

太湖地区气溶胶光学特征分析

宋童艾¹ 王静^{1,2*} 于兴娜^{1,2} 王焱³ 陈彦颖³ 高颖¹ 闫景瑞³

(1 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 2 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点实验室, 南京 210044; 3 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

摘要 利用 AERONET 太湖站 2007—2010 年大气气溶胶光学特性数据, 基于马氏距离聚类分析对太湖地区气溶胶进行分类研究。结果表明, 气溶胶光学厚度(AOD)夏季达到最大(1.29), Angstrom 波长指数(AE)在秋季达到最大(1.31); 单散射反照率(SSA)均值在春季和秋季达到最大(0.92); 不对称因子(ASY)均值在夏季达到最大(0.66); 气溶胶粒子谱分布呈现双峰分布; 太湖地区气溶胶粗模态粒子主要来源于北方的沙尘以及近海海域的海盐颗粒, 细模态粒子主要来自人为污染尤其是汽车尾气、工业废气等的排放; 吸收性气溶胶光学厚度(AAOD)夏季出现最大值 0.11, AE 夏季出现最小值 1.0, 说明该地区气溶胶粒子包含了典型的黑碳气溶胶。太湖地区混合类气溶胶占比最多(54.08%), 其次是城市工业类气溶胶(18.95%); 不同类型气溶胶占比的季节性差异较明显, 秋季混合类型气溶胶占比最大(65.30%), 城市工业类型在夏季占比最高(32.07%), 春季受到远距离输送的影响, 沙尘类占比最高(21.01%)。

关键词 AERONET; 光学特性; 吸收性气溶胶; 聚类分析

中图分类号: P421 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200231 **文献标识码:** A

引言

大气气溶胶的光学特性及来源分布已经成为气候和环境变化的研究重点之一^[1-3]。气溶胶光学厚度(AOD)、Angstrom 波长指数(AE)、吸收性光学厚度(AAOD)、吸收性波长指数(AAE)、单次散射反照率(SSA)、非对称因子(ASY)、气溶胶粒子谱分布、复折射指数实部(RRI)和虚部(IRI)等光学参数用于研究气溶胶气候效应并评估大气污染程度^[4-9]。基于不同的气溶胶光学参数特性, 可对气溶胶进行分类研究。刘状等^[10]反演我国中东部地区的 AOD, 通过 K 均值聚类算法(K-means), 对其时间序列进行分析。Li 等^[11]利用 K-means 法将中国地区的气溶胶分为 10 类典型的细模态和粗模态气溶胶模型。Chen 等^[12]提出一种简单的图形方法, 基于全球气溶胶监测网(AERONET)的 AOD

产品将气溶胶分为 6 类, 能够分辨不同情况下气溶胶的变化特征。

为了对区域气溶胶种类进行更细致划分, 确定不同类型气溶胶各个光学参数的分类阈值, 需要对长时间序列的观测数据进行重新挖掘。基于多元统计分析可以对气溶胶粒子的多个光学参数进行聚类分析和判别分析, 从而更精确地确定不同类型气溶胶的分类边界, 构建多参数化气溶胶模型^[13-14]。针对我国以混合污染形态为主的霾气溶胶粒子, 聚类分析可对不同种类气溶胶光学参数阈值进行定量化估计, 对不同类型气溶胶的占比进行统计^[13]。

本文利用 AERONET 的 V3 反演算法气溶胶反演产品, 分析太湖站大气气溶胶光学参数(AOD、AE、SSA、ASY、体积谱分布和复折射指数 RI)的分布特征, 并基于马氏距离聚类分析的方法对气溶胶进行分类, 确定太湖地区不同成分气溶胶的贡献率。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发计划项目(2019YFC0214604)、国家自然科学基金资助项目(41705009)、江苏省高等学校大学生创新创业计划项目(201910300002Z) 资助

作者简介: 宋童艾, 女, 1999 年生, 硕士在读, 主要从事大气气溶胶光学特性研究, Email: ai1999bi@163.com

收稿日期: 2020 年 6 月 15 日; 定稿日期: 2021 年 3 月 10 日

* 通信作者, Email: wangjing2004y@nuist.edu.cn

1 站点及数据描述

太湖位于长江东部沿海区域(图 1)。太湖站(31.42°N, 120.22°E)的气溶胶光学反演数据来自 AERONET 网站(https://aeronet.gsfc.nasa.gov/), 由于某些年份数据缺测, 本文选取 2007—2010 年连续观测数据, 讨论太湖站气溶胶光学特性时间变化特征。其中 AOD(500 nm)、AE(440~

870 nm)、AAOD(440 nm)、AAE 以及 SSA(440 nm)、ASY、气溶胶粒子谱分布、RI(675 nm)等均采用的是 Level 2.0 数据产品, 经过了前后视场的校准, 去除了人为影响和云的影响^[15-16]。从气象共享服务网站(https://www.wunderground.com)整理出离太湖站最近的上海虹桥机场历史气象要素的月均值。下文中关于季节的划分为春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季为 12 月至次年 2 月。

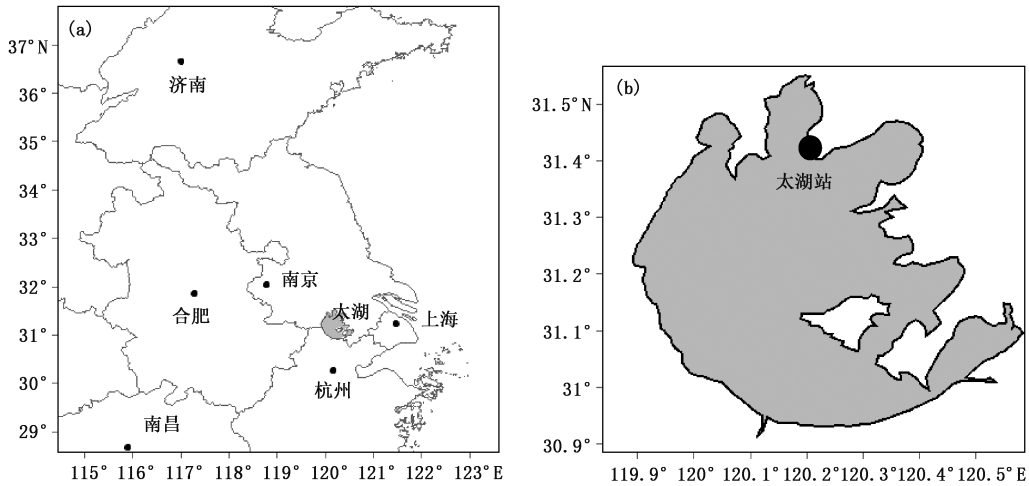


图 1 太湖地区站点位置(a)及信息(b)

2 马氏聚类分析法

马氏距离(Mahalanobis distance)表示点与一个分布之间的距离, 是一种计算两个未知样本集的相似度的方法^[17]。它不受量纲的影响, 两点之间的马氏距离与原始数据的测量单位无关, 可排除变量之间相关性的干扰。 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为一个 n 维向量, 样本的总体均值为 $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$, 则马氏距离 d 的表达式如下:

$$d = \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{m})^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m})} \quad (1)$$

其中, \mathbf{S} 为协方差矩阵, 被定义为:

$$\mathbf{S} = E[(x_i - m_i)(x_j - m_j)]^T \quad (2)$$

其中, E 为期望, i 为行, j 为列。

本文根据 Patrick Hamill 等^[13] 给出的典型区域气溶胶类型的参考质心(表 1), 将太湖站 2005—2016 年的 5 个气溶胶光学数据(AE、AAE、SSA、RRI 和 IRI)马氏化, 利用最小马氏距离进行 K-means 聚类, 得到城市工业、生物质燃烧、混合、沙

尘和海洋 5 类气溶胶, 并根据聚类结果计算太湖地区 5 类气溶胶成分所占比率。

表 1 5 个参考簇的质心^[13]

气溶胶类型	AE	AAE	SSA	RRI	IRI
城市工业	1.76	1.15	0.96	1.40	0.005
生物质燃烧	1.87	1.30	0.89	1.48	0.020
混合	1.32	1.20	0.92	1.45	0.011
沙尘	0.28	1.75	0.91	1.47	0.004
海洋	0.59	0.93	0.97	1.40	0.001

注: AE: Angstrom 波长指数, AAE: 吸收性波长指数, SSA: 单次散射反照率, RRI: 复折射指数实部, IRI: 复折射指数虚部, 下同。

3 结果与讨论

3.1 光学特性年变化特征

整体的年分布特性中(图 2), 细模态的气溶胶粒子占主导, AOD 和 AE 年均值分别为 0.76、1.1。SSA 的年分布较集中(图 2c), 年均值为 0.90。气溶胶的散射作用的影响在总消光中的影响年变化范围

小,对比中国东北 4 个地区 SSA, 同鞍山地区的均值(0.89)接近,比沈阳地区(0.84)、本溪地区(0.81)、抚顺地区(0.84)大,太湖站气溶胶粒子的散

射特性比东北地区强^[18]。ASY 平均值为 0.72,表明太湖地区气溶胶前向散射影响占的比重稍大。

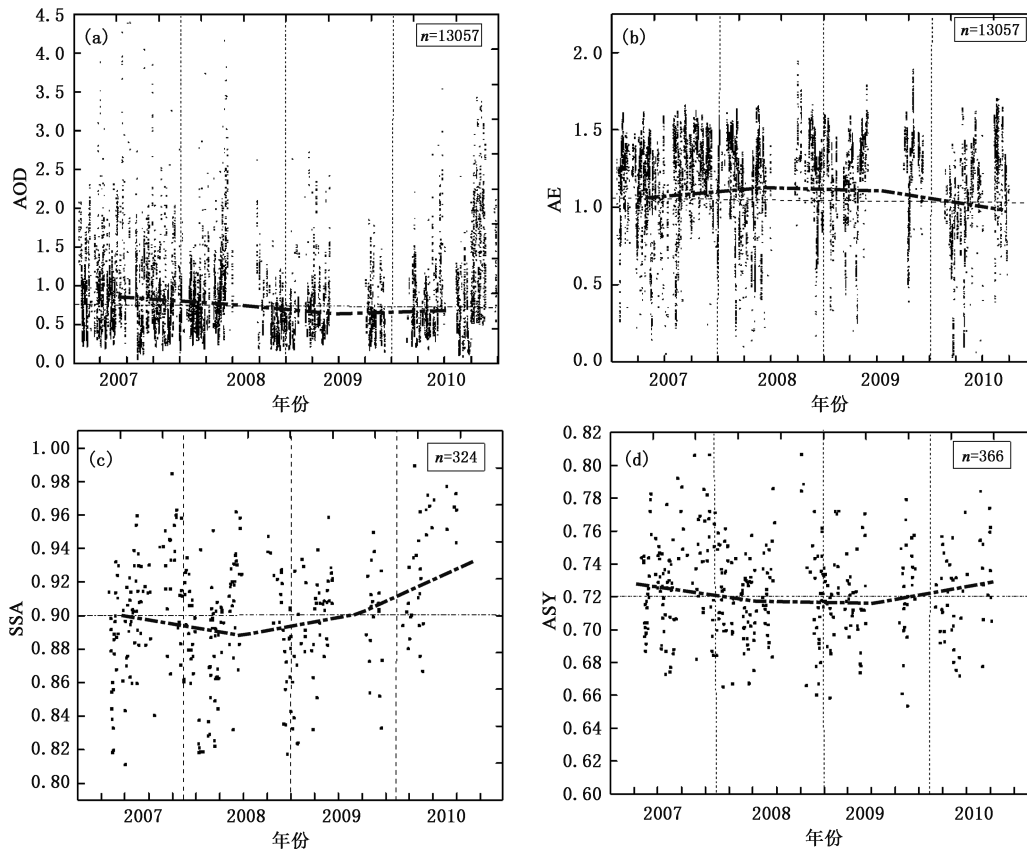


图 2 2007—2010 年太湖站气溶胶光学特征:(a) AOD, (b) AE, (c) SSA, (d) ASY
(黑色虚线表示 4 年平均,折线表示年均值变化)

3.2 季节变化特征

AOD 季节均值夏季最大(1.29),冬季最小(0.67)(表 2)。这个结果与北京的观测相似^[19]。结合气象要素(图 3)分析可知,由于太湖地区夏季水汽含量较高,相对湿度最大,同时夏季高温加速水汽相互作用,太湖水体中的可溶性成分会随着水汽进入到大气中,进而导致吸湿性的气溶胶粒子的吸湿性增长,引起夏季 AOD 变大。太湖 AOD 峰值比北京地区的高大约 0.4^[19]。

AE 春季最小(0.99),秋季最大(1.31)。夏秋季节以粒径较小的细模态为主,秋季太湖的气溶胶以城市工业型气溶胶占主导地位^[19]。春季 AE<1.0,气溶胶粗模态占主导地位,AE 值大于在坎普尔(工业城市,位于印度北部)对应的观测值(0.6)^[20],且

大于春季的中国北方的半干旱地区(0.7)^[21]。我国北方大部分地区春季沙尘污染严重,粗模态粒子占主导,导致 AE 值很小。太湖所在的长江三角洲地区以工业城市气溶胶为主^[22],春季受北方远距离传输的沙尘粒子影响较小,该区域的 AE 值大于北方半干旱地区。

表 2 2007—2010 年太湖站 AOD 和 AE 季平均值

季节	AOD	AE
春(3,4,5月)	0.90	1.00
夏(6,7,8月)	1.29	1.13
秋(9,10,11月)	1.00	1.31
冬(12,1,2月)	0.67	1.11

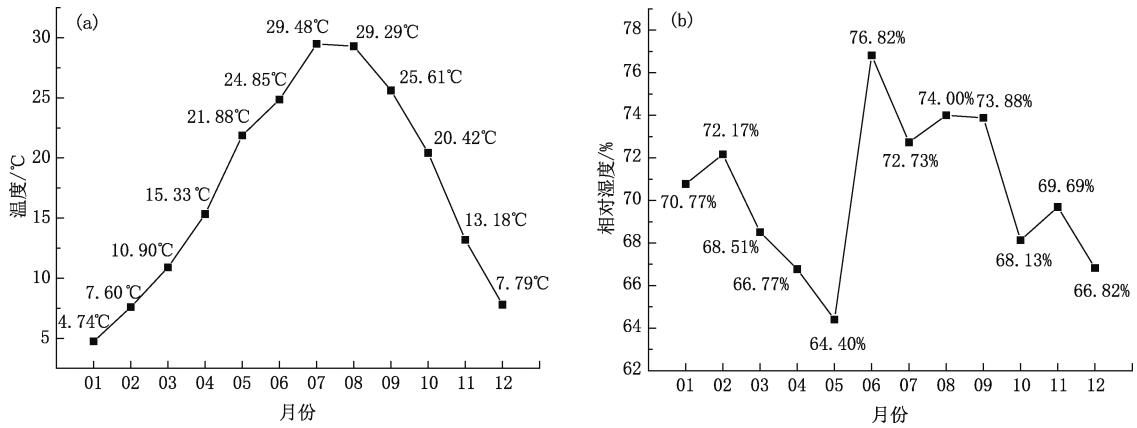


图 3 2007—2010 年太湖站月平均温度(a)、相对湿度(b)年变化

Dubovik 等^[23]发现城市工业和生物气溶胶会导致 SSA 的减少,而沙尘气溶胶增加会导致 SSA 的增加。Bergstrom 等^[24]建议可根据 SSA 对应光谱区分气溶胶类型。太湖 SSA 春季随波长增加而增大,夏季相反(表 3),这与春季沙尘天气的高发有关^[19, 25-26]。冬季 SSA 平均值(0.89)均低于其他 3 个季节,可能与冬季城市黑碳气溶胶吸收性强^[24]有关。SSA 的变化受地理位置,燃料类型,远程运输和天气状况等因素影响^[27-28]。由于太湖地处长江三角洲地区,受到工业区排放的大气污染物^[29]、周围环境以及气溶胶自身结构的影响^[28],使得粒子性质变化较大。太湖 SSA(440 nm)年平均值为 0.91,接近于墨西哥城和卡普尔中获得的平均值(0.9)^[30],而且比马里兰州(0.96)和巴黎(0.93)稍低^[31]。太湖地区的吸湿性气溶胶主要为生物质燃料和化石燃料的不完全燃烧,以及汽车尾气释放的黑碳类气溶胶^[28],导致了这样的差异。在夏季、秋季和冬季 ASY 的平均值随波长增加而减小,类似于在光州、白滨、诺托测量得到的结果^[32]。RRI 在春季(1.48)和冬季(1.47)的平均值要高于其他的 2 个季节(表 4)。IRI 在春季、秋季和冬季随波长的增加而减少,夏季均值最高(0.013),随着波长的增加呈现增加趋势。

表 3 2007—2010 年太湖站 SSA、ASY 随波长的季平均值

	SSA				ASY			
	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm
春	0.90	0.93	0.93	0.93	0.72	0.66	0.64	0.64
夏	0.92	0.93	0.92	0.92	0.75	0.69	0.65	0.63
秋	0.92	0.93	0.92	0.92	0.74	0.67	0.63	0.62
冬	0.88	0.90	0.90	0.89	0.72	0.66	0.64	0.63

表 4 2007—2010 年太湖站 RRI、IRI 随波长的季平均值

	RRI				IRI			
	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm
春	1.45	1.48	1.49	1.48	0.010	0.007	0.006	0.006
夏	1.41	1.42	1.44	1.43	0.011	0.012	0.015	0.015
秋	1.40	1.42	1.44	1.43	0.010	0.008	0.007	0.007
冬	1.44	1.46	1.48	1.48	0.018	0.011	0.011	0.011

3.3 体积谱分布特征

太湖的气溶胶体积谱分布呈双峰结构(图 4a)。细模态(半径 $<0.6 \mu\text{m}$)中粒径的峰值约为 $0.26 \mu\text{m}$ (夏季),粗模态(半径 $>0.6 \mu\text{m}$)中粒径的峰值分别为 $2.24 \mu\text{m}$ (春季)、 $2.94 \mu\text{m}$ (夏季),秋季和冬季的峰值半径约 $3.8 \mu\text{m}$ 。春季粗模态占主导地位,夏季和秋季细模态占主导。结合表 3、表 4 可以看出夏季细模态占主导的气溶胶具有较高的 SSA 以及较小的 RRI,气溶胶粒子有明显的吸湿性增长。不同 AOD 对应不同粒子谱的分布特征(图 4b),细模态气溶胶粒子占主导,在 AOD >1.0 严重污染的条件时,粒子体积谱明显增加。细模态中粒径随着 AOD 的增加变大,所对应的体积浓度峰值也随之增大。

3.4 吸收性光学特征

根据 AAOD 和 AAE 可对气溶胶进行分类^[33](图 5a):第 1 类: $0.0 < \text{AAOD} < 0.2, 0.0 < \text{AAE} < 2.0$,代表背景吸收性气溶胶以混合型气溶胶为主。第 2 类: $\text{AAOD} > 0.2, \text{AAE} < 1.0$,代表了大气消光性的气溶胶粒子可能以外部具有涂层的黑碳气溶胶

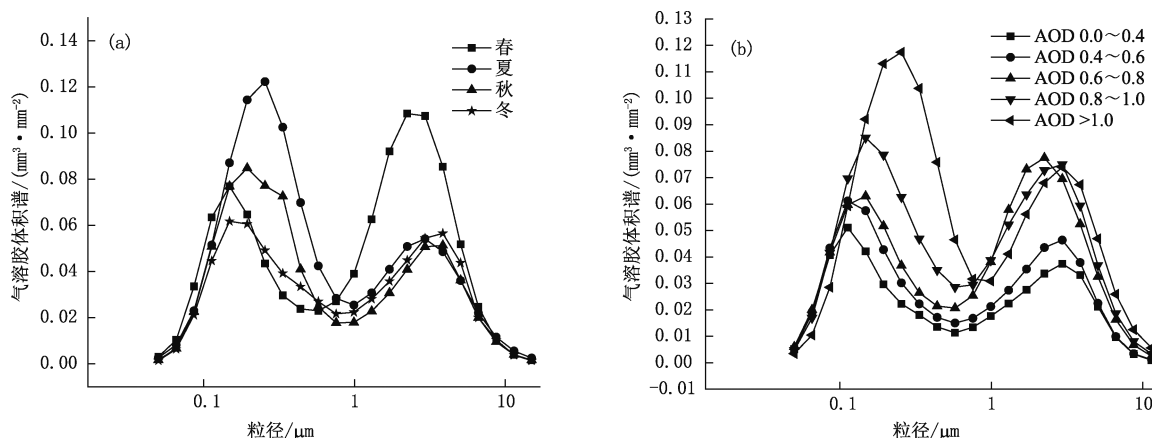


图 4 2007—2010 年太湖站不同季节(a)和不同 AOD 范围(b)气溶胶体积谱

为主。太湖站以混合型气溶胶所为主,AAOD 均值为 0.08,AAE 均值为 1.51。AAE 值越大时,说明此地区的吸收性气溶胶主要由有机物燃烧产生。AAE 接近 1,表明此地区的吸收性气溶胶主要是黑碳气溶胶^[34]。从图 5b 中可以看出,B 区和 C 区的数量分布较多,太湖站气溶胶以城市及工业排放的气溶胶和生活物质燃烧产生的气溶胶居多,以混合

型气溶胶为主。A 区有少量的分布,说明沙尘气溶胶在太湖站不占主导,随季节变化出现。D 区中也是有较少的数量分布,说明粒径较大的吸收性较差的气溶胶粒子有时会出现,这部分具有沙尘和有机碳等粗粒子的涂层包裹的黑碳气溶胶不占主导。太湖站气溶胶粒子是以混合型气溶胶为主,与 Giles 等对北京及香河的研究结果相似^[35]。

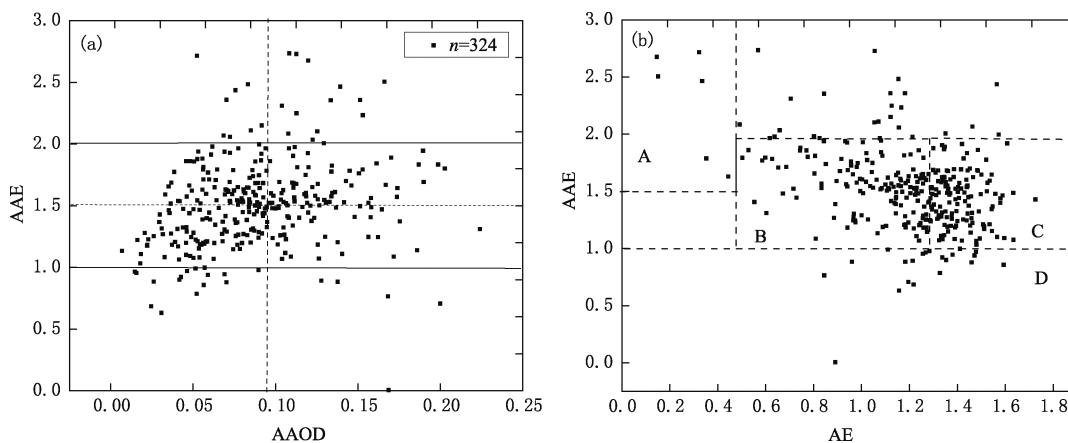


图 5 根据 AAOD 和 AAE(a)与 AE 和 AAE(b)对气溶胶分类

3.5 基于马氏聚类的气溶胶分类

通过聚类得到了 5 类气溶胶之间的 5 维马氏距离(表 5)。可以看出,海洋类与生物质燃烧类气溶胶之间的马氏距离最大,其次是海洋类与混合类;海洋类与沙尘类之间的马氏距离最小,其次是混合类与城市工业类。粗细粒子之间差异很大,但粗细粒子内部之间差异较小,不易区分。在计算各组数据到参考质心的马氏距离时,我们发现有很多组数据到城市工业和混合类的马氏距离相差很小,说明这

两类气溶胶的区分非常困难。由于马氏距离排除了各参数之间相关性的干扰,因此得到的结果是较为合理的^[13]。

根据聚类结果,太湖地区各类气溶胶的占比如图 6a 所示,混合类气溶胶占比最多(54.08%),其次是城市工业类气溶胶(18.95%),海洋类占比最少(0.23%)。太湖地区吸收性气溶胶占比较大^[36],北方输送过来的污染物中含黑碳等吸收性强的颗粒物也不容忽视^[37],加上旅游旺季人为因素以及太湖水

体污染的影响,使得混合类气溶胶占比最多。而长江三角洲工业区对于太湖影响很大,导致城市工业类气溶胶占据一定的比重。随季节变化太湖地区会受到海洋性气团输送的影响,导致出现少量的海洋类气溶胶。

5类气溶胶占比率的季节性差异较明显(图6b)。根据王书肖和张楚莹^[38]的研究,我国生物质燃烧以秸秆燃烧为主,南方10月的秸秆燃烧导致秋季生物质燃烧气溶胶占比最高。而秋季混合类气溶胶也明显比其他季节占比高,因太湖地区秋冬季相对夏季干燥,黑碳季节变化明显,秋冬季高于夏季^[39-40],使得太湖地区在秋季受到混合类气溶胶的影响更为显著。根据聚类结果,各个季节均出现了海洋类气溶胶,从5月下旬开始由于西南季风的影响,孟加拉湾和印度洋的水汽会被输送到我国华南甚至华东地区,而冬季海洋占比达到了最大,因 Patrick Hamill

等^[13]给出的海洋类气溶胶为推导量,在定义海洋类气溶胶的参考质心时使用了 Sayer 等^[41]给出的标准: $AOD < 0.2$, 且 AE 介于 $0.1 \sim 1.0$ 之间。冬季气溶胶 AE 介于 $0.1 \sim 1.0$ 占比最高为 20%, 且冬季 AOD 为最小值, 加上 12 年间江苏地区曾在冬季受到过雨雪冻害的影响^[42], 有海洋上空的水汽输送, 使得聚类时冬季海洋类气溶胶占比超过了其他 3 个季节。

表 5 集群在参考集群之间的五维马氏距离

	城市工业	生物质燃烧	混合	沙尘	海洋
城市工业	0	6.57	3.74	7.03	5.97
生物质燃烧		0	4.37	8.91	9.40
混合			0	5.06	5.12
沙尘				0	2.98
海洋					0

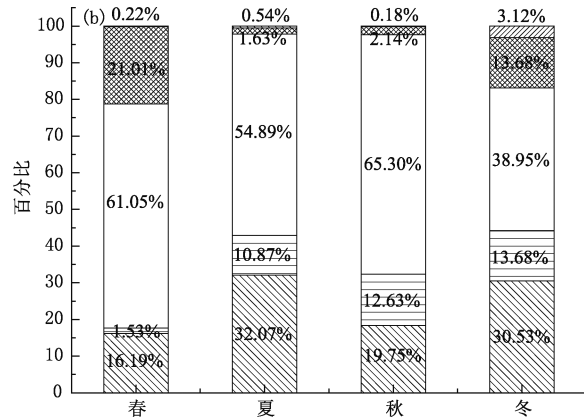
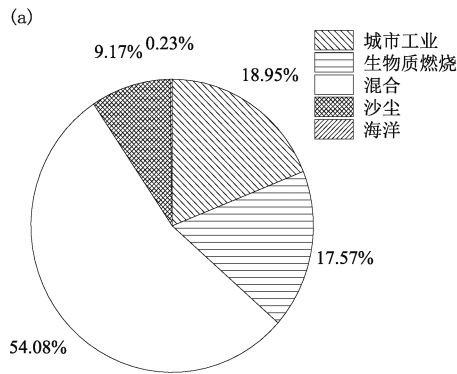


图 6 5类气溶胶成分的总(a)和各季节(b)占比

4 结论

(1) 太湖站 AOD 夏季达到峰值(1.29), AE 在秋季达到峰值(1.31), SSA 年总平均值为 0.90。气溶胶粒子谱分布呈双峰对数正态结构。 RI 的实部在春季和冬季的平均值要高于其他的两个季节。 RI 的虚部的值在夏季比其他几个季节的值要高, 峰值为 0.013。

(2) $AAOD$ 均值为 0.08, AAE 均值为 1.51, 该地区气溶胶粒子包含了典型的黑碳气溶胶, 以混合型气溶胶为主。夏季湿度增加会影响部分吸湿性气溶胶粒子 AOD 增加。

(3) 太湖地区混合类气溶胶占比最多(54.08%), 其次是城市工业类气溶胶(18.95%)。5类气溶胶

占比率的季节性差异较明显, 秋季混合类型气溶胶占比最大(65.30%), 城市工业类型在夏季占比最高(32.07%), 春季由于北方沙尘气溶胶粒子的输送, 占比(21.01%)均大于其他 3 个季节。

致谢: 对于 AERONET 网站所提供的观测数据、WEATHER UNDERGROUND 提供的气象数据, 在此一并致谢

参考文献

- [1] 王明星. 气溶胶与气候[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 1-5.
- [2] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [3] 倪敏, 郑军, 马嫣, 等. 气溶胶的辐射强迫作用研究进展[J].

- 环境科学与技术, 2016, 39(10): 73-78.
- [4] 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.
- [5] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.
- [6] Beron F M, Tanre D, Generoso S. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite [J]. Science, 2002 (5556): 834-838.
- [7] 刘晓舟, 许潇锋, 杨军. 华东三市能见度、气溶胶和太阳辐射变化特征[J]. 气象科技, 2013, 41(02): 352-359.
- [8] 王伟齐, 张成网, 臧增亮, 等. Terra 和 Aqua 卫星 MODIS 3 km AOD 与北京 PM_{2.5} 对比分析[J]. 气象科学, 2017, 37(1): 93-100.
- [9] 张凤霞, 李正强, 李凯涛, 等. 京津唐地区气溶胶直接辐射强迫的遥感观测[J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(2): 155-161.
- [10] 刘状, 石晨烈, 张萌, 等. 基于聚类分析的气溶胶光学厚度时间变化特征研究[J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(6): 411-418.
- [11] Li Z, Zhang Y, Xu H, et al. The fundamental aerosol models over China region: A cluster analysis of the ground-based remote sensing measurements of total columnar atmosphere [J]. Geophysical Research Letters, 2019(9): 4924-4932.
- [12] Chen Qixiang, Yuan Yuan, Shuai Yong, et al. Graphical aerosol classification method using aerosol relative optical depth [J]. Atmospheric Environment, 2016, 135: 84-91.
- [13] Hamill P, Giordano M, Ward C, et al. An AERONET-based aerosol classification using the Mahalanobis distance [J]. Atmospheric Environment, 2016, 140: 213-233.
- [14] Russell P B, Kacenelenbogen M, Livingston J M, et al. A multiparameter aerosol classification method and its application to retrievals from spaceborne polarimetry [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 119(16): 9838-9863.
- [15] 王捷纯, 邓玉娇. 利用 MODIS C6 产品分析广东省气溶胶光学厚度时空特征[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 809-813.
- [16] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(3): 337-349.
- [17] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [18] 赵胡筋. 中国东北城市地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射效应研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
- [19] Masoumi A, Khalesifard H R, Bayat A, et al. Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran [J]. Atmospheric Research, 2013, 120/121: 343-355.
- [20] Tiwari S, Srivastava A K, Singh A K. Heterogeneity in pre-monsoon aerosol characteristics over the Indo-Gangetic Basin [J]. Atmospheric Environment, 2013, 77: 738-747.
- [21] Xia Xiangao, Chen Hongbin, Wang Pucal. Aerosol properties in a Chinese semiarid region [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(27): 4571-4581.
- [22] 王宏斌, 张志薇, 张镭, 等. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶大小的识别及特征分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 995-1003.
- [23] Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(3): 590-608.
- [24] Bergstrom R W, Russell P B, Hignett P. Wavelength dependence of the absorption of black carbon particles: Predictions and results from the TARFOX experiment and implications for the aerosol single scattering albedo [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59: 567-577.
- [25] 张盼想, 张鹏, 陈林, 等. 沙尘和霾气溶胶的物理特征比较[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 1258-1265.
- [26] 马新成, 毕凯, 田海军, 等. 北京地区沙尘天气气溶胶飞机观测特征[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 95-103.
- [27] Tanré D, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106 (D16): 18205-18217.
- [28] 饶加旺, 马荣华, 段洪涛. 基于实测数据的太湖上空气溶胶单次散射反照率特征分析[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(2): 284-287.
- [29] Lee K H, Li Z, Wong M S, et al. Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112: D22S15. doi:10.1029/2007JD009077
- [30] Vasilyev O B, Contreras A L, Velazquez A M, et al. Spectral optical properties of the polluted atmosphere of Mexico City (spring summer 1992) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995(D12): 26027-26044.
- [31] Yu Xingna, Zhu Bin, Yin Yan, et al. Seasonal variation of columnar aerosol optical properties in Yangtze River Delta in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(6): 1326-1335.
- [32] Cheng T, Liu Y, Yu X, et al. A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(30): 5787-5797.
- [33] Kaskaoutis D G, Sinha P R, Vinoj V, et al. Aerosol properties and radiative forcing over Kanpur during severe aerosol loading conditions [J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 7-19.
- [34] Russell P B, Bergstrom R W, Shinzuka Y, et al. Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. [J]. Atmospheric Chemistry and

- Physics, 2010(3): 1155-1169.
- [35] Giles D M, Holben B N, Eck T F, et al. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D17203. doi: 10.1029/2012JD018127.
- [36] 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.
- [37] 徐记亮, 张镭, 吕达仁. 太湖地区大气气溶胶光学及微物理特征分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(6): 1668-1675.
- [38] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. *中国科技论文在线*, 2008(5): 329-333.
- [39] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 深圳市城区和郊区黑碳气溶胶对比研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1653-1662.
- [40] 徐昶, 沈建东, 叶辉, 等. 杭州黑碳气溶胶污染特性及来源研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(12): 3026-3033.
- [41] Sayer A M, Smirnov A, Hsu N C, et al. A pure marine aerosol model, for use in remote sensing applications [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5).
- [42] 项瑛, 张余庆, 许琪, 等. 江苏省主要气象灾害时空分布及演变特征分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(19): 112-119.

Optical Properties of Aerosols in Taihu Region of China

SONG Tongai¹ WANG Jing^{1, 2} YU Xingna^{1, 2} WANG Yan³ CHEN Yanying³
GAO Ying¹ YAN Jingrui³

(1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044; 3 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The temporal variation of aerosol optical properties retrieved from the Aerosol Robotic Network (AERONET) at the Taihu site in East China is analyzed. The classification study of aerosols is conducted by the method of cluster analysis based on the Mahalanobis distance. The results show that the mean values of aerosol optical depth (AOD) reached a maximum of 1.29 in summer and the maximum value of Angstrom Exponent (AE) is 1.31 in autumn. The highest average value (0.92) of single scattering albedo (SSA) was shown in spring and autumn, while the maximum average value (0.66) of asymmetry factor appeared in summer. The overall seasonal volume size distribution of aerosols showed a bimodal model, with a fine mode peak at about 0.26 μm in summer and a coarse mode peak at about 2.24 μm in spring. The coarse mode aerosols were mainly from the transport of dust aerosols from the north part of China and the marine aerosols from sea. The fine mode aerosols were mainly caused by biomass burning mixed with urban industrial pollutants. The maximum of absorbing aerosol optical depth (AAOD) in summer is 0.11, while the minimum value of AE is 1.0, indicating that aerosol particles in this area contain typical black carbon aerosols. Mixed aerosols accounted for the largest proportion (54.09%) in the Taihu Lake region, followed by urban industrial aerosols (18.95%). Seasonal differences in the proportions of the aerosols of the five categories were more pronounced, and mixed aerosols accounted for the largest proportion in autumn (65.30%). The urban industrial type accounted for the highest proportion in summer (32.07%), and in the spring due to the transport of dusts and aerosol particles in the north, the proportion is the highest (21.01%).

Keywords: AERONET; optical property; absorbing aerosol; cluster analysis