

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁敏, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁敏, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事	(553)
《环境科学》征稿简则	(655)
信息	(664, 755, 885)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征

张瑞芳, 于兴娜*

(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, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 利用 2001 ~ 2018 年的 Terra MODIS C6.1 气溶胶产品对河南省大气气溶胶光学特性进行研究, 分析气溶胶光学厚度 (AOD)、气溶胶垂直柱质量浓度 (AMC) 和细粒子比 (FMF) 的时空分布特征, 并针对代表性区域研究了气溶胶光学参数的时间变化特征。结果表明, 河南省年均 AOD 和 AMC 及其在各个季节的空间分布均为东高西低、北高南低, 与河南省特殊地势、人口分布及各地区企业数量有关, 而 FMF 的空间分布与 AOD 和 AMC 分布相反。春季 AMC 值最高, 而 FMF 值最低, 表明春季主要是受到沙尘气溶胶的影响。夏季 AOD 和 FMF 值最高, 而 AMC 值较低, 主要是夏季气溶胶吸湿增长作用增强导致 AOD 高值出现, 雨水冲刷与二次气溶胶生成量增加使夏季以细模态气溶胶为主。秋、冬季河南省 AOD 和 AMC 值相对较低, FMF 值略高于春季。河南省 AOD 和 AMC 呈现逐年下降趋势; 而 FMF 呈现上升趋势, 而且 2011 年之后 AOD、AMC 和 FMF 的月平均峰谷差值均有所减少。

关键词: 气溶胶; 气溶胶光学厚度 (AOD); 细粒子比 (FMF); 时空分布; 河南省

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0600-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908197

Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province

ZHANG Rui-fang, YU Xing-na*

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The temporal variation and spatial distribution characteristics of aerosol optical depth (AOD), aerosol column mass concentration (AMC), and fine mode fraction (FMF) were analyzed based on the aerosol product information obtained from MODIS/Terra C6.1 from 2001 to 2018 in the Henan province. The spatial distribution of AOD and AMC in all seasons are high in the east and low in the west, and high in the north and low in the south, which was related to the special topography, population distribution, and number of enterprises in each region. Meanwhile, the spatial distribution of FMF is opposite to that of AOD and AMC. In spring, AMC was the highest, while FMF was the lowest, indicating that it was mainly affected by dust aerosol in spring. AOD and FMF were the highest in summer, while the AMC was lower, mainly because the high values of AOD in summer were caused by the hygroscopic growth of aerosol. The increase of rainwater scouring and secondary aerosol generation led to the domination of fine-mode aerosols in summer. In autumn and winter, the AOD and AMC were relatively low, and the FMF was slightly higher than in spring. The AOD and AMC in the Henan Province showed a decreasing annual trend, while the FMF exhibited an increasing trend. The average monthly peak-valley difference of AOD, AMC, and FMF decreased after 2011.

Key words: aerosol; aerosol optical depth (AOD); fine mode fraction (FMF); spatio-temporal distribution; Henan Province

大气气溶胶是指均匀分散在大气中的固体微粒和液体微粒构成的稳定混合体系^[1]。大气气溶胶可以通过吸收、散射直接影响气候变化, 也可以通过充当云和冰晶的凝结核间接影响气候系统^[2,3]。因为气溶胶时空分布不均以及辐射强迫与气溶胶之间复杂的相互作用, 使得气溶胶在气候变化研究中存在很强的不确定性^[4]。气溶胶的光学性质是影响地球大气系统辐射收支平衡的重要参数。因此, 正确认识气溶胶的光学特性尤为重要。

目前对于气溶胶光学特性的遥感研究主要分为地基与卫星遥感。地基大气气溶胶观测精度高, 但是站点的分布稀疏, 不能获取到全国空间分布特征^[5]; 卫星遥感是目前可以提供区域和全球尺度气溶胶特性的探测手段。如今, 提供气溶胶资料的卫星遥感有: MODIS^[6]、CALIPSO^[7] 和 TOMS^[8] 等。目前

国内外学者利用 MODIS 数据对气溶胶的变化开展了大量研究, 其中有研究证明 MODIS 气溶胶产品具有较高的精度^[9,10]。此外, 王银牌等^[11]、柳晶^[12] 和 张小娟^[13] 发现中国中部地区存在气溶胶光学厚度的高值区, 人口密度和工业化程度对气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 分布的影响较大。谭成好^[14] 分析出华中三省的 AOD 分布为东高西低, 细粒子比 (fine mode fraction, FMF) 为西高东低, 并指明^[15] FMF 增加趋势与人类活动有关。蔡子颖等^[16] 利用太阳光度计证实郑州地区为我国 AOD 的

收稿日期: 2019-08-23; 修订日期: 2019-09-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0203501); 国家自然科学基金项目 (91544229); 江苏省“六大人才高峰”项目 (JNHB-057)

作者简介: 张瑞芳 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: 1326495928@qq.com

* 通信作者, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

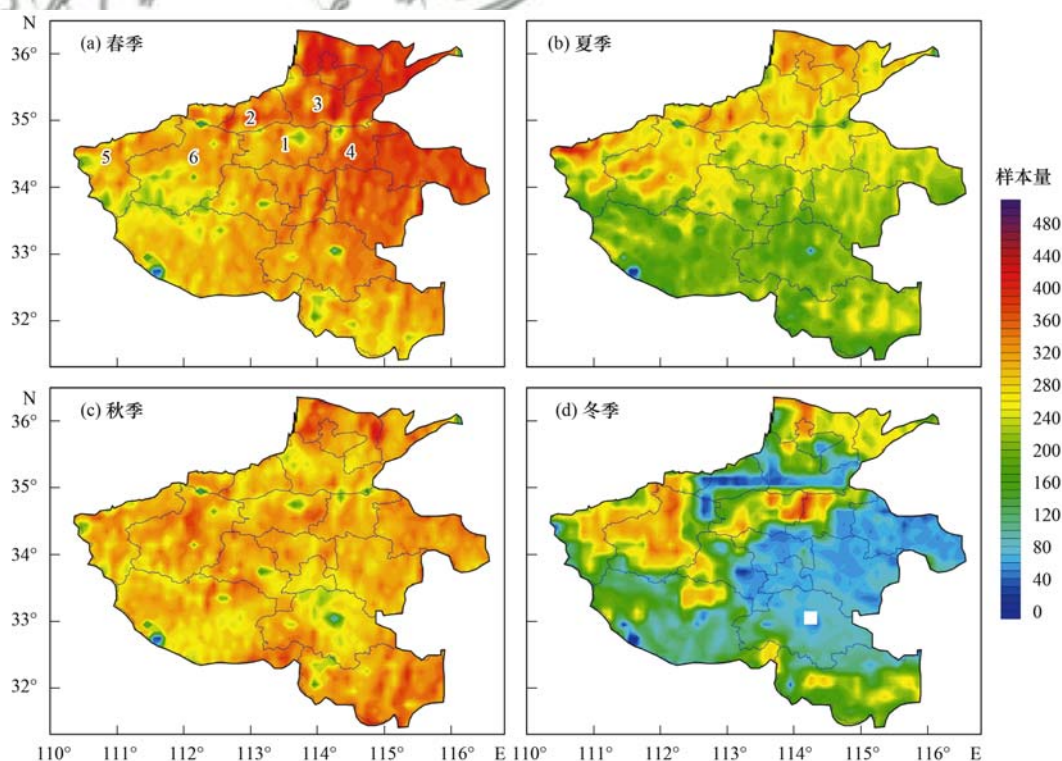
高值区,且春季主要存在沙尘气溶胶,夏季主要存在城市-工业气溶胶.前期气溶胶研究多集中在华北^[17]和华东^[15,18]等经济发达地区,对中部城市地区则关注较少.河南省有其独特的气候特征和经济结构,其气溶胶光学特征的时空分布及变化特征与其他地区有一定区别.近年来随着工业、经济快速增长,河南省大气环境质量形势严峻,2015 年全省有 18 个城市环境空气质量级别总体为中度污染^[19].相对于区域性研究,对于整个河南省的气溶胶研究较少^[20],且分辨率较低.因此本文基于分辨率相对较高的 MODIS C6.1 版数据(分辨率:0.1°×0.1°),对河南省气溶胶光学厚度、气溶胶柱质量浓度以及细粒子比进行长时间序列的时空变化特征分析,研究气溶胶污染物的主要来源,以期为该地区经济发展及大气环境治理提供科学依据.

1 材料与方法

利用 NASA 发布 Terra 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS 传感器 C6.1 Level 2 气溶胶产品(MOD04_L2)获取气溶胶数据,其空间分辨率为 10 km×10 km.与前期的 MODIS 产品(C5,C6)相比,C6.1 版气溶胶产品改进了反演算法,使其空间覆盖率、数据准确度以及质量控制等方面得到了提高^[21,22].AOD 数据选取“AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined”融合产品,其基于“暗目标”

反演算法(DT)和“深蓝”算法(DB).其中,MODIS DT 气溶胶产品能够在植被地区得到较高精确水平的气溶胶产品,但在城市与植被稀疏地区气溶胶的整体精确度较差,并且缺测天数较多.而 DB 算法在城市、植被稀疏地区反演气溶胶产品的精度明显优于 DT 产品,但其在植被覆盖较密区域的气溶胶产品稳定性较低^[22].所以,其融合方案基于 NDVI 植被指数根据地表反射率分为 $NDVI < 0.2$ 、 $0.2 \leq NDVI \leq 0.3$ 和 $NDVI > 0.3$ 这 3 种情况.最后根据 DT 及 DB 算法的优劣性进行挑选融合^[23].FMF 使用“Optical_Depth_Ratio_Small_Land”数据.气溶胶垂直柱质量浓度(aerosol column mass concentration, AMC)使用“Mass_Concentration_Land”数据.本文使用 AMC 数据仅限于评估气溶胶空间结构和相对大小的定性研究^[24].

由于使用 MODIS 产品为卫星轨道数据,其原数据的空间分辨率为 10 km×10 km.为了有效地选取数据及空间匹配,将数据进行空间校正、格点化并且整合到空间分辨率为 0.1°×0.1°数据产品中得到研究区数据资料,最后进行时空分布分析.本文先结合河南省 AOD 的高低值区域与地形地貌等特点,提取了两个代表区域的气溶胶光学特性月平均、年平均数据,并与整个区域(T 区)的对应数值进行比较分析.其中两个代表区域分别是 H 区和 L 区,具体地理位置见图 1(a).



1. 郑州; 2. 焦作; 3. 新乡; 4. 开封; 5. 三门峡; 6. 洛阳

图 1 2001~2018 年河南省 MODIS AOD 融合产品格点有效样本数空间分布

Fig. 1 Seasonal spatial distribution of number of samples based on MODIS AOD combined products during 2001-2018 in Henan Province

图1显示融合AOD数据四季的有效样本数分布情况. 整体来说, 冬季有效样本数最低, 春季样本总数较高, 秋季次之. DT AOD产品在河南省冬季出现大范围的缺测现象, 之后通过质量控制较高(QA > 2) DB AOD数据的有效补充, 使得融合AOD在洛阳、郑州、开封和三门峡等地区样本统计数高于240. 东部、中部及西南大部分地区耕地植被覆盖度高, 其NDVI指数较高^[25], 在这些地区的冬季陆地表面情况较复杂, 地表反射率较高, 使其融合AOD采用DT算法产品, 故而出现较大范围的缺值现象, 甚至出现无统计样本的格点.

2 结果与讨论

2.1 河南省气溶胶光学特性的总体平均情况

图2给出了2001~2018年河南省平均大气气溶胶光学厚度(AOD)、气溶胶柱质量浓度(AMC)和细粒子比(FMF)的空间分布. 可以看出, 河南省

平均AOD与AMC的空间分布一致. AOD大于0.8或者AMC高于 $45 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的高值区主要位于河南省北部, 其高值中心(AOD超过1.0, AMC高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)位于郑州、焦作与新乡的交界处, 主要与这些地区的人口密度大以及工业数量多有关. 河南省中部、东部及南部区域AOD与AMC值分别在 $0.5\sim0.8$ 和 $30\sim45 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间. AOD与AMC低值区主要分布在河南省西部地区, 其中三门峡市平均AOD和AMC分别为0.36和 $21.0 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 比北部高值区分别低0.45和 $22.0 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 这与西部地区人口稀疏、植被覆盖率高以及人类活动较少有关. 对于FMF来说, 河南省的平均FMF空间分布与平均AOD以及AMC的分布基本相反, 即北部城市FMF值明显低于0.35; 东部及南部FMF值分布在 $0.3\sim0.5$ 之间; 而西部地区FMF高于0.6, 尤其三门峡、洛阳与南阳交界处的FMF值高达0.8, 说明西部地区主要以细模态气溶胶为主.

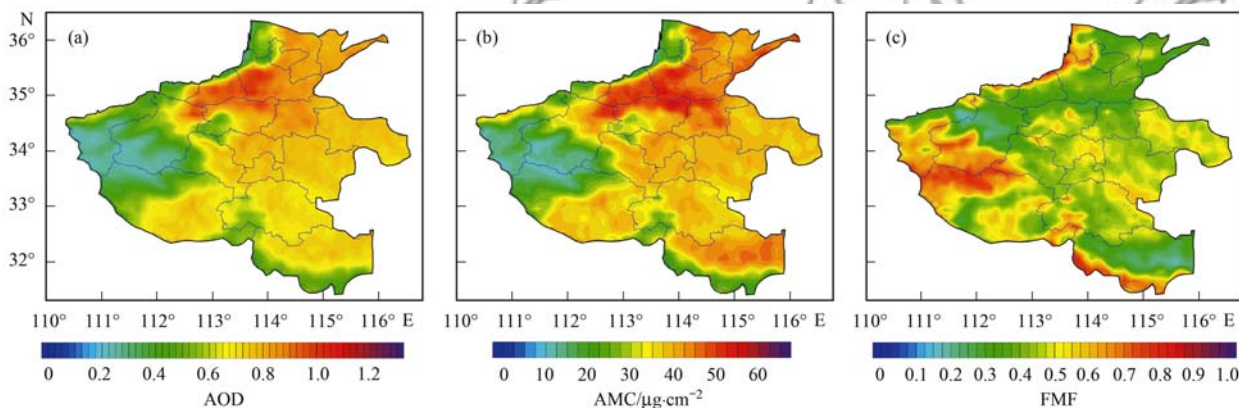


图2 河南省2001~2018年的AOD、AMC和FMF的年均值

Fig. 2 Distributions of annual AOD, AMC, and FMF in Henan Province during 2001-2018

2.2 河南省气溶胶光学特性的季节分布特征

图3为河南省2001~2018年AOD的季节变化特征. 河南省AOD季节分布特征与年均值分布相似, 均表现为北高南低、东高西低. 其中夏季AOD值最高, 春季次之. 这种春夏高与秋冬低的季节变化特征与北京^[26]、湖北^[27]和南京^[28]等地区结果相似. 春季新乡、焦作及郑州等AOD值高于1.0, 且除西部地区之外大部分地区AOD值大于0.8, 这与春季大风天气频繁造成的沙尘气溶胶增多有关^[29]. 夏季河南省的平均AOD达到0.78, 其中北部和中部地区AOD值可高达1.36. 夏季出现的高AOD与气溶胶粒子吸湿增长导致气溶胶消光系数增加有关^[30]. 秋冬两季AOD值明显低于春夏季节, 仅有部分地区AOD值达到0.8. 四季的低值区均出现在西部地区, 其中冬季AOD低值区($\text{AOD} \leq 0.2$)范围最大, 主要与西部地势高、空气较为清洁有关.

图4和图5分别显示了河南省气溶胶柱质量浓

度和细粒子比的季节变化特征. 与平均AMC空间分布类似, 四季AMC低值区均在西部山区; 而FMF高值区也出现在西部地区. 春季平均AMC值($46.51 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)远高于其他季节, 部分地区AMC高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; 然而春季平均FMF值(0.24)最低, 空气较清洁的西部地区平均FMF值也低于0.5, 其他地区FMF值远低于0.2. 春季大风天气较频繁, 空气中存在大量沙尘气溶胶, 导致AMC总体水平较高、FMF值较低的现象. 从FMF的季节分布来看, 平均FMF值在夏季最高, 达到0.71, 但AMC值较低. 这主要是由于夏季频繁的降水以及高温高湿引起的气粒转化, 导致细模态气溶胶占比较高. 而且夏季植被生长茂盛, 由自然界植物排放的挥发性有机物等气体经过气-粒转化过程, 生成的粒子主要以细颗粒物为主^[31]. 秋、冬季平均FMF值分布为0.54和0.33, 但其AMC平均值却基本接近. 这主要是因为秋收期间河南省存在秸秆燃烧的现象^[32], 使大气中细模态

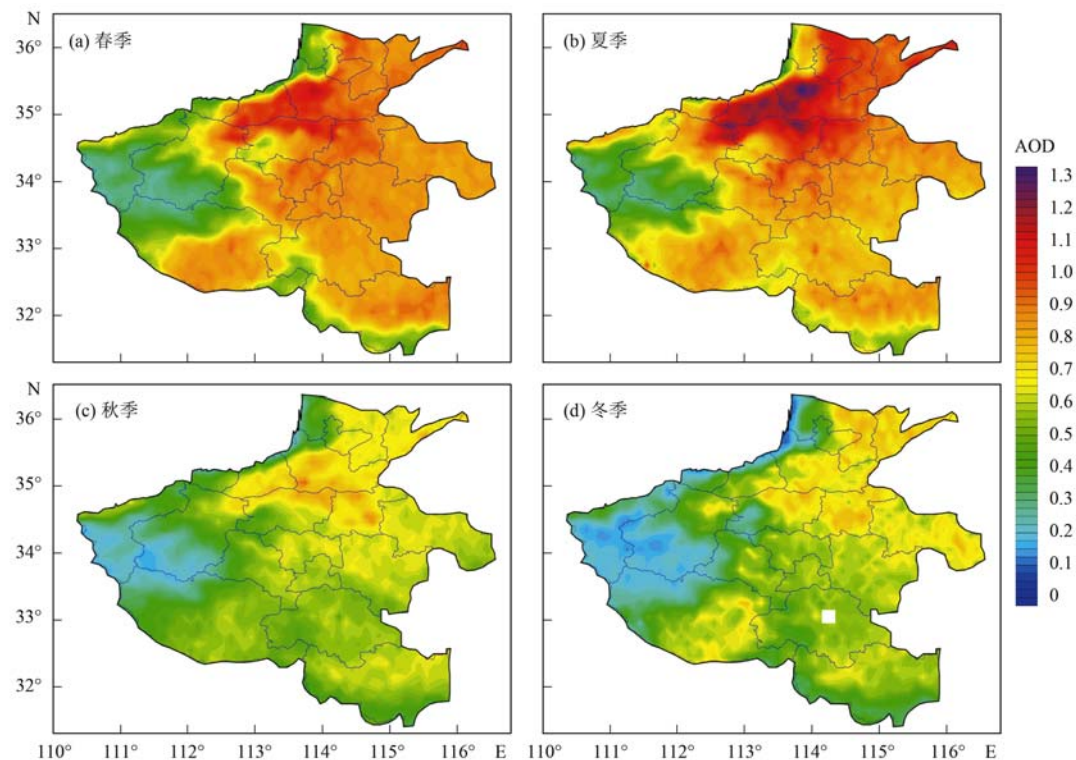


图3 河南省2001~2018年的AOD的空间分布和季节变化特征

Fig. 3 Seasonal average spatial distribution of AOD based on MODIS combined products during 2001-2018 in Henan Province

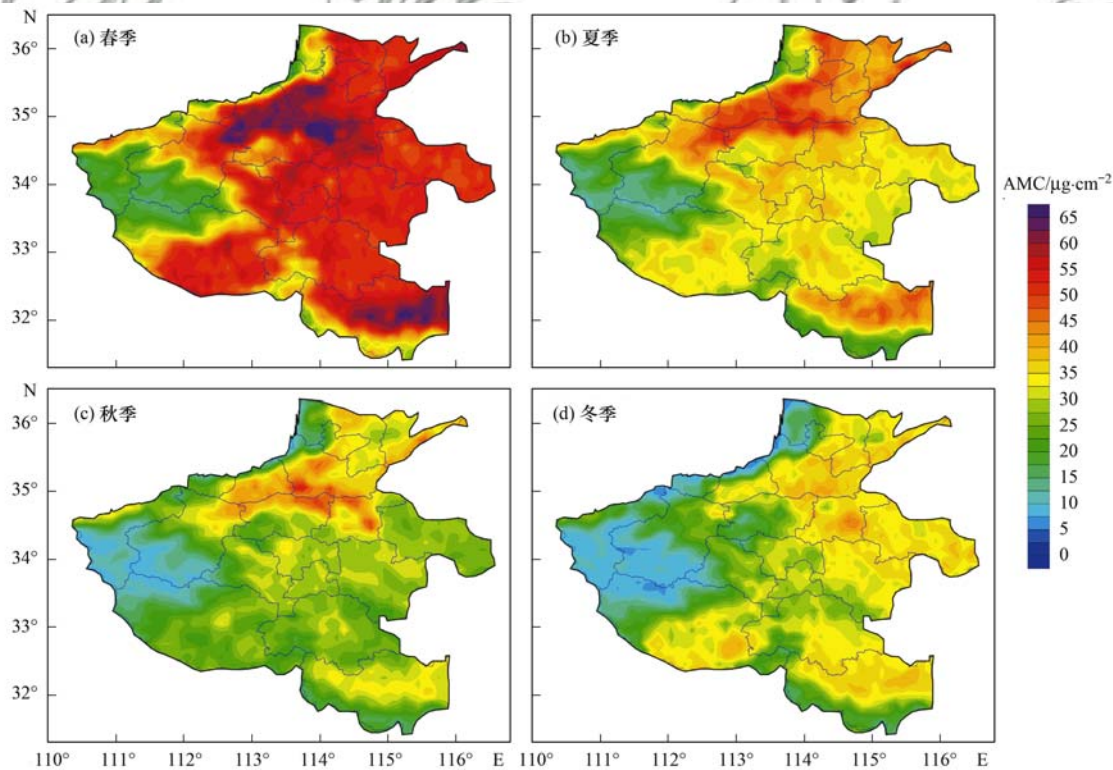


图4 河南省2001~2018年的AMC的空间分布和季节变化特征

Fig. 4 Seasonal average spatial distribution of AMC based on MODIS products during 2001-2018 in Henan Province

气溶胶增多;而煤炭燃烧排放的气溶胶是河南省冬季污染物的主要贡献源。

2.3 区域气溶胶光学特性月均值变化特征

根据图2(a)和图3显示AOD的空间分布,将

AOD的高值区(郑州、焦作、新乡和开封)看作H区,将低值区(洛阳和三门峡)看作L区,最后将整个河南省地区看作T区。为了研究平坦的H区、山地地形的L区以及河南省全区域的气溶胶光学特

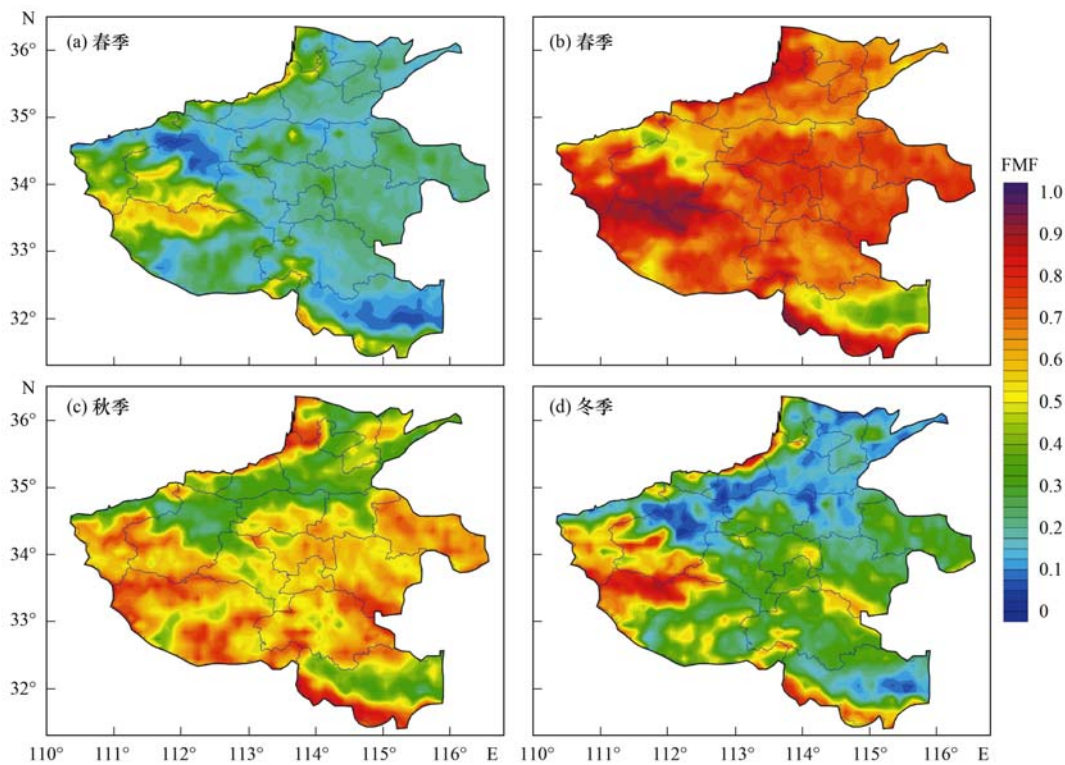


图5 河南省 2001 ~ 2018 年的 FMF 的空间分布和季节变化特征

Fig. 5 Seasonal average spatial distribution of FMF based on MODIS products during 2001-2018 in Henan Province

性的时间变化状况,分别提取了 2001 ~ 2018 年 H、L 和 T 区的气溶胶光学厚度、气溶胶柱质量浓度和

细粒子比的月平均值和年平均值.

图 6 显示为 H、L 和 T 区 (河南省平均) 的

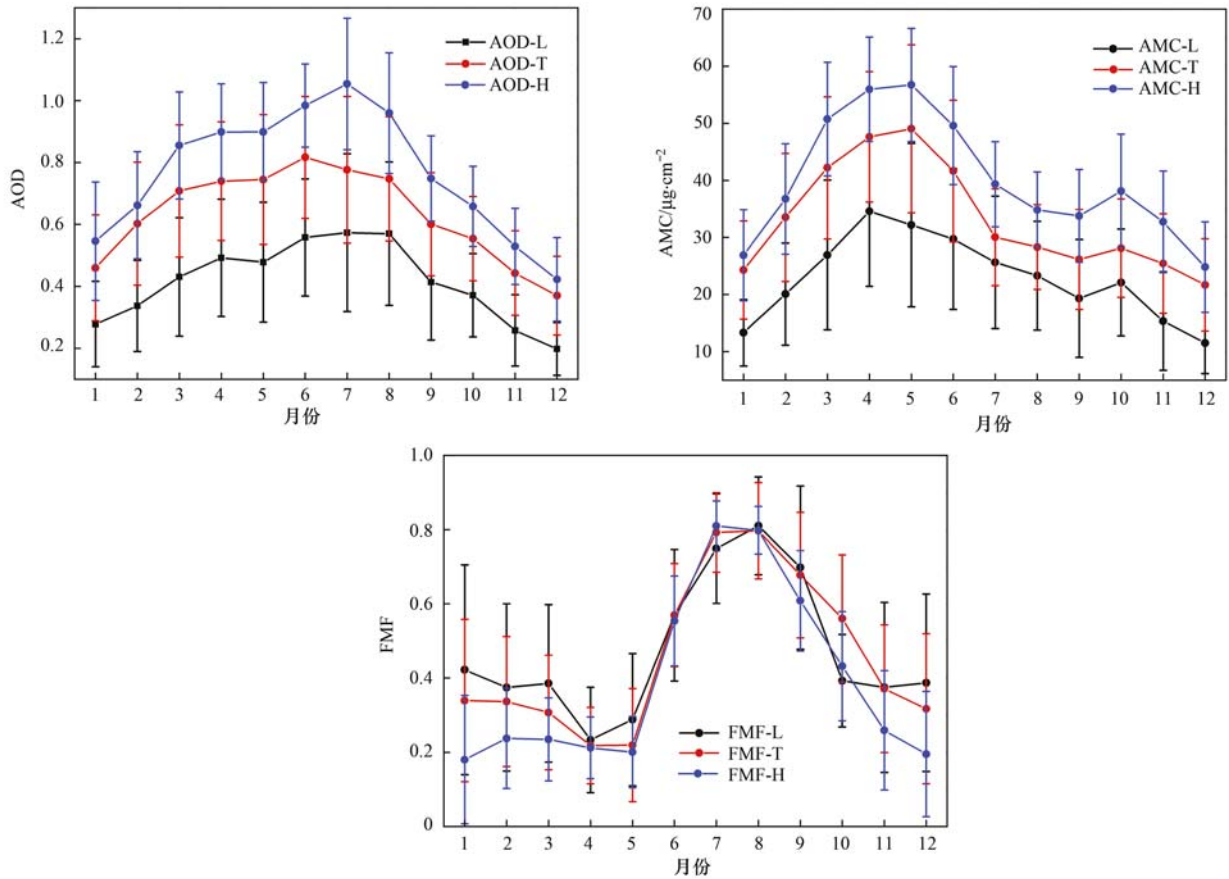


图6 河南省 AOD、AMC 和 FMF 月际变化

Fig. 6 Monthly variation of AOD, AMC, and FMF in Henan Province

AOD、AMC 和 FMF 月均值变化. 可以看出, AOD 在 L、H 和 T 区均为 6~7 月最高, 其中 H 区平均 AOD 可达到 1.05, 是 L 区最高月平均的 2 倍. 12 月的平均 AOD 最小, 分别为 0.42 (H 区)、0.37 (T 区) 和 0.19 (L 区). L 区最大和最小月平均 AOD 相差 3 倍左右, 而 H 区两者差值最大. L 区在 6~8 月的 AOD 高值反映出水汽对 AOD 的贡献. 值得注意的是, 冬季 H 区和 T 区的平均 AOD 差值不大, 仅在 0.05~0.09 之间, 说明河南省在冬季期间大气污染整体比较严重.

对 AMC 来说, H、L 和 T 区的月均值均呈现双峰型的变化趋势, 分别出现在 4~5 月和 10 月, 这主要归因于春季沙尘与秋季秸秆燃烧的贡献. L 区的最高月平均 AMC 为 $(34.57 \pm 13.14) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 比 H 区的最高月平均低 $22.15 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 这与河南省西部地区多植被有关. 与 AOD 的月变化相似, H 区和 T 区的平均 AMC 在 12、1 和 2 月基本接近, 同样表明了整个河南省冬季期间气溶胶含量较高的事实.

从图 6 可以看出, 5~9 月期间 3 个区域的 FMF 月均值非常接近, 并在 7~8 月均达到最高 ($\text{FMF} \geq 0.8$), 说明夏季气溶胶主要以细粒子为主导. 因春季沙尘气溶胶影响导致 3 个区域的 FMF 均在 4 月最低, 仅为 0.21. 从 11 月到次年 2 月, H 区的月平均 FMF 明显低于 L 区和 T 区, 可能是秋冬季大气边界层较稳定, 有利于气溶胶积聚碰并增长, 导致雾-霾天气较多.

2.4 区域气溶胶光学特性逐月及逐年变化特征

图 7 给出了河南省 AOD、AMC 和 FMF 的逐年及逐月平均值的情况. AMC 的年平均变化趋势与 AOD 类似, 但月平均 AOD 的峰、谷值略滞后于 AMC. 河南省 AOD 月平均的最高值出现在 2006 年 7 月, 达到 1.49; 最低值 (0.22) 出现在 2012 年 11 月, 是最高值的 1/6; AOD 月平均值波动幅度较大. 2001~2018 年期间河南省年平均 AOD 值在 0.49~0.82 范围内, 平均值为 0.65, 高于京津冀区域 (0.488)^[33]、西北地区 (0.21)^[34] 以及山西省 (0.23)^[35]. 整体上说, AOD 和 AMC 均呈现降低趋势, 年变化率分别为 -0.44% 和 -43% ; FMF 呈现微弱增加趋势, 变化率为 0.73% . AOD、AMC 年均值均在 2011 年达到最高, 之后逐渐下降到最低值, 表明河南省空气质量状况有所改善.

河南省最低和最高平均 FMF 值分别出现在 2008 年 (0.37) 和 2015 年 (0.59); 2012~2017 年 FMF 年平均值均超过 0.5, 说明细模态气溶胶对 AOD 变化的影响力度增强, 人类活动对 AOD 的影响越来越明显. 自 2011 年以来, 河南省 AOD、AMC、FMF 月平均的峰谷差值均有所减少, AOD 和 AMC 的峰值有所降低. 结合最近几年河南省环境评估报告^[36~38], 均表明近年来河南省大气污染治理与环境保护政策的实施取得了显著的进展.

图 8 和图 9 分别显示了 H 和 L 区的 AOD、AMC 及 FMF 逐年及逐月平均值的变化状况. H 区 AOD 逐月平均值变化与 T 区相似, 都滞后于气溶胶

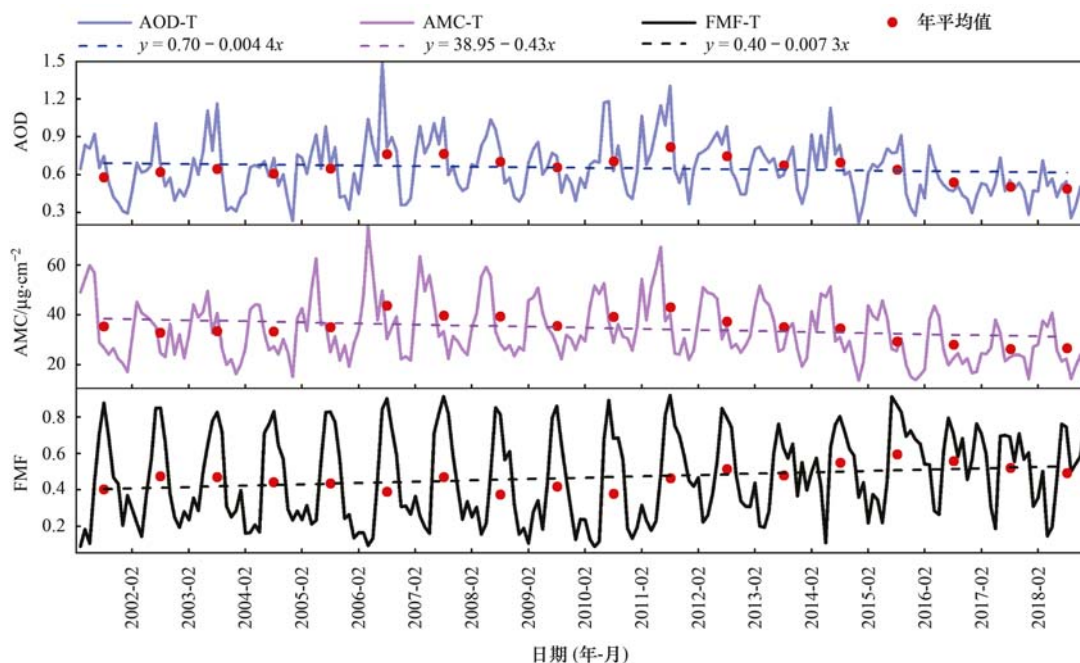


图 7 河南省 (T 区) AOD、AMC 和 FMF 月平均值及年平均状况

Fig. 7 Monthly average trend and annual average of AOD, FMF, and AMC in Henan Province (T area)

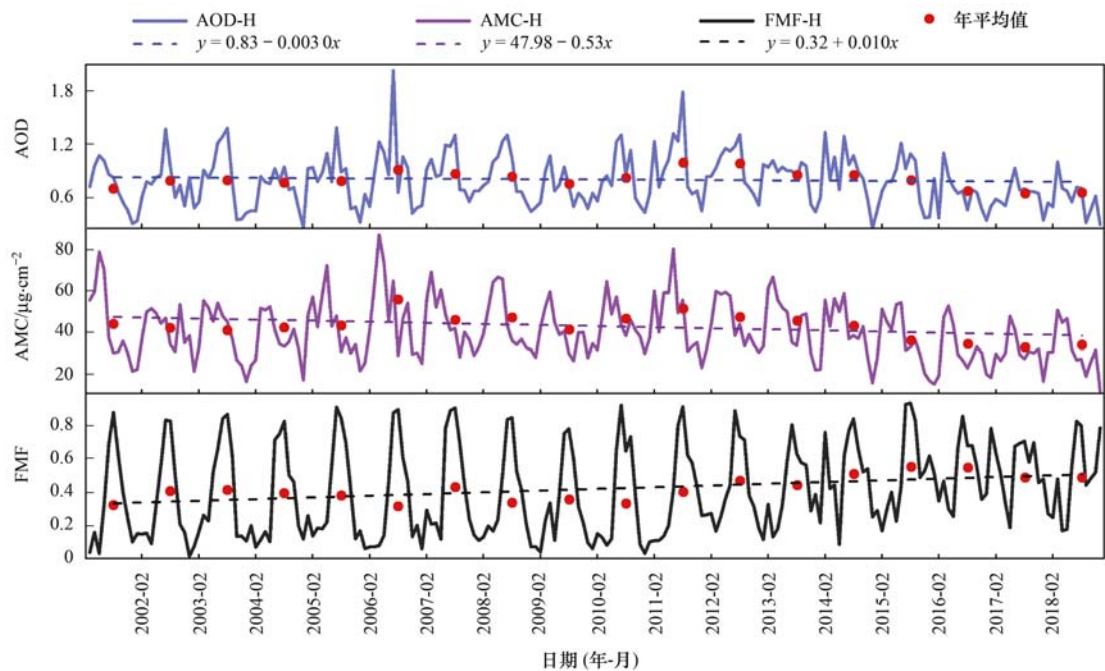


图8 H区(郑州、焦作、新乡和开封市)的AOD、AMC和FMF月平均值及年平均状况

Fig. 8 Monthly average trend and annual average of AOD, FMF, and AMC in H area (Zhengzhou, Jiaozuo, Xinxiang, and Kaifeng)

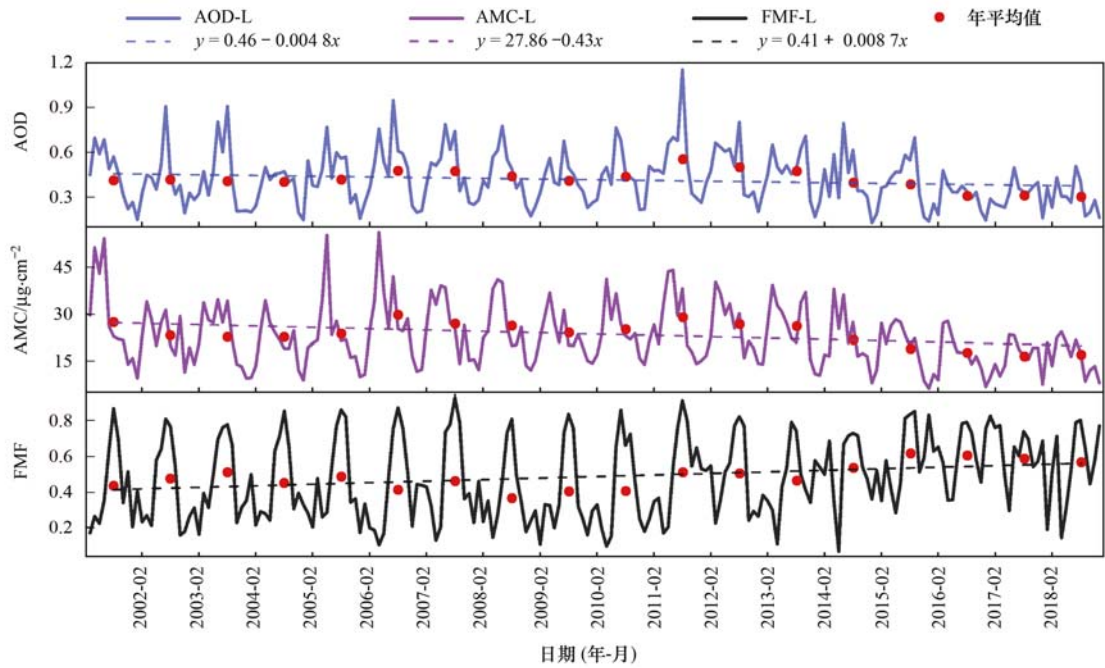


图9 L区(洛阳和三门峡市)AOD、AMC和FMF月平均值及年平均状况

Fig. 9 Monthly average trend and annual average of AOD, FMF, and AMC in L area (Luoyang and Sanmenxia)

柱质量浓度,AOD月平均最高值(2.03)都出现在2006年7月,次高值(1.79)出现在2011年8月;L区AOD月平均值的最高值(1.15,2011年8月)约是H区AOD最高值的一半.

与L区相比,H区的AOD年平均值减少率偏低,而气溶胶柱质量浓度的减少率偏高.从2011年开始,H区和L区的AOD、AMC年平均值显著减少,尤其是H区的减少率更明显,说明河南省加强了对郑州、焦作等工业城市的环境治理的力度.

H和L区的细粒子比均呈逐年增长趋势,特别是H区的年增长率为1%,且近几年H区FMF年均值在0.5附近波动,说明细模态气溶胶对H区AOD年际变化影响增加,即郑州、焦作等地区的人类活动对AOD的影响越来越明显.H与L区的FMF年平均值在2010年出现极小值,之后均呈现波动增长趋势,而且FMF峰谷差值减少,说明沙尘天气或由城市建筑引起的扬尘等粗颗粒物的治理效果明显.

3 结论

(1) 河南省气溶胶光学厚度、气溶胶柱质量浓度和细粒子比的分布具有典型的地理特征. AOD 和 AMC 总体上呈现由北向南增加, 由东部平原向西部山区减少的特征; FMF 分布与 AOD 基本相反. 2001~2018 年平均 AOD 和 AMC 的高值区主要分布在河南省北部地区; FMF 高值区则分布在河南省西部地区.

(2) AOD 的季节变化较为明显, 春夏两季 AOD 明显高于秋冬季. 河南省春季由于沙尘气溶胶的影响, 平均 AMC 最大, 高达 $46.51 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; 而 FMF 值最小, 为 0.24. 夏季由于气溶胶吸湿增长, 河南省平均 AOD 值最高; 雨水冲刷和二次气溶胶生成量增加导致夏季 FMF 值高达 0.71. 秋冬两季 AOD 和 AMC 值相对较低, FMF 值略高于春季.

(3) H 区(郑州、焦作、新乡和开封)、L 区(三门峡和洛阳)和 T 区的 AOD 平均值在 6~7 月最高, AMC 值在 4~5 月最高, FMF 值在 7~8 月最高. 在 12 月、1 月和 2 月, H 区与 T 区的 AOD 平均值相差不大, 两者 AMC 差值也较低. 而从 11 月到次年 2 月, H 区的平均 FMF 值要明显低于 L 区和 T 区.

(4) 河南省年平均 AOD 值在 0.49~0.86 之间, 平均值为 0.56. 2001~2018 年河南省 AOD 和 AMC 呈现逐年下降趋势, 而 FMF 呈现上升趋势. 2012~2017 年河南省 FMF 年均值均高于 0.5, 细模态气溶胶占 AOD 主要部分. 在 2011 年之后, 河南省 AOD、AMC 和 FMF 月平均的峰谷差值均有所减少, AOD 和 AMC 的峰值呈现降低趋势. 这与河南省近年的环境质量报告结果类似, 说明河南省大气污染治理取得了显著成效.

致谢: 非常感谢 NASA 数据中心提供 MODIS 气溶胶产品资料.

参考文献:

- [1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 268-359.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environmental chemistry (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 268-359.
- [2] 张小曳. 中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1108-1117.
Zhang X Y. Characteristics of the chemical components of aerosol particles in the various regions over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1108-1117.
- [3] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.
Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.
- [4] IPCC. Intergovernmental panel on climate change fifth assessment report [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [5] 王宏斌, 张镭, 焦圣明, 等. 基于 AERONET 观测资料对 MODIS 气溶胶产品的验证[A]. 见: 第 31 届中国气象学会年会[C]. 北京: 中国气象学会, 2014. 13-25.
- [6] 唐家奎, 薛勇, 虞统, 等. MODIS 陆地气溶胶遥感反演——利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, 35(5): 474-481.
- [7] Liu B M, Ma Y Y, Gong W, et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and Sun Photometer under different conditions over Central China [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 10066.
- [8] 胡婷. 中国区域气溶胶的光学厚度特征和气候效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. 29-50.
- [9] 王宏斌, 张镭, 焦圣明, 等. 中国地区 MODIS 气溶胶产品的验证及反演误差分析[J]. 高原气象, 2016, 35(3): 810-822.
Wang H B, Zhang L, Jiao S M et al. Evaluation of the MODIS aerosol products and analysis of the retrieval errors in China [J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(3): 810-822.
- [10] Levy R C, Leptoukh G G, Kahn R, et al. A critical look at deriving monthly aerosol optical depth from satellite data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2942-2956.
- [11] 王银牌, 喻鑫, 谢广奇. 中国近 15 年气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 426-434.
Wang Y P, Yu X, Xie G Q. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15 years [J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 426-434.
- [12] 柳晶. 中国地区气溶胶光学特性及辐射强迫的卫星遥感观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. 37-100.
- [13] 张小娟. 基于 MODIS 遥感 DT 和 DB 数据集的中国 AOD 分布与变化[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. 42-85.
- [14] 谭成好. 华中地区大气环境的多源观测资料气候分析及模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016. 30-45.
- [15] Tan C H, Zhao T L, Xu X F, et al. Climatic analysis of satellite aerosol data on variations of submicron aerosols over East China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 123: 392-398.
- [16] 蔡子颖, 郑有飞, 胡鹏, 等. 郑州地区大气气溶胶光学特性的地基遥感研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 31-35.
Cai Z Y, Zheng Y F, Hu P, et al. Ground-based measurements of aerosol optical properties in Zhengzhou, China [J]. China Environmental Science, 2009, 29(1): 31-35.
- [17] 李一凡, 陈文忠. 基于 MODIS 和 CALIOP 卫星遥感数据的气溶胶光学厚度与海洋初级生产力相关性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(1): 76-86.
Li Y F, Chen W Z. Correlation between aerosol optical depth and ocean primary productivity based on MODIS and CALIOP data [J]. China Environmental Science, 2017, 37(1): 76-86.
- [18] 茆佳佳. 华东地区气溶胶特性的 MODIS 资料反演及其时空分布特征的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011. 60-68.
- [19] 河南省生态环境厅. 2015 年河南省环境质量年报[R]. 郑州: 河南省环境保护厅, 2016. 1-3.
- [20] 田宏伟. 2006—2016 年河南省气溶胶光学厚度时空分布[J]. 干旱气象, 2018, 36(1): 104-109.
Tian H W. Spatial-temporal distribution characteristics of aerosol optical depth in He'nan Province from 2006 to 2016 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(1): 104-106.
- [21] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. Atmospheric

- Measurement Techniques Discussions, 2013, **6**(1): 159-259.
- [22] Che H Z, Yang L K, Liu C, *et al.* Long-term validation of MODIS C6 and C6.1 dark target aerosol products over China using CARSNET and AERONET[J]. *Chemosphere*, 2019, **236**: 124268.
- [23] Bilal M, Nichol J E. Evaluation of the NDVI-based pixel selection criteria of the MODIS C6 dark target and deep blue combined aerosol product[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(8): 3448-3453.
- [24] Burton S P, Thomason L W, Zawodny J M. Technical note: time-dependent limb-darkening calibration for solar occultation instruments[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(1): 1-8.
- [25] 余玉洋. 河南省植被 NDVI 时空变化及其驱动因子研究[D]. 郑州: 河南大学, 2018. 29-41.
- [26] Yu X N, Lü R, Liu C, *et al.* Seasonal variation of columnar aerosol optical properties and radiative forcing over Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **166**: 340-350.
- [27] 王晓玲, 吕睿, 王艳杰, 等. 基于 MODIS C6 产品研究湖北省气溶胶光学特性的时空分布[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(6): 1099-1106.
- Wang X L, Lü R, Wang Y J, *et al.* Seasonal variation and spatial distribution of columnar aerosol optical properties in collection 6 aerosol products derived from MODIS over Hubei Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(6): 1099-1106.
- [28] Kang N, Kumar K R, Hu K, *et al.* Long-term (2002-2014) evolution and trend in Collection 5.1 Level-2 aerosol products derived from the MODIS and MISR sensors over the Chinese Yangtze River Delta[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 29-43.
- [29] 梁铤, 吕林宜, 齐伊玲. 河南省大风与沙尘天气气候特征分析[A]. 见: 第32届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报[C]. 天津: 中国气象学会, 2015. 14-28.
- [30] 张宸赫, 赵天良, 王富, 等. 2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 476-484.
- Zhang C H, Zhao T L, Wang F, *et al.* Variations in aerosol optical depth over three northeastern provinces of China, in 2003-2014[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 476-484.
- [31] Li L Y, Chen Y, Xie S D. Spatio-temporal variation of biogenic volatile organic compounds emissions in China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **182**: 157-168.
- [32] 程良晓, 范萌, 陈良富, 等. 秋季秸秆焚烧对京津冀地区霾污染过程的影响分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 2801-2812.
- Cheng L X, Fan M, Chen L G, *et al.* Effects on the haze pollution from autumn crop residue burning over the Jing-Jin-Ji region[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 2801-2812.
- [33] 刘浩, 高小明, 谢志英, 等. 京津冀晋鲁区域气溶胶光学厚度的时空特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1506-1511.
- Liu H, Gao X M, Xie Z Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth over Beijing-Tianjin-Hebei-Shanxi-Shandong region during 2000-2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1506-1511.
- [34] 赵仕伟, 高晓清. 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2637-2646.
- Zhao S W, Gao X Q. Analysis of spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical depth over the northwest of China by MODIS C6 product[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2637-2646.
- [35] 王雁, 郭伟, 闫世明, 等. 山西省气溶胶光学厚度时空变化特征及气候效应分析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(5): 900-907.
- Wang Y, Guo W, Yan S M, *et al.* Analysis of spatio-temporal variation of aerosol optical depth and climatic effects in Shanxi Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(5): 900-907.
- [36] 河南省生态环境厅. 2011 年河南省环境质量年报[R]. 郑州: 河南省环境保护厅, 2012. 1-3.
- [37] 河南省环境保护厅. 河南省环境质量报告书(2018)[R]. 郑州: 河南省环境保护厅, 2019. 1-3.
- [38] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)