



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230222

数字出版日期: 2024-06-21; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240620.1544.008>

东中国海海域气溶胶光学特性研究

杨会宁, 郑小慎

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 气溶胶光学特性影响着气溶胶对太阳辐射的吸收和散射能力, 因此不同类型气溶胶的环境和气候效应也存在着显著差异。通过 CALIPSO (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations) 卫星的气溶胶数据分析了 2008 年 3 月—2021 年 2 月东中国海海域气溶胶光学特性及类型的分布情况。结果表明: 渤海和黄海气溶胶光学厚度较大且季节变化不明显, 东海气溶胶光学厚度相对偏小, 季节差异较大; 3 个海域气溶胶的退偏比和色比均表现为春季最大。渤海和黄海春季以沙尘型气溶胶为主, 其他季节以沙尘海洋型气溶胶为主, 东海春季受沙尘海洋型气溶胶影响最大, 其他季节以清洁海洋型气溶胶为主。沙尘型和沙尘海洋型气溶胶的光学厚度较大, 颗粒较大且粒子以非球形为主, 清洁海洋型气溶胶的光学厚度较小, 粒子偏球形, 由此可见不同类型的气溶胶具有不同的光学特性, 这对理解大气中的能量平衡和预测气候变化具有重要意义。

关键词: 东中国海; 气溶胶; 光学特性

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)05-0037-12

Optical Properties of Aerosols in the East China Seas

YANG Huining, ZHENG Xiaoshen

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Aerosol optical properties affect the ability of aerosols to absorb and scatter solar radiation, and therefore the environmental and climatic effects of different types of aerosols vary significantly. In the current study the aerosol data products from the cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) satellite were used to analyze the distribution of aerosol optical properties and types in the East China Seas from March 2008 to February 2021. The results showed that the aerosol optical depth in the Bohai Sea and the Yellow Sea was large and the seasonal variation was not obvious, while the aerosol optical depth in the East China Sea was relatively small and the seasonal differences were large; the particle depolarization ratio and the color ratio of aerosols in the three seas were the largest in spring. The Bohai Sea and the Yellow Sea were dominated by dust in spring and dusty marine in other seasons, the East China Sea was most affected by dusty marine in spring, while clean marine dominated in other seasons. The optical depth of dust and dusty Marine aerosols was large with large particles and non-spherical particles, while the optical depth of clean marine aerosols was smaller with particles of spherical shapes. It can be concluded that different types of aerosols have different optical properties, which is of great significance for understanding the energy balance in the atmosphere and predicting climate change.

Key words: the East China Seas; aerosol; optical properties

引文格式:

杨会宁, 郑小慎. 东中国海海域气溶胶光学特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(5): 37-48.

YANG H N, ZHENG X S. Optical properties of aerosols in the East China Seas[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(5): 37-48.

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2017ZX07107); 天津市自然科学基金资助项目(19JCYBJC23600)

作者简介: 杨会宁(1998—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生; 通信作者: 郑小慎, 教授, zxst@tust.edu.cn

大气气溶胶是指悬浮在大气中的固态或液态微小粒子形成的相对稳定的气体分散体系^[1],它是大气的重要组成部分,通过直接或间接的方式影响着全球的气候变化和生态环境^[2-3]。由于气溶胶受多种因素影响,粒子之间的光学特性不同,不同类型的气溶胶对气候产生的影响也存在差异,因此深入研究气溶胶光学特性及类型对了解全球气候变化具有重要意义。随着遥感技术的发展,卫星遥感监测获取气溶胶信息成为重要手段,相较于地基观测,卫星遥感具有实时监测、观测范围大、时间序列长、更新周期短等特点,因此它在大气气溶胶探测和环境监测研究中被广泛运用^[4-7]。

近年来,有不少国内外学者使用遥感卫星数据对气溶胶光学特性进行研究。Barnaba 等^[8]利用 2001 年的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 气溶胶光学厚度标准数据,分析了地中海上空气溶胶光学厚度的季节和区域变化。李冬辉^[9]通过 MODIS 数据分析了我国东部海域气溶胶光学厚度的季节变化和地理分布特征。纪晓璐^[10]利用 MODIS 气溶胶数据,分析了环渤海地区光学厚度和细粒子比例的时空分布和变化特征。郝增周等^[11]使用 SeaWiFS 气溶胶数据分析了中国海域气溶胶光学厚度的空间分布和季节变化。贾瑞等^[12]利用 CALIPSO (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations) 卫星数据分析了我国西北地区气溶胶光学厚度和消光系数的分布特征。Chen 等^[13]基于 CALIPSO 卫星数据分析了上海地区气溶胶总衰减后向散射系数、体积退偏比、色比的分布特征。已有研究^[14]证实基于光学特性可判别不同的气溶胶类型,基于此有不少学者通过阈值划分和聚类分析等方法对气溶胶进行分类,探讨不同类型气溶胶的区域化差异^[15-17],但大部分研究多集中在气溶胶光学特性和类型的单独分析上,缺少对气溶胶光学特性与类型对应关系的研究。CALIPSO 卫星不仅可以提供大量有关气溶胶光学特性的数据,还具有较为成熟的气溶胶分类算法。首次提出这种分类算法的是 Omar 等^[18],他们使用 CALIPSO version 2 气溶胶数据,根据气溶胶光学特性的不同提出 6 种类型:清洁大陆型、清洁海洋型、沙尘型、污染大陆型、污染沙尘型和煤烟型。Kim 等^[19]随后在 version 4 数据的基础上进行改进,加入了沙尘海洋型,使这一识别算法更为详细,已经有不少学者运用这种算法识别海上气溶胶类型^[20-22]。

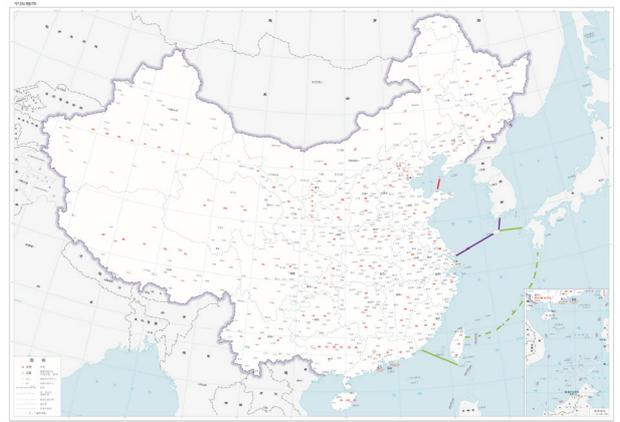
为了更好地认识不同类型气溶胶本身的光学特

性和存在的区域差异,本文基于 CALIPSO 卫星数据,对比分析了渤海、黄海和东海气溶胶光学特性及类型的季节分布特征,并在此基础上辨识了不同类型气溶胶所具有的光学特性,以为大气监测和气候评估提供参考。

1 数据资料与方法

1.1 研究区域

选取的研究区域为 116°E—131°E、22°N—41°N 的东中国海海域,研究区域如图 1 所示。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2766 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

在后续分析中,渤海海域为渤海与黄海分界线(辽东半岛西南端老铁山岬与山东半岛北部蓬莱角的连线,图 1 中红线)与山东省、天津市、河北省、辽宁省之间的海域;黄海海域为渤海与黄海分界线、辽宁省、朝鲜西海岸、韩国西海岸、韩国西南端与济州岛东北端连线(图 1 中短紫线)、黄东海分界线(长江口北岸的启东嘴与韩国济州岛西南角连线,图 1 中长紫线)与江苏省和山东省之间的海域;东海海域为黄东海分界线、韩国济州岛东北端与日本九州岛西北端连线(图 1 中短绿实线)、日本九州岛与琉球群岛及我国台湾省连线(图 1 中绿虚线)、东南海分界线(福建省东山岛南端与台湾省南端鹅銮鼻连线,图 1 中长绿实线)与福建省、浙江省和上海市之间的海域^[23]。渤海位于中国东北部,是我国的内陆海,极易受陆地环境影响,也是中国北方地区的重要港口和航运中心;黄海为半封闭海域,容易受沙尘、季风和陆源污染的影响^[24-26],是中国海岸线最长的海域之一;东海海域辽阔,且东邻太平洋,受海洋的影响较大,是中国海域中最富有

经济价值的海域之一。3个海域地理位置的特殊性,导致研究区域气溶胶的物理特性和化学成分复杂多变^[27]。

1.2 数据来源与处理

CALIPSO 卫星是由美国国家航空航天局和法国国家航天中心研制的用于云-气溶胶激光雷达和红外探路者卫星观测的卫星, CALIOP 是其上搭载的正交偏振的云-气溶胶激光雷达探测器,数据可在美国国家航空航天局的网站 (<https://www-calipso.larc.nasa.gov/>) 获取^[28-31]。CALIOP 可提供 Level 0、Level 1、Level 2、Level 3、Level 4 数据,本文使用的数据包括 Level 2 气溶胶垂直特征层分类数据(VFM)、廓线数据和层数据,使用到的数据时间范围为 2008 年 3 月至 2021 年 2 月。

VFM 来源于 V4 版二级数据,可提供气溶胶的分类信息,将气溶胶类型分为 7 种: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)、清洁大陆型(clean continental)、煤烟型(smoke)和沙尘海洋型(dusty marine)^[32]。廓线数据可提供特征层的光学厚度、消光系数、退偏比、色比等廓线信息^[33],水平分辨率为 5 km。层数据提供不同气溶胶类型的层积分光学厚度、退偏比、色比等,水平分辨率为 5 km。

由于层数据和廓线数据本身的算法存在不确定性,因此需要进行质量控制以减小误差。层数据用于进行筛选的参数有 ExtinctionQC_532 和 CAD_Score,其中 ExtinctionQC_532 是消光质量控制标志。通常情况下,当激光雷达比在消光反演期间保持不变(ExtinctionQC_532 = 0)或反演受到约束(ExtinctionQC_532 = 1)时,认为气溶胶消光系数最可靠。CAD_Score 可区分云和气溶胶,当 CAD_Score = -100 时,认为该特征是气溶胶;当 CAD_Score = 100

时,认为该特征是云。为了提高对云和气溶胶识别的准确性,本文仅保留了气溶胶置信度更高的数据。廓线数据用于进行筛选的参数有 CAD_Score、Atmospheric_Volume_Description(AVD)和 Extinction_QC_Flag_532,其中 AVD 与 CAD_Score 均用来区分云和气溶胶。当 AVD = 3 时认定为气溶胶,CAD_Score 选用的数据范围与层数据中的一致,Extinction_QC_Flag_532 与 ExtinctionQC_532 均是消光质量控制标志^[34]。

2 结果与分析

在研究区域气溶胶光学特性的分析中使用的光学参数是光学厚度、退偏比和色比。光学厚度是介质的消光系数在垂直方向上的积分,表征气溶胶对光的吸收强弱,用于表示整个大气柱的气溶胶含量,也可表征大气污染状况^[35-36]。退偏比是垂直方向的散射光分量与水平分量的比值^[37],表征气溶胶颗粒的规则程度,值越小,表明气溶胶颗粒越规则,形状越偏球形,反之则形状越不规则,偏非球形,由此特性可区分生物质燃烧等人为气溶胶和沙尘、海洋等自然气溶胶^[38]。色比是波长 1064 nm 后向散射系数与 532 nm 总后向散射系数的比值,它也是气溶胶的重要光学参数,表征气溶胶颗粒大小,色比越大,表示气溶胶颗粒越大,反之越小。

2.1 气溶胶光学特性的季节分布特征

选取 2008 年 3 月—2021 年 2 月 CALIOP 廓线数据中的光学厚度、退偏比和色比进行高度和季节平均,春季为 3 月—5 月、夏季为 6 月—8 月、秋季为 9 月—11 月、冬季为 12 月—次年 2 月。以 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 进行插值,得到研究区域不同季节光学参数的空间分布,如图 2—图 4 所示。

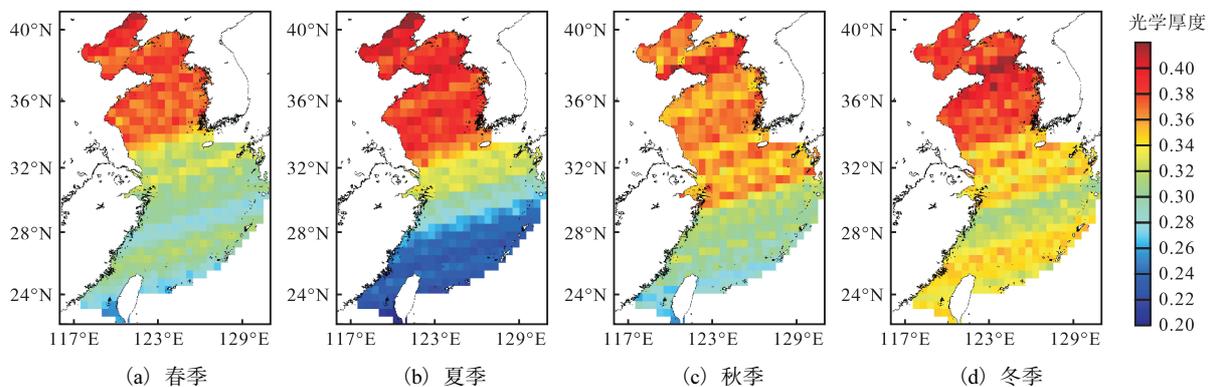


图 2 四季气溶胶光学厚度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of aerosol optical depth for the four seasons

由图 2 可知:渤海和黄海气溶胶光学厚度的季节变化趋势相似,四季均表现出较大的光学厚度。渤海和黄海靠近工业化和人口密集区域,这可能导致大气中的颗粒物浓度较高,从而导致这两个海域的气溶胶光学厚度较大。相比之下,东海气溶胶光学厚度的季节变化明显,但光学厚度总体低于渤海和黄海,具体表现为:冬季较大,为 0.30~0.34,出现这种现象的原因可能是冬季陆地工业活动较为频繁,且寒冷的温度

和相对较高的湿度有助于形成更多的气溶胶颗粒,尤其是在大气垂直混合层较低的情况下,颗粒物在大气中停留的时间较长,光学厚度相对较大;夏季气溶胶光学厚度较小,且随着纬度的减小而逐渐减小,东海南部海域达到最小,光学厚度约为 0.20;春季和秋季东海北部气溶胶光学厚度大于南部,其中秋季东海北部气溶胶光学厚度接近渤海和黄海,在 0.36 左右。

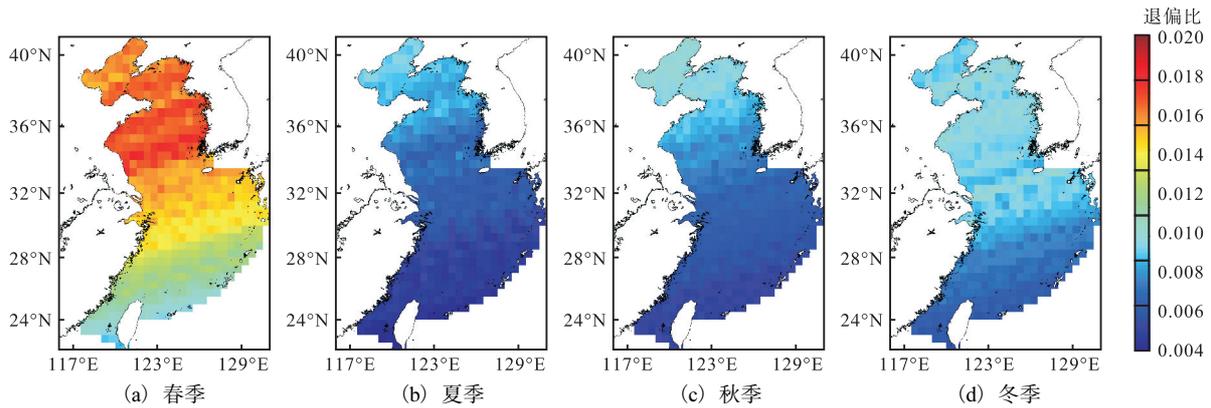


图 3 四季退偏比空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of particle depolarization ratio for the four seasons

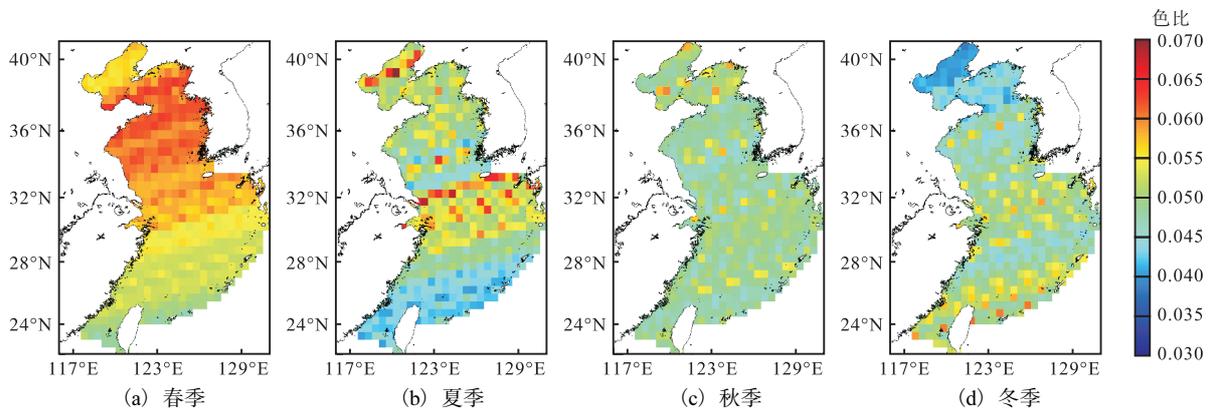


图 4 四季色比空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of color ratio for the four seasons

由图 3 可知:渤海、黄海和东海气溶胶退偏比在春季达到最大值,其他 3 个季节较小。这表明春季存在相对较多的非球形气溶胶颗粒,而夏季、秋季、冬季则较少。春季,渤海气溶胶退偏比在 0.016 左右,区域变化不明显,黄海气溶胶退偏比整体大于渤海和东海,通常超过 0.016,而东海气溶胶退偏比在 0.016 以下,且随纬度的降低呈递减趋势,说明渤海和黄海非球形气溶胶颗粒相对东海较多。3 个海域气溶胶的退偏比在夏季最小,其中渤海和黄海大致在 0.008 左右,而东海约为 0.004。秋季和冬季 3 个海域气溶胶退偏比逐渐增大,但总体仍在 0.01 以下。

在 0.055 左右;夏季有所减少;秋季基本稳定在 0.050 左右;冬季渤海则成为低值区,色比在 0.040 左右。黄海气溶胶色比的季节变化与渤海一致,但春季黄海气溶胶色比大于渤海,可达 0.060,此时黄海的大颗粒气溶胶多于渤海。在东海,春季气溶胶色比整体最大,大颗粒气溶胶相对较多,整体随纬度的降低呈递减趋势,可能与温度、湿度条件的南北差异有关;夏季,东海北部的气溶胶色比大于南部,可能是北部更容易受到陆地或远距离传输的影响,导致气溶胶色比相对较大,此时南部海域为四季中气溶胶色比的低值区,数值在 0.040~0.045 范围内,主要以小颗粒气溶胶为主;秋季,气溶胶色比在整个东海分布较均匀,

由图 4 可知:渤海春季气溶胶色比较大,大部分

大致在 0.050 左右;相比之下冬季有所增加。总体而言,3个海域大颗粒气溶胶在春季多于其他季节。

2.2 气溶胶类型季节分布特征

从前面的研究中可以看出,渤海、黄海和东海的气溶胶光学特性存在差异,为了进一步探究这种差异性,接下来从气溶胶类型入手。选取了3个海域2008年3月—2021年2月的所有VFM数据,在时间尺度上进行空间和高度的累加,通过计算每种类型气溶胶出现的频次与所有类型气溶胶频次和的比值,得到3个海域不同类型气溶胶的季节占比,结果见表1—表3。从气溶胶类型的统计结果中可以看出:渤海、黄海和东海的污染大陆型和清洁大陆型气溶胶占比很小,可能是由于下垫面的影响,因此后面主要分析其他5种类型的气溶胶。

表1 渤海不同季节气溶胶类型占比

Tab. 1 Percentage of aerosol types in the Bohai Sea in different seasons

季节	占比/%						
	清洁海洋型	沙尘型	污染大陆型	清洁大陆型	污染沙尘型	煤烟型	沙尘海洋型
春季	6	38	3	3	10	11	29
夏季	20	12	7	2	13	14	32
秋季	12	20	5	4	10	11	38
冬季	10	22	4	5	10	13	36

表2 黄海不同季节气溶胶类型占比

Tab. 2 Percentage of aerosol types in the Yellow Sea in different seasons

季节	占比/%						
	清洁海洋型	沙尘型	污染大陆型	清洁大陆型	污染沙尘型	煤烟型	沙尘海洋型
春季	7	35	3	3	11	10	31
夏季	26	12	6	3	9	15	29
秋季	20	17	5	4	10	10	34
冬季	14	25	4	5	10	13	29

表3 东海不同季节气溶胶类型占比

Tab. 3 Percentage of aerosol types in the East China Sea in different seasons

季节	占比/%						
	清洁海洋型	沙尘型	污染大陆型	清洁大陆型	污染沙尘型	煤烟型	沙尘海洋型
春季	16	21	5	4	15	14	25
夏季	39	10	9	3	8	9	22
秋季	38	16	7	4	9	6	20
冬季	29	22	4	4	15	7	19

渤海清洁海洋型气溶胶夏季占比最大(20%),春季最小(6%),可能是夏季大气相对稳定,沙尘天气少,且没有取暖带来的污染颗粒。沙尘型气溶胶在春季占比最大(38%),其次是冬季和秋季,夏季占比最

小,这与沙尘输送多发生在春季具有一致性,且渤海主要受东亚沙尘的影响^[39],沙尘颗粒呈现出明显的春冬季较多、夏秋季较少的季节更替现象。煤烟型和污染沙尘型气溶胶夏季占比达到最大,其他季节变化不明显。沙尘海洋型在夏秋冬三季中均占主导地位,占比分别为32%、38%和36%。

黄海清洁海洋型气溶胶在夏季占据主导地位,占比为26%,春季最小,这与渤海清洁海洋型气溶胶的季节变化趋势一致。沙尘型和污染沙尘型气溶胶春季占比最大,分别为35%和11%;夏季占比最小,可能与黄海主要受沙尘远距离运输的影响有关^[40],夏季雨水的沉降作用降低了这种影响。煤烟型气溶胶夏季占比达到最大,其次是冬季,可能的原因是我国华北平原夏季常发性进行生物质秸秆的大规模燃烧,空气污染加剧,进一步影响了气溶胶的组成^[41],冬季取暖带来的煤烟颗粒也使煤烟型气溶胶有所增加。沙尘海洋型气溶胶四季占比均较大,其中秋季占比最大(34%),其次是春季。

东海受海洋影响较大,夏季、秋季、冬季气溶胶类型均以清洁海洋型为主,其中夏季这种影响最为突出,清洁海洋型气溶胶占比高达39%。东海主要的沙尘来源是处于沙漠源区下风区的华南地区,沙尘型气溶胶冬季占比最大,污染沙尘型气溶胶在春季、冬季占比较大。煤烟型气溶胶在春季占比最大(14%),夏季、秋季、冬季逐渐减少,可能的原因是春季气温逐渐回暖,大气不稳定,极易出现强对流天气(冷空气过境、台风登陆等),且东海作为亚欧大陆与太平洋大气输送的主要通道,在春初输送极强^[42],因此这些天气可能会携带大量颗粒物。沙尘海洋型气溶胶春季最多,占比为25%,可能是沙尘天气多发生于春季,且东海主要受海洋影响,由风吹来的沙尘在海洋上空与海盐粒子混合得比较充分导致的。综合来看,渤海、黄海、东海受清洁海洋型、沙尘型和沙尘海洋型气溶胶的影响较大,这与任文核等^[21]以及崔廷伟等^[22]有关渤海、黄海和东海气溶胶类型的研究结果具有一致性。

在气溶胶辐射-气候效应中,清洁海洋型气溶胶对太阳辐射有较高的反射能力,可减少地表吸收的太阳能量,有助于降低地表温度,而沙尘型、污染沙尘型、沙尘海洋型和煤烟型气溶胶对太阳辐射有较强的吸收作用,同时将吸收的太阳辐射能作为热辐射重新释放,因此过量排放可能加速全球变暖。与此同时,大气气溶胶可以充当云凝结核,影响雨滴的形成和云

的性质,对大气循环和降水模式产生影响。研究^[43]发现沙尘等气溶胶的沉降会给海洋带来营养盐,如铁等元素就主要来自沙尘的输送和沉降,但像污染沙尘型和煤烟型气溶胶带来的黑炭和生物质燃烧颗粒,对空气质量和人类健康也会造成严重影响。总体而言,气溶胶对气候和环境变化产生多方面影响,但具体效应受到许多因素的调控,同时由于气溶胶通常结合在一起形成混合颗粒,使其影响在不同时间尺度和地域尺度上表现出复杂性。

2.3 不同气溶胶类型的光学特性分析

选取 CALIPSO Level 2 层数据,经过质量控制,得到了3个海域5种类型气溶胶光学厚度、退偏比和色比的频次直方图(图5—图13)。由于研究区域的光学厚度整体偏小,光学厚度大于0.3的数据仅占总数据的10%,因此为了更直观地看到不同类型气溶胶光学特性的变化,在图中仅展示0~0.3范围的光

学厚度,以此类推,退偏比仅展示0~0.3,色比仅展示0~1.5。根据Liu等^[44]制定的气溶胶分类标准,将退偏比小于等于0.06的气溶胶粒子定义为球形,将退偏比大于0.06的气溶胶粒子定义为非球形;将色比小于0.5的气溶胶粒子定义为小颗粒,色比大于等于0.5的气溶胶粒子定义为大颗粒^[22]。

从图5—图7可以看出,3个海域清洁海洋型气溶胶光学厚度主要在0~0.20范围内。当光学厚度小于0.01时,渤海和黄海清洁海洋型气溶胶明显多于其他类型;当光学厚度小于0.12时,东海清洁海洋型气溶胶出现频次最高,此时东海气溶胶的光学厚度主要受清洁海洋型气溶胶的影响,这与前面研究的东海夏季以清洁海洋型气溶胶为主、光学厚度较小具有一致性。当光学厚度大于0.20时,3个海域清洁海洋型气溶胶出现频次极少。

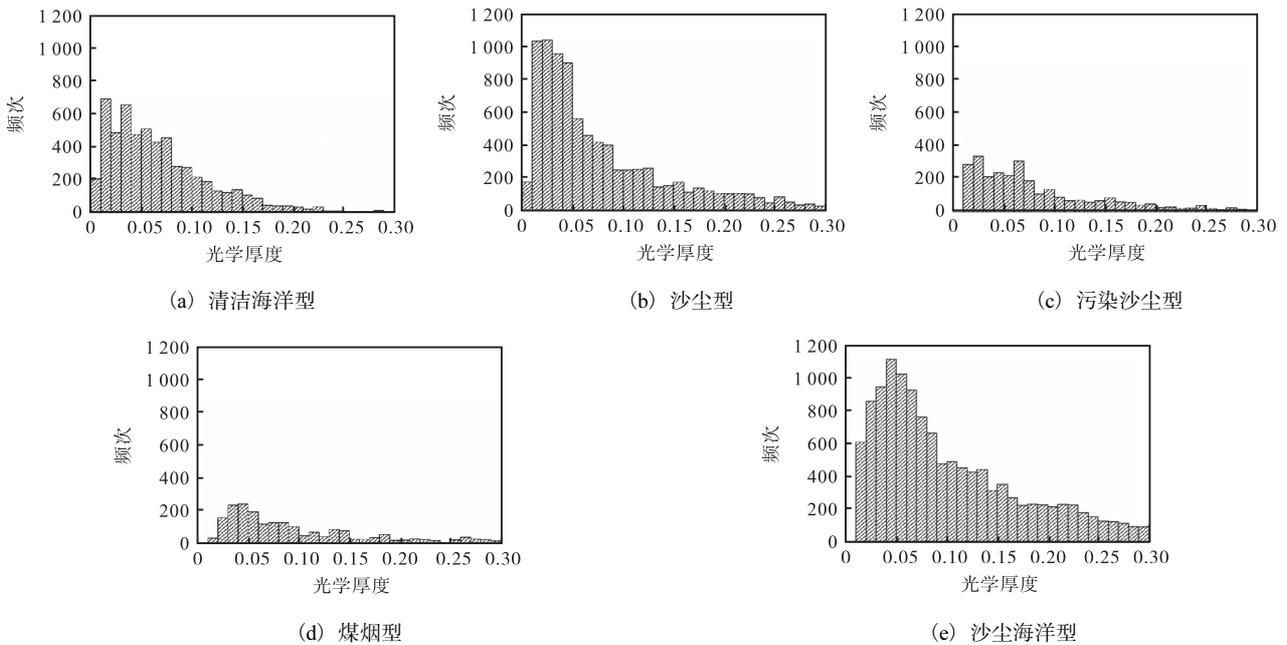


图5 渤海不同类型气溶胶光学厚度直方图

Fig. 5 Histogram of optical depth of different aerosols types in the Bohai Sea

渤海沙尘型气溶胶出现频次较多,在光学厚度为0~0.30均有分布;沙尘海洋型气溶胶光学厚度的整体变化与沙尘型类似,当光学厚度大于0.04时,沙尘海洋型气溶胶最多,其次是沙尘型。当光学厚度大于0.01且小于0.03时,黄海的沙尘型气溶胶最多;当光学厚度大于0.03时,沙尘海洋型气溶胶明显多于其他类型。由此可以推断,渤海和黄海气溶胶光学厚度高值区主要受沙尘型和沙尘海洋型气溶胶的影响,结合2.1节和2.2节分析可知,此结果也验证了渤海、黄海四季气溶胶光学厚度均较大的结论。东海沙尘

型气溶胶光学厚度主要分布在0~0.10之间,当光学厚度大于0.20时,出现频次极少;沙尘海洋型气溶胶在光学厚度大于0.12时出现频次高于其他类型。

渤海污染沙尘型和煤烟型气溶胶整体出现频次较少,光学厚度主要分布在0~0.20之间。当光学厚度大于0.20时,出现频次较少,但此范围内总频次仍大于清洁海洋型气溶胶。黄海污染沙尘型和煤烟型气溶胶主要出现在光学厚度小于0.15的区间,当光学厚度大于0.20时,出现频次较少。东海污染沙尘型气溶胶在光学厚度小于0.10时出现频次极少;煤烟

型气溶胶在各个光学厚度值区间出现的频次相差不大, 表现为随光学厚度的增大有轻微的下趋势。

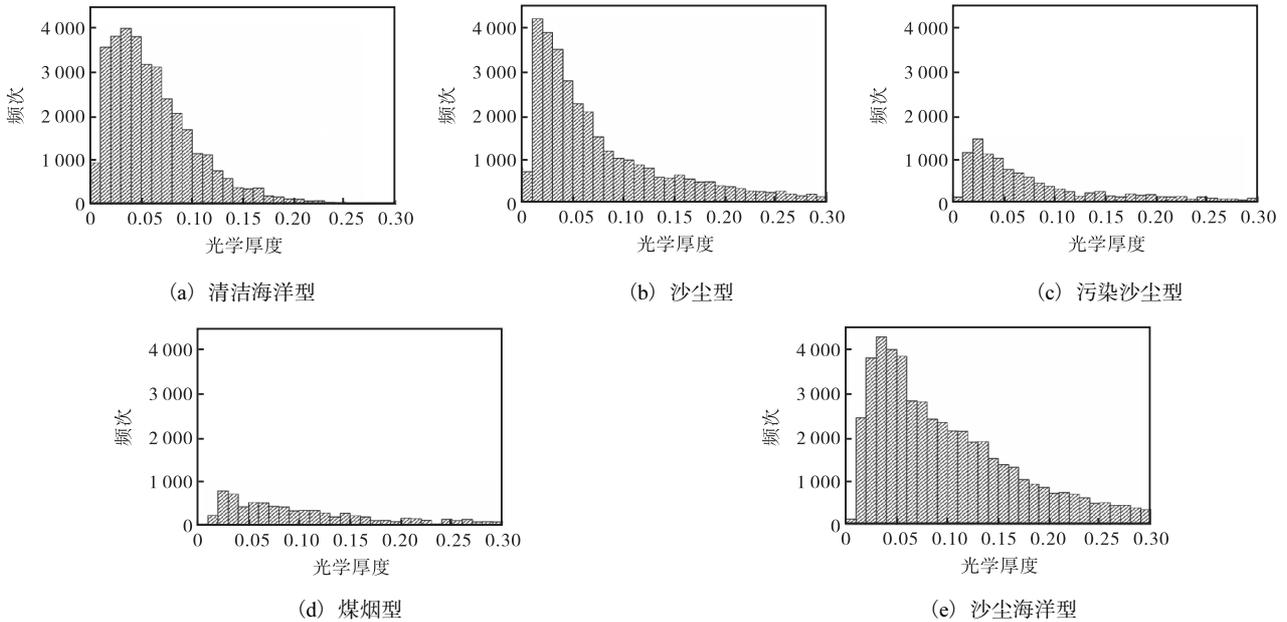


图 6 黄海不同类型气溶胶光学厚度直方图

Fig. 6 Histogram of optical depth of different aerosols types in the Yellow Sea

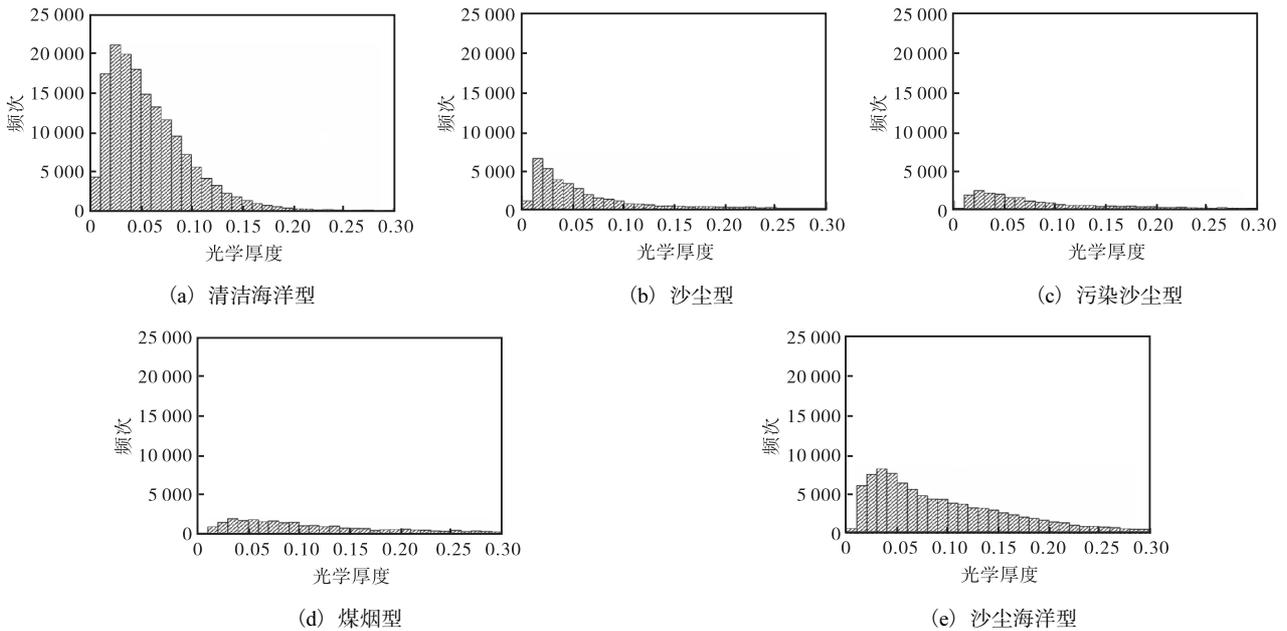


图 7 东海不同类型气溶胶光学厚度直方图

Fig. 7 Histogram of optical depth of different aerosols types in the East China Sea

从图 8—图 10 可以看出, 渤海清洁海洋型气溶胶的出现频次主要集中在退偏比 0 ~ 0.08 之间, 当退偏比在 0.03 ~ 0.04 范围内时, 清洁海洋型气溶胶出现频次最高。黄海清洁海洋型气溶胶的出现频次也集中在退偏比为 0 ~ 0.08 之间, 当退偏比在 0.04 ~ 0.05 范围内时, 清洁海洋型气溶胶出现频次最高。东海清洁海洋型气溶胶的出现频次较高, 其退偏比的分布区间与渤海和黄海类似。由此可以推断东中国海海域

清洁海洋型气溶胶退偏比较小, 粒子偏球形。最能反映这种关系的是 2.1 节中东海退偏比的季节变化, 除春季外, 其他季节退偏比均较小(其他季节以清洁海洋型气溶胶为主)。

渤海沙尘型气溶胶出现频次主要集中在退偏比大于 0.05 的区间, 黄海和东海集中在大于 0.10 的区间。当退偏比大于 0.20 时, 沙尘型气溶胶出现频次最高, 说明退偏比越大, 沙尘型的影响越大。其中当退

偏比在 0.21 ~ 0.22 时, 沙尘型气溶胶在渤海和黄海出现的频次达到最高; 当退偏比在 >0.22 ~ 0.23 时, 在

东海出现的频次最高。由此可见东中国海海域的沙尘型气溶胶的退偏比较大, 粒子大多数为非球形。

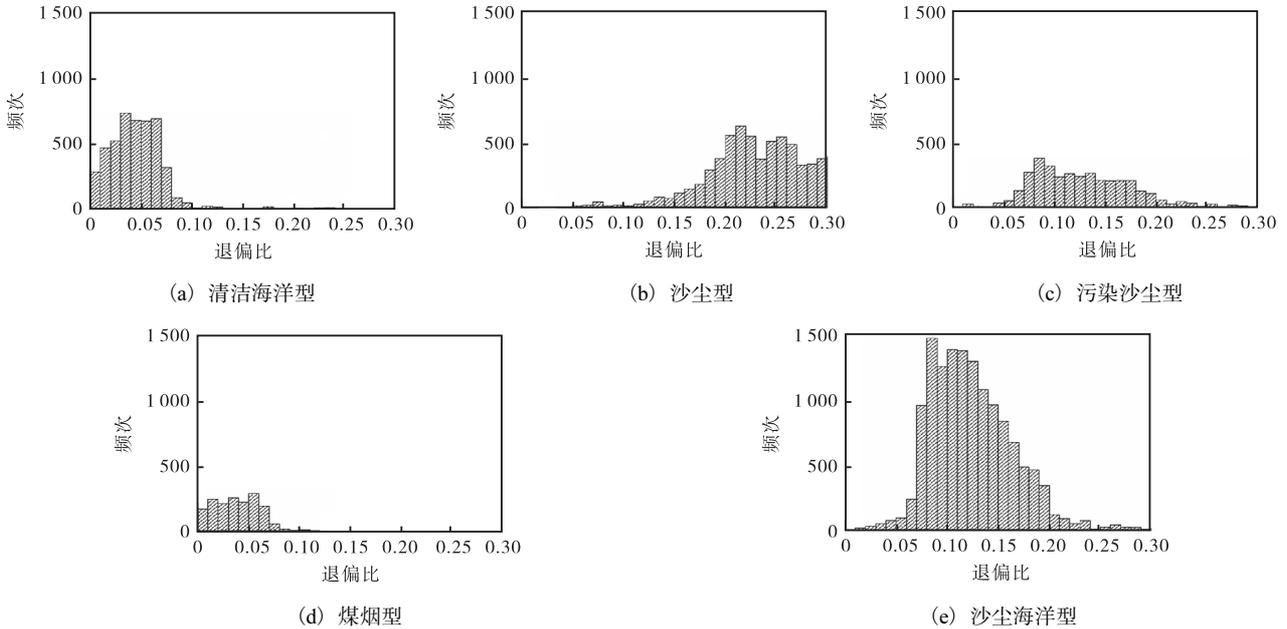


图 8 渤海不同类型气溶胶退偏比直方图

Fig. 8 Histogram of particle depolarization ratio of different aerosols types in the Bohai Sea

当退偏比为 0.06 ~ 0.20 时, 渤海、黄海和东海污染沙尘型气溶胶出现频次较高, 变化趋势较其他类型更为平缓, 推断东中国海海域的污染沙尘型气溶胶的粒子以非球形为主。渤海、黄海和东海煤烟型气溶胶的退偏比主要分布在 0 ~ 0.10, 当退偏比小于 0.06 时, 出现频次较高, 说明东中国海海域的煤烟型气溶

胶的粒子以球形为主。

当退偏比小于 0.06 时, 渤海和黄海沙尘海洋型气溶胶出现频次极小, 当退偏比大于 0.06 时, 出现频次较高; 东海与之相类似。综合来看, 东中国海海域的沙尘海洋型气溶胶退偏比较大, 粒子偏非球形。

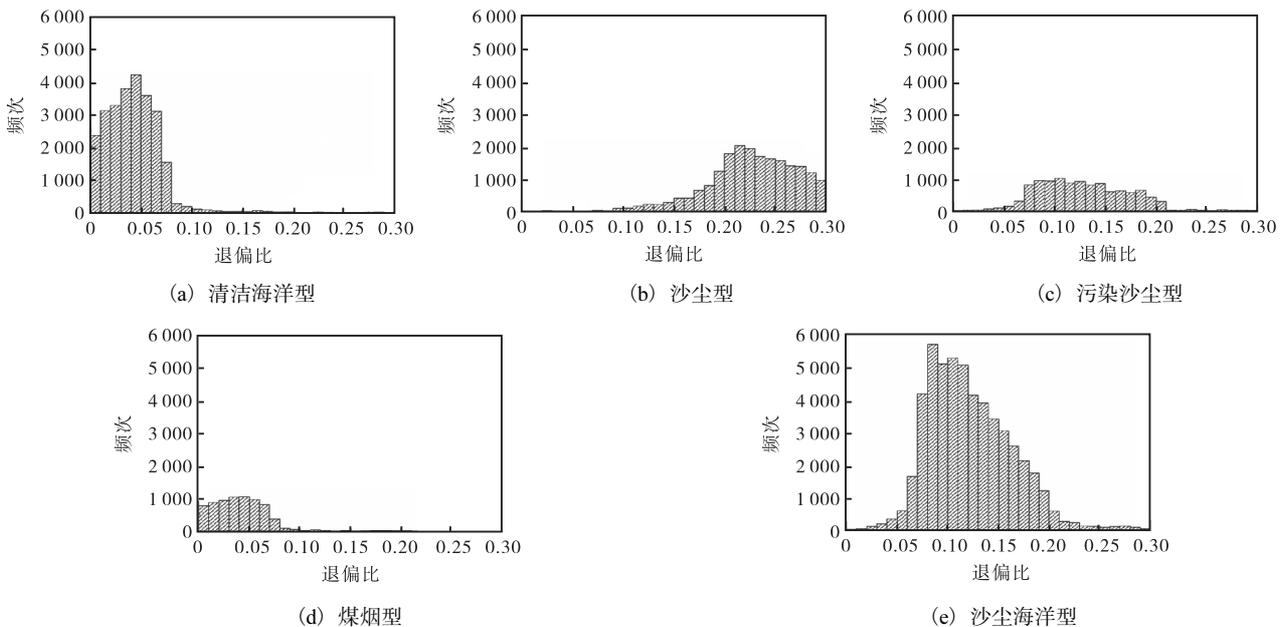


图 9 黄海不同类型气溶胶退偏比直方图

Fig. 9 Histogram of particle depolarization ratio of different aerosols types in the Yellow Sea

不同海域的不同类型气溶胶色比直方图如图

11—图 13 所示。渤海和黄海清洁海洋型气溶胶色比

主要集中在 0.50 ~ 1.00, 当色比小于 0.40 时, 出现频次极少; 东海清洁海洋型气溶胶出现频次较多, 集中分布在色比 0.50 ~ 1.30, 当色比小于 0.32 时, 出现频

次极少。由此可以看出东中国海海域清洁海洋型气溶胶主要以大颗粒粒子为主。

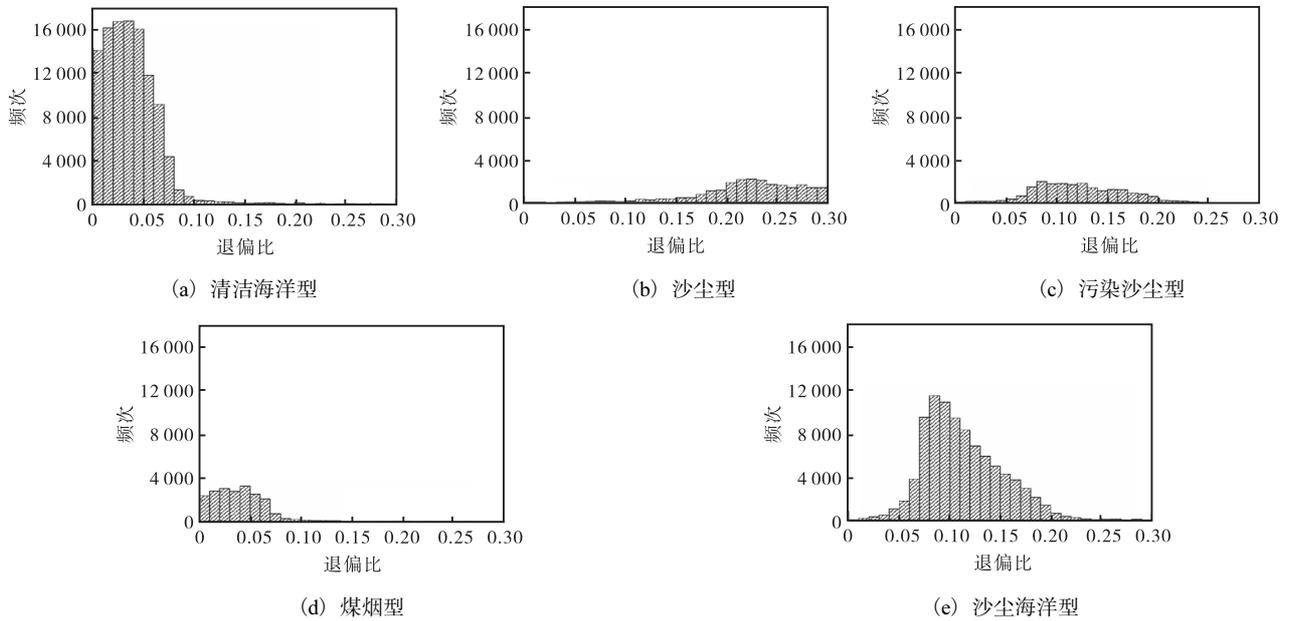


图 10 东海不同类型气溶胶退偏比直方图

Fig. 10 Histogram of particle depolarization ratio of different aerosols types in the East China Sea

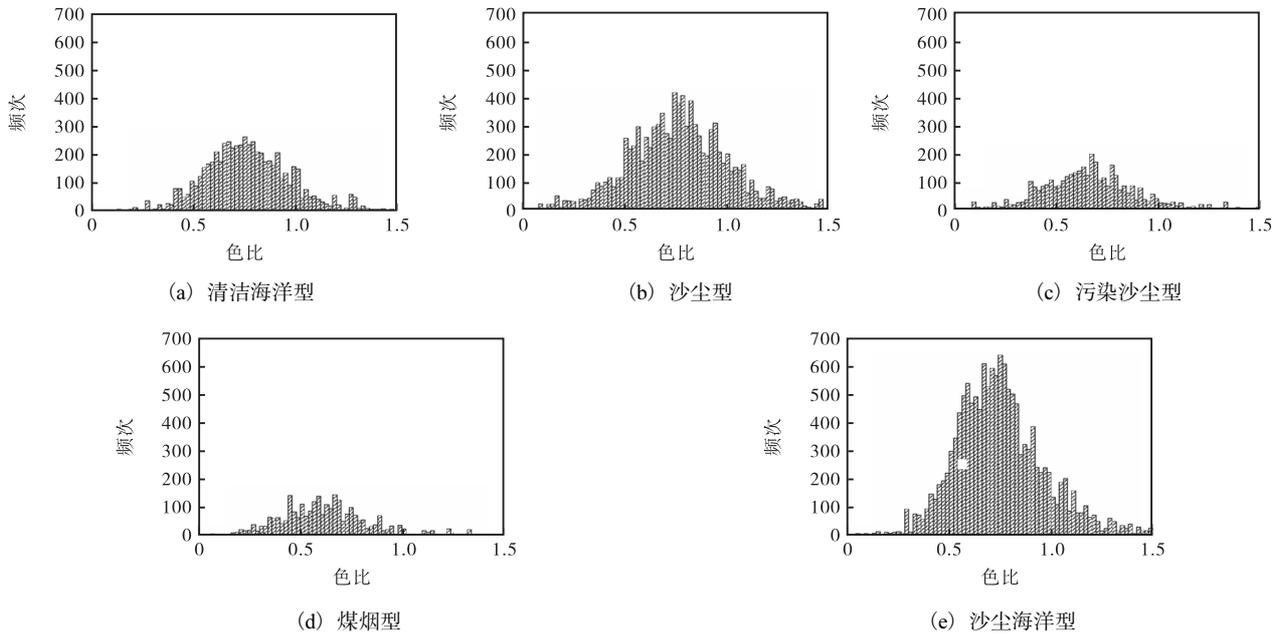


图 11 渤海不同类型气溶胶色比直方图

Fig. 11 Histogram of color ratio of different aerosols types in the Bohai Sea

渤海沙尘型气溶胶出现频次较高, 色比在大于 0.10 均有分布, 主要集中在 0.50 ~ 1.01。黄海沙尘型气溶胶的色比分布情况与清洁海洋型相似, 集中分布在色比 0.50 ~ 1.00, 在色比为 0.71 ~ 0.73 时出现频次最高。东海沙尘型气溶胶出现频次相对较小, 集中分布在色比 0.50 ~ 1.00, 在色比为 0.77 ~ 0.79 时出现频

次最高。以上表明东中国海海域沙尘型气溶胶存在一部分小颗粒粒子, 但主要以大颗粒粒子为主。

渤海污染沙尘型气溶胶色比分布在 0.08 ~ 1.50, 黄海分布在 0.14 ~ 1.50, 东海分布在 0.06 ~ 1.50, 3 个海域污染沙尘型气溶胶出现频次随色比的增加大致呈现出先增大后减小的趋势。这说明东中国海海域

污染沙尘型气溶胶是大颗粒粒子气溶胶和小颗粒粒子气溶胶的混合。

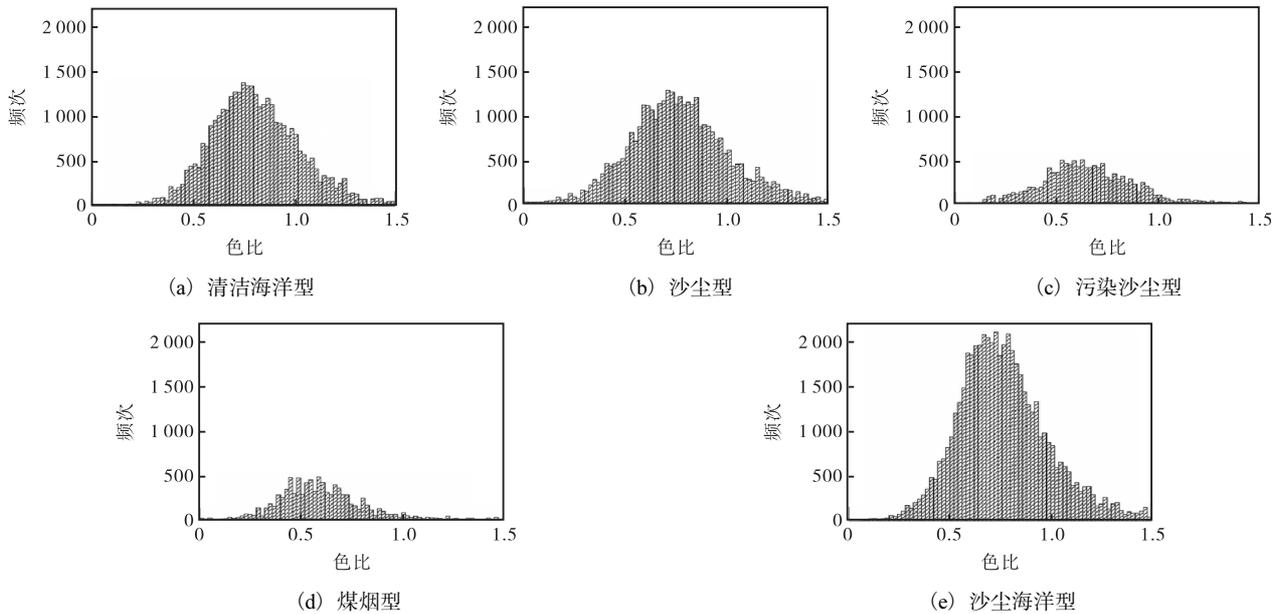


图 12 黄海不同类型气溶胶色比直方图

Fig. 12 Histogram of color ratio of different aerosols types in the Yellow Sea

渤海、黄海和东海煤烟型气溶胶整体出现频次较小,当色比大于 1.00 时,出现频次极小。渤海和黄海煤烟型气溶胶出现频次集中在色比为 0.38 ~ 0.74; 东海集中在 0.34 ~ 0.80, 在色比为 0.57 ~ 0.59 时出现频次最高。由此可以推断东中国海海域煤烟型气溶胶主要是大小颗粒粒子气溶胶的混合。

渤海、黄海和东海沙尘海洋型气溶胶主要集中在色比大于 0.50 的区域,当色比小于 0.30 时,出现频次极少。渤海沙尘海洋型气溶胶在色比为 0.75 ~ 0.77

时出现频次最高,黄海在色比为 0.73 ~ 0.75 时出现频次最高,东海在色比为 0.81 ~ 0.83 时出现频次最高。由此可知东中国海海域沙尘海洋型气溶胶主要以大颗粒粒子为主。渤海和黄海沙尘海洋型气溶胶总的出现频次明显大于其他类型,因此色比高值主要受到沙尘海洋型气溶胶的影响,其次影响较大的是沙尘型和清洁海洋型;东海主要受清洁海洋型气溶胶的影响,其次是沙尘海洋型。

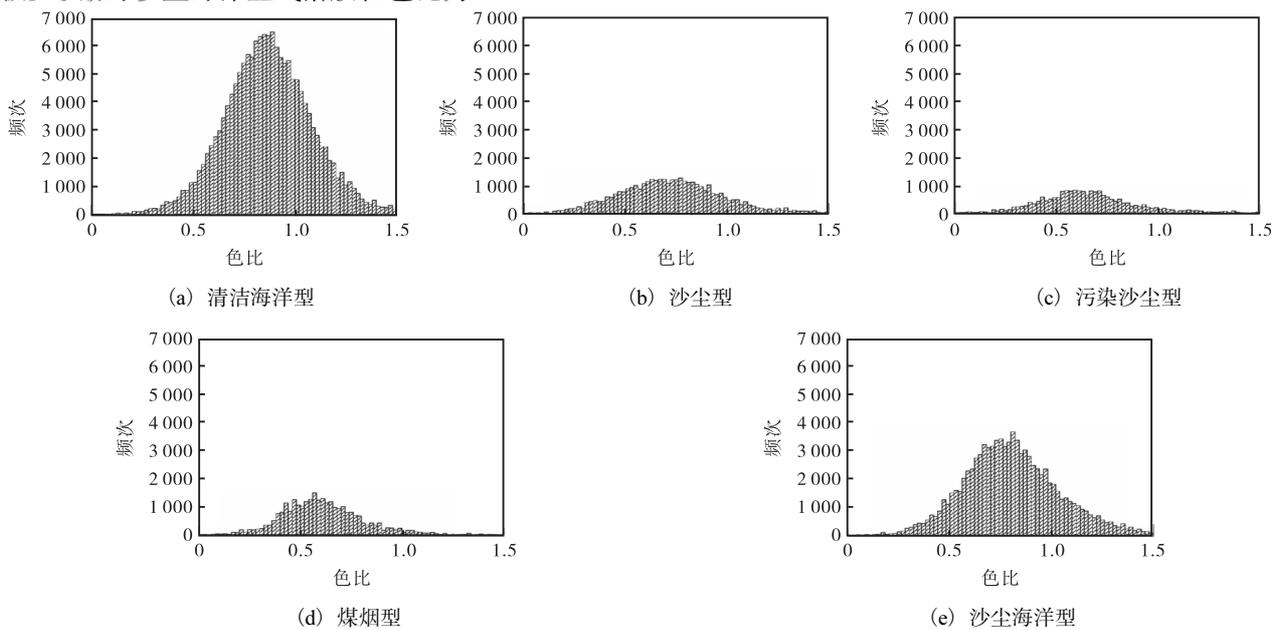


图 13 东海不同类型气溶胶色比直方图

Fig. 13 Histogram of color ratio of different aerosols types in the East China Sea

3 结 论

由 3 个海域气溶胶光学特性的季节分布可以得出:渤海和黄海气溶胶光学厚度差异不大,季节变化不明显;东海气溶胶光学厚度整体小于渤海和黄海,季节变化明显。渤海、黄海和东海气溶胶的退偏比表现为春季最大,其中渤海和黄海的退偏比大于东海;其他 3 个季节退偏比较小,区域差异不大,随季节的变化有增大的趋势。渤海和黄海气溶胶色比的季节变化一致,均表现为春季最大;冬季在渤海和黄海的北部出现低值区。东海春季气溶胶色比整体最大,夏季南北差异明显,秋冬季分布相对均匀。

由 3 个海域气溶胶类型的季节分布可以得出:渤海和黄海气溶胶类型季节占比变化差异不大,而东海与之差异较大。渤海和黄海春季沙尘型气溶胶占比最大,其次是沙尘海洋型,夏季、秋季和冬季以沙尘海洋型气溶胶为主。东海春季沙尘海洋型气溶胶占比最大,其次是沙尘型,而其他 3 个季节主要以清洁海洋型气溶胶为主,其中冬季受沙尘的影响也较大。

由 3 个海域不同类型气溶胶光学特性的差异可以得出:3 个海域气溶胶光学厚度高值区主要受沙尘型和沙尘海洋型气溶胶的影响,低值区主要受清洁海洋型气溶胶的影响。3 个海域的清洁海洋型、煤烟型气溶胶粒子偏球形,沙尘型、污染沙尘型和沙尘海洋型气溶胶粒子以非球形为主;退偏比高值区受沙尘型、沙尘海洋型和污染沙尘型气溶胶的影响,且随着退偏比的增大,沙尘型的影响越来越突出,低值区受清洁海洋型和煤烟型气溶胶的影响。3 个海域的清洁海洋型、沙尘型和沙尘海洋型气溶胶粒子以大颗粒为主,污染沙尘型和煤烟型气溶胶是大小颗粒粒子气溶胶的混合;色比高值区主要受沙尘海洋型、沙尘型和清洁海洋型气溶胶的影响。

本文分析了东中国海海域气溶胶光学特性及类型的分布,有助于更准确地模拟大气传播和反射,进而改善气象和空气质量预测模型的准确性,但研究中还缺乏对不同地区各类型气溶胶输送机理的探讨,因此在后续的工作中还需要进行深层次的分析。

参考文献:

- [1] 王菲菲,李学彬,郑显明,等. 相对湿度和风速对海洋大气气溶胶粒子谱的影响[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S1): 89-94.
- [2] 夏祥鳌,王明星. 气溶胶吸收及气候效应研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 630-635.
- [3] 刘雨华,郑小慎. 基于太阳光度计的天津沿海地区气溶胶特性[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(4): 41-46.
- [4] 余卫国,房世波,余学祥. 中国卫星遥感气溶胶研究进展[J]. 能源环境保护, 2016, 30(1): 1-6.
- [5] JIA D, GAO F, HAN B, et al. Analysis of aerosol characteristics in the coastal waters of Zhejiang based on satellite remote sensing and on-site long time series observation data[C]//SPIE. Proceedings of the Eighth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Kunming: SPIE, 2022: 2827-2839.
- [6] 史亚龙,张永科,陈涌,等. 大气气溶胶粒子粒径分布激光遥测研究进展[J]. 激光杂志, 2023, 44(2): 1-7.
- [7] 曹惠明,孟祥亮,孔梅,等. 山东省大气气溶胶时空分布特征遥感研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(8): 1046-1053.
- [8] BARNABA F, GOBBI G P. Aerosol seasonal variability over the Mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the basin from MODIS data in the year 2001[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2004, 4(9/10): 2367-2391.
- [9] 李冬辉. 中国东部海域气溶胶光学特性及其季节变化和地理分布特征研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
- [10] 纪晓璐. 基于 MODIS 数据的环渤海地区气溶胶时空分布及其影响因素分析[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2017.
- [11] 郝增周,潘德炉,白雁. SeaWiFS 遥感资料分析中国海域气溶胶光学厚度的季节变化和分布特征[J]. 海洋学研究, 2007, 25(1): 80-87.
- [12] 贾瑞,李君,祝清哲,等. 中国西北地区气溶胶的三维分布特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 34-43.
- [13] CHEN Y H, LIU Q, GENG F H, et al. Vertical distribution of optical and micro-physical properties of ambient aerosols during dry haze periods in Shanghai[J]. Atmospheric environment, 2012, 50: 50-59.
- [14] 王庚辰. 大气气溶胶浓度及其谱分布的某些特征[J]. 大气科学, 1982(2): 211-216.
- [15] KASKAOUTIS D G, KOSMOPOULOS P, KAMBEZIDIS H D, et al. Aerosol climatology and discrimination of different types over Athens, Greece, based on MODIS data[J]. Atmospheric environment, 2007, 41(34): 7315-7329.
- [16] OMAR A H, WON J G, WINKER D M, et al. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements[J]. Journal of geophysical research: atmospheres, 2005,

- 110(D10):1-14.
- [17] 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.
- [18] OMAR A H, WINKER D M, VAUGHAN M A, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(10): 1994-2014.
- [19] KIM M H, OMAR A H, TACKETT J L, et al. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. Atmospheric measurement techniques, 2018, 11(11): 6107-6135.
- [20] 戴晨. CALIOP 在海上气溶胶特性分析与海雾统计预报领域中的应用[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
- [21] 任文核,宋小全,王芳涵. 星载激光雷达观测东中国海气溶胶时空分布的统计特征[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 89-94.
- [22] 崔廷伟,黄廷轩,牟冰,等. CALIOP 观测的渤海、黄海气溶胶类型时空分布特征[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 103-109.
- [23] 苏纪兰,袁业立. 中国近海水文[M]. 北京:海洋出版社, 2005: 3.
- [24] 张莉燕,王文彩,罗诚汉,等. 沙尘传输路径和沉降量对南黄海叶绿素 a 浓度的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(8): 9-18.
- [25] 黄菊,高郭平,程天宇,等. 2015 年冬季南黄海水文特征及海-气 CO₂ 通量分析[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(5): 757-765.
- [26] 毛颖. 基于多源卫星数据的渤海气溶胶光学厚度遥感研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2019.
- [27] 毛颖,郑君亮,丘仲锋,等. 黄渤海气溶胶光学厚度的多源卫星遥感产品精度分析和时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(7): 2550-2559.
- [28] 刘东,刘群,白剑,等. 星载激光雷达 CALIOP 数据处理算法概述[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 8-19.
- [29] 郑韶青,徐峻,何友江,等. 星载激光雷达 CALIOP 功能、产品和应用[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(4): 313-320.
- [30] 于娜娜. 气溶胶/云星载激光雷达数据反演算法初步研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
- [31] 赵剑,孙学金,张日伟,等. CALIPSO 星载激光雷达系统在全球气溶胶探测中的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(1): 50-54.
- [32] 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.
- [33] 高星星,陈艳,张武. 2006—2015 年中国华北地区气溶胶的垂直分布特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2241-2250.
- [34] 张玲,郑小慎. 基于 CALIPSO 数据的沿海区域气溶胶光学特性时空特征[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(6): 1033-1049.
- [35] 曾昭亮,郭建平,马大喜,等. 基于 CALIOP 和 MODIS 数据的气溶胶时空分布特征对比分析[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(3): 210-220.
- [36] XU Q Q, CHEN X L, RUPAKHETI D, et al. Evaluation and comparison of spatio-temporal relationship between multiple satellite aerosol optical depth (AOD) and near-surface PM_{2.5} concentration over China[J]. Remote sensing, 2022, 14(22): 5841.
- [37] 徐成鹏,葛颀铭,黄建平,等. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的中国沙尘气溶胶观测[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1353-1362.
- [38] 杨冰韵,刘健,贾煦. 基于 CALIPSO 卫星资料的京津冀地区 MODIS 卷云云顶高度订正[J]. 大气科学, 2020, 44(5): 1013-1022.
- [39] 沈晓晶. 中国近海上空大气气溶胶光学厚度及雾霾识别遥感研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2019.
- [40] WANG H, SHI G Y, TERUO A, et al. Radiative forcing due to dust aerosol over east Asia-north Pacific region during spring, 2001[J]. Chinese science bulletin, 2004, 49(20): 2212-2219.
- [41] LI J J, WANG G H, ZHANG Q, et al. Molecular characteristics and diurnal variations of organic aerosols at a rural site in the North China Plain with implications for the influence of regional biomass burning[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2019, 19(16): 10481-10496.
- [42] BEY I, JACOB D J, LOGAN J A, et al. Asian chemical outflow to the Pacific in spring: origins, pathways, and budgets[J]. Journal of geophysical research: atmospheres, 2001, 106(D19): 23097-23113.
- [43] 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(4): 826-840.
- [44] LIU Z, LIU D, HUANG J, et al. Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2008, 8(16): 5045-5060.

责任编辑:周建军