

星载激光雷达观测大气气溶胶成分研究

任文核, 张宇, 孙鹤泉

海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年12月3日; 录用日期: 2024年1月3日; 发布日期: 2024年1月10日

摘要

基于CALIPSO卫星的气溶胶类型产品, 研究和分析台湾海峡海域在2008至2018年期间各类型大气气溶胶的时空分布特征: 1) 受北方沙尘气候和季风气候的影响, 台湾海峡主导气溶胶类型为清洁大陆型(34%), 煤烟型(27%)和沙尘海洋型(15%), 合计占比75%以上; 2) 不同类型气溶胶的垂直分布特点差别明显: 其中清洁海洋型、污染大陆型、沙尘海洋型主要分布在2500米之下, 沙尘型、污染沙尘型、煤烟型分布在2500米之上; 3) 各类型气溶胶占比时间变化随季节变化明显, 主要集中在春季, 冬季其次, 秋季比冬季略低, 夏季最低。

关键词

CALIPSO, 气溶胶类型, 台湾海峡

Atmospheric Aerosol Distribution Based on Spaceborne Lidar

Wenhe Ren, Yu Zhang, Hequan Sun

Department of Military Oceanography & Hydrography, Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning

Received: Dec. 3rd, 2023; accepted: Jan. 3rd, 2024; published: Jan. 10th, 2024

Abstract

The paper studies and analyzes the spatial and temporal distribution characteristics of various types of atmospheric aerosols in the area of Taiwan Strait during the period from 2008 to 2018, based on the aerosol sub-types products from the CALIPSO satellite: 1) The dominant aerosol types in the Taiwan Strait are clean continental (34%), soot (27%), and sandy and dusty oceanic (15%), which accounted for a combined ratio of more than 75%; 2) Vertical distribution characteristics of different types of aerosols vary significantly: clean oceanic, polluted continental, and dusty oceanic types are mainly distributed below 2500 meters, while dusty, polluted dusty, and sooty types are distributed above 2500 meters; 3) The temporal variation in the percentage of each type of aerosol

varies significantly with the seasons, with the main concentration in the spring, followed by the winter, slightly lower in the fall than in the winter, and lowest in the summer.

Keywords

CALIPSO, Aerosol Type, Taiwan Strait

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气气溶胶一般指在大气中悬浮的气、液、固态粒子所形成的胶体，颗粒直径在 $0.001\ \mu\text{m}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ 之间。由于气溶胶结构来源复杂，观测数据少，所以不能准确地估算气溶胶为环境带来的具体影响[1]。在对气溶胶类型的分析与其演变规律的总结中，其垂直分布结构的变化可以通过影响大气中垂直加热率的分布结构而改变大气层结与动力过程，来改变气候、云层分布及其他气象要素的湍流运动以及存在时间，同时也是判断气溶胶辐射效应的关键因素之一[2]。

在过去的大气气溶胶观测中，主要使用的手段为地面站观测与微波雷达遥感观测，此方法观测区域小，受天气影响较大，不便于观测气溶胶的垂直分布情况。激光雷达可以监测大气气溶胶的光学性质和空间垂直分布[3] [4]。其灵敏度高和分辨率高的特点使其成为了观测反演气溶胶参数，分析大气垂直气溶胶结构的主要方法[5] [6] [7]。

在我国对海洋研究探测需求日益增长的大环境下，充分利用 CALIOP 星载激光雷达观测数据对我国周边海区气溶胶及其他方面进行数据处理与规律总结我国大气观测的重要一环。本文针对台湾海峡气溶胶分布特性进行重点分析，可为研究海域的大气能见度变化规律及气象变化规律提供参考。

2. 卫星数据和研究区域

2.1. CALIOP 数据

CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)，即“云-气溶胶正交偏振激光雷达”，是搭载在 2006 年发射的 CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 卫星上的一种载荷。该卫星还具有高解析度的光学仪器，可以探测云和气溶胶粒子的分布情况和气溶胶性质，以帮助科学家研究大气环境中的细微颗粒物和热波段强度变化，从而对气候变化产生的积极或消极影响做出判断[8]。

CALIOP 的数据产品划分为五个级别：Level 0、Level 1A、Level 1B、Level 2、Level 3、Level 4。一级数据是经过时间、地理等多方面的矫正的重组数据，并加入了多方面的从属信息。二级数据以一级数据为基础，并加入了多个 CALIPSO 测量仪器参与矫正，从而得到了不同水平分辨率的云信息和 $5\ \text{km}$ 的气溶胶信息。更高级别的气溶胶观测数据是在前一级数据基础上加工矫正误差并细化分类得到[9] [10] [11]。

本文选取的是 CALIOP 数据最新版本(V4 版)所提供的 Level 2 级气溶胶产品。该版本的数据将气溶胶分为以下 7 类：清洁海洋型(Clean Marine)、沙尘型(Dust)、污染沙尘型(Polluted Dust)、污染大陆型(Polluted Continental/Smoke)、清洁大陆型(Clean Continental/background)、煤烟型(Elevated Smoke)、沙尘海洋型(Dusty Marine)。

2.2. 研究区域

从 NASA 网站下载了 2008 年 1 月至 2018 年 1 月这十年的台湾海峡数据共 1219 轨，研究区域卫星观测轨迹如图 1 所示。本次获取数据方形区域为 117.9°E~121.9°E，21.5°N~26.2°N，包含的范围主要为台湾岛及其周边海域，主要为台湾海峡地带。台湾海峡为我国重要渔场之一，且是贯通中国南北海运的要道。通过对该海域的大气气溶胶组成信息进行遥感探测，对掌握该海域的大气环境特征有一定参考价值。

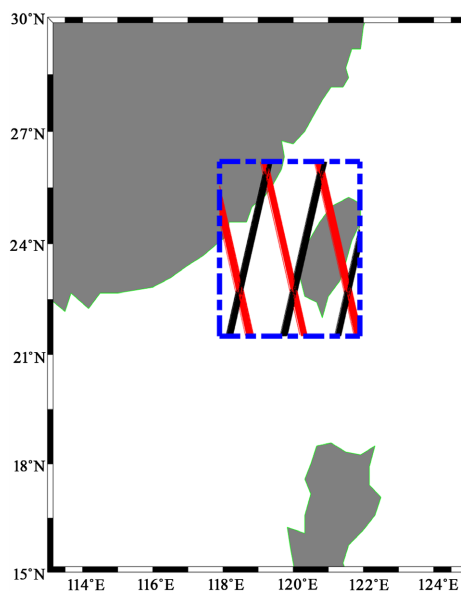


Figure 1. Schematic diagram of the study area

图 1. 研究区域示意图

3. 结果和分析

3.1. 总体分布

如图 2 所示为十年间台湾海峡上空大气整体上各类型气溶胶的百分比占比分布。

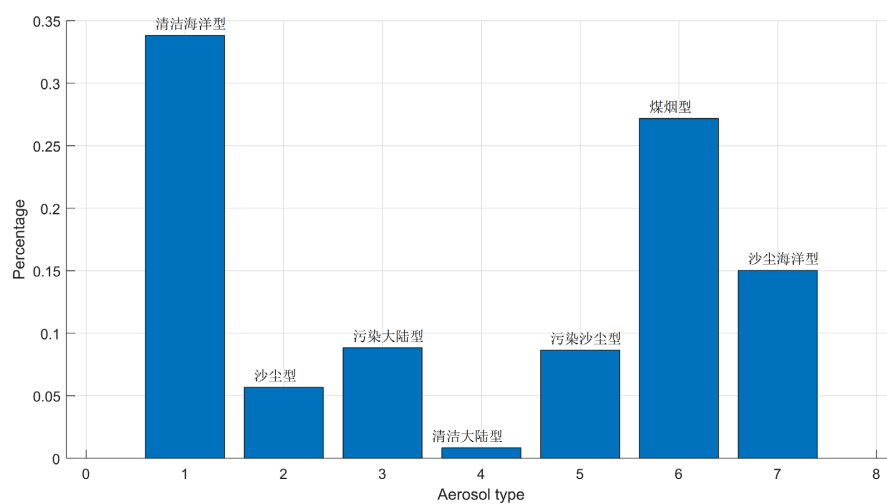


Figure 2. Histogram of aerosol sub-types statistics

图 2. 各类型气溶胶总占比直方图

从图中可以得到各类气溶胶所有高度十年累计总和。可知清洁海洋型占比为 0.34、沙尘型占比为 0.06、污染大陆型占比为 0.09、清洁大陆型占比为 0.01、污染沙尘型占比为 0.09、煤烟型占比为 0.26、沙尘海洋型占比为 0.15。其中，清洁海洋型为占比最多的气溶胶类型、其次主要类型还有煤烟型和沙尘海洋型。此三种类型占总气溶胶的 0.75，是影响台湾海峡上空实际天气状况的主要气溶胶类型。其余四种占比较低，特别是清洁大陆型的占比 0.01 左右，故在对气溶胶的研究中几乎可以忽略该气溶胶的影响。

3.2. 各类型气溶胶占比的垂直空间分布

针对 Level 2 级各类型气溶胶数据，统计分析了研究区域 10 年间在 0~8200 米之间的各类型气溶胶垂直，其结果如图 3 曲线所示。

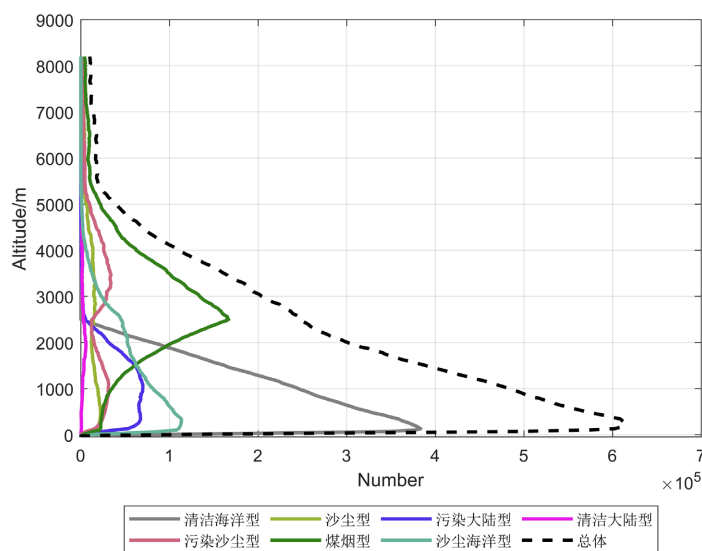


Figure 3. Vertical distribution profiles of aerosol sub-types
图 3. 各类型气溶胶垂直廓线

从图中可以看出在十年统计中，台湾海峡上空气溶胶主要出现在 0 米至 5500 米之间，当海拔超过 5500 米时，各类气溶胶总量会显著下降。气溶胶总量最高点分布在 300 米左右，达到 61 万次。从趋势上看，气溶胶总量从 0~300 米迅速升高，在 300 米之后缓慢降低，在 5500 米之后变化趋于平稳，在此高度之上气溶胶总量相对较少。

清洁海洋型气溶胶(Clean Marine)是各类气溶胶中出现次数最高的气溶胶，占气溶胶中的主导地位，主要分布在 0~2500 米之间，最大值分布在 100 米，达到 38 万次。其中由于 CALIOP 其产品本身算法设计原因，由于海洋大气边界层(MBL)的存在位置大约为 2500 米，而清洁海洋型气溶胶只存在于 MBL 之内，故此类型气溶胶在 2500 米处直接降为零。总体上看可判断清洁海洋型是台湾海峡低空大气存在的主要气溶胶类型。

沙尘型气溶胶(Dust)，是气溶胶中占比较小的一类。最大值分布在 600 米，达到 2 万次左右。在 600~6000 米之间缓慢降低，但变化总体平缓。说明沙尘型也是台湾海峡低空存在气溶胶之一，但占比较小。

污染大陆型气溶胶(Polluted Continental)，最大值分别出现在 300 米和 1300 米，在两个最大值之间污染大陆型出现次数稍有降低但总体平稳，在 2500 米处由于海洋大气边界层的原因出现次数降为零。可以看出污染大陆型是台湾海峡上空 300~1300 米之间主要的气溶胶类型之一。

清洁大陆型气溶胶(Clean Continental)是所有类型气溶胶中占比最低的气溶胶种类，其最大值分布在

2000 米, 约为 1 万次左右, 其变化相对缓慢。可以看出清洁大陆型是台湾海峡上空中层高度上存在的气溶胶类型之一, 且占比最低。

污染沙尘型气溶胶(Polluted Dust)在图像中存在两个极值, 分别在 1000 米和 3300 米, 出现次数均为 3 万次左右, 在 2300 米处出现极小值, 为 1.5 万次左右。可以看出污染沙尘型是台湾海峡上空 1000 米和 3300 米主要存在的气溶胶类型之一, 其在 2500 米处出现较少, 但仍大于清洁大陆型出现次数。

煤烟型气溶胶(Elevated Smoke)最大值出现在 2500 米处, 为 16 万次左右, 是在中层空间中占比最高的气溶胶类型。其在 0~2500 米处迅速升高, 在 2500 米之后缓慢降低, 5500 米后基本不变。可以看出, 煤烟型是台湾海峡中层高度主要气溶胶, 并且广泛存在于各个高度, 其出现次数在 1500 米处超过污染大陆型和沙尘海洋型, 在 1900 米处超过清洁海洋型并成为占比最高的气溶胶类型。

沙尘海洋型(Dusty Marine)最高值出现在 400 米左右, 为 11 万次。其出现次数在 0~400 米间迅速升高, 在 400~4500 米间缓慢降低。其出现次数在 1500 米处落后于煤烟型并持续降低。可以看出, 沙尘海洋型是台湾海峡底层空间的主要气溶胶类型之一, 其占比仅次于清洁海洋型, 并且其在 0~4500 米处均有存在, 分布广泛。

总体观察, 台湾海峡十年间气溶胶垂直分布呈现下多上少的普遍规律, 其中表层和中层气溶胶主要类型分别为清洁海洋型和煤烟型, 而其他种类气溶胶也在不同高度上均有存在。只有清洁大陆型的出现次数极低, 对气溶胶总体情况影响微小。

3.3. 不同类型气溶胶逐月时空变化规律

如图 4 所示, 总结了台湾海峡海域十年来每月的各类型气溶胶的出现次数, 并做出相应变化曲线。

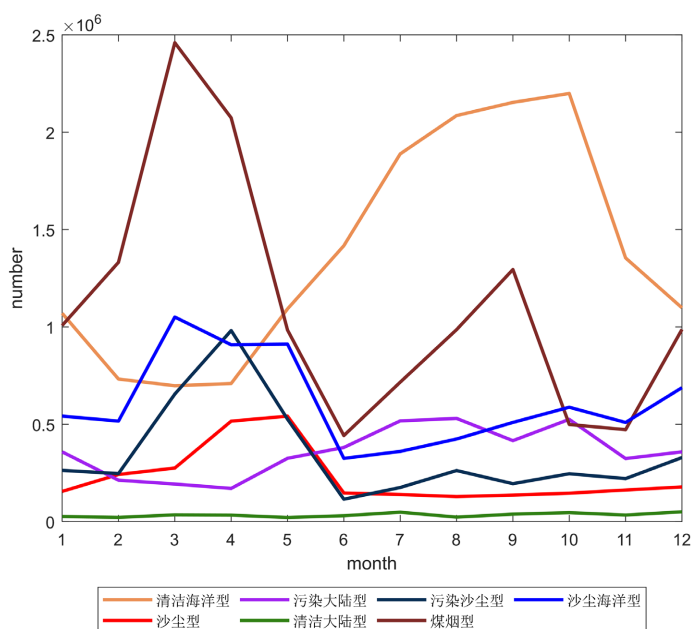


Figure 4. Monthly temporal changes in aerosol sub-types
图 4. 各气溶胶类型的逐月分布

清洁海洋型气溶胶可以看出其在 2~4 月份变化平稳, 在 4 月份后开始升高, 升高趋势先快后慢, 升高趋势延续到 10 月, 后开始下降, 一直下降至 2 月份。总体上其在 5 月~次年 1 月均为占比最高的气溶胶类型, 在 2~5 月占比中等。

沙尘型气溶胶在 1~5 月升高, 之后开始降低至 6 月, 其余月份趋于平稳, 无显著波动。4~5 月份其出现次数也处于总体气溶胶的中下水平, 其余时间低于大部分类型气溶胶。

污染大陆型气溶胶, 总体变化为 2~5 月份较低, 7~10 月份较高, 但其波动较清洁海洋型或者煤烟型相比较为平缓, 在 2~5 月其低于除清洁大陆型外的大部分气溶胶, 而在 6~10 月份其处于整体各类气溶胶出现次数的中上水平。

清洁大陆型气溶胶是全年占比最低的气溶胶种类, 在各个月份均低于其他类型的气溶胶。总体上其在 7 月份和 10 月份有两个极大值, 但总体波动较为平缓, 不会对台湾海峡天气出现较大影响。

污沙尘海洋型在 3~5 月较高, 随后降低, 并一直保持平稳至次年 2 月。从总体上看其出现次数在全年都处于中上水平, 特别是在 3 月其超过清洁海洋型成为占比第二的气溶胶类型, 故沙尘海洋型是在台湾海峡全年都有存在的气溶胶类型, 并且在 3 月份出现频率最高, 超过大部分气溶胶类型。

煤烟型气溶胶是全年出现次数较高的气溶胶之一。在 1~4 月保持较高水平, 之后开始下降, 但在 9 月份又迎来一个极大值, 后再次下降至 11 月份。在 1~4 月, 其一直为出现次数最多的气溶胶类型, 在 5 月份被清洁海洋型所超越, 但基本维持着第二或者第三的位置。可以看出煤烟型是台湾海峡上空经常性出现的气溶胶之一, 并且在 1~5 月相当强盛, 6~12 月有所减少但依旧是台湾海峡上空气溶胶的重要组成部分。

污染沙尘型气溶胶在 2~5 月维持较高水平, 在 4 月份短暂超过沙尘海洋型成为出现次数第二的气溶胶类型。之后持续降低并在 6 月份到达极小值并趋于平稳。总体上看污染沙尘型在台湾海峡上空 3~5 月份出现频率较高, 其余月份保持较低的出现频率。

4. 结论

本文主要采用 10 年(2008~2018) CALIPSO 星载激光雷达资料, 研究了 0~8200 米的台湾海峡上空气溶胶垂直分布及时空分布特征。从主导气溶胶类型来看, 研究区域气溶胶占比排序自高到低依次为清洁海洋型(34%), 煤烟型(26%)和沙尘海洋型(15%), 污染大陆型(9%), 污染沙尘型(9%), 沙尘型(5%), 合计占比 98% 以上。易引起沙尘天气及低能见度天气的 3 种气溶胶类型(沙尘海洋型、污染沙尘型、沙尘型)占比约 29%。从气溶胶垂直分布规律来看, 各类型气溶胶在不同高度上区别明显。其中清洁海洋型、污染大陆型、沙尘海洋型主要分布在 2500 米之下, 沙尘型、污染沙尘型、煤烟型分布在 2500 米之上。综合来看, 台湾海峡上空气溶胶受到北方沙尘气候及季风气候的影响, 但在海上沙尘情况有减弱趋势。

参考文献

- [1] 田梓莹, 郑小慎. 基于典型站点 AERONET 数据气溶胶类型分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4238-4246.
- [2] 杨健博, 蔡子颖, 杨旭, 等. 气溶胶对大气辐射特性影响及其气象和空气质量反馈效应的观测与模拟研究[J]. 中国环境科学, 2022, 9(14): 27-30.
- [3] 马骁骏, 秦艳, 陈勇航, 等. 上海地区霾时气溶胶类型垂直分布的季节变化[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 961-969.
- [4] 孙强, 范学花, 夏祥鳌. 华北地区气溶胶垂直分布特征的观测与分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 26-33.
- [5] 沈晓晶, 张海龙, 程锐, 等. 黄渤海上空气溶胶类型判别及其成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1649-1655.
- [6] 贺欣, 陆春松, 朱君. 中国地区气溶胶类型变化及其辐射效应研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 4070-4080.
- [7] 孙艺, 杨悦, 甄晴. CALIPSO 卫星资料的春夏季黄海海雾高度特征分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(3): 54-61.
- [8] 高星星, 陈艳, 张镭, 等. 基于 CALIPSO 卫星数据的中国典型区域气溶胶特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(4): 431-439.
- [9] 王敏, 胡春, 赵福燕, 等. 基于 CALIPSO 卫星探测的 2007-2018 年西南地区平流层气溶胶的光学特性分析[J]. 沙

漠与绿洲气象, 2021, 15(5): 93-100.

- [10] 陈本清, 杨燕明. 台湾海峡及周边海区气溶胶时空分布特征的遥感分析[J]. 环境科学学报, 2008(12): 2597-2604.
- [11] 罗卉卉, 陈臻懿, 张天舒, 等. 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 39-47.