

百方知库  
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.9  
第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 ..... 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)

郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 ..... 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)

济南市背景区域大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及其对能见度的影响 ..... 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)

聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 ..... 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)

2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 ..... 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 ..... 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 ..... 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)

高速公路沿线 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征 ..... 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)

北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 ..... 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 ..... 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 ..... 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)

成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 ..... 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)

工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 ..... 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)

典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 ..... 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)

不同方法制备 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 催化剂 CO-SCR 性能及机制 ..... 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)

全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 ..... 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 ..... 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笄文怡, 季鹏飞 (4000)

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素:以宁波市小浞江为例 ..... 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)

水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 ..... 肖琳, 杨佳怡 (4018)

沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 ..... 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)

汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 ..... 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 ..... 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)

基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 ..... 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 ..... 陈倩, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)

天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 ..... 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)

镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb<sup>2+</sup> 的去除 ..... 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)

2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb<sup>2+</sup> ..... 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)

钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 ..... 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 ..... 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (4105)

A<sup>2</sup>/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 ..... 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 ..... 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)

微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 ..... 张若晨, 陈川, 王威, 徐照俊, 任南琪 (4128)

基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 ..... 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)

聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 ..... 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)

厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 ..... 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)

Ca<sup>2+</sup> 对污泥硝化活性和絮体沉降性能的影响 ..... 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 ..... 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 ..... 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏漪旋 (4177)

海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 ..... 胡越航, 宣丽霞, 袁琼芬 (4185)

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 ..... 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)

稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 ..... 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 ..... 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)

氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)

三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O) 分布和释放 ..... 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)

沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 ..... 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)

新建铅蓄电集聚区对周边土壤环境的影响:基于重金属空间特征 ..... 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 ..... 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)

基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 ..... 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 ..... 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 ..... 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)

调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 ..... 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)

海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 ..... 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)

《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)

## 2001 ~ 2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势

刘海知<sup>1</sup>, 郭海燕<sup>2,3\*</sup>, 马振峰<sup>2,3</sup>, 徐辉<sup>1</sup>, 包红军<sup>1</sup>, 徐成鹏<sup>1</sup>

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 四川省气候中心, 成都 610072; 3. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072)

**摘要:** 为探究全国大气气溶胶光学厚度(AOD)的分布及变化特征, 利用最新的MODIS/Terra C6.1 550 nm AOD月数据分析了2001~2017年全国AOD的时空分布及变化趋势。结果表明, 空间特征: 年均AOD空间分布呈现两个显著的高值中心和低值中心, 第一高值中心位于以人为气溶胶为主的华北平原、华中地区、长三角地区、珠三角地区和四川盆地, 第二高值中心位于以尘埃气溶胶为主的塔克拉玛干沙漠地区, 两个低值中心分别位于内蒙古地区东部至东北地区北部以及青藏高原。时间特征: 各区域AOD峰值主要出现在春、夏季, 塔克拉玛干沙漠地区、四川盆地和珠三角地区AOD在3~4月达到峰值, 华北平原、华中地区和长三角地区AOD在5~7月达到峰值。趋势特征: 2001~2006年, 我国西北地区和内蒙古地区AOD呈现减少趋势, 我国中东部地区和西南地区东部AOD呈现增长趋势。2007~2012年, 青藏高原和塔克拉玛干沙漠地区AOD变化趋势由减少转为增长, 华北平原和四川盆地AOD的增幅减弱, 长三角地区AOD呈现弱的下降趋势。2013~2017年, 我国大部分地区AOD呈显著地下降趋势。

**关键词:** 气溶胶光学厚度(AOD); 时空分布; 变化趋势; 中分辨率成像光谱仪(MOIDS); 中国

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-3886-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901144

## Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017

LIU Hai-zhi<sup>1</sup>, GUO Hai-yan<sup>2,3\*</sup>, MA Zhen-feng<sup>2,3</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, BAO Hong-jun<sup>1</sup>, XU Cheng-peng<sup>1</sup>

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. Sichuan Climate Center, Chengdu 610072, China; 3. Sichuan Provincial Main Laboratory of Heavy Rain and Drought Disaster in Plateau and Basin, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Based on the latest monthly data of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)/Terra C6.1 aerosol optical depth (AOD), the temporal-spatial distribution and variability trend in AOD over China during 2001-2017 are analyzed to explore the distribution and variation characteristics of AOD in China. Regarding the spatial characteristics, the first prominent high-value center of the annual mean AOD was located in the industrially and economically developed areas of the North China Plain, Central China, the Yangtze River Delta region, the Pearl River Delta region, and the Sichuan Basin. The second prominent high-value center of the annual mean AOD was located in the dust aerosol-dominated areas of Taklimakan Desert. Two low-value centers of the annual mean AOD were located in the eastern part of Inner Mongolia to the north of Northeast China and the Tibet Plateau. Regarding the temporal characteristics, the AOD value peaked in eight areas in spring and summer. The annual mean AOD values in the Taklimakan Desert, Sichuan Basin, and Pearl River Delta peaked from March to May, and those in the North China Plain, Central China, and Yangtze River Delta peaked from May to July. The trend characteristics showed that during 2001-2006, the AOD in Northwest China and Inner Mongolia showed a downtrend, and that in the east-central China and the eastern part of southwest China showed a growth trend. During 2007-2012, the trend of AOD in the Tibetan Plateau and the Taklimakan Desert changed from decreasing to increasing. The growth trend of AOD in the North China Plain and the Sichuan Basin was weakened, and the AOD in the Yangtze River Delta showed a weak downward trend. During 2013-2017, the AOD in most areas of China showed a significant downward trend.

**Key words:** aerosol optical depth (AOD); temporal-spatial distribution; trend; moderate-resolution imaging spectroradiometer (MOIDS); China

大气气溶胶在地球辐射平衡和气候变化中扮演着重要角色。气溶胶粒子通过散射、吸收太阳短波辐射以及吸收地面长波辐射改变地-气系统辐射平衡的过程称为直接辐射效应; 气溶胶粒子通过影响云的微物理特性、光学性质、生命周期、沉淀效率以及辐射特性改变地-气系统辐射平衡的过程称为间接辐射效应<sup>[1,2]</sup>。不同效应的产生取决于气溶胶粒子的大小、形状、类型、化学成分、混合状态及周边大气环境<sup>[3~6]</sup>。气溶胶通过影响大气中的物理和化学过程, 对温室气体的浓度、分布及水循环产

生重要影响, 进而可能导致环境和公共健康问题<sup>[7~10]</sup>。尽管相关研究已经对气溶胶来源、性质和演化过程等方面做了大量分析, 但气溶胶光学特性参数(特别是气溶胶光学厚度)仍是当前全球气候

收稿日期: 2019-01-16; 修订日期: 2019-04-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402702); 国家自然科学基金项目(41775111); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-142); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室课题项目(SCZD2017)

作者简介: 刘海知(1991~), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为气象灾害监测预警, E-mail: lhz1012@aliyun.com

\* 通信作者, E-mail: ghy-824@163.com

变化评估中最大的不确定因素之一<sup>[11-13]</sup>。

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)作为最基本的光学参数之一,因能反映整层大气气溶胶的消光作用被广泛地作为评估空气污染程度的关键参数,同时,AOD作为纵向整合量可以反映气溶胶浓度和气溶胶对地球辐射的影响。目前,地基和卫星遥感是长期观测气溶胶特性的两种重要手段<sup>[14]</sup>。然而,由于地面观测网分布较为稀疏,各种相关仪器难以在全球范围内实现对气溶胶特性和浓度进行连续观测。近几十年来,利用卫星遥感反演获取气溶胶光学参数已得到了越来越多的应用。其中,中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的全球气溶胶观测产品因具有较高的空间覆盖率和时间分辨率(接近连续的逐日时间)以及准确地反演算法,已广泛运用于气溶胶领域研究。

随着格局-尺度-驱动力的范式在环境学等学科领域的广泛应用,学者们对 AOD 开展了许多探索, Qiu 等<sup>[15]</sup>通过估算宽带消光法反演了北京等 9 个地区的气溶胶光学厚度;罗云峰等<sup>[16-18]</sup>利用太阳辐射日总量和日照时数等资料,反演了中国各观测站 0.75  $\mu\text{m}$  大气气溶胶光学厚度;李成才等<sup>[19]</sup>利用卫星资料对中国部分区域的气溶胶光学特征进行了研究<sup>[20-22]</sup>; Kim 等<sup>[23]</sup>利用 MODIS 产品分析了 2000~2005 年东亚气溶胶光学特性的月际变化特征。Zhang 等<sup>[24]</sup>用 Terra 和 Aqua 卫星的 MODIS 资料,分析了近 10 年全球海上 AOD 的季节和年际间变化趋势。目前,多见于较小区域、较短时间的 AOD 时空分布和变化趋势研究<sup>[20,25]</sup>,相对少见于大区域、较长时间的 AOD 时空分布和变化趋势研究。此外,我国在近 20 年的不同时间节点发布了多项减排政策,分析 AOD 在不同时期的变化趋势也将给相关部门评估减排措施效率提供一定的科学依据。本文使用最新发布的融合了暗像元法(DT)与深蓝算法(DB)的 MODIS/Terra C6.1 版本的 550 nm AOD 月产品数据(空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ),分析了 2001 年到 2017 年我国 AOD 的时空分布特征及不同时期的变化趋势,以期了解中国大气气溶胶光学厚度的时空变化规律提供方法参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 MODIS C6.1 AOD 数据

MODIS 传感器具有 36 个离散光谱段,光谱范围从 0.41~14.5  $\mu\text{m}$ ,视场宽度为 2 330 km,空间分辨率为 1 km,这些功能可以准确有效地反演陆地和海洋上的 AOD<sup>[26,27]</sup>。最新的 C6.1 MODIS 气溶胶

产品提供了用于反演陆地和海洋上的气溶胶特性的精确算法,特别是适用于沙漠、高原和干旱地区等亮地表下垫面的扩展深蓝算法尤为重要<sup>[28,29]</sup>,C6.1 采用融合的 DT/DB 产品,该产品从海洋到沙漠都可生成涵盖多种表面类型的数据集,不仅包括标准的 10 km 气溶胶产品,还包括 3km 的全球(DT-陆地和 DT-海洋)气溶胶产品<sup>[30]</sup>。相对于全球自动观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)光学厚度( $\tau_{\text{AERONET}}$ ),C6.1 DT-陆地期望误差为  $\pm(0.05 + 0.15)\tau_{\text{AERONET}}$ ,相对于 MODIS 光学厚度( $\tau_{\text{MODIS}}$ ),C6.1 DB 期望误差约为  $\pm(0.03 + 0.20)\tau_{\text{MODIS}}$ <sup>[28]</sup>。此外,MODIS Terra 蓝色通道的偏移已经从 C5 校正到 C6<sup>[29]</sup>。通过与中国地区 AERONET 地面观测结果对比评估,及对 MODIS DT/DB C6.1 AOD 产品的性能进行评估,结果表明从 DT 中收到的 AOD 远高于 DB, AOD 季节平均值在中国东部超过 0.30~0.40<sup>[31]</sup>。

### 1.2 研究区域

本文对 MODIS 反演得到的我国 2001~2017 年 AOD 时空变化趋势进行了分析。由于我国面积辽阔,下垫面情况复杂,本文选取全国 8 个不同的典型区域,来分别分析 AOD 的长期变化趋势。如图 1 所示,本文分析的 8 个区域分别位于:① 东北地区、② 塔克拉玛干沙漠地区、③ 内蒙古地区、④ 华北平原、⑤ 四川盆地、⑥ 华中地区、⑦ 长三角地区和⑧ 珠三角地区。

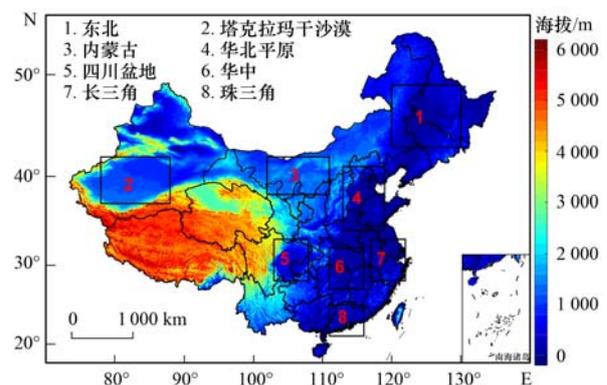


图 1 中国地形及典型区域

Fig. 1 National terrain and typical areas

### 1.3 趋势分析方法

通过月平均 AOD 数据计算出年平均 AOD 值和季节平均 AOD 值,以 2001~2017 年的 MODIS Terra C6.1 数据统计分析全国区域 AOD 分布状况,并采用最小二乘法分析其变化趋势。最小二乘法是一种参数估计的基本方法,其出发点是认为最适合的曲线会使估计误差的平方和最小,利用最小二乘法原理对直线型( $Y = kX + b$ )的方程参数进行估计:

令  $\sum (Y - C)^2 = \sum (kX + b - C)^2$  为最小值, 对 AOD 趋势值  $k$  求偏导, 并令偏导数等于 0 得到方程式(1), 对趋势的检验方法采用双侧  $t$  检验. 由于卫星遥感技术的局限性, 可能在某些区域存在一定的缺测值, 为了保证结果的合理性, 仅对时间序列内缺测值比例小于 40% 的格点进行趋势计算.

$$k = \frac{n \sum X \cdot Y - \sum X \cdot \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (1)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 全国 AOD 的空间分布

根据 MODIS Terra C6.1 的 DT/DB AOD 组合数据的月平均值计算得出了 2001 ~ 2017 年全国多年平均的 AOD 空间分布. 如图 2 (a) 所示, 2001 ~ 2017 年我国 AOD 的分布形势呈现出明显的高、中、低值中心. AOD 高值(0.65 ~ 1.00)区域位于华北平原、华中地区中北部、长三角地区中北部、珠三角地区及四川盆地. 这些区域是我国人口最密集, 工业化程度最高且海拔较低的地区, 人类活动导致气溶胶局地排放量增加, 其中细粒子占较高比例<sup>[32]</sup>. AOD 中值(0.35 ~ 0.60)区域位于塔克拉玛干沙漠地区、黄土高原中北部、东北地区中部和云贵地区, 其中塔克拉玛干沙漠是高浓度的天然气溶胶源地, 沙漠尘埃占主导地位. AOD 低值(<0.25)区域主要分布在内蒙古至东北地区北部以及我国西北部(新疆北部、青海)和西南部(青藏高原).

图 2 (b) 为 2001 ~ 2017 年全国 8 个典型区域 AOD 平均值的情况, 最高值出现在华中地区(0.72 ± 0.11), 其次是长三角地区(0.69 ± 0.19), 再次是华北平原(0.66 ± 0.27), 往后依次为四川盆地(0.56 ± 0.25)、珠三角地区(0.54 ± 0.09)、塔克拉玛干沙漠地区(0.34 ± 0.10)、东北地区(0.28 ± 0.08)和内蒙古地区(0.22 ± 0.04).

我国主要有两种气溶胶来源: 一是我国东部地区的人为排放, 二是我国西北沙漠地区的天然粉尘. 华北平原、长三角地区和珠三角地区以人为源气溶胶占主导, 塔克拉玛干沙漠地区以自然源气溶胶为主, 这两个主要的气溶胶源地之间的区域从我国东北部延伸到青藏高原, 内蒙古地区中东部和东北北部地区因天然密林覆盖使得气溶胶浓度较低, 西北地区(新疆北部、青海)和西南地区(青藏高原)等中西部地区人口稀少且工业气溶胶排放有限, 这些地区的气溶胶浓度较低, 主要受气溶胶源地输送影响<sup>[33]</sup>, 将此类自然源气溶胶和人为源气溶胶浓度都较低的地区视为气溶胶受体区域. 从气

溶胶源地到受体区域的传输过程较为复杂, 通常影响气溶胶源地与受体区域之间传输过程的因素可分为两类: 排放因子和气象因子<sup>[34,35]</sup>. 排放因子主要包含污染源的排放强度及化学转化; 气象因子主要控制从源地到受体区域的传输途径、边界层和对流层之间的物质交换以及传输途径中发生的清除过程.

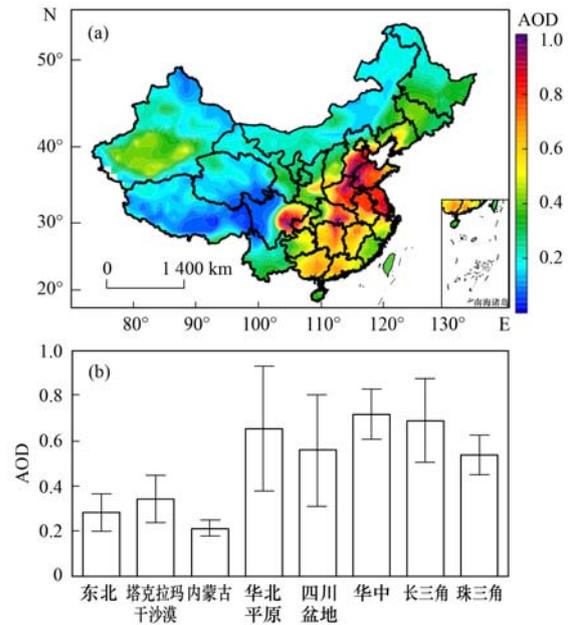


图 2 2001 ~ 2017 年全国年均 AOD 空间分布及区域平均 AOD 值  
Fig. 2 Annual mean AOD spatial distribution over China and regional mean AOD value for the period 2001-2017

### 2.2 全国 AOD 时空分布的季节变化

图 3 为全国 AOD 季节平均后的空间分布, AOD 中心强度呈现各自区域的季节变化. 春季, 全国 AOD 呈现两低两高的区域分布特征, 低值中心分别位于川西高原和准格尔盆地, 高值中心分别位于塔克拉玛干沙漠地区以及四川盆地至我国中东部地区(华中地区-珠三角地区-长三角北部地区-华北平原). 夏季, 全国 AOD 两低两高的区域分布特征基本不变, 塔克拉玛干沙漠地区 AOD 开始降低, AOD 低值区域扩展至我国西部大部地区(青藏高原-青海-新疆北部); 高值区域范围开始缩小, 集中在四川盆地以及华北平原-华中地区-长三角部分地区, 污染程度加深. 秋、冬季, AOD 低值区域延伸至内蒙古地区和东北地区北部, 华北平原、华中地区和长三角地区 AOD 降低, AOD 高值区范围明显缩小, 且较分散.

图 4 为典型区域平均 AOD 的季节和年际变化, 8 个典型区域 AOD 存在较大的季节性差异, 根据每个区域的变化特点, 可归为 3 种主要类型: 第一种类型的特征为春、夏季 AOD 达到高峰, 春季最高,

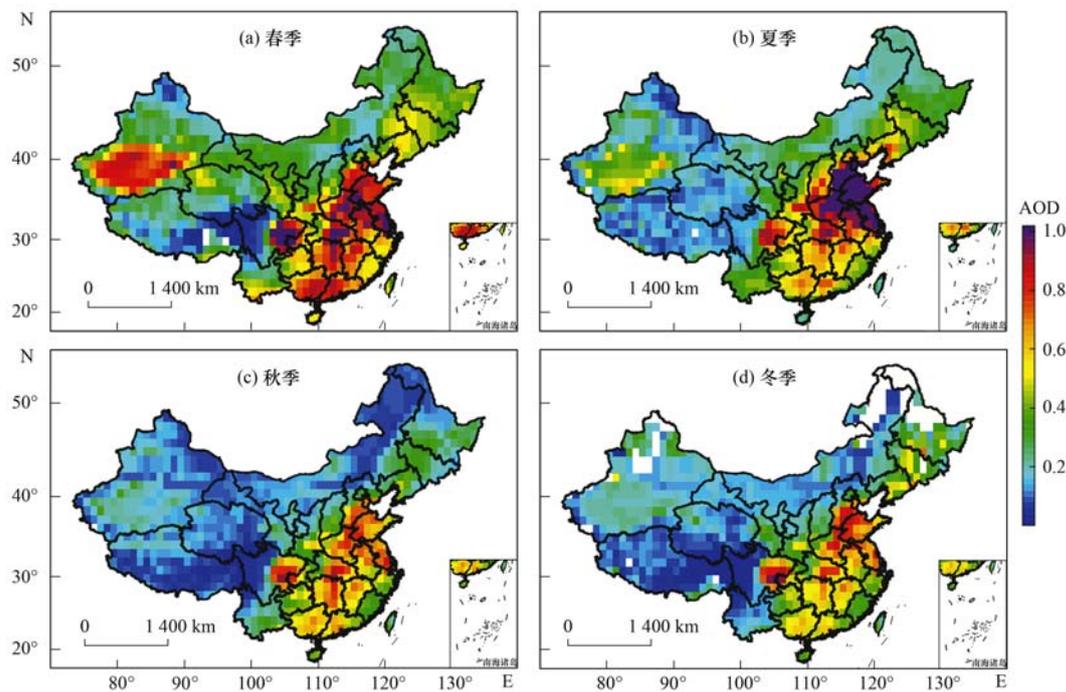


图3 2001~2017 全国季节平均 AOD 空间分布

Fig. 3 Seasonal mean AOD over China for the period 2001-2017

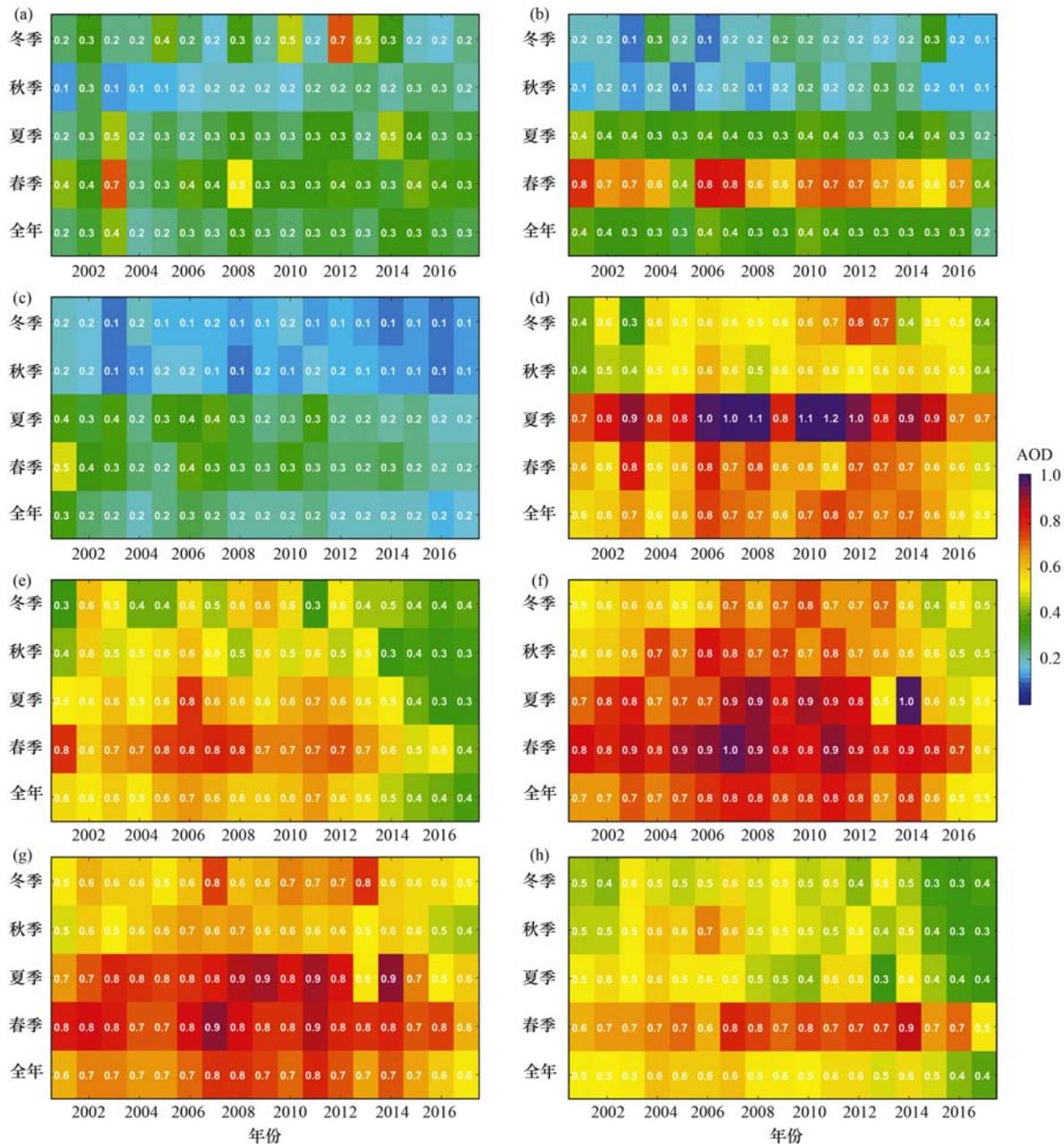
如:塔克拉玛干沙漠地区、四川盆地和珠三角地区,春季是我国西北地区沙尘输送的高峰,塔克拉玛干沙漠作为我国西北部较大的干旱半干旱地区以及天然气溶胶的主要源地<sup>[34]</sup>,AOD 峰值出现在春季与其在春季经常发生沙尘暴事件有关<sup>[36,37]</sup>,加之高浓度的生物材料燃烧和自然表面的扬尘,春季是上述地区污染最严重的季节.第二种类型的特征为春、夏季 AOD 达到高峰,夏季最高,如华北平原和长三角地区,这可能是由于夏季的高温和丰富的水汽含量以及更易发生的光化学反应导致<sup>[32,38]</sup>.此外,华北平原是小麦的主要产区,夏季是小麦的收获季节,大量的秸秆燃烧也是造成该地夏季 AOD 较高的原因之一.华北平原 AOD 在夏(冬)季出现高峰(低谷)与地面监测的污染物浓度结果相反,这是由于地面监测和反演过程均存在一定的不确定因素,二者容易出现较大的偏差<sup>[26]</sup>.相关研究表明:对华北平原而言,地面监测和 MODIS AOD 的季节性变化差异较大,趋势几近相反.一方面由于夏季降雨增多且扩散条件变好,污染物近地面浓度较低且垂直分布较均匀,造成地面监测结果较低,加之夏季盛行偏南风,北部地区“马蹄形”大地形结构会抑制南来污染物向北输送,同时,高温高湿条件使“气-粒”转换作用以及气溶胶粒子吸湿增长过程更易发生,污染物在华北平原上空堆积<sup>[39]</sup>,使得反演出的华北平原夏季 AOD 较高.另一方面也由于冬季排放源增加且扩散条件转差,导致近地面污染物

浓度增加且垂直分布不均匀,同时,冬季地表覆盖情况的改变不满足暗像元法<sup>[42]</sup>,使得反演出的华北平原冬季 AOD 较低.第三种类型的特点是四季平均 AOD 都相对偏低,如东北地区 and 内蒙古地区,两地 4 季的 AOD 均值大多低于 0.4.冬季在东北地区北部和北蒙古地区东北部存在 AOD 缺失,这与 MODIS AOD 的反演算法有关. MODIS AOD 的反演算法采用暗像元法,暗像元包括陆地上的植被、湿土壤和水体覆盖区.上述地区冬季由于天气因素,植被覆盖面积减小,有时地面被雪覆盖形成了较亮的下垫面背景,反射率发生变化,与暗像元法的要求差距较大,这成为冬季 MODIS AOD 缺失的重要原因之一<sup>[40-43]</sup>.

### 2.3 全国 AOD 的空间分布

图 5 为全国 AOD 各月平均后的空间分布.1 月 AOD 高值区范围较小且分散.2 月 AOD 高值区范围开始扩展并集中在华北平原、华中地区、四川盆地以及长三角地区北部.3~4 月,塔克拉玛干沙漠地区 AOD 开始增长并达到峰值,AOD 高值区范围进一步扩展至珠三角地区,5~7 月塔克拉玛干沙漠地区与珠三角地区 AOD 高值中心逐渐瓦解,中东部地区的 AOD 高值区范围逐渐缩小至华北平原、华中地区和长三角北部地区,高值中心污染程度进一步加深.8~12 月,中东部地区的 AOD 高值中心开始自北向南分散并逐步瓦解.

图 6 为区域平均 AOD 的月际变化,8 个典型区



(a) 东北; (b) 塔克拉玛干沙漠; (c) 内蒙古; (d) 华北平原; (e) 四川盆地; (f) 华中; (g) 长三角; (h) 珠三角

图 4 2001~2017 年典型区域平均 AOD 与季节和年份的关系

Fig. 4 Regional-averaged AOD distribution in relation to season and year in typical areas for the period 2001-2017

域 AOD 的低谷都出现在 12 月至次年 1 月. 内蒙古地区和东北地区的 AOD 各月均值较低且变化幅度较小. 塔克拉玛干沙漠地区 AOD 月际变化呈现单峰型, 4 月达到峰值. 四川盆地和珠三角地区的月际变化呈现双峰型, 两地 AOD 分别在 3~4 月和 8~9 月出现第一峰值和第二峰值; 5~7 月四川盆地受孟加拉湾西南气流影响, AOD 逐渐降低. 珠三角地区进入华南前汛期后, 降雨对气溶胶的冲刷作用使 AOD 迅速降低, 8 月副热带高压北抬, 雨带逐渐北移, 珠三角地区 AOD 出现次高峰. 6 月华中地区和长三角地区 AOD 达到峰值, 伴随长江中下游进

入梅雨期<sup>[44]</sup>, 华中地区和长三角地区的 AOD 逐渐降低. 6~7 月华北平原处于秸秆焚烧的高峰期<sup>[45]</sup>, 有研究利用 MODIS 卫星火点产品分析了中国地区农作物燃烧排放情况, 结果表明华北平原地区夏季火点数多而密集<sup>[46]</sup>, 因而华北平原 AOD 在 6~7 月达到高峰, 进入华北雨季后, 兼受大尺度天气系统南移过程中阻止污染物向北输送的影响, 华北平原 AOD 迅速降低.

#### 2.4 全国 AOD 变化趋势的时空分布

图 7 为全国 AOD 变化趋势空间分布, 2001~2017 年全国大部分地区 AOD 呈现弱的下降趋势,

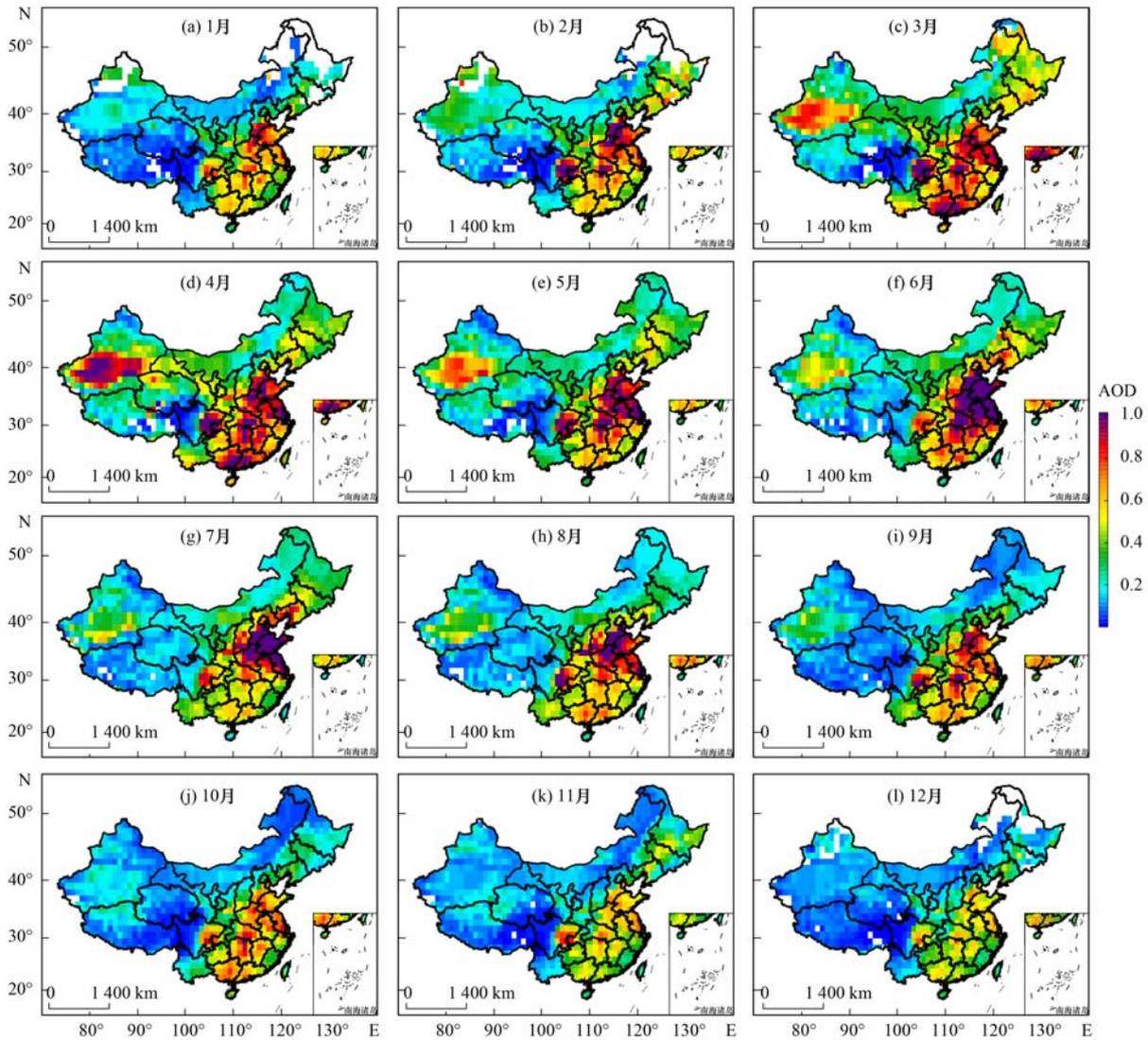


图 5 2001 ~ 2017 年全国逐月平均 AOD 空间分布

Fig. 5 Monthly mean AOD over China for the period 2001-2017

仅东北地区北部、山东半岛以及准格尔盆地呈小幅度增长. 2001 ~ 2017 年春、夏季 AOD 变化趋势的空间分布与年均 AOD 变化趋势的空间分布大致相同, 变化程度略有加深, 其中, 春季 AOD 呈下降趋势的范围相对于年均 AOD 在长江以北(南)略有增大(减小), 夏季 AOD 在东北地区北部的增长趋势有所增强. 2001 ~ 2017 年秋、冬季 AOD 变化趋势在长江以北主要呈小幅增长, 在长江以南主要呈降低, 秋季 AOD 变化程度相对于冬季更大. 为了进一步探究全国 AOD 变化趋势的时空分布, 将整个时间序列分为 3 段, 分别为: 2001 ~ 2006 年、2007 ~ 2012 年和 2013 ~ 2017 年, 从春季(图 8)、夏季(图 9)、秋季(图 10)和冬季(图 11)分析全国区域 AOD 变化趋势.

2001 ~ 2006 年, 我国西北地区中北部和内蒙古地区西部年均 AOD 变化趋势呈现小幅减少, 我国

中东部地区和西南地区东部年均 AOD 变化趋势呈现增长, 尤其是华北平原和四川盆地增幅较大. 2001 ~ 2006 年春季, AOD 升高的区域主要集中在山东半岛、华中地区以及四川盆地, AOD 下降的区域主要集中在内蒙古地区西部和新疆东北部. 2001 ~ 2006 年夏季, 我国西南地区东部及黄土高原中南部 AOD 保持增长且幅度加大. 2001 ~ 2006 年秋季, 季节平均 AOD 变化趋势的空间分布与年均 AOD 变化趋势的空间分布较为一致, 我国中东部地区 AOD 以增长趋势为主, 升高区域幅度进一步加大. 2001 ~ 2006 年冬季, 我国西南地区南部、黄土高原西部以及山东半岛 AOD 呈小幅增长, 青藏高原西北部 AOD 呈现小幅减少.

2007 ~ 2012 年内蒙古西部年均 AOD 仍呈减少趋势, 新疆北部及青藏高原西北部年均 AOD 变化趋势转为增长, 华北平原年均 AOD 增幅略有减小,

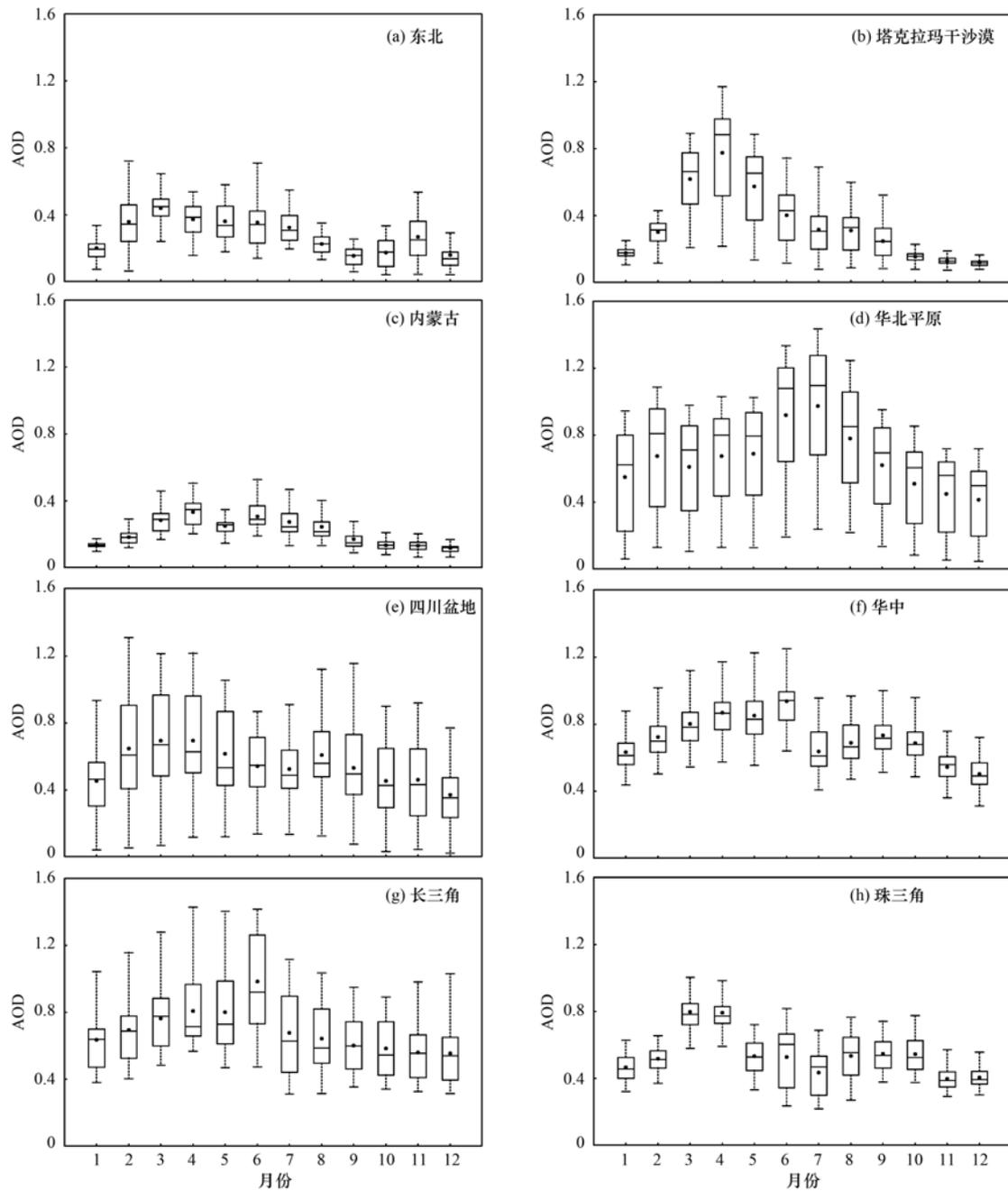


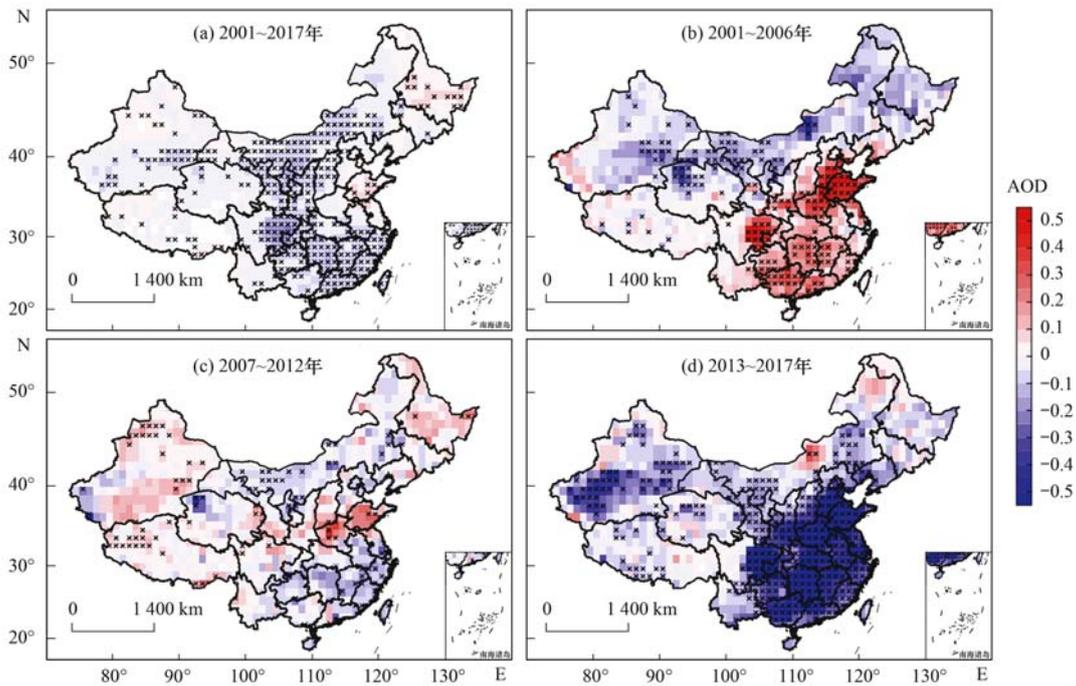
图 6 2001 ~ 2017 年典型区域平均 AOD 与月份的关系

Fig. 6 Regional-averaged AOD distribution in relation to month in typical areas for the period 2001-2017

长三角地区年均 AOD 变化趋势转为弱的下降. 2007 ~ 2012 年春季, 青藏高原西北部 AOD 变化趋势以弱的增长为主, 华中地区 AOD 变化趋势以弱的减少为主. 2007 ~ 2012 年夏季, 东北地区北部和珠三角地区 AOD 呈明显的增长趋势. 2007 ~ 2012 年秋季, 我国西北地区中部和东北地区北部 AOD 主要呈较弱的增长趋势. 2007 ~ 2012 年冬季, 我国 AOD 变化趋势的空间分布与秋季相似, 青藏高原西部 AOD 增长幅度相对于秋季更为明显, 内蒙古地区西部 AOD 变化呈弱的降低.

2013 ~ 2017 年全国年均 AOD 以下降趋势为主, 我国中东部地区、西北部地区和西南地区东部

年均 AOD 下降趋势较为显著, 青藏高原西北部 AOD 下降趋势较弱. 2013 ~ 2017 年春季, AOD 变化趋势的空间分布与年均 AOD 变化趋势的空间分布大致相同, 我国西北地区及内蒙古地区西部 AOD 下降趋势增强. 2013 ~ 2017 年夏季, 我国中东部地区 AOD 呈较强下降趋势的范围缩小, 我国西北地区 AOD 下降趋势减弱. 2013 ~ 2017 年秋季, 我国西南地区东部、青藏高原中西部、新疆地区以及内蒙古西部地区 AOD 下降趋势再次增强. 2013 ~ 2017 年冬季, 我国中东部地区 AOD 维持较明显的下降趋势, 四川盆地及青藏高原中西部地区 AOD 下降趋势减弱.



标注 'x' 的格点的趋势值通过 95% 的显著性检验, 下同

图 7 4 个时期的全国年均 AOD 变化趋势的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of annual mean AOD trends during the four periods

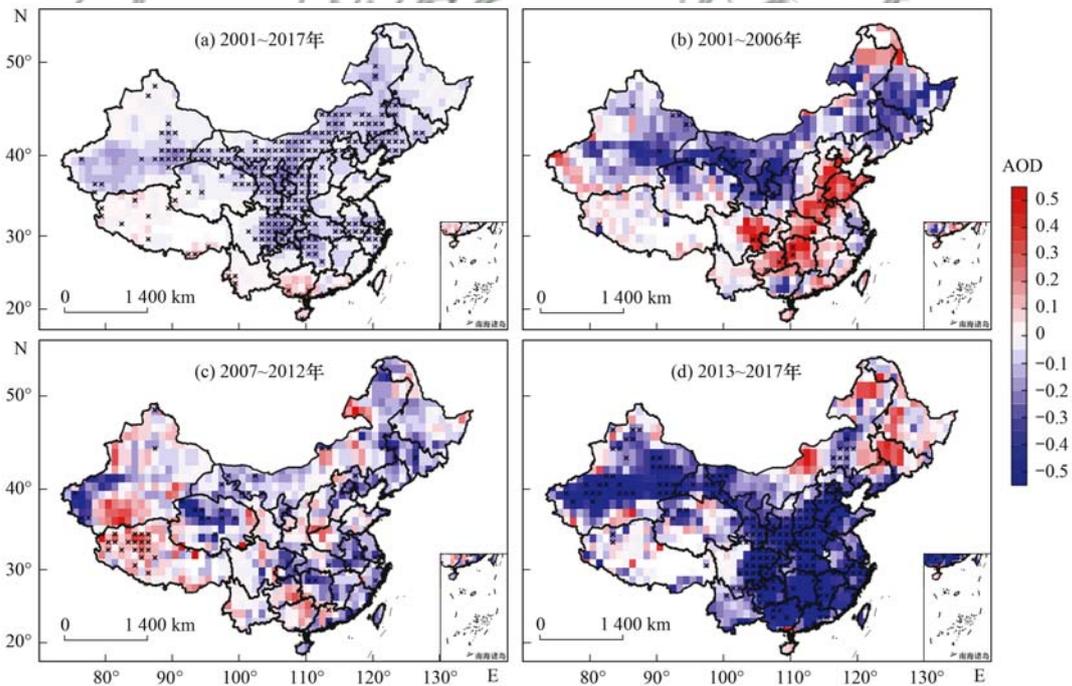


图 8 4 个时期的全国春季平均 AOD 变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of spring mean AOD trends during the four periods

### 3 结论

(1) 研究时段内年我国平均 AOD 分布存在两个高值中心, 第一高值区位于华北平原-长三角地区-华中地区和四川盆地 ( $0.65 \sim 1.00$ ). 第二高值区位于新疆南部的塔克拉玛干沙漠地区 ( $0.35 \sim 0.60$ ). AOD 的两个低中心分别位于东北地区北部-

内蒙古地区以及青藏高原, 全国 8 个典型区域中, AOD 的最高值位于华中地区 ( $0.72 \pm 0.11$ ), 其次是长三角地区 ( $0.69 \pm 0.19$ ), 再次是华北平原 ( $0.66 \pm 0.27$ ), 往后依次为四川盆地 ( $0.56 \pm 0.25$ ), 珠三角地区 ( $0.54 \pm 0.09$ ), 塔克拉玛干沙漠地区 ( $0.34 \pm 0.10$ ), 东北地区 ( $0.28 \pm 0.08$ ) 和内蒙古地区 ( $0.22 \pm 0.04$ ).

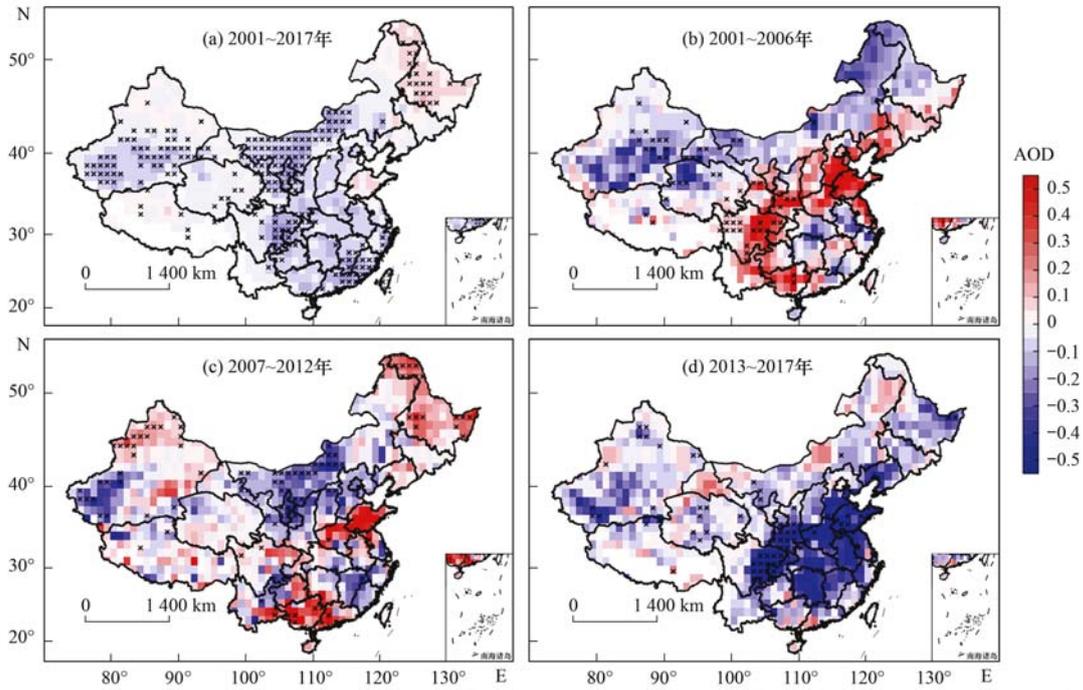


图 9 4 个时期的全国夏季平均 AOD 变化趋势的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of summer mean AOD trends during the four periods

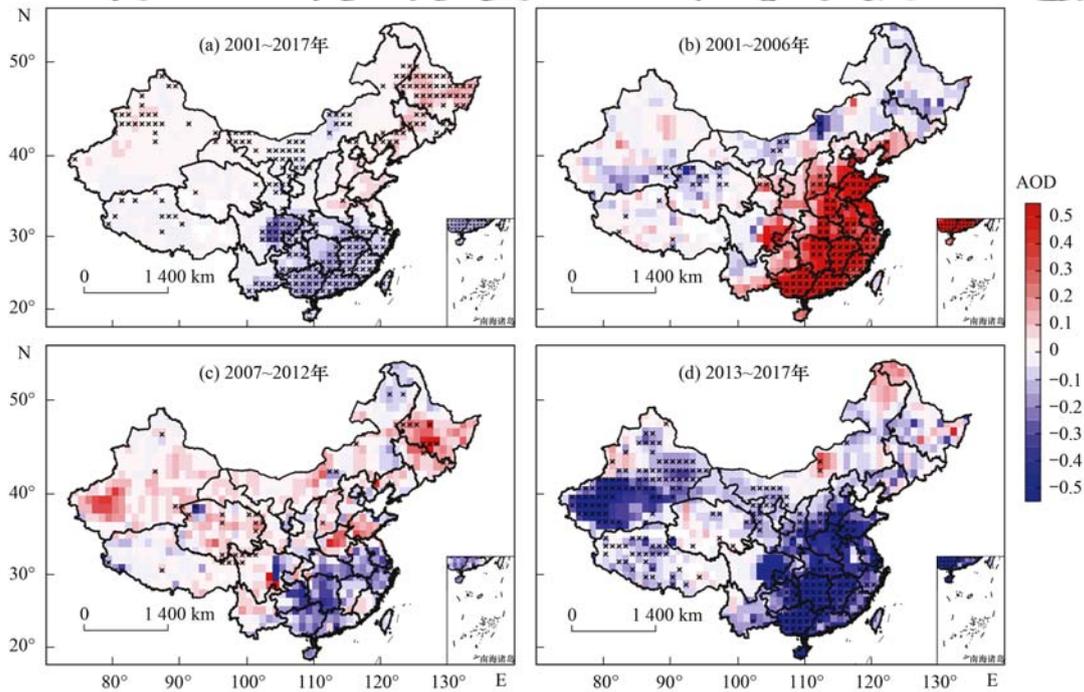


图 10 4 个时期的全国秋季平均 AOD 变化趋势的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of autumn mean AOD trends during the four periods

(2) AOD 空间分布的季节变化特征可归为 3 种主要类型, 第一种类型为春、夏季平均 AOD 比其它季节更高, 春天最高, 如塔克拉玛干沙漠地区、四川盆地和珠三角地区; 第二种类型为春、夏季平均 AOD 比其它季节更高, 夏季最高, 如华北平原和长三角地区; 第三种类型的特点是四季平均 AOD 都相对偏低, 如东北地区 and 内蒙古地区。

(3) 塔克拉玛干沙漠地区 AOD 在 3~4 月出现

峰值, 四川盆地、珠三角地区 AOD 分别在 3~4 月和 8~9 月出现第一峰值和第二峰值, 华中地区和长三角地区 AOD 在 5~6 月出现峰值, 华北平原 AOD 在 7 月出现峰值。

(4) 2001~2017 年全国大部分地区 AOD 呈现弱的下降趋势, 仅东北地区北部、山东半岛以及准格尔盆地呈小幅度增长。其中, 2001~2006 年, 我国西北地区中北部和内蒙古地区西部年均 AOD 变

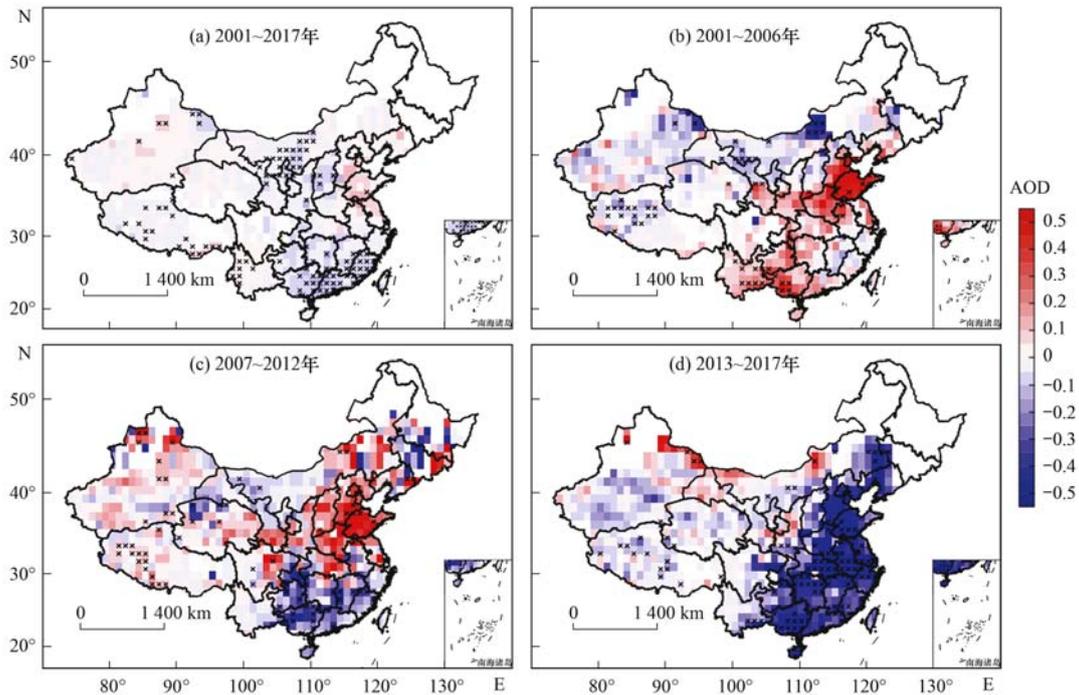


图 11 4 个时期的全国冬季平均 AOD 变化趋势的空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of winter mean AOD trends during the four periods

化趋势呈现小幅减少,我国中东部地区和西南地区东部年均 AOD 变化趋势呈现增长. 2007~2012 年内蒙古西部年均 AOD 仍呈减少趋势,新疆北部及青藏高原西北部年均 AOD 变化趋势转为增长,华北平原年均 AOD 增幅略有减小,长三角地区年均 AOD 变化趋势转为弱的下降. 2013~2017 年全国年均 AOD 以下降趋势为主,我国中东部地区、西北部地区、西南地区东部年均 AOD 下降趋势较为显著,青藏高原西北部 AOD 下降趋势较弱.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Ramanathan V, Li F, Ramana M V, *et al.* Atmospheric brown clouds: Hemispherical and regional variations in long-range transport, absorption, and radiative forcing [ J ]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, **112** ( D22 ): D22S21.
- [ 2 ] Li Z Q, Niu F, Fan J W, *et al.* Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [ J ]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(12): 888-894.
- [ 3 ] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols [ J ]. *Science*, 1992, **255** ( 5043 ): 423-430.
- [ 4 ] Gui K, Che H Z, Chen Q L, *et al.* Aerosol optical properties based on ground and satellite retrievals during a serious haze episode in December 2015 over Beijing [ J ]. *Atmosphere*, 2016, **7**(5): 70.
- [ 5 ] Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, *et al.* Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? [ J ]. *Science*, 2008, **321** ( 5894 ): 1309-1313.
- [ 6 ] Claquin T, Schulz M, Balkanski Y, *et al.* Uncertainties in assessing radiative forcing by mineral dust [ J ]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1998, **50**(5): 491-505.
- [ 7 ] Gui K, Che H Z, Chen Q L, *et al.* Water vapor variation and the effect of aerosols in China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 322-335.
- [ 8 ] 罗宇翔, 陈娟, 郑小波, 等. 近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征 [ J ]. *生态环境学报*, 2012, **21** ( 5 ): 876-883.
- [ 9 ] Luo Y X, Chen J, Zheng X B, *et al.* Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data [ J ]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21** ( 5 ): 876-883.
- [ 10 ] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(14): 2375-2377.
- [ 11 ] Schäfer K, Thomas W, Peters A, *et al.* Influences of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic plume on air quality in the northern Alpine region [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(16): 8555-8575.
- [ 12 ] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, *et al.* Indian Ocean experiment: an integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D22): 28371-28398.
- [ 13 ] Susan S, Qin D H, Martin M, *et al.* Intergovernmental panel on climate change ( IPCC ). *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis [ M ]*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007, 996.
- [ 14 ] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Intergovernmental Panel on Climate Change ( IPCC ). *Climate change 2013: the physical science basis [ M ]*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535.
- [ 15 ] Che H, Zhang X Y, Xia X, *et al.* Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China aerosol remote sensing network ( CARSNET ) 2002-2013 [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** ( 13 ): 7619-7652.
- [ 16 ] Qiu J H, Yang L Q. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980-1994 [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(4): 603-609.

- [16] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析[J]. 大气科学, 2002, **26**(6): 721-730.  
Luo Y F, Lu D R, Zhou X J, *et al.* Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, **26**(6): 721-730.
- [17] 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析[J]. 气象学报, 2001, **59**(1): 77-87.  
Luo Y F, Li W L, Zhou X J. Analyses of the 1980's atmospheric aerosol optical depth over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, **59**(1): 77-87.
- [18] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征[J]. 科学通报, 2000, **45**(5): 549-554.  
Luo Y F, Lü D R, He Q, *et al.* Characteristics of atmospheric aerosol optical depth variation over China in recent 30 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, **45**(14): 1328-1334.
- [19] 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.  
Li C C, Mao J T, Lua K H A, *et al.* Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, **48**(22): 2488-2495.
- [20] 段靖, 毛节泰. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(4): 537-543.  
Duan J, Mao J T. Study on the distribution and variation trends of atmospheric aerosol optical depth over the Yangtze River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(4): 537-543.
- [21] 关佳欣, 李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(2): 185-191.  
Guan J X, Li C C. Spatial distributions and changes of aerosol optical depth over eastern and central China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, **46**(2): 185-191.
- [22] 邓学良, 邓伟涛, 何冬燕. 近年来华东地区大气气溶胶的时空特征[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(3): 347-354.  
Deng X L, Deng W T, He D Y. Spatial-temporal features of atmospheric aerosol in east China in recent year[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, **33**(3): 347-354.
- [23] Kim S W, Yoon S C, Kim J, *et al.* Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/Sky radiometer measurements [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(8): 1634-1651.
- [24] Zhang J, Reid J S. A decadal regional and global trend analysis of the aerosol optical depth using a data-assimilation grade over-water MODIS and Level 2 MISR aerosol products [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(22): 10949-10963.
- [25] 黄文声, 李真, 李权镐, 等. 香港及珠三角地区 MODIS 高分辨率气溶胶光学厚度的反演[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(7): 1372-1380.  
Huang W S, Li Z, Li Q G, *et al.* Retrieval of aerosol optical thickness over Hong Kong and Pearl River Delta region using MODIS satellite data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(7): 1372-1380.
- [26] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, **62**(4): 947-973.
- [27] Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, *et al.* Global evaluation of the collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(21): 10399-10420.
- [28] Sayer A M, Munchak L A, Hsu N C, *et al.* MODIS collection 6 aerosol products: comparison between aqua's e-deep blue, dark target, and "merged" data sets, and usage recommendations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, **119**(24): 13965-13989.
- [29] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [30] de Leeuw G, Sogacheva L, Rodriguez E, *et al.* Two decades of satellite observations of AOD over mainland China using ATSR-2, AATSR and MODIS/Terra: data set evaluation and large-scale patterns [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(3): 1573-1592.
- [31] Tao M H, Chen L F, Wang Z F, *et al.* Comparison and evaluation of the MODIS collection 6 aerosol data in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(14): 6992-7005.
- [32] Lei Y, Zhang Q, He K B, *et al.* Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990-2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(3): 931-954.
- [33] 郑小波, 罗宇翔, 赵天良, 等. 中国气溶胶分布的地理学和气候学特征[J]. 地理科学, 2012, **32**(3): 265-272.  
Zheng X B, Luo Y X, Zhao T L, *et al.* Geographical and climatological characterization of aerosol distribution in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, **32**(3): 265-272.
- [34] Voulgarakis A, Savage N H, Wild O, *et al.* Interannual variability of tropospheric composition: the influence of changes in emissions, meteorology and clouds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(5): 2491-2506.
- [35] Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, *et al.* A simulated climatology of Asian dust aerosol and its Trans-Pacific transport. Part I: mean climate and validation [J]. Journal of Climate, 2006, **19**(1): 88-103.
- [36] 薛福民, 刘新春, 马燕, 等. 1997-2007 年塔克拉玛干沙漠腹地沙尘天气变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, **3**(1): 31-34.  
Xue F M, Liu X C, Ma Y, *et al.* Variation characteristics of dust weather in the hinterland of Taklimakan Desert during 1997-2007 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009, **3**(1): 31-34.
- [37] Che H Z, Wang Y Q, Sun J Y, *et al.* Variation of aerosol optical properties over the Taklimakan Desert in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, **13**: 777-785.
- [38] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog [J]. Science, 1997, **278**(5339): 827-830.
- [39] 徐祥德, 施晓辉, 张胜军, 等. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应[J]. 科学通报, 2005, **50**(22): 2522-2530.  
Xu X D, Shi X H, Zhang S J, *et al.* Aerosol influence domain of Beijing and peripheral city agglomeration and its climatic effect [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(16): 2016-2026.
- [40] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1997, **102**(D14): 17051-17067.

- [41] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, *et al.* Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, **108** (D21): 4661.
- [42] Levy R C, Remer L A, Dubovik O. Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol retrieval over land [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, **112** ( D13 ): D13210.
- [43] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, **112**(D13): D13211.
- [44] 丁一汇, 村上胜人. 亚洲季风[M]. 北京: 气象出版社, 1994. 76-83.
- [45] 厉青, 张丽娟, 吴传庆, 等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, **25**(1): 32-37.
- Li Q, Zhang L J, Wu C Q, *et al.* Satellite-remote-sensing-based monitoring of straw burning and analysis of its impact on air quality[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, **25**(1): 32-37.
- [46] 胡梅, 齐述华, 舒晓波, 等. 华北平原秸秆焚烧火点的 MODIS 影像识别监测[J]. *地球信息科学*, 2008, **10** (6): 802-807.
- Hu M, Qi S H, Shu X B, *et al.* Monitoring fire from crop residues burning with MODIS data in North China plain [J]. *Geo-Information Science*, 2008, **10**(6): 802-807.

环 境 科 学

## CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols .....	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 .....	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan .....	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, CAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017 .....	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta .....	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers .....	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Near Highway .....	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing .....	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant .....	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei .....	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources .....	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China .....	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts .....	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China .....	..... CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....	..... SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City .....	..... GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal .....	..... XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs .....	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River .....	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang .....	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons .....	..... ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau .....	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals .....	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb <sup>2+</sup> from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent .....	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb <sup>2+</sup> by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode .....	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants .....	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A <sup>2</sup> /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater .....	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment .....	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions .....	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal .....	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal .....	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge .....	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca <sup>2+</sup> on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge .....	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge .....	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur .....	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage .....	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process .....	..... ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils .....	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland .....	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N <sub>2</sub> O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover .....	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River .....	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters .....	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals .....	..... DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings .....	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety .....	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns in Jinyun Mountain .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China .....	..... TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice .....	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo .....	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)