Chinese mainland, the special atmospheric circulation and local emission sources in Taiwan, China from its seagirt terrain have led to the difference in aerosols' characteristics. Lack of information on aerosol temporal and spatial characteristics might cause errors in the retrieval of satellite aerosol parameters.

On the basis of the historical data of several representative Aerosol Robotic Network (AERONET) sites in Taiwan, this study explored the temporal and spatial variation characteristics and differences of aerosol parameters and types of typical sites in Taiwan, China. First, the change trend of aerosol optical parameters was analyzed. The observation sample points of AERONET were divided into six categories, namely, maritime, continental, desert dust, sub-continental, urban industry, and biomass burning aerosols, using the graphical classification method. The differences in aerosol types at different sites and the effects of wind direction and speed on Aerosol Optical Depth (AOD) and aerosol types were explored, and they were comparing with the aerosol optical parameters of Beijing. Second, the MODIS data were validated against the AERONET data.

The annual average of AOD at each station is decreasing annually, which suggests the highest seasonal variation in spring (0.5257) and the diurnal variation of bimodal structure. The dominant aerosol type is urban industrial, and only Lulin station is maritime type. The northeast wind prevails in Taiwan, China, and the AOD is lower and the maritime aerosol type occupies larger proportion when the wind speed is higher. Conversely, urban industrial aerosols dominate. The average values of Ångström Exponent, Single Scattering Albedo, Refractive Index-Imaginary Part, and Asymmetry Factor are 1.3283, 0.9564, 0.0054, and 0.7292, respectively. Compared with those in the Beijing site (39.9768° N, 116.3813° E), the annual average of AOD, seasonal variation, and dominant aerosol types in the "Central University" shows a dramatic difference. For the remote retrieval products, MODIS AOD has higher verification accuracy at different sites, and only the Lulin site is slightly lower ($R^2=0.5925$). As for the verification results of different aerosol types, urban industry ($R^2=0.7238$), biomass burning ($R^2=0.6161$), and sub-continental ($R^2=0.5116$) have higher accuracy, while maritime ($R^2=0.1585$) and continental ($R^2=0.1111$) have significantly lower accuracy.

The types of aerosols in Taiwan, China show differences in temporal and spatial characteristics. The proportion of sub-continental types in the southwest coastal sites increases in autumn and winter, while the continental types in the northwest coast increase. Refining the characteristic changes of aerosol parameters plays an important role in guiding the aerosol satellite retrieval algorithm for island regions with distinct features of circulation.

Key words: atmospheric remote sensing, aerosol, AERONET, aerosol optical properties, temporal and spatial analysis

Supported by Public-Interest Scientific Institution of Fujian (No. 2020R11010009-1); National Natural Science Foundation of China (No. 42001295); Open Fund of the State Key Laboratory of Remote Sensing Science (No. OFSLRSS202011)