

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及生态、健康风险评估 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 陈姗, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N₂O排放的影响 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N₂O和CH₄排放的影响 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征

沈吉, 曹念文*

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 利用主动式遥感卫星云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测 (CALIPSO) 提供的激光雷达资料, 重点分析了 2017-12 ~ 2018-11 中国长江三角洲地区对流层大气中 532 nm 气溶胶消光系数, 气溶胶退偏比, 气溶胶色比以及各类型气溶胶的时空变化特征. 对气溶胶的光学参数随高度变化的研究表明, 与对流层高空相比, 一般在对流层低空中气溶胶消光能力更强, 气溶胶粒子更规则, 气溶胶粒径更小. 对气溶胶的光学参数随季节变化的研究表明, 与冬春季相比, 一般夏秋季在对流层高空中气溶胶消光能力更强, 在 2 km 以下气溶胶粒子更规则, 在对流层高空中气溶胶粒径的范围更大. 长江三角洲地区全年中污染沙尘气溶胶出现的频率最高, 为 37.4816%, 夏秋季烟尘、污染大陆与洁净海洋气溶胶出现的频率比冬春季高, 而夏秋季沙漠沙尘气溶胶出现的频率相对较低.

关键词: 气溶胶; 垂直分布; 光学参数; 类型; 主动式遥感卫星云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测 (CALIPSO)

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4743-12 DOI: 10.13227/j.hjcx.201903187

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018

SHEN Ji, CAO Nian-wen*

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the lidar data provided by cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) from December 2017 to November 2018, the temporal and spatial variation characteristics of 532 nm aerosol extinction coefficient, aerosol depolarization ratio, aerosol color ratio, and various types of aerosols in the troposphere over the Yangtze River Delta region of China were analyzed in detail. The altitude variation of aerosol optical parameters showed that the extinction ability of aerosols was generally stronger in the lower troposphere than that in the upper troposphere, the shape of particles was generally more regular in the lower troposphere than that in the upper troposphere, and the size of particles was generally smaller in the lower troposphere than that in the upper troposphere. The seasonal variation of aerosol optical parameters showed that the extinction ability of aerosols in the upper troposphere was generally stronger in summer and autumn than that in winter and spring, the shape of particles below 2 km was generally more regular in summer and autumn than that in winter and spring, and the size range of particles in the upper troposphere was generally larger in summer and autumn than that in winter and spring. The occurrence frequency of polluted dust aerosols over the Yangtze River Delta throughout the year was the highest (37.4816%). The occurrence frequency of smoke aerosols, polluted continental aerosols, and clean marine aerosols in the troposphere was higher in summer and autumn than that in winter and spring. However, the occurrence frequency of dust aerosols in summer and autumn was relatively low.

Key words: aerosol; vertical distribution; optical parameter; type; cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO)

大气气溶胶对太阳辐射具有散射和吸收作用, 可以显著改变到达地表的太阳辐射能, 影响整个天气系统的辐射收支, 继而引起气候和环境变化. 大气气溶胶的垂直分布特征是客观评价气溶胶辐射强迫及气候效应的关键要素之一^[1], 因此大气气溶胶的垂直分布特征已成为大气科学与环境监测等领域的研究热点. 而中国长江三角洲地区严峻的大气气溶胶污染现状已成为制约其经济社会可持续发展的重要障碍^[2], 研究该地区大气气溶胶的垂直分布特征, 具有重要的现实意义.

已有学者研究了长江三角洲地区的气溶胶垂直分布特征, Fan 等^[3]利用三年的激光雷达探测数据分析了长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征, 并

结合潜在源贡献函数和浓度加权轨迹模型探讨了气溶胶的来源, Liu 等^[4]分析了长江三角洲地区一年的气溶胶消光系数廓线数据, 发现气溶胶对对流层低空大气稳定性与大气动力的影响显著. 他们使用位于无锡太湖附近的激光雷达都获得了比较好的探测结果, 但是地基激光雷达的定点观测^[5,6]代表区域有限, 其观测结果不能完全代表整个长江三角洲地区.

卫星遥感可以克服定点观测代表区域有限的缺

收稿日期: 2019-03-21; 修订日期: 2019-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0209600, 2018YFC0213100)

作者简介: 沈吉 (1994 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光雷达大气探测, E-mail: 1624421539@qq.com

* 通信作者, E-mail: nwcao@nuist.edu.cn

点,其中主动式遥感卫星云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测 (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations, CALIPSO) 可以克服被动式遥感卫星只能探测大气气溶胶的水平分布与传输^[7,8]的缺点,可以提供气溶胶垂直方向的信息^[9~19]. 学者们已经利用 CALIPSO 在长江三角洲地区开展过一些研究, Sun 等^[20]分析了雾-霾污染事件中气溶胶的光学特性以及不同类型气溶胶的来源, Tao 等^[21]发现 2012 年 6 月 8~12 日出现在中国东部的持续雾-霾是由空气中的灰尘, 火灾排放和潮湿条件下的城市污染造成的, 刘璇等^[22]研究了霾污染过程中气溶胶的垂直分布特征, 她们利用 CALIPSO 卫星激光雷达资料主要还是分析短期大气污染过程中气溶胶的光学参数随高度的变化, 不能揭示区域长期气溶胶的垂直分布规律. 目前, 针对长江三角洲地区长期大气气溶胶垂直分布特征的研究仍然比较少, 本文利用 1 a 的 CALIPSO 卫星激光雷达资料, 详细分析了长江三角洲地区大气气溶胶的垂直分布特征.

本研究基于 CALIPSO 卫星的 Level 2 激光雷达数据产品资料, 为提高气溶胶数据的质量, 介绍了筛选高质量气溶胶数据的方法, 利用具有高准确度与可信度的气溶胶数据探讨了 532 nm 气溶胶消光系数廓线, 气溶胶退偏比廓线与气溶胶色比廓线的长期变化规律, 并且研究了长江三角洲地区对流层大气中各类型气溶胶的时空变化特征.

1 材料与方法

1.1 CALIPSO 资料

此次研究基于 CALIPSO 卫星提供的 Level 2 数据产品, CALIPSO 卫星属太阳同步极轨卫星, 轨道高度为 705 km, 轨道倾角为 98.2°, 轨道周期为 96 min, 每天绕地飞行 14.55 圈, 地球覆盖周期为 16 d. 重点研究 Level 2 数据产品中的气溶胶廓线数据与垂直特征识别数据, 表 1 为 Level 2 数据的空间分辨率.

表 1 CALIPSO 激光雷达 Level 2 数据产品的空间分辨率

海拔高度 /km	水平分辨率 /km	532 nm 垂直分辨率/km	1 064 nm 垂直分辨率/km
-0.5~8.2	1/3	0.06	0.06
8.2~20.2	1	0.06	0.06
20.2~30.1	5/3	0.18	0.18

1.2 CALIPSO 资料筛选方法

长江三角洲地区经度范围为 118°E~123°E, 纬度范围为 28°N~33°N, 如图 1 所示, 从 NASA

(national aeronautics and space administration) 官网上下下载长江三角洲地区 1 a 的星载激光雷达资料, 选取的资料时间范围为 2017-12~2018-11.

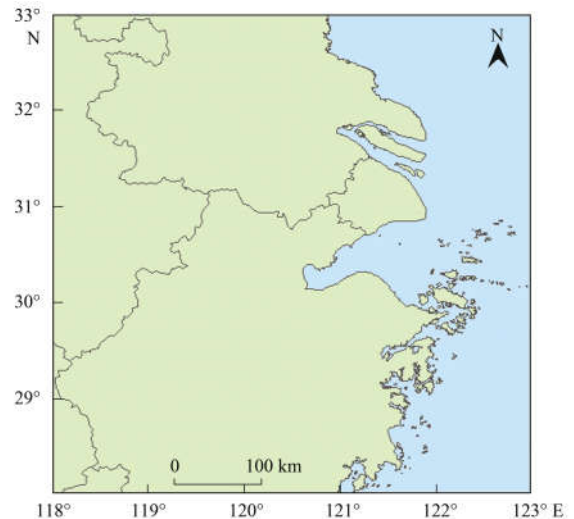


图 1 长江三角洲区域范围

Fig. 1 Region of the Yangtze River Delta

1.2.1 气溶胶廓线数据的筛选方法

Level 2 气溶胶廓线数据由 Level 1 数据采用相关算法计算得到, 由于算法的不确定性, 使 Level 2 气溶胶廓线数据中消光系数, 后向散射系数与退偏比等存在一定误差, 因此, 在使用这些气溶胶光学参数前需要进行数据质量控制以便减小误差. 可以使用廓线数据中 extinction coefficient uncertainty、cloud-aerosol discrimination score (CAD Score)、atmospheric volume description (AVD) 和 extinction quality control (Extinction QC) 等标志量对对流层 10 km 以下的气溶胶数据进行筛选. 在使用标志量筛选数据前, 可以先剔除气溶胶光学参数数组中的无效值. 消光系数数组中的无效值基本为负值. 气溶胶退偏比数组中 0~1 之间数值比较可靠, 可以剔除范围之外的退偏比数据. 气溶胶色比 (CR) 的公式如下:

$$CR = \frac{\beta_{1064}}{\beta_{532}}$$

式中, β_{1064} 为 1 064 nm 激光的气溶胶后向散射系数, β_{532} 为 532 nm 激光的气溶胶后向散射系数, 气溶胶色比数组中 0~3 之间数值比较可靠, 可以剔除范围之外的色比数据.

extinction coefficient uncertainty 为每个气溶胶消光系数值对应的不确定性, 设置的不确定性数值在 10 km^{-1} 以内表示消光系数值可靠, 由于反演过程自上而下进行, 误差会向下传递, 所以超过 10 km^{-1} 的不确定性数值位置下方的数据需要全部剔除.

CAD Score 用于区分云与气溶胶, CAD Score 数值范围为 $[-100, 100]$, 负值表示为气溶胶, 正值表示为云, 数值的绝对值越大说明气溶胶或云的置信度越高, 设定气溶胶的 CAD Score 数值范围为 $[-100, -20]$, 只有当 CAD Score 上下两层数值均处于该范围, 才认定该高度只存在气溶胶, 得到的大气消光系数是气溶胶消光系数。

每个 AVD 有上下两层数据, 它可以用于区分云与气溶胶, 只要有一层 AVD 数值按位进行与运算后第 1~3 位为 3, 则该层被认定为气溶胶层。

每个 Extinction QC 存在上下两层数据, 它是对消光系数反演类型与反演过程等做出的相应标记, 本文认定 Extinction QC 数值为 0 与 1 对应的气溶胶消光系数更可靠, 只有两层标记都满足条件才保留该处数据。

1.2.2 垂直特征识别数据的筛选方法

垂直特征识别数据中 FCF (feature classification flags) 标志量可以用于区分云与气溶胶, 以及云相态与气溶胶类型。利用 FCF 按位进行与运算可以提取出气溶胶数据, FCF 经过移位运算, 再按位进行与运算可以进一步提取出气溶胶子类型数据。

2 结果与讨论

2.1 气溶胶光学参数的时空变化

CALIPSO 卫星每有一条经过长江三角洲地区的星下点轨迹, 可以得到一组长江三角洲地区平均的气溶胶廓线数据。为研究长江三角洲地区气溶胶廓线数据的季变化, 按照 12 月~次年 2 月、3~5 月、6~8 月与 9~11 月分为冬季、春季、夏季与秋季。将大气对流层划分了 5 个高度层研究长江三角洲地区不同高度的气溶胶分布情况, 5 个高度层分别为 8~10、6~8、4~6、2~4 与 0~2 km。

2.1.1 气溶胶消光系数的时空变化

图 2 为长江三角洲地区不同高度层 532 nm 气溶胶消光系数逐月平均值。图 3 为长江三角洲地区逐季平均的 532 nm 气溶胶消光系数廓线, 气溶胶消光系数是气溶胶散射系数与吸收系数之和, 反映气溶胶颗粒物散射与吸收相互作用的总能力, 气溶胶消光系数越大说明气溶胶消光能力越强。图 3 中四季气溶胶消光系数的范围为 0.0009~0.644 km^{-1} , 冬季气溶胶消光系数的范围为 0.008~0.644 km^{-1} , 春季气溶胶消光系数的范围为 0.012~0.44 km^{-1} , 夏季气溶胶消光系数的范围为 0.0009~0.477 km^{-1} , 秋季气溶胶消光系数的范围为 0.002~0.498 km^{-1} 。图 4 为不同高度层 532 nm 气溶胶消光系数的季节频率分布, 对流层被划分为

5 个高度层, 将气溶胶消光系数值设置在 0~1 km^{-1} 之间分布, 间隔为 0.05 km^{-1} , 总共有 21 个特定的消光系数值, 分别统计并计算每个季节中同一高度层气溶胶消光系数值出现在特定消光系数值附近的频率, 其中超过 1 km^{-1} 的消光系数值均被归于特定值 1 km^{-1} 附近。

由图 2 可见各月份在 0~2 km 的气溶胶消光系数都比较大, 由图 3 可见四季气溶胶消光系数最大值出现的高度都在近地面, 由图 4 可见四季在 0~4 km 高度层比较大的气溶胶消光系数出现频率较高, 4~10 km 高度层比较小的气溶胶消光系数出现频率较高, 说明对流层高空大气比较干净, 气溶胶主要积聚于对流层低空大气中, 尤其近地面的气溶胶消光系数最大, 这是由于近地面主要以人为活动排放的气溶胶为主, 而长江三角洲地区工业发达, 人为活动强烈。

图 2 中不同高度层的气溶胶消光系数表明 12、1、3、4 与 11 月的大气气溶胶垂直分布比较均匀, 即冬季的各月份气溶胶垂直分布比较均匀, 气溶胶消光系数基本随高度增加而减小, 由图 3 也可见冬季的气溶胶消光系数基本随高度增加而减小。这与冬春季各月份大气边界层比较低^[23]有关, 近地面的气溶胶不容易扩散到对流层高空大气中。图 2 中不同高度层的气溶胶消光系数表明 6、7、8 与 9 月的大气气溶胶垂直分布不均, 即夏秋季出现高空大气气溶胶消光系数大于低空大气气溶胶消光系数的现象, 由图 3 可见夏秋季对流层高空大气气溶胶消光系数出现多处较大峰值。这可能是大气垂直运动剧烈造成的, 夏秋季地面温度比较高, 大气边界层也比较高^[24], 低空大气气溶胶容易扩散到对流层高空大气中。

从图 3 中可见与其他季节气溶胶消光系数最大值相比, 冬季的消光系数值最大, 在 0.65 km^{-1} 左右, 但是冬季对流层高空大气气溶胶消光系数比其

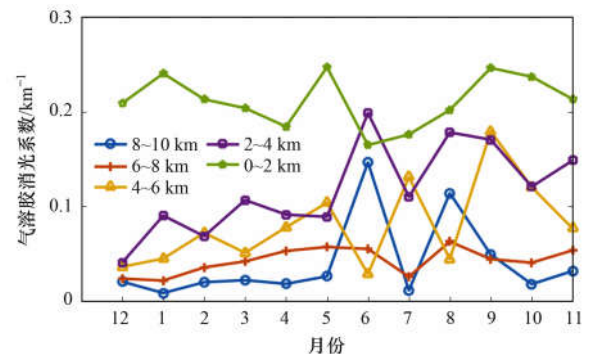


图 2 不同高度层气溶胶消光系数逐月平均值

Fig. 2 Monthly averaged aerosol extinction coefficients at different altitudes

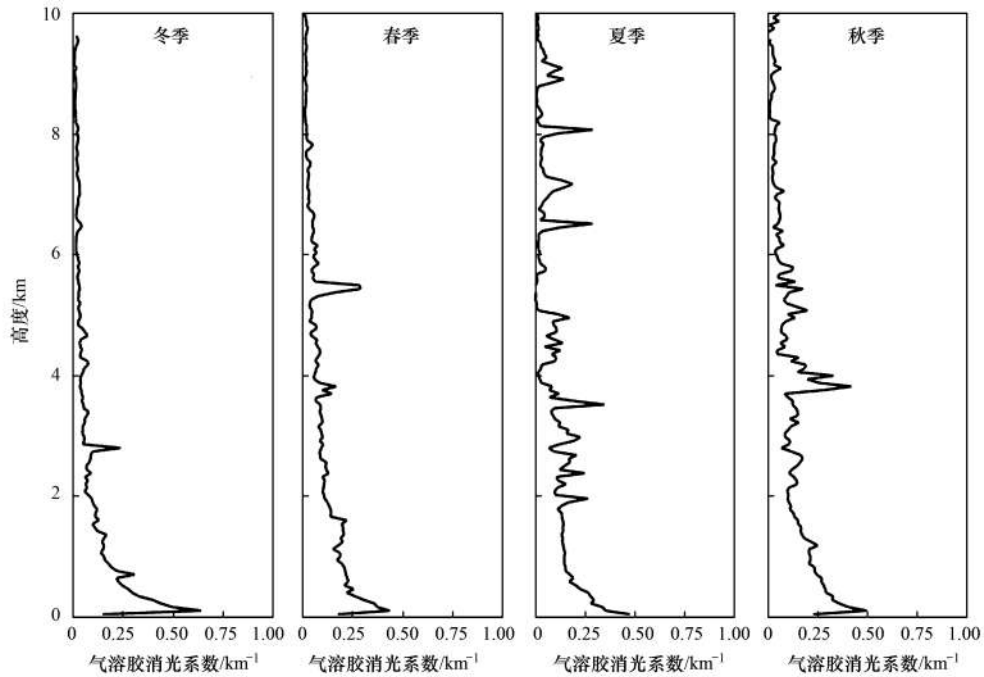


图3 逐季平均的气溶胶消光系数廓线

Fig. 3 Quarterly averaged aerosol extinction coefficient profiles

他季节小, 消光系数基本不超过 0.1 km^{-1} , 这与冬季长江三角洲地区大气边界层最低有关^[25]. 春季气溶胶消光系数在 5.5 km 左右出现峰值, 约为 0.4 km^{-1} , 而冬季气溶胶消光系数在 3 km 左右出现峰值, 约为 0.25 km^{-1} , 冬春季在近地面以上大气中都出现气溶胶消光系数峰值, 这与冬春季沙尘天气

频发有关, 且春季的大气边界层高度比冬季高, 近地面气溶胶容易扩散到高空大气中, 春季气溶胶消光系数峰值出现的高度也比冬季高. 夏季对流层高空大气气溶胶消光系数出现多处较大峰值, 约为 0.4 km^{-1} , 秋季对流层高空大气气溶胶消光系数在 4 km 左右出现峰值, 约为 0.5 km^{-1} ,

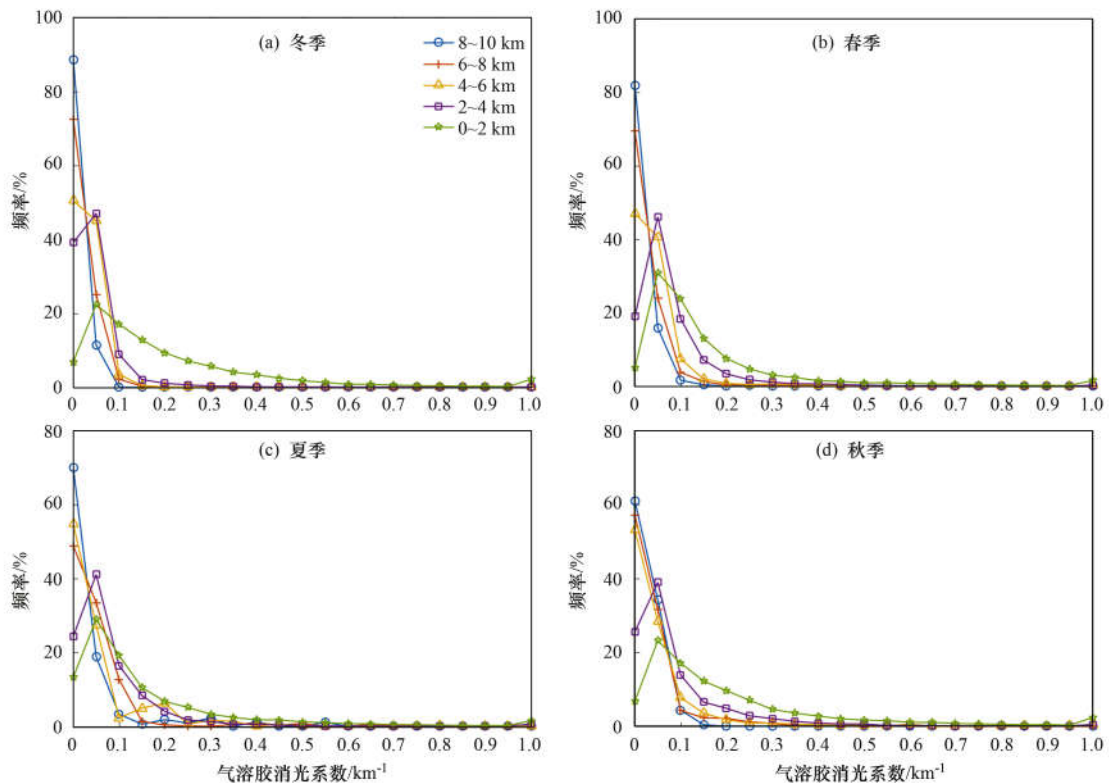


图4 不同高度层气溶胶消光系数的季节频率分布

Fig. 4 Seasonal frequency distribution of aerosol extinction coefficients at different altitudes

可能与夏秋季的秸秆燃烧有关, 由于夏秋季大气边界层较高^[24], 低空大气中聚集的气溶胶容易扩散到高空大气中。

图 5~8 分别为长江三角洲地区冬季, 春季, 夏季与秋季的 532 nm 气溶胶消光系数廓线, 温度廓线与相对湿度廓线。从图 5 可见, 冬季在近地面出现逆温现象, 大气相对湿度比较大, 气溶胶消光系数比较大, 在 5 km 高度以下自由大气中, 大气相对湿度低于 60% 时, 气溶胶消光系数基本比较小。从图 6 可见, 春季在近地面出现逆温现象, 大气相对

湿度比较大, 气溶胶消光系数比较大, 在 5 km 高度以下自由大气中, 大气相对湿度基本维持在 60%, 气溶胶消光系数比冬季大。从图 7 可见, 夏季在近地面出现逆温现象, 大气相对湿度比较大, 气溶胶消光系数也比较大, 在 5 km 高度以下自由大气中, 大气相对湿度比较大, 基本都大于 60%, 气溶胶消光系数比冬春季大。从图 8 可见, 秋季在近地面出现逆温现象, 大气相对湿度比较大, 气溶胶消光系数比较大, 在 5 km 高度以下自由大气中, 大气相对湿度大于 60% 时, 气溶胶消光系数也比较大。

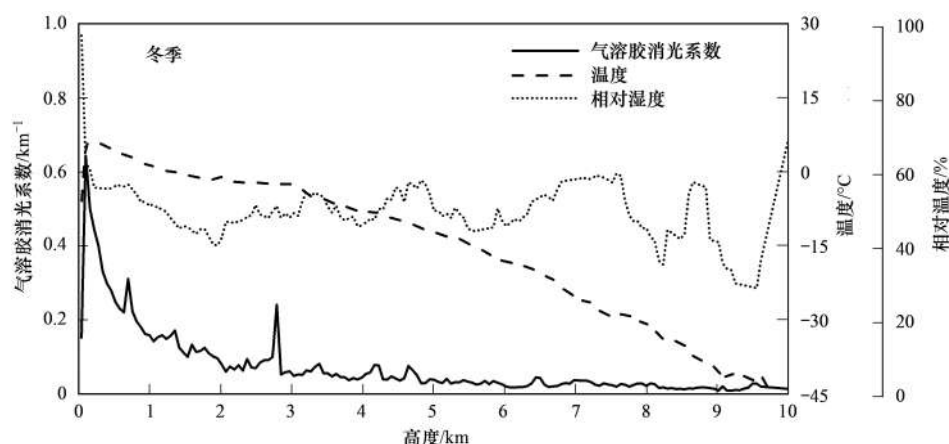


图 5 冬季气溶胶消光系数, 温度与相对湿度的均值廓线

Fig. 5 Mean profiles of aerosol extinction coefficient, temperature, and relative humidity in winter

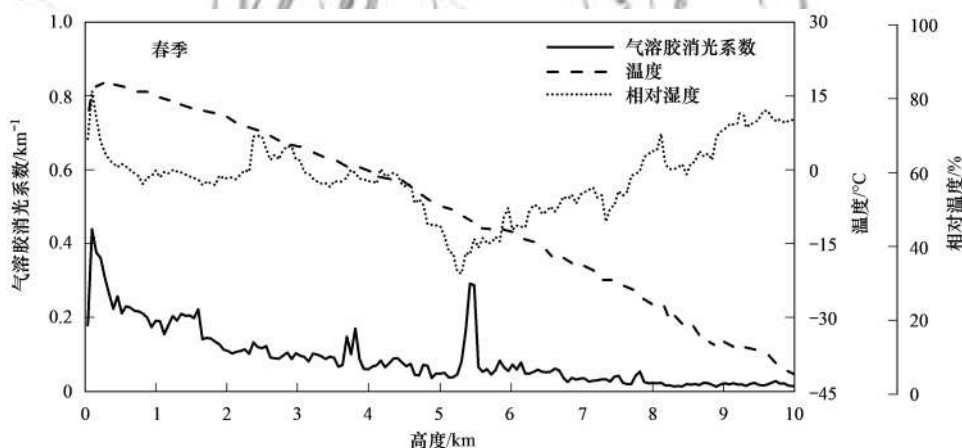


图 6 春季气溶胶消光系数, 温度与相对湿度的均值廓线

Fig. 6 Mean profiles of aerosol extinction coefficient, temperature, and relative humidity in spring

对比 4 个季节的大气气溶胶消光系数, 大气温度与大气相对湿度的廓线变化, 结果发现, 在近地面的大气中, 逆温高湿的气象条件有利于增大气溶胶的消光系数, 增强颗粒物的消光能力^[25]。在 5 km 高度以下的自由大气中, 高湿条件也有利于增大气溶胶的消光系数。宋秀瑜等^[26]的研究认为对流层中大天气溶胶消光系数会随相对湿度增大而增大。

2.1.2 气溶胶退偏比的时空变化

图 9 为长江三角洲地区不同高度层气溶胶退偏比逐月平均值, 气溶胶退偏比越小, 越趋向于 0,

说明气溶胶形状越偏向于球形, 其中 0~2 km 的气溶胶退偏比较小的月份在 7~11 月, 退偏比在 0.15 左右, 2~4 km 的气溶胶退偏比较小的月份在 5、7、8 与 11 月, 4~6 km 的气溶胶退偏比较小的月份在 6、8、9 与 11 月, 6~8 km 的气溶胶退偏比较小的月份在 8 月与 9 月, 8~10 km 的气溶胶退偏比都比较大, 尤其是 8 月与 9 月的气溶胶退偏比异常地高, 分别约为 0.4 与 0.35。图 10 为长江三角洲地区逐季平均的气溶胶退偏比廓线, 气溶胶退偏比是 532 nm 气溶胶垂直后向散射系数与 532 nm 平行后

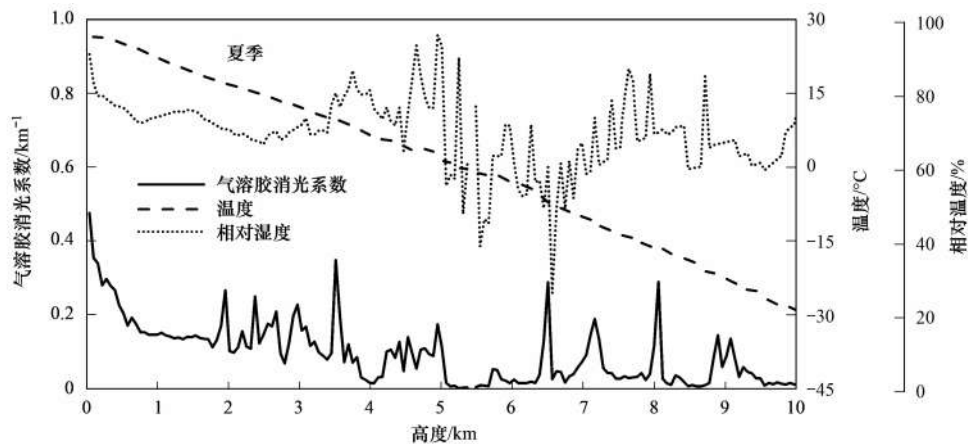


图7 夏季气溶胶消光系数, 温度与相对湿度的均值廓线

Fig. 7 Mean profiles of aerosol extinction coefficient, temperature, and relative humidity in summer

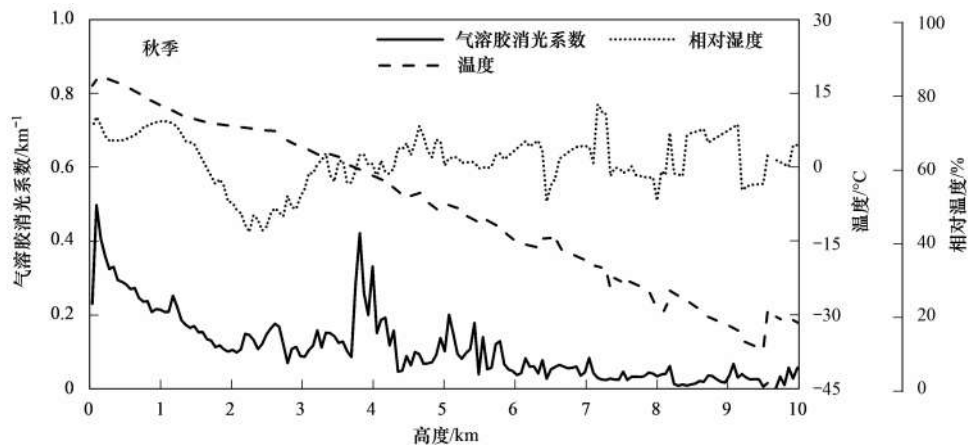


图8 秋季气溶胶消光系数, 温度与相对湿度的均值廓线

Fig. 8 Mean profiles of aerosol extinction coefficient, temperature, and relative humidity in autumn

向散射系数之比, 反映气溶胶颗粒物的非球型程度, 退偏比越小, 说明气溶胶粒子越偏向于球型. 图 10 中四季气溶胶退偏比的范围为 0.003 ~ 0.871, 冬季气溶胶退偏比的范围为 0.027 ~ 0.553, 春季气溶胶退偏比的范围为 0.107 ~ 0.35, 夏季气溶胶退偏比的范围为 0.003 ~ 0.871, 秋季气溶胶退偏比的范围为 0.02 ~ 0.513. 图 11 为不同高度层气溶胶退偏比的季节频率分布, 将对流层划分为 5 个高度层, 将气溶胶退偏比值设置在 0 ~ 1 之间分布, 间隔为 0.05, 总共有 21 个特定的退偏比值, 分别统计并计算每个季节中同一高度层气溶胶退偏比值出现在特定退偏比值附近的频率.

由图 9 可见各高度层气溶胶退偏比基本在 0.1 ~ 0.3 之间, 由图 11 可见四季各高度层小气溶胶退偏比出现的频率最高, 表明长江三角洲地区对流层大气中气溶胶形状更偏向于球型. 这与长江三角洲地区空气湿度较大有关, 大气颗粒物可通过吸湿潮解由原来的不规则状变为球型^[27].

由图 9 和图 10 可见冬春季的对流层高空大气比低空大气存在更多的不规则粒子, 从图 11 可见

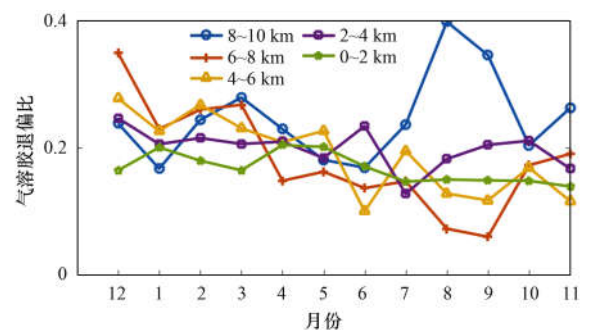


图9 不同高度层气溶胶退偏比逐月平均值

Fig. 9 Monthly averaged aerosol depolarization ratios at different altitudes

与其他高度层相比, 冬春季的偏球型气溶胶粒子主要集中在出现在 0 ~ 2 km 高度层. 这是由于冬春季沙漠沙尘气溶胶的高空输送, 使对流层高空大气中气溶胶粒子比对流层低空大气更偏向于非球型.

由图 9 可见夏秋季在对流层低空大气中的气溶胶退偏比一般比冬春季小, 对流层高空大气中的气溶胶退偏比一般比对流层低空大气小, 由图 10 可见与其他季节相比, 夏秋季在 2 km 以下的气溶胶退偏比更小, 在 2 km 以上的气溶胶退偏比曲线振

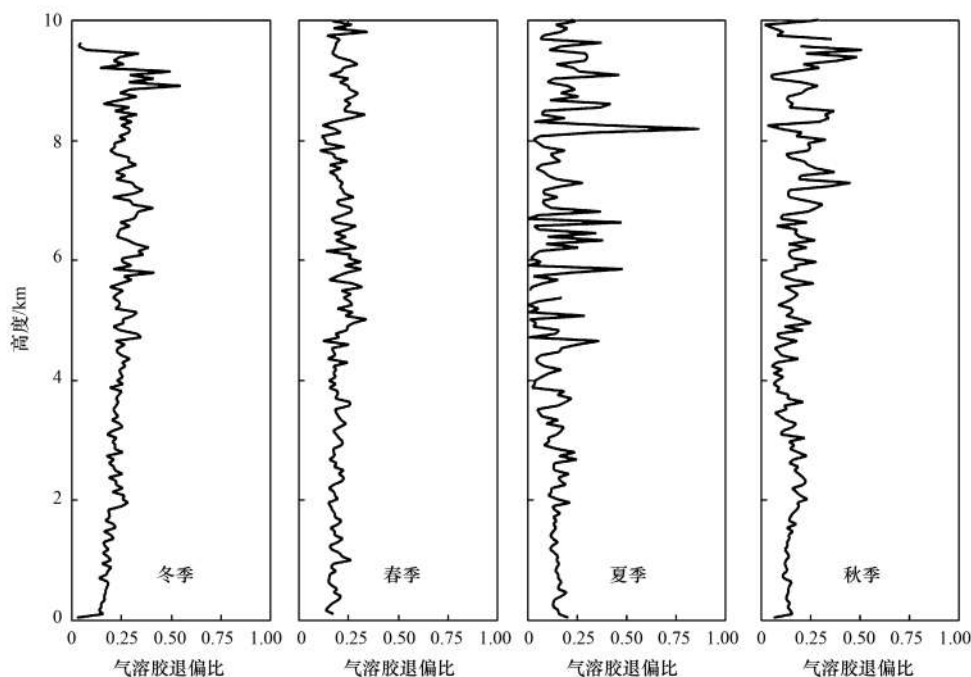


图 10 逐季平均的气溶胶退偏比廓线

Fig. 10 Quarterly averaged aerosol depolarization ratio profiles

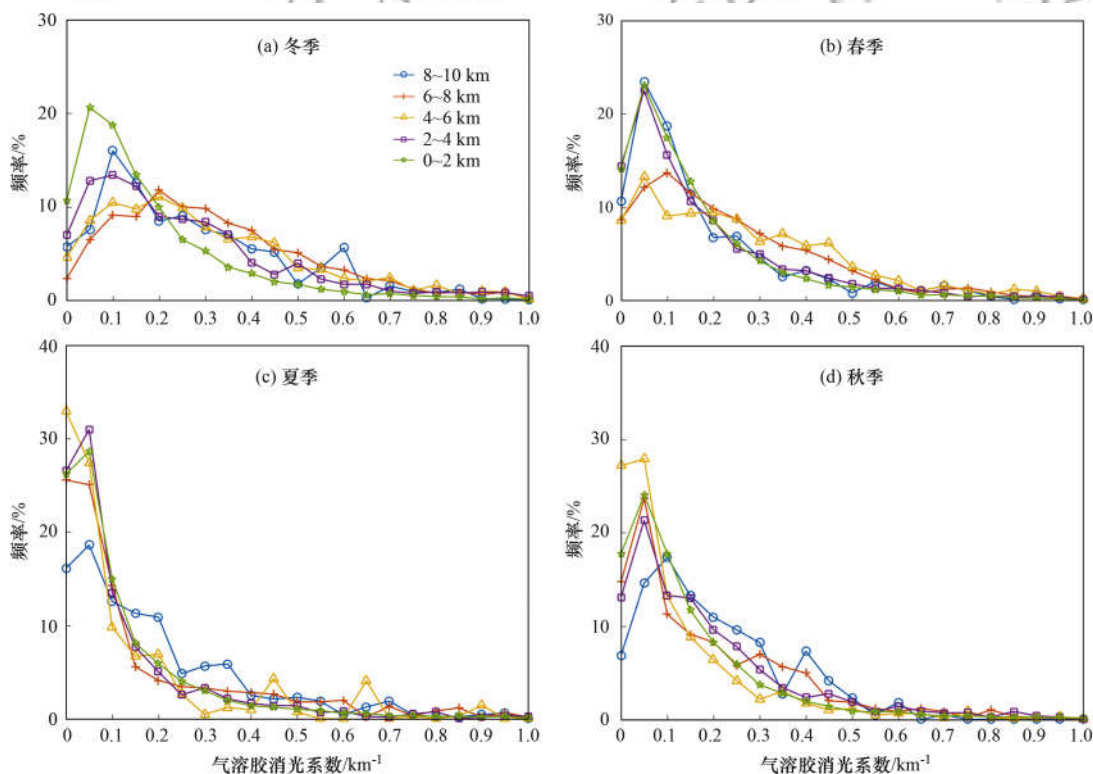


图 11 不同高度层气溶胶退偏比的季节频率分布

Fig. 11 Seasonal frequency distribution of aerosol depolarization ratios at different altitudes

荡变化，但是仍可以发现对流层高空中存在许多较小的气溶胶退偏比值，由图 11 可见与其他季节相比，夏秋季偏球型气溶胶粒子出现的频率更高，这些均表明夏秋季对流层大气中规则粒子比冬春季多，对流层高空大气中存在较多的规则粒子。这与夏秋季暴雨多发有关，降水会使大气中气溶胶湿沉

降，从图 3 也可见夏秋季高空多处大气比较干净，其中球型粒子比重较大。

从图 9 可见夏秋季在 8 ~ 10 km 高度层出现气溶胶退偏比异常高值，从图 10 可见夏秋季在 2 km 以上的气溶胶退偏比曲线振荡变化，说明夏秋季在对流层高空大气中存在极不规则的粒子。这与夏秋

季秸秆燃烧密切相关, 秸秆燃烧产生的气溶胶可以被对流输送到对流层高空大气中^[28].

2.1.3 气溶胶色比的时空变化

图 12 为长江三角洲地区不同高度层气溶胶色比逐月平均值, 气溶胶色比越大, 说明颗粒物粒子尺寸越大. 图 13 为长江三角洲地区逐季平均的气溶胶色比廓线, 气溶胶色比是 1 064 nm 气溶胶后向散射系数与 532 nm 总后向散射系数之比, 反应气溶胶颗粒物的尺寸, 色比越大, 说明气溶胶粒子越大. 图 13 中四季气溶胶色比的范围为 0.027 ~ 2.952, 冬季气溶胶色比的范围为 0.187 ~ 2.774, 春季气溶胶色比的范围为 0.525 ~ 1.481, 夏季气溶胶色比的范围为 0.027 ~ 2.952, 秋季气溶胶色比的范围为 0.175 ~ 2.698. 图 14 为不同高度层气溶胶色比的季节频率分布, 将对流层划分为 5 个高度层, 将气溶胶色比值设置在 0 ~ 3 之间分布, 间隔为 0.15, 总共有 21 个特定的色比值, 分别统计并计算每个季节中同一高度层气溶胶色比值出现在特定色比值附近的频率.

由图 12 可见, 各月份 0 ~ 4 km 的气溶胶色比在 0.6716 ~ 0.989 范围内, 一般各月份 4 ~ 10 km 高度层的气溶胶色比值比 0 ~ 4 km 高度层的大, 由图 13 可见, 四季 0 ~ 4 km 高度层的气溶胶色比在 0.75 左右, 由图 14 可见相比于其他高度层, 四季在 0 ~ 4 km 高度层中较小的气溶胶色比值出现的频率较高, 在 4 ~ 10 km 高度层中较大的气溶胶色比值出现的频率较高, 表明长江三角洲地区的对流层低空大气中气溶胶粒径变化小, 气溶胶粒径偏大,

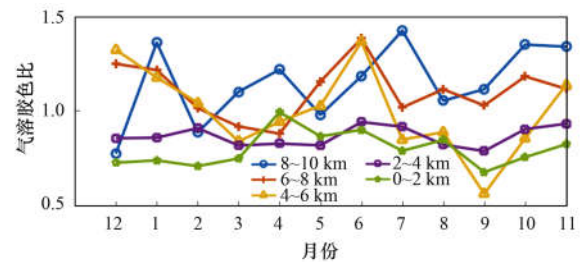


图 12 不同高度层气溶胶色比逐月平均值

Fig. 12 Monthly averaged aerosol color ratios at different altitudes

且对流层高空大气中气溶胶粒径比对对流层低空大气更大.

由图 13 可见, 冬春季对流层高空大气气溶胶粒径基本随高度增加而增加, 对流层高空大气比对流层低空大气中气溶胶粒径大, 这与冬春季沙尘天气频发有关, 大量沙尘粗粒子导致探测到的气溶胶色比值比较大^[28]. 受收获季节中生物质燃烧^[28]与频繁降水的影响, 夏秋季在对流层高空的气溶胶色比曲线振荡变化, 对流层高空大气中气溶胶的粒径范围比较广.

2.2 不同类型气溶胶的时空变化

图 15 为 2017-12 ~ 2018-11 长江三角洲地区不同高度层各种类型气溶胶出现的频率, 长江三角洲地区的对流层被划分为 5 个高度, 统计每个高度层各类气溶胶出现的次数分别占整个对流层所有气溶胶出现次数的比例. CALIPSO 卫星的激光雷达资料将探测到的气溶胶分为洁净海洋、沙漠沙尘、污染大陆、洁净大陆、污染沙尘与烟尘这 6 类气溶胶. 按照洁净海洋、沙漠沙尘、污染大陆、洁净大陆、

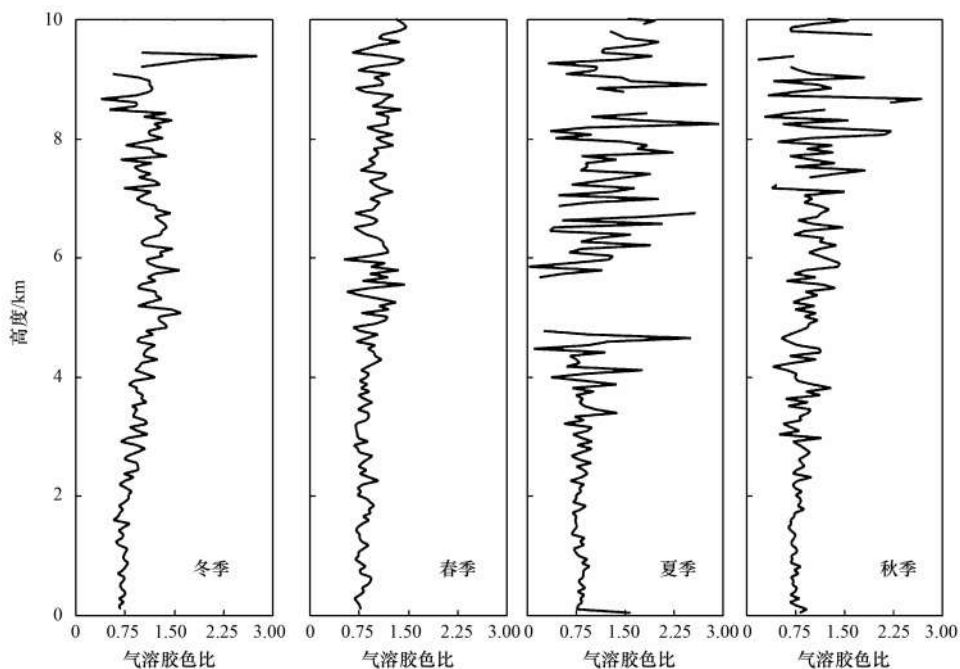


图 13 逐季平均的气溶胶色比廓线

Fig. 13 Quarterly averaged aerosol color ratio profiles

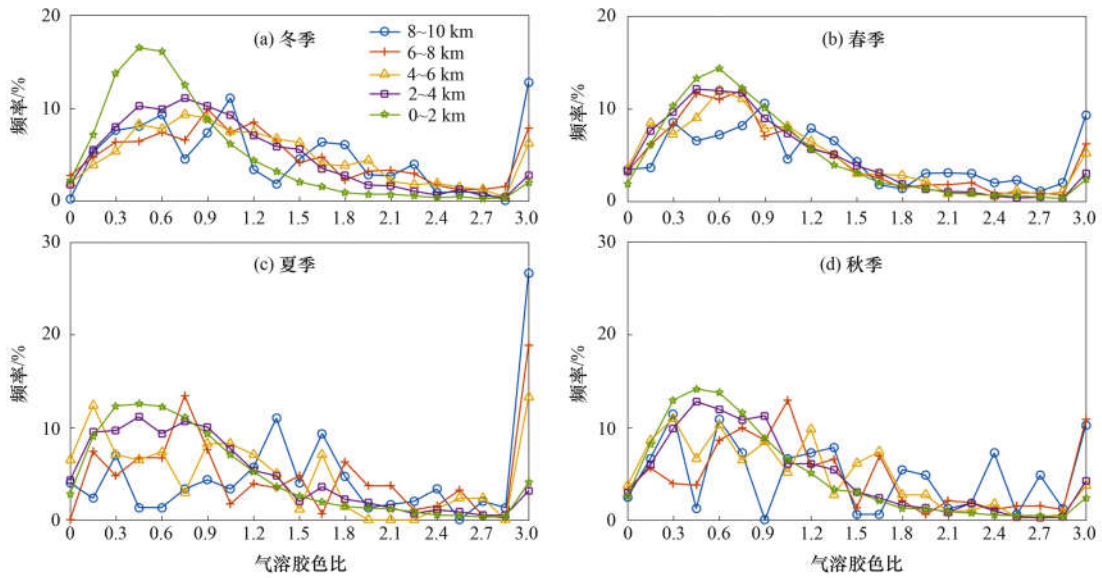


图 14 不同高度层气溶胶色比的季节频率分布

Fig. 14 Seasonal frequency distribution of aerosol color ratios at different altitudes

污染沙尘和烟尘气溶胶排序，各种类型气溶胶在 8 ~ 10 km 高度层出现的频率分别为 0.021 7%、0.514 6%、0、0.231 1%、0.693 5% 与 0.155 2%，污染沙尘气溶胶出现的频率最高；各种类型气溶胶在 6 ~ 8 km 高度层出现的频率分别为 0.046 2%、3.788 %、0、0.833 1%、1.764 8% 与 0.650 8%，沙漠沙尘气溶胶出现的频率最高；各种类型气溶胶在 4 ~ 6 km 高度层出现的频率分别为 0.103 6%、4.864 6%、0、0.55%、1.913 1% 与 1.472 7%，沙漠沙尘气溶胶出现的频率最高；各种类型气溶胶在 2 ~ 4 km 高度层出现的频率分别为 0.960 8%、6.432 4%、0.819%、0.670 5%、6.955 7% 与 5.467 2%，污染沙尘气溶胶出现的频率最高；各种类型气溶胶在 0 ~ 2 km 高度层出现的频率分别为 9.651 4%、6.232 5%、11.055 2%、0.536 5%、26.154 5% 与 7.461 2%，污染沙尘气溶胶出现的频率最高。整个对流层各类气溶胶出现的频率从高到低分别为污染沙尘、沙漠沙尘、烟尘、污染大陆、洁净海洋与洁净大陆气溶胶。沙漠沙尘与污染沙尘气溶胶在各高度层出现次数所占比例较高，这与长江三角洲地区工业发达以及沙尘天气频发有关。烟尘气溶胶在 0 ~ 6 km 高度内出现的频率较高可能与长江三角洲地区的煤炭燃烧^[29] 与秸秆燃烧有关^[30-33]。洁净海洋与污染大陆气溶胶在 0 ~ 2 km 高度内出现的频率较高，这可能与长江三角洲地理位置有关，长江三角洲位于长江下游地区，沟通沿海与内陆地区的联系。

图 16 为四个季节长江三角洲地区不同高度层各种类型气溶胶出现的频率，长江三角洲地区

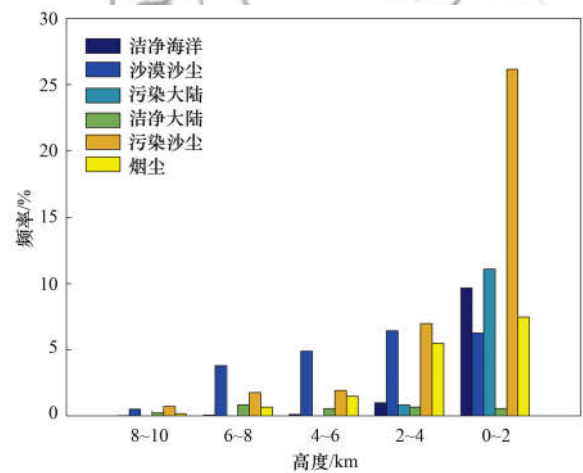


图 15 气溶胶类型占比

Fig. 15 Proportion of aerosol types

的对流层被划分为 5 个高度，统计每个季节不同高度层各类气溶胶出现的次数分别占该季整个对流层所有气溶胶出现次数的比例。冬季沙漠沙尘气溶胶出现频率最高，其次为污染沙尘气溶胶，对流层高空沙漠沙尘气溶胶出现的频率最高，对流层低空污染沙尘气溶胶出现的频率最高；春季污染沙尘气溶胶出现频率最高，各类型气溶胶的空间分布与冬季类似，但是与冬季相比，沙漠沙尘气溶胶出现的频率降低，烟尘气溶胶出现的频率提高；夏季烟尘气溶胶在对流层大气中出现的频率最高，与冬春季相比，烟尘气溶胶在各高度层出现的频率提高，而沙漠沙尘与污染沙尘气溶胶出现的频率降低，夏季洁净海洋和污染大陆气溶胶在 0 ~ 2 km 高度层出现的频率比冬春季高；秋季各类型气溶胶垂直分布与夏季类似，但是与夏季相比，污染沙尘气溶胶在各高

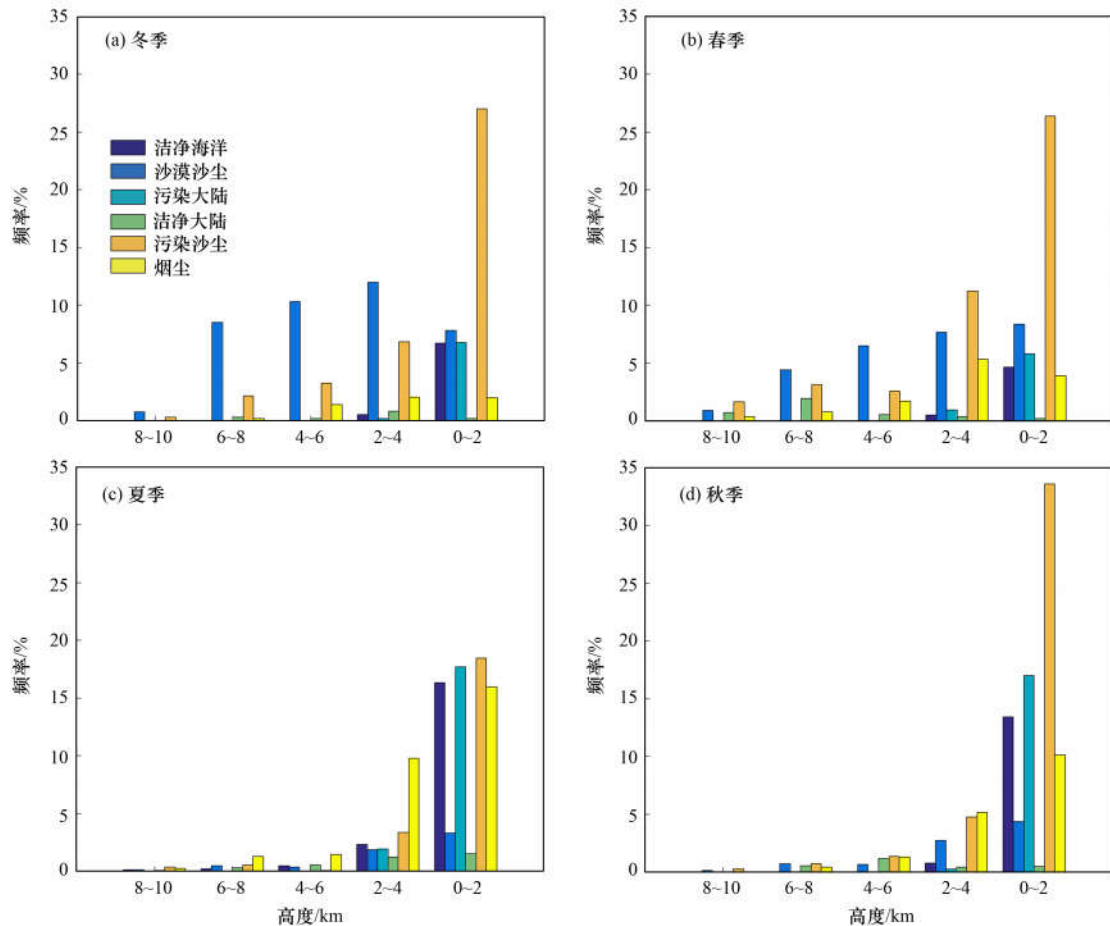


图 16 各季节气溶胶类型占比

Fig. 16 Proportion of aerosol types in different seasons

度层出现的频率提高,而烟尘气溶胶出现的频率降低,洁净海洋气溶胶在 0~2 km 高度层出现的频率也降低.全年污染沙尘气溶胶出现的频率一直高居不下,与长江三角洲地区为我国第一大综合性工业基地有关,冬春季沙漠沙尘气溶胶出现的频率较高,这与沙尘天气多发生于冬春季有关,与冬春季相比,夏秋季的烟尘气溶胶出现的频率较高,这与长江三角洲地区的秸秆焚烧密切相关^[30~33].

3 结论

(1) 气溶胶消光系数整体分布在 $0.0009 \sim 0.644 \text{ km}^{-1}$ 之间.近地面的气溶胶消光系数高于对流层高空大气的气溶胶消光系数,表明近地面的气溶胶消光能力较强.与夏秋季相比,冬春季探测到的对流层高空大气气溶胶消光系数更小,表明冬春季在对流层高空大气气溶胶消光能力较弱.对比气溶胶消光系数廓线,温度廓线与相对湿度廓线的变化,发现在近地面大气中,逆温高湿的气象条件有利于增强对流层气溶胶的消光能力,在 5 km 以下自由大气中,气溶胶消光能力会随大气相对湿度增

大而增强.

(2) 气溶胶退偏比整体分布在 0.003~0.871 之间.对流层低空大气气溶胶粒子形状一般比对流层高空大气气溶胶粒子形状更规则,但是夏秋季在对流层高空大气中也存在较多的偏球型粒子.与冬季相比,夏秋季在 2 km 以下的气溶胶粒子形状更规则.

(3) 气溶胶色比整体分布在 0.027~2.952 之间,对流层低空大气气溶胶色比一般比较大,色比值在 0.75 左右,表明对流层低空中气溶胶粒径较大.对流层低空大气气溶胶粒径一般比对流层高空大气气溶胶粒径小.与冬春季相比,夏秋季在对流层高空大气中气溶胶粒径的范围更广.

(4) 对流层各类气溶胶出现频率从高到低分别为污染沙尘、沙漠沙尘、烟尘、污染大陆、洁净海洋与洁净大陆气溶胶.冬季气溶胶类型以沙漠沙尘气溶胶为主,其次为污染沙尘气溶胶,而春季相反.夏季气溶胶类型以烟尘气溶胶为主,其次为污染沙尘气溶胶,与其他季节相比,夏季 0~2 km 高度层洁净海洋与污染大陆气溶胶出现频率最高.秋季气溶胶类型以污染沙尘气溶胶为主,而烟尘、污

染大陆与洁净海洋气溶胶出现的频率也比较高。

参考文献:

- [1] 衣娜娜, 张镭, 刘卫平, 等. 西北地区气溶胶光学特性及辐射影响[J]. 大气科学, 2017, **41**(2): 409-420.
Yi N N, Zhang L, Liu W P, *et al.* Optical characteristics and radiative effects of atmospheric aerosol over Northwest China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, **41**(2): 409-420.
- [2] 张乐. 中国长三角地区环境污染的现状与应对策略研究[J]. 科技视界, 2016, (4): 258-259.
- [3] Fan W Z, Qin K, Xu J, *et al.* Aerosol vertical distribution and sources estimation at a site of the Yangtze River Delta region of China[J]. Atmospheric Research, 2019, **217**: 128-136.
- [4] Liu J J, Zheng Y F, Li Z Q, *et al.* Seasonal variations of aerosol optical properties, vertical distribution and associated radiative effects in the Yangtze Delta region of China[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, **117**(D16): D00K38.
- [5] Shimizu A, Sugimoto N, Nishizawa T, *et al.* Variations of dust extinction coefficient estimated by lidar observations over Japan, 2007-2016[J]. SOLA, 2017, **13**: 205-208.
- [6] 华雯丽, 韩颖, 乔瀚洋, 等. 敦煌沙尘气溶胶质量浓度垂直特征个例分析[J]. 高原气象, 2018, **37**(5): 1428-1439.
Hua W L, Han Y, Qiao H Y, *et al.* Profiling of dust aerosol mass concentration over Dunhuang: case studies[J]. Plateau Meteorology, 2018, **37**(5): 1428-1439.
- [7] Xia X L, Min J Z, Shen F F, *et al.* Aerosol data assimilation using data from Fengyun-3A and MODIS: application to a dust storm over East Asia in 2011[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, **36**(1): 1-14.
- [8] Cheng F, Zhang J H, He J L, *et al.* Analysis of aerosol-cloud-precipitation interactions based on MODIS data[J]. Advances in Space Research, 2017, **59**(1): 63-73.
- [9] Pan B W, Yao Z D, Wang M Z, *et al.* Evaluation and utilization of CloudSat and CALIPSO data to analyze the impact of dust aerosol on the microphysical properties of cirrus over the Tibetan Plateau[J]. Advances in Space Research, 2019, **63**(1): 2-15.
- [10] Solanki R, Singh N. LiDAR observations of the vertical distribution of aerosols in free troposphere: Comparison with CALIPSO level-2 data over the central Himalayas[J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 227-238.
- [11] Reddy K R O, Zhang X Y, Bi L. Seasonal aerosol variations over a coastal city, Zhoushan, China from CALIPSO observations[J]. Atmospheric Research, 2019, **218**: 117-128.
- [12] Huang L, Jiang J H, Tackett J L, *et al.* Seasonal and diurnal variations of aerosol extinction profile and type distribution from CALIPSO 5 - year observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2013, **118**(10): 4572-4596.
- [13] Ma X Y, Yu F Q. Seasonal variability of aerosol vertical profiles over east US and west Europe: GEOS-Chem/APM simulation and comparison with CALIPSO observations[J]. Atmospheric Research, 2014, **140-141**: 28-37.
- [14] 许潇锋, 刘晨璇, 唐志伟, 等. 基于 CALIPSO 的华北地区气溶胶垂直分布特征[J]. 大气科学学报, 2018, **41**(1): 126-134.
Xu X F, Liu C X, Tang Z W, *et al.* Characteristics of aerosol vertical distribution based on CALIPSO over North China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, **41**(1): 126-134.
- [15] 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.
Xu C P, Ge J M, Huang J P, *et al.* Observations of dust aerosol over China based on CALIPSO spaceborne lidar[J]. Journal of Desert Research, 2014, **34**(5): 1353-1362.
- [16] 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.
Gao X X, Chen Y, Zhang W. Vertical distribution of atmospheric aerosol particles over North China from 2006 to 2015[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2241-2250.
- [17] 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.
Gao X X, Chen Y, Zhang L, *et al.* Aerosol properties based on CALIPSO data in representative regions over China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, **54**(4): 431-439.
- [18] 刘璇, 朱彬, 袁亮, 等. 基于 CALIPSO 卫星资料的华东地区气溶胶垂直分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, **10**(5): 79-86.
Liu X, Zhu B, Yuan L, *et al.* Characteristics of aerosol vertical distribution in Eastern China based on CALIPSO satellite data[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, **10**(5): 79-86.
- [19] 王潇, 曹念文, 黄婧婷, 等. 西安市一次霾过程中气溶胶垂直分布特征及气象要素影响[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(9): 1519-1526.
Wang X, Cao N W, Huang J T, *et al.* Vertical distribution of aerosol and meteorological elements during a haze episode in Xi'an City[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(9): 1519-1526.
- [20] Sun T Z, Che H Z, Qi B, *et al.* Aerosol optical characteristics and their vertical distributions under enhanced haze pollution events: effect of the regional transport of different aerosol types over eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(4): 2949-2971.
- [21] Tao M H, Chen L F, Wang Z F, *et al.* Satellite observation of abnormal yellow haze clouds over East China during summer agricultural burning season[J]. Atmospheric Environment, 2013, **79**: 632-640.
- [22] 刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析——以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 641-651.
Liu X, Zhu B, Hou X W, *et al.* Analysis of haze events based on satellite remote sensing and field observations: a case study of severe haze pollution over the Yangtze River Delta[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(3): 641-651.
- [23] 黄聪聪, 马嫣, 郑军. 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3057-3066.
Huang C C, Ma Y, Zheng J. Aerosol optical properties and light absorption enhancement of EC during wintertime in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3057-3066.
- [24] Sun T Z, Che H Z, Qi B, *et al.* Characterization of vertical distribution and radiative forcing of ambient aerosol over the Yangtze River Delta during 2013-2015[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 1846-1857.
- [25] 胡晓, 徐璐, 俞科爱, 等. 宁波地区一次重污染天气过程的成因分析[J]. 高原气象, 2017, **36**(5): 1412-1421.
Hu X, Xu L, Yu K A, *et al.* Impact factors of a heavy air pollution process over Ningbo[J]. Plateau Meteorology, 2017, **36**(5): 1412-1421.
- [26] 宋秀瑜, 曹念文, 赵成, 等. 南京地区相对湿度对气溶胶含量的影响[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(9): 3240-3246.

- Song X Y, Cao N W, Zhao C, *et al.* Effect of relative humidity on aerosol content in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3240-3246.
- [27] 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京2013年1月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 282-288.
- Yang X, Chen Y Z, Liu H F, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a serious haze event in January 2013 in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 282-288.
- [28] 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.
- Sun Q, Fan X H, Xia X A. Observation and analysis of aerosol vertical distribution characteristics in North China Plain [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, **39**(1): 26-33.
- [29] 于兴娜, 时政, 马佳, 等. 南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1521-1528.
- Yu X N, Shi Z, Ma J, *et al.* Source apportionment and mixing state of single particles in the Nanjing Jiangbei New Area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1521-1528.
- [30] 徐足飞, 曹芳, 高嵩, 等. 南京北郊秋季PM_{2.5}碳质组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3033-3041.
- Xu Z F, Cao F, Gao S, *et al.* Characteristics and source analysis of carbonaceous components of PM_{2.5} during autumn in the northern suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3033-3041.
- [31] 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 等. 上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 1978-1986.
- Gao Y Q, Wang H L, Jing S A, *et al.* Chemical characterization, spatial distribution, and source identification of organic matter in PM_{2.5} in summertime Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1978-1986.
- [32] 靳全锋, 马祥庆, 王文辉, 等. 华东地区2000-2014年间秸秆燃烧排放PM_{2.5}时空动态变化[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(2): 460-468.
- Jin Q F, Ma X Q, Wang W H, *et al.* Temporal and spatial variations of PM_{2.5} emissions from crop straw burning in eastern China during 2000-2014 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 460-468.
- [33] 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 1943-1950.
- Zhu J L, Wang T J, Xing L, *et al.* Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(12): 1943-1950.



CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)