

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.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛蒲萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾璐杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型

刘莹¹, 林爱文^{1*}, 覃文敏², 何利杰¹, 李霄³

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074; 3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 为准确了解中国地区气溶胶光学特性, 通过 1990 ~ 2017 年的 MERRA2 数据集中的气溶胶光学厚度数据, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's slope 变化趋势分析法, 从不同的时空尺度和气溶胶类型上分析中国地区 AOD 值的时空变化特征。结果表明: ①从年际尺度上看, 1990 ~ 2017 年 AOD 年均值整体呈波动上升趋势; 从季节尺度上看, 月均值整体呈春夏秋冬依次递减, 冬季有所提升的趋势, 地形和气候环境是其主要影响因素。②在空间上, AOD 年均值呈现东南高西北低的特征, 西南部四川盆地、西北的塔里木与吐鲁番盆地等为 AOD 值的高值区, 青藏高原地区为 AOD 值的低值区, 同时 AOD 的 MK 值和 Sen's slope 值也呈现由东南向西北递减的趋势。③沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶影响分布具有明显的区域差异。与地形、气候变化以及人类活动强度有着密切联系。

关键词: 气溶胶光学厚度; 时空分布; 气溶胶类型; 变化趋势分析; 中国地区

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2572-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809220

Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017

LIU Ying¹, LIN Ai-wen^{1*}, QIN Wen-min², HE Li-jie¹, LI Xiao³

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 3. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to accurately understand the optical characteristics of aerosols in China, based on Mann-Kendall (MK) and Sen's slope trend analysis methods, the spatiotemporal variations of aerosol optical depth (AOD) derived from MERRA-2 reanalysis datasets were estimated in China for the period of 1990-2017. The results showed that ① for the interannual scale, there was a significant increasing trend in the annual mean AOD in China during 1990-2017. Besides, high aerosol loadings were observed in spring and summer, and the seasonal difference between the eastern and western regions was large. This was mainly due to the topographic and meteorological factors. ② At the spatial scale, the annual mean AOD values increased from the northwest to the southeast, with characteristically high AOD values occurring in Sichuan Pendi and the Tarim and Turpan basins and low values in the Qinghai-Xizang plateau region. Similarly, the AOD MK value and Sen's slope value showed significant decreasing trends from the southeast to the northwest, which was closely related to climate change and the human activity intensity. ③ In regard to black carbon aerosol, dust aerosol, organic carbon aerosol, sea salt aerosol, and SO₄ aerosol, dust and SO₄ aerosols were affected by the air humidity and human activity intensity, which have obvious regional differences in China.

Key words: aerosol optical depth; spatial-temporal distribution; aerosol type; trend analysis; China

精确地观测或反演气溶胶的光学特性, 是科学地认识和理解全球气候变化的基础。其中, 气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 是气溶胶光学特性的主要物理参数, 是表征气溶胶含量、大气浑浊度和大气污染状况的关键因子, AOD 值可以通过地基站点观测和卫星遥感等方式获得^[1]。地基观测是最为有效和准确的 AOD 数据获取方式, 目前全球各地已建立起了一系列的气溶胶光学特性观测网络, 例如 Aerosol Robotic Network (AERONET)^[2]、Aerosol Radiation Observation Network (Skynet)^[3]、Canadian Sun-Photometer Network (AEROCAN)^[4] 和中国气象局气溶胶观测网络 (CASNET)^[5] 等。地面

观测网络精度虽较高, 但受建设成本的影响, 地面观测站点空间分布极为稀疏, 难以生成高分辨率和大尺度的气溶胶光学特性产品; 相比之下, 卫星遥感可提供大尺度和实时连续的气溶胶观测数据, 弥补了地基观测的不足, 为大气环境研究提供了技术支持, 目前已有多种覆盖区域和全球的气溶胶遥感观测网络, 如搭载在 Terra 和 Aqua 卫星的中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging

收稿日期: 2018-09-29; 修订日期: 2018-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801172)

作者简介: 刘莹 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域建模和遥感应用, E-mail: liuying157@163.com

* 通信作者, E-mail: awlin@whu.edu.cn

Spectroradiometer), 基于 Nimbus 卫星的臭氧观测仪 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer); 还有搭载在 Aura 卫星的 OMI 传感器以及搭载在 Terra 卫星的 MISR 传感器等对 AOD 进行观测和反演。

改革开放以来, 中国的工业化和城市化进程不断加快, 人口数量剧增, 能源的消费量和排放量日益增加^[6], 空气中的气溶胶粒子含量不断增加, 气溶胶光学厚度不断上升, 中国地区已成为引起全球气溶胶辐射强迫效应和气候效应的不确定性的主要区域之一。国内外诸多学者对该区域气溶胶光学厚度的时空分布和变化进行了大量科学研究。薛文博等^[7]和 Luo 等^[8]采用 MODIS 大气气溶胶光学厚度资料来分析中国 10 a (2000~2010 年) 的 AOD 值, 其空间分布中心大体呈现两低两高格局。郑小波等^[9]和千家乐等^[10]则以胡焕庸线为界, 发现两侧 AOD 值东高西低的特点。罗云峰等^[11,12]基于逐日太阳辐射和日照时数观测数据, 反演了全国 47 个站点的 1960~1990 年的气溶胶光学厚度的时空分布特征。Zhang 等^[13]应用一种新方法 KM-Elterman, 研究推断 AOD 可用于探索气溶胶对气候变化和地球辐射预算的影响。此外, 中国幅员辽阔, 地区差异较大, 诸多学者从不同时空尺度分析了中国各地区的气溶胶光学厚度的时空分布特征, 主要有北方地区^[14,15]、东北地区^[16]、华北地区^[17~20]、东部地区^[21,22]、西北地区^[23,24]和西南地区^[25,26]等。

综上, 国内外学者对中国各地区 AOD 时空分布的研究取得了一定成果, 但相对于中国尺度范围的研究, 在时间序列及所采用数据上都有其不足。本研究通过分析卫星遥感观测数据, 围绕 1990 年以来中国地区 20 多年间气溶胶光学厚度变化, 从时间尺度和空间尺度上对中国地区不同地形区和气候区进行连续的趋势观测分析, 并讨论了不同类型气溶胶的时空分布, 更加准确了解中国地区气溶胶光学特性, 揭示 1990~2017 年 20 多年间 AOD 空间格局变化, 提高未来气候变化预测可信度, 以期应对全球气候变化的决策提出合理依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国地区幅员辽阔, 地势西高东低, 地形复杂多样, 其中山区面积广大, 经纬度范围大致为: $17^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$, $73^{\circ} \sim 136^{\circ} \text{E}$ 。基于中国气象局所提供的 839 个台站的日平均气温、相对湿度、平均气压和日照时长, 分析了中国大陆地区的气候特征。中国各地区的平均气温约为 $-4.78 \sim 24.99^{\circ}\text{C}$; 相对湿

度约为 $29.73\% \sim 87.01\%$; 平均气压约为 $562.30 \sim 1048.70 \text{ hPa}$; 日照时长约为 $2.42 \sim 9.69 \text{ h}$ 。由于跨越的纬度范围较大, 各地区接收的总热量不一, 同时受到海拔高度、太阳高度角、云量、地势等的影响, 中国地区的平均气温、平均气压、相对湿度、日照时长都呈现由东南向西北的显著变化。

1.2 数据来源

1.2.1 气溶胶光学厚度数据

MERRA2 (The Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) 数据集是由 NASA 戈达德地球科学数据和信息服务中心 (GESDISC, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) 在融合多种气象观测资料和卫星数据基础上, 所生成的同化数据集。该数据集涵盖了气温、降水、风速、气压、湿度、地表反照率和地表反射率等多种自然地理特性数据, 本研究将提取该数据集中国地区 1990~2017 年的气溶胶光学厚度数据集进行分析研究。MERRA2 数据的原始分辨率为 $0.5^{\circ}(\text{纬度}) \times 0.625^{\circ}(\text{经度})$, 时间分辨率为每日, 主要使用参数包括气溶胶光学厚度 (AOD, 550 nm)、沙尘气溶胶 (DUAOD, 550 nm)、黑炭气溶胶 (BCAOD, 550 nm)、有机碳气溶胶 (OCAOD, 550 nm)、海盐气溶胶 (SSAOD, 550 nm)、硫酸盐气溶胶 (SO_4AOD , 550 nm)。

1.2.2 生态地理分区数据

中国地区之间的气候特征和地形特征差异极大。为分析中国地区气溶胶光学厚度的气候学特征, 本研究引入了中国科学院资源与环境科学数据中心所提供的生态地理分区数据 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=125>)。该数据集按温度、湿度和地形等自然地理特征将中国地区划分为了多个温度带、干湿区和地形区, 具体分类体系可参考中国科学院资源与环境科学中心所提供的说明文档 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=125>)。图 1 和图 2 分别为中国的干湿区分布、温度带分布和地形区分区。

1.3 研究方法

为定量分析气溶胶光学厚度时空变化趋势及其显著性, 本文选用了 Man-Kendall 趋势检验方法和 Sen's slope 变化趋势分析方法来分别分析时间序列数据的变化趋势的显著性和变化程度。

1.3.1 Man-Kendall 趋势检验方法

Man-Kendall 趋势检验方法是一种使用较为广泛的非参数统计检验方法, 用以检验时间序列数据的变化趋势。该方法的原假设 H_0 为时间序列数据, 由 n 个独立的随机变量样本组成; 备择假设为时间

序列数据单调递增或递减的趋势. 该检验方法通过统计原假设和备择假设正偏差的总次数来判断变化趋势的显著程度. 首先, 定义检验统计量 S :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中, sign 为函数符号. 当 $x_j > x_i$ 时 $\text{sign}(x_j - x_i)$ 为 1, 当 $x_j < x_i$ 时 $\text{sign}(x_j - x_i)$ 为 -1, 当 $x_j = x_i$ 时 $\text{sign}(x_j - x_i)$ 为 0; 当 S 为正数时表征上升的趋势, 负数表征下降的趋势, 零值表征无波动. 检验统计量 S 的方差 $\text{VAR}(S)$ 可通过以下公式来计算:

$$\text{VAR}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{o=1}^m t_o(t_o-1)(2t_o+5) \right] / 18 \quad (2)$$

式中, m 为数据序列, t_o 为 p 组数据点的数目. 进一步可计算标准正态分布检验量 Z , 用以评估趋势的显著性. 具体公式如下:

$$\begin{cases} Z = (S+1)/\sqrt{\text{VAR}(S)}, & S > 0 \\ Z = 0, & S = 0 \\ Z = (S-1)/\sqrt{\text{VAR}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $Z > 0$ 时表示存在增加趋势, $Z < 0$ 时表示存在减少趋势. Z 的绝对值在大于等于 1.96 和 2.58 时表示分别通过了信度 95% 和 99% 显著性检验.

1.3.2 Sen's slope 变化趋势分析方法

Sen's slope 趋势分析法用于分析估算时间序列数据的变化趋势度, 具体可用下列公式计算:

$$Q_{\text{med}} = \begin{cases} Q_{[(W+1)/2]}, & \text{如果 } W \text{ 为奇数} \\ \frac{Q_{(W/2)} + Q_{[(W+2)/2]}}{2}, & \text{如果 } W \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (4)$$

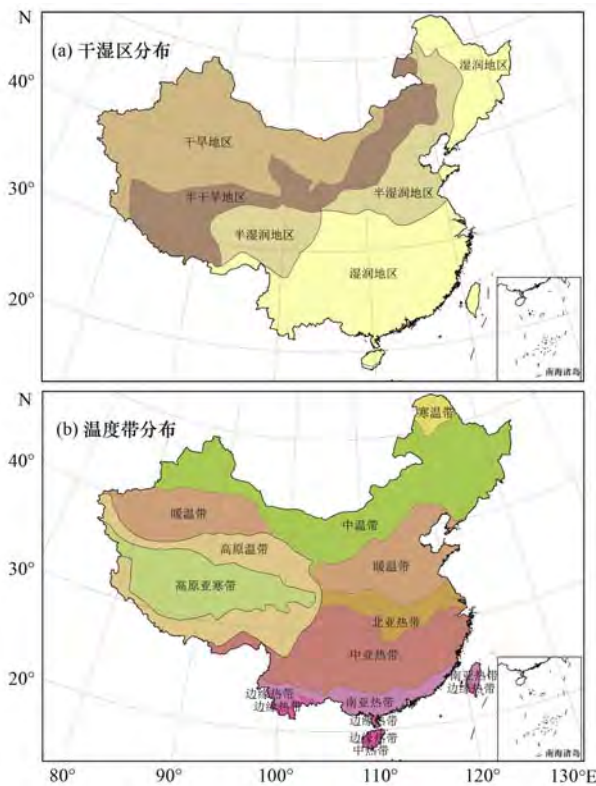


图 1 中国地区干湿区和温度带分布示意
Fig. 1 Distribution of wet and dry zones and temperature zones in China



图 2 中国地区地形区分布
Fig. 2 Distribution of the terrain area in China

式中, Q 值的计算公式为:

$$Q_i = \frac{x_p - x_q}{p - q}, \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

式中, x_p 和 x_q 分别为数据在 p 时刻和 q 时刻的值 ($p > q$). 当只有一组时间序列时, $N = n(n-1)/2$; 当存在多组时间序列时, $N < n(n-1)/2$.

2 结果与分析

2.1 气溶胶光学厚度年际时空变化

图 3 为 1990~2017 年间中国地区气溶胶光学厚度的年平均变化曲线以及距平。可以看出, 气溶胶光学厚度整体上呈波动上升的趋势, 这与中国改革开放以来经济的飞速发展、城市迅速扩张、人口数量激增和工业污染加剧的历程有着密切的联系。1990 年初气溶胶光学厚度值剧烈上升, 主要是由于 1991 年 6 月, 东南亚菲律宾的皮纳图博火山剧烈喷发^[27~29], 向亚洲地区的大气中释放了大量的烟雾和火山灰, 造成了中国全境空气中的气溶胶粒子浓度剧烈上升, AOD 值从 1990 年的 0.196 上升到了历史最高值 0.342。1992~1995 年, 空气中的气溶胶粒子逐渐消散, AOD 值从 0.342 降到了 0.193。1996~1999 年, 中国地区的气溶胶光学厚度值较为平稳, 保持在 0.198~0.212 之间。进入 21 世纪, 经济发展开始提速, 人类活动强度增强, 人为气溶胶排放量剧烈上升, 2000~2008 年中国地区的 AOD 值迅速波动增加, AOD 值从 0.227 上升

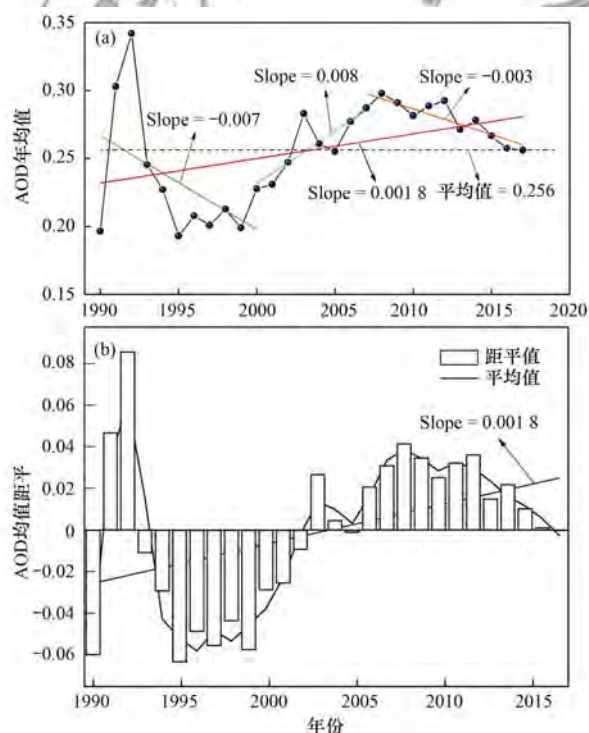


图 3 1990~2017 年 AOD 年际变化和距平

Fig. 3 Interannual variation and spacing of AOD in 1990-2017

到了 0.297; 在 2007 年中国共产党“十七大”把“生态文明”作为一项战略任务首次明确下来之后, 人为气溶胶排放量得到了一定的控制^[30], 因此 2008~2017 年 AOD 值呈现出平稳下降的趋势, 从 2008 年的 0.297 下降到了 2017 年的 0.256。但总体上, 中国地区气溶胶光学厚度值的 slope 值为正, 呈波动上升。

2.2 气溶胶光学厚度空间分布变化

图 4 为 1990~2017 年间中国地区 AOD 年均值空间分布特征, 可以看出: AOD 年均值总体分布上中东部和西北部较高, 东北部和西南部较低。结合图 5 中不同地形区的 AOD 空间分布可以看出, 四川盆地是 AOD 的最高值分布区, 年平均值达到了 0.536, 这与该区域气候湿润且盆地地形不易气溶胶粒子扩散密切相关, 另一方面该区域人口较为密集、经济发达, 人为气溶胶排放量较大; 华北地区人口集中, 工业产业分布较为密集, 且耕地面积大, 农民季节性焚烧秸秆较多, 导致人为气溶胶排放量大, 因而该区域 AOD 值较高 (0.509); 江南地区也是高值区 (0.450), 主要由于其湖泊众多, 水系发达, 暖湿气候带来的云雾天气有利于气溶胶在空气中集聚, 同时该区域人类活动强度也较大; 西北地区的塔里木与吐鲁番盆地内部为世界第二大流动沙漠塔克拉玛干沙漠, 常年多风沙天气, 空气中的沙尘气溶胶粒子极为丰富, 而且盆地地形不易该地的沙尘气溶胶粒子的扩散, 因而该区域的 AOD 值也较高 (0.310)。而在东北地区的大小兴安岭附近, 植被覆盖率高, 人类活动强度小; 青藏高原地区空气稀薄, 气候干旱, 人烟稀少, 不利于气溶胶粒子的形成和集聚, 因而在东北地区和青藏高原地区形成了 AOD 值的低值区 (0.077)。

图 6 分别展示了 1990~2017 年间 AOD 平均值在不同的温度带和干湿区的空间分布特征。从图中

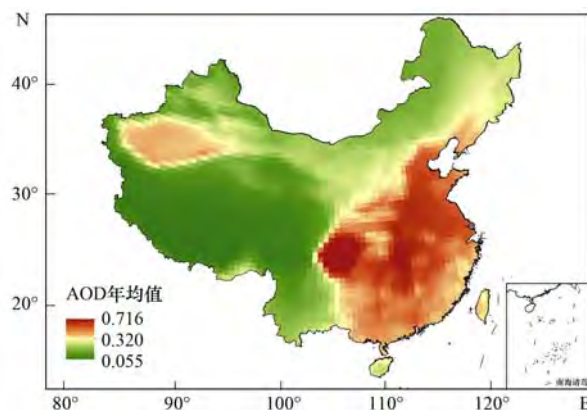


图 4 1990~2017 年 AOD 年均值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the average annual value of AOD in 1990-2017

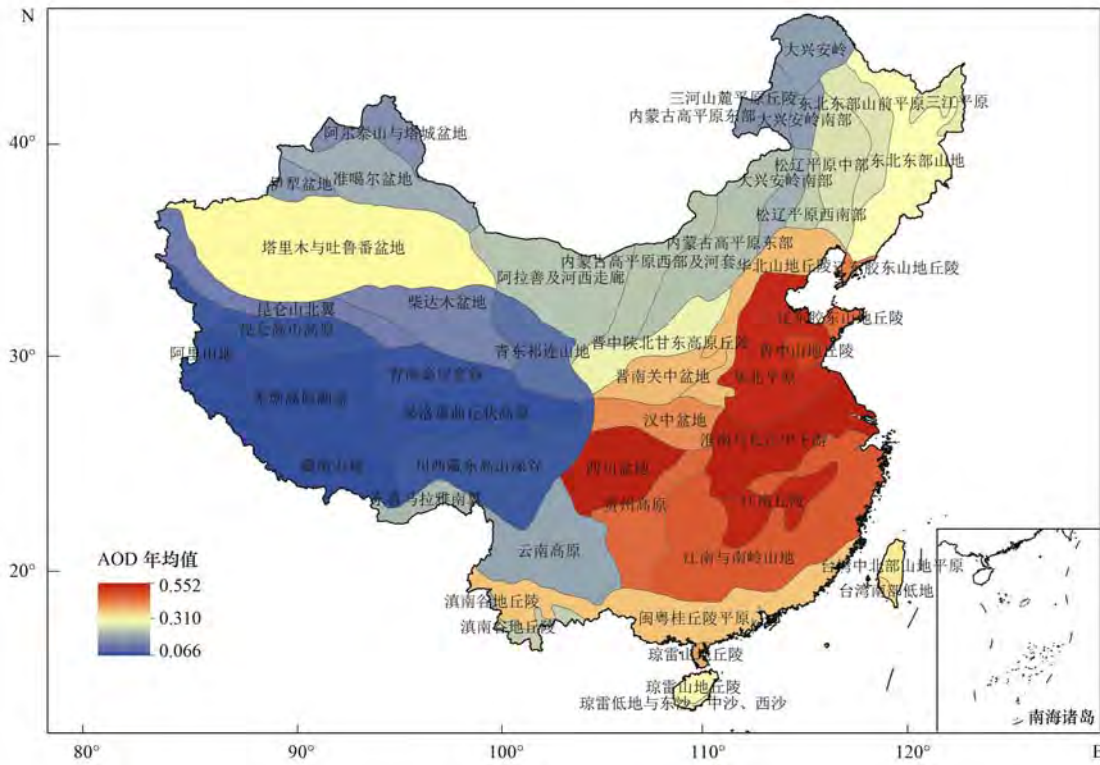


图 5 1990 ~ 2017 年不同地形区的 AOD 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of AOD in different terrain areas during 1990-2017

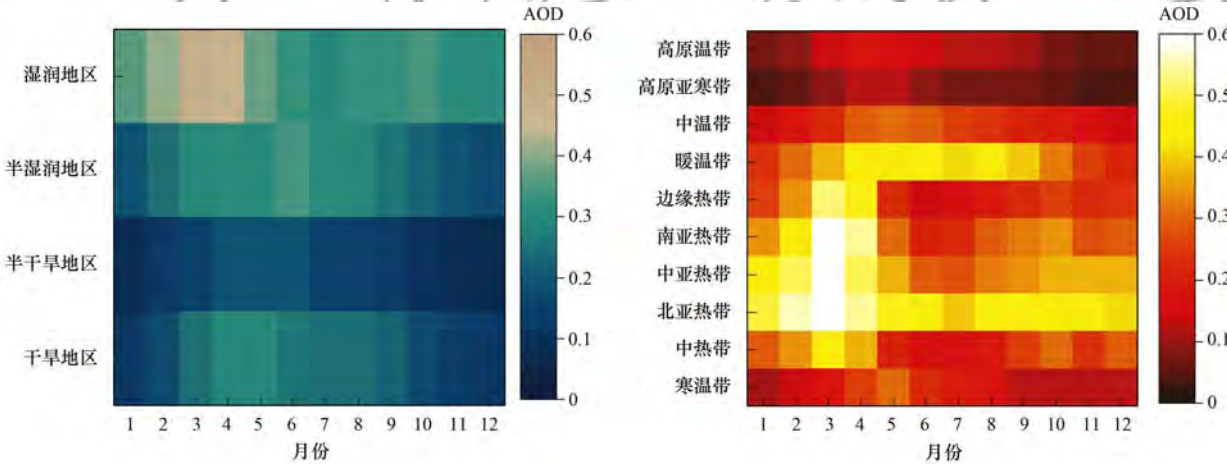


图 6 1990 ~ 2017 年不同干湿区和温度带的 AOD 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of AOD in different dry and wet zones and temperature zones in 1990-2017

可以看出, 暖湿地区更易于气溶胶粒子的形成和集聚, AOD 年均值更高, 例如北亚热带湿润地区 (0.483)、暖温带半湿润地区 (0.359) 和中亚热带湿润地区 (0.404) 等; 而高寒气候区的稀薄空气及干旱气候特征则不利于气溶胶粒子的形成, 是 AOD 年均值的低值分布区, 例如高原温带干旱地区 (0.109)、高原温带半干旱地区 (0.126)、高原亚寒带干旱地区 (0.076) 等。

2.3 气溶胶光学厚度趋势突变检验

基于重建的 1990 ~ 2017 年的中国地区 AOD 值的历史数据, 本文拟合出了研究区内的 MK 指数和 Sen's slope 指数, 用以分别表征 AOD 值在 1990 ~

2017 年的变化趋势显著性 (上升或者下降) 和变化趋势大小 (幅度)。

图 7 分别展示了中国地区 AOD 值的 MK 值、Sen's slope 值的空间分布规律。其中结果显示: AOD 值的 MK 和 Sen slope 值呈现出明显的由东南向西北递减的趋势。东南部及华北平原地区的 AOD 值呈显著地持续上升趋势, 这主要由于经济持续发展, 人为气溶胶排放量不断增加所导致。而西部地区 AOD 值呈不连续下降趋势, 例如西北地区的塔里木盆地附近地区 MK 和 Sen's slope 值明显高于周边地区, 主要由于该地区常年多风沙天气, 沙尘气溶胶粒子极为丰富, 且受季节变化影响较大^[31]; 而

在青藏高原地区人口稀少, 东北地区 and 新疆北部由于植被茂盛, 人类活动强度低, AOD 值都呈现出了明显的下降趋势. 这个结果也很好地检验了之前研究发现的 AOD 值在空间分布上的变化.

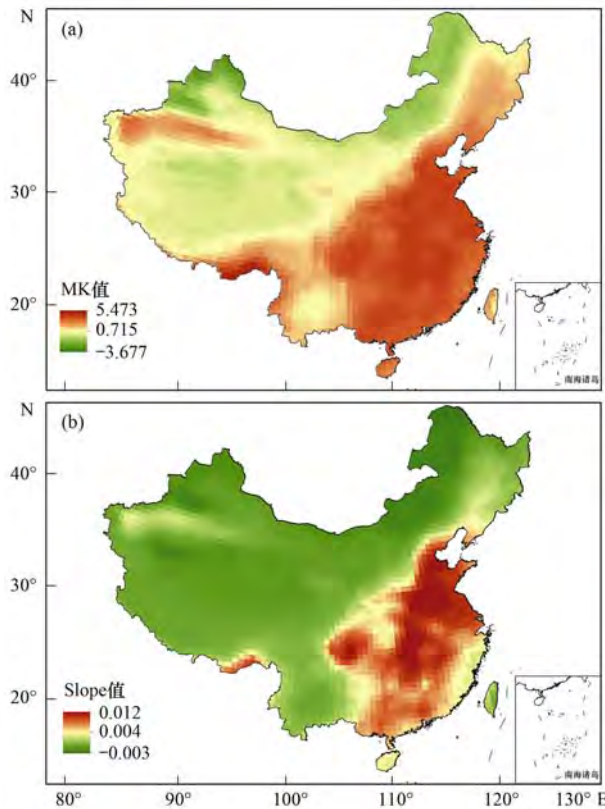


图7 1990~2017 年中国地区 AOD 的 MK 值和 Sen's slope 值分布

Fig. 7 MK value and Sen's slope value distribution of AOD in various regions of China during 1990-2017

2.4 气溶胶光学厚度季节分布特征

图 8 显示了中国地区 1990~2017 年的 AOD 值季节分布特征, 可以看出 AOD 值整体上呈现了春夏秋依次递减, 冬季再次升高的趋势. 其中, 春季 (3~5 月) 在东部地区的 AOD 月均值明显高于其他各月份 (0.300~0.345), 主要由于春季 3、4 月北方地区频繁的沙尘暴天气^[5, 31], 有利于气溶胶粒子的形成, 而在东南部春种开始, 人为的秸秆燃烧等也导致 AOD 值较高^[10]. 夏季中国各地区的降雨量增多, 稀释了空气中的气溶胶粒子, 降低了 AOD 值, 但在华北平原尤其是京津冀地区, 相比于其他季节 AOD 值偏高^[32], 主要由于夏季人类活动增强, 夏末小麦主产区的农作物秸秆燃烧所导致的^[33], 因此夏季各区域的 AOD 值仍较高 (0.243~0.276). 秋季, 气温降低, 降水量减少, 空气干燥, 中国地区整体的 AOD 值开始降低 (0.197~0.217). 冬季的 1、2 月, 由于北方取暖而产生的燃煤排放以及不利的气象扩散条件造成 AOD 值有所

上升^[5]. 另外四川盆地由于秋冬季节大雾等天气原因, AOD 值一直保持较高浓度.

地形和气候环境条件作为影响气溶胶光学厚度的主要因素之一, 在中国东西部地区的不同地形区和气候区呈现出了较大的季节分布差异, 整体上呈现出东南部和西北部较高, 东北部和西南部较低. 图 8 中可以看出, 东部和南部的平原及丘陵地区一直是 AOD 高值区, 这主要与该区域较强的人类活动强度以及较高的工业发展水平有关^[7]. 例如, 淮南与长江中下游平原 (0.530)、江南丘陵 (0.515) 和华北平原地区 (0.509) 等皆为 AOD 的高值区, 其中四川盆地受地形的影响, 气溶胶粒子不易扩散, 且该区域人口较为密集, 人为气溶胶排放量大, 因而四川盆地一年都是 AOD 的最高值分布区 (0.553), 1~12 月每月的气溶胶光学厚度月均值分别为 0.658、0.703、0.710、0.609、0.493、0.397、0.391、0.439、0.476、0.552、0.605 和 0.600. 西北地区气候干旱, AOD 值相对较低, 例如昆仑山北翼 (0.133)、柴达木盆地 (0.142)、阿尔泰山与塔城盆地 (0.158) 都是气溶胶光学厚度低值区. 青藏高原地区空气稀薄, 不易于气溶胶的形成和集聚, 例如羌塘高原湖盆 (0.066)、藏南山地 (0.072)、阿里山地 (0.738) 都是气溶胶光学厚度低值区. 但是夏季在西北干旱地区, 由于近地面的强沙尘天气造成了 AOD 值较高的现象.

3 讨论

根据来源不同, 气溶胶可分为沙尘型、污染型、海洋型等不同类型, 各类型的气溶胶光学特性相差很大, 研究不同类型气溶胶的时空分布特征, 对于天气预报、环境污染、交通运输等领域有着重要的意义. 本文通过选取黑炭气溶胶 [图 9(a)]、沙尘气溶胶 [图 9(b)]、有机碳气溶胶 [图 9(c)]、海盐气溶胶 [图 9(d)] 和硫酸盐气溶胶 [图 9(e)] 这 5 种不同类型的气溶胶, 通过计算 5 类气溶胶在 1990~2017 年的年均值, 以及不同时间间隔下的该类气溶胶 AOD 年均值, 讨论其在空间中的分布规律, 如图 9.

图 9 所示为五类气溶胶 1990~2017 年年均值的分布情况, 从中可以看出, 黑炭、有机碳和海盐这 3 类气溶胶的排放相对较少, 对区域有一定的影响但是不明显; 而沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶的影响较大, 其中明显看出硫酸盐气溶胶是主要的影响因素, 尤其对于中国的东部地区, 硫酸盐气溶胶排放量较大, 主要来自于二氧化硫转化过程与颗粒物中水相的氧化转化过程^[34], 工业生产过程中的水相

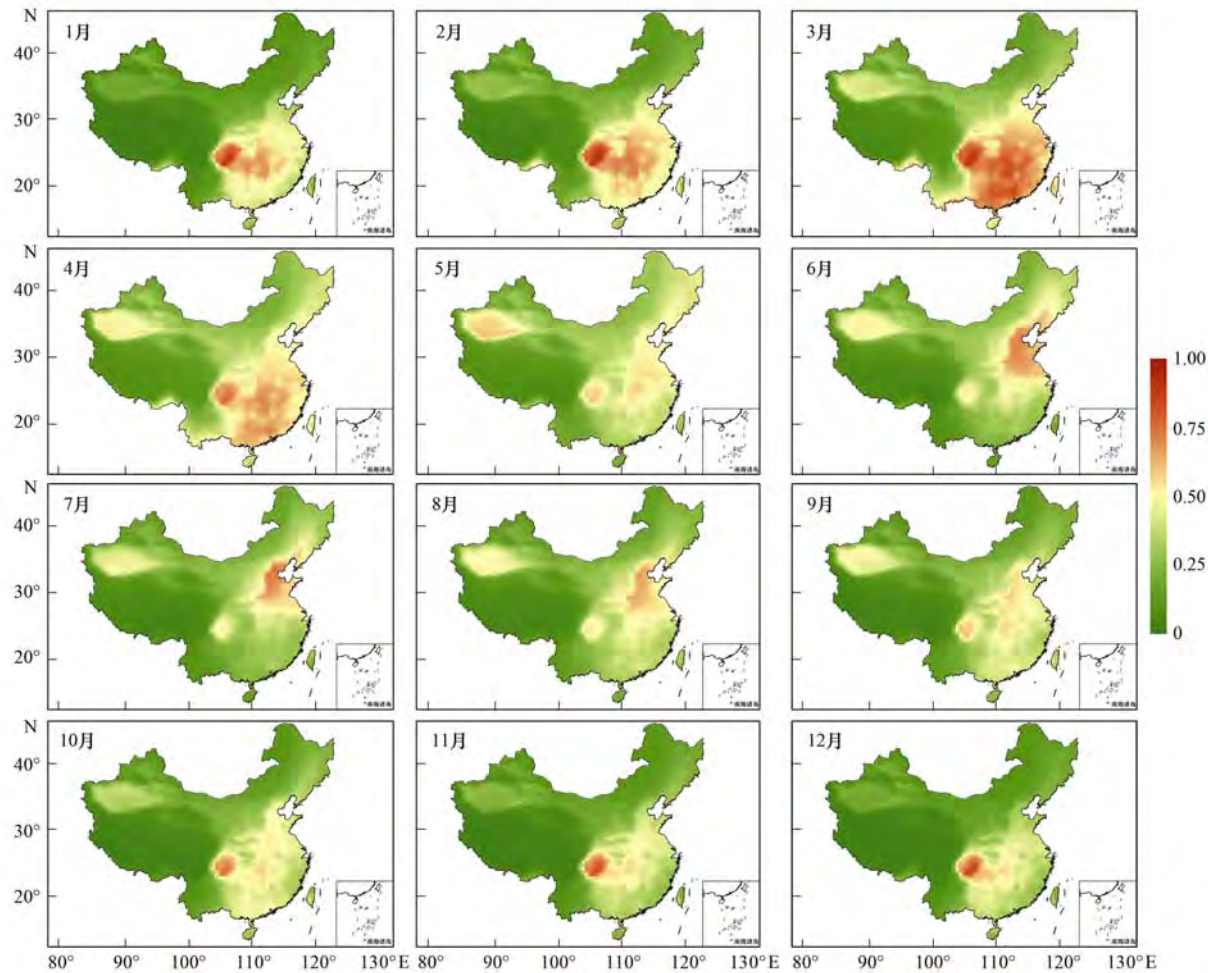


图 8 中国地区 AOD 月均值变化

Fig. 8 Variation of the monthly average value of AOD in various regions of China

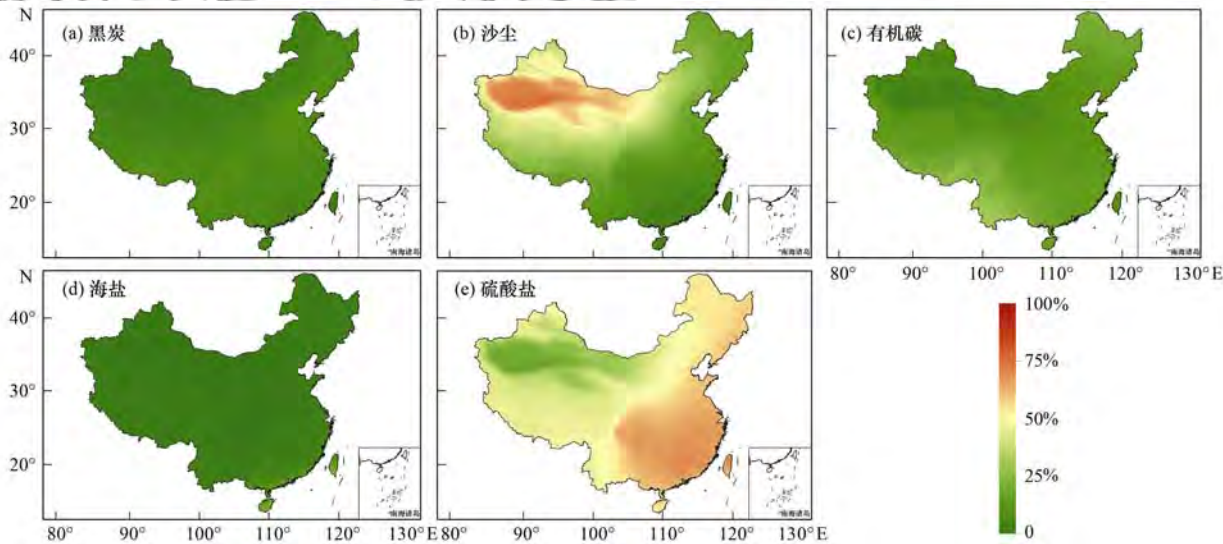


图 9 不同种类气溶胶年均值分布

Fig. 9 Annual mean AOD over mainland China

生大量的二氧化硫,因此这与经济的发展密不可分;沙尘气溶胶的形成很大程度上来自西北地区的塔克拉玛干沙漠,由于沙尘暴天气频发所造成^[10].近几年由于气候变化、植被破坏等生态环境变化,风沙天气逐渐增多,沙尘气溶胶对中国的北方地区

影响也在逐年增大.

另外,以1990、2000、2005、2010和2017年为节点,计算5类气溶胶在该年份的均值(图10),结果与图9类似,可以看出,海盐气溶胶对中国地区的影响一直很小,而黑炭、有机碳类型的碳质气溶

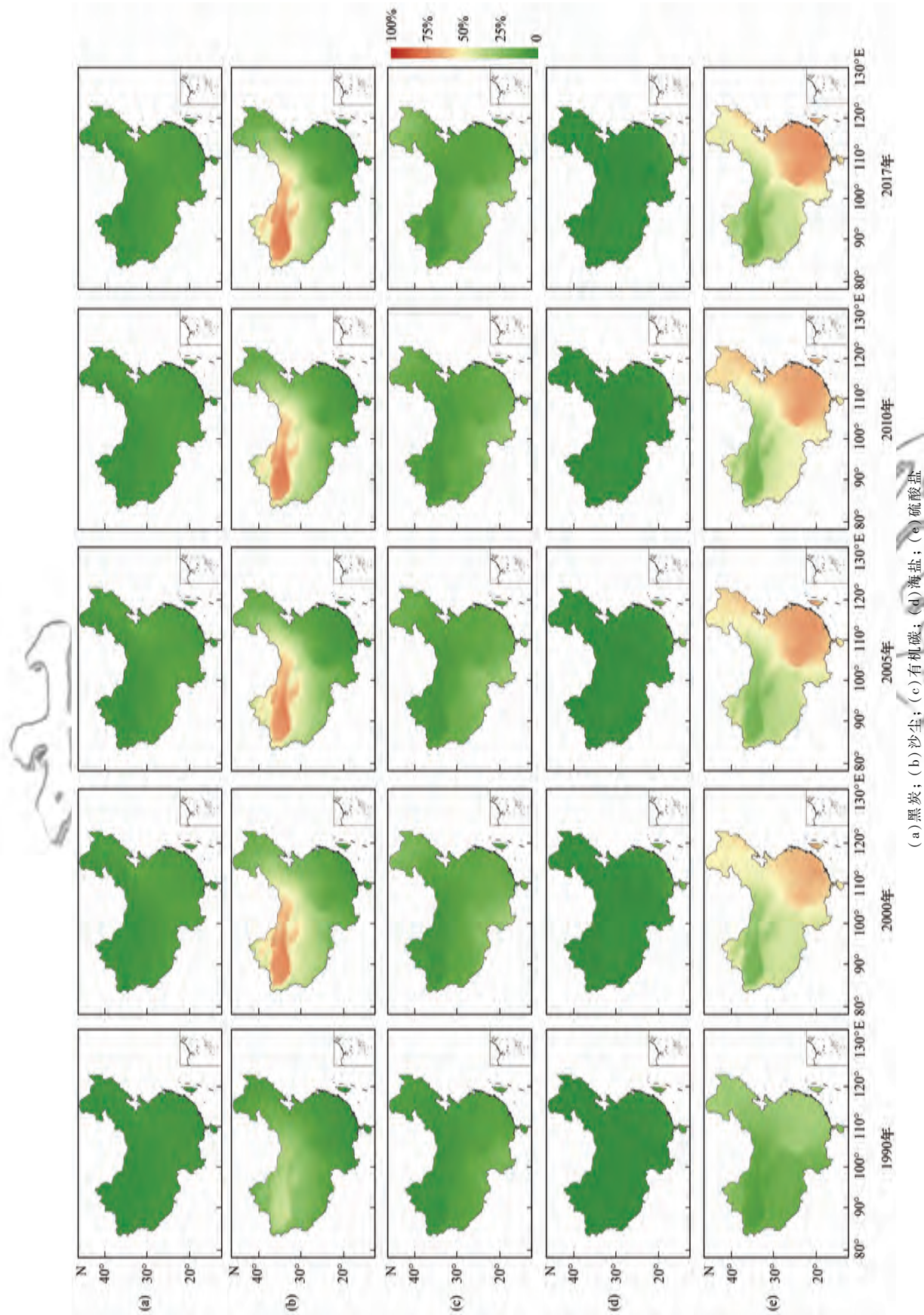


图 10 中国地区 1990、2000、2005、2010 和 2017 年不同气溶胶的分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of different aerosols in 1990, 2000, 2005, 2010, and 2017 in various regions of China

胶的形成主要来自于燃料的不完全燃烧,但其对紫外波长到红外波长范围内光线具有强吸收作用,因此在气溶胶含量中所占比例较小^[35]. 2000 年以后,沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶对中国地区的影响明显增加. 其中沙尘气溶胶的影响范围主要集中在干旱的西北地区^[31],干旱地区更容易产生大量的沙尘气溶胶,并且影响在不断加深,可能与该区域植被覆盖率下降,生态环境恶化有关;而硫酸盐气溶胶的影响范围主要集中在东部地区以及西南湿润地区,随着经济发展,人为气溶胶排放量不断增多,影响强度也在不断加深.

上述讨论可以得出,沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶对中国地区气溶胶光学厚度分布有主要驱动作用,两类气溶胶受空气湿度和人类活动强度影响,具有明显的区域分布特征. 在之后的研究中可对这两类气溶胶的影响因素做进一步分析,探究其影响发展规律.

4 结论

(1) 从年际尺度上看,研究区 27 年间的平均 AOD 值整体上呈波动上升的趋势,在空间分布上呈现明显的空间异质性,总体呈现东南高西北低的特征. 四川盆地、江南地区、西北的塔里木与吐鲁番盆地 AOD 值的高值区;青藏高原地区为 AOD 值的低值区. 同时 AOD 值与温度和湿度有明显的正相关性,暖湿地区的 AOD 值年均值更高,而在高寒气候区和干旱地区则是 AOD 值的低值分布区.

(2) 从季节尺度上看, AOD 的月均值整体呈现了春夏秋依次递减趋势. 春季受沙尘天气影响 AOD 值最高,夏季人类活动强度大, AOD 值仍较高,秋冬季节气温降低空气干燥, AOD 值逐渐降低. 同时,地形和气候也对季节分布有较大影响.

(3) AOD 值变化趋势呈现明显的东南向西北递减趋势,与 AOD 值的高低值中心分布大致相似,其中东部以及中部平原高值区的 AOD 值上升趋势明显,而西北、东北地区呈明显的下降趋势. 这说明经济的快速发展下人类活动对 AOD 值有着显著影响.

(4) 黑炭、有机碳和海盐这 3 类 AOD 值在中国地区的排放相对较少,对区域有一定的影响但是不明显,沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶是主要影响因素,它们受空气湿度和人类活动强度影响,具有明显的区域分布特征.

参考文献:

[1] Xue Y, He X W, de Leeuw G, *et al.* Long-time series aerosol optical depth retrieval from AVHRR data over land in north China and central Europe[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,

198: 471-489.

- [2] He L J, Wang L C, Lin A W, *et al.* Performance of the NPP-VIIRS and Aqua-MODIS aerosol optical depth products over the Yangtze River Basin [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10** (1): 117.
- [3] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. *气象科学*, 2006, **26**(1): 110-117.
- Yan H, Jiao M Y, Bi B G, *et al.* Advances in aerosol observation network and corresponding science plan[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006, **26**(1): 110-117.
- [4] Freemantle J, O'Neill N, Royer A, *et al.* AEROCAN: The Canadian sunphotometer network [A]. *Proceedings of the 2005 IEEE Workshop on Remote Sensing of Atmospheric Aerosols* [C]. Tucson, AZ, USA: IEEE, 2005. 32-35.
- [5] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, *et al.* Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China aerosol remote sensing network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D3): D03206.
- [6] Xu X F, Qiu J H, Xia X G, *et al.* Characteristics of atmospheric aerosol optical depth variation in China during 1993-2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **119**: 82-94.
- [7] 薛文博, 武卫玲, 王金南, 等. 中国气溶胶光学厚度时空演变特征分析[J]. *环境与可持续发展*, 2013, **38**(4): 17-20.
- Xue W B, Wu W L, Wang J N, *et al.* Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of aerosol optical thickness in China [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2013, **38** (4): 17-20.
- [8] Luo Y X, Zheng X B, Zhao T L, *et al.* A climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, **34** (3): 863-870.
- [9] 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, Lou 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.
- [10] 千家乐, 刘朝顺. 胡焕庸线两侧气溶胶光学厚度时空分布特征及其与土地利用响应的研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 752-760.
- Qian J L, Liu C S. Distributions and changes of aerosol optical depth on both sides of HU Huanyong Line and the response to land use and land cover [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 752-760.
- [11] 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.
- [12] 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, Li W L, *et al.* Characteristics of atmospheric aerosol optical depth variation over China in recent 30 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(14): 1328-1334.
- [13] Zhang Z Y, Wu W L, Wei J, *et al.* Aerosol optical depth retrieval from visibility in China during 1973-2014 [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **171**: 38-48.
- [14] Li S S, Chen L F, Tao J H, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth over bright targets in the urban areas of north China during

- winter[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, **55**(9): 1545-1553.
- [15] 齐玉磊, 葛颀铭, 黄建平. 北方地区 MODIS 和 MISR 与 AERONET 气溶胶光学厚度的比较及其时空分布分析[J]. *科学通报*, 2013, **58**(17): 1670-1679.
- Qi Y L, Ge J M, Huang J P. Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(20): 2479-2506.
- [16] 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.
- [17] 李龙, 施润和, 张璐, 等. 华东地区 MODIS 与 OMI 气溶胶光学厚度数据融合[J]. *地球信息科学学报*, 2015, **17**(10): 1224-1233.
- Li L, Shi R H, Zhang L, *et al.* Data fusion of MODIS AOD and OMI AOD over east China using universal kriging[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, **17**(10): 1224-1233.
- [18] 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.
- [19] Wang H, Yang L K, Deng A J, *et al.* Remote sensing of aerosol optical depth using an airborne polarimeter over north China[J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(10): 979.
- [20] Qie L L, Li Z Q, Sun X B, *et al.* Improving remote sensing of aerosol optical depth over land by polarimetric measurements at 1640 nm: Airborne test in north China[J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(5): 6240-6256.
- [21] 李嘉伟, 韩志伟. 中国东部气溶胶光学厚度季节变化的数值模拟[J]. *遥感学报*, 2016, **20**(2): 205-215.
- Li J W, Han Z W. Numerical simulation of the seasonal variation of aerosol optical depth over eastern China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(2): 205-215.
- [22] Lin J T, van Donkelaar A, Xin J Y, *et al.* Clear-sky aerosol optical depth over east China estimated from visibility measurements and chemical transport modeling[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **95**: 258-267.
- [23] Di A J, Xue Y, Yang X H, *et al.* Dust aerosol optical depth retrieval and dust storm detection for Xinjiang Region using Indian national satellite observations [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(9): 702.
- [24] 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 等. 基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3563-3570.
- Hu J, Kang Y M, Chen Y H, *et al.* Analysis of aerosol optical depth variation characteristics for 10 years in Urumqi based on MODIS_C006 [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3563-3570.
- [25] 张天宇, 王勇, 程炳岩. 1961—2013 年四川盆地气溶胶光学厚度的长期变化及与气温的联系[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 793-802.
- Zhang T Y, Wang Y, Cheng B Y. Long-term variation of aerosol optical depth over Sichuan Basin of China during 1961—2013 and its relationship with temperature [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 793-802.
- [26] Liu X Y, Chen Q L, Che H Z, *et al.* Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth in the Sichuan basin, China, the recent ten years [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **147**: 434-445.
- [27] Toohy M, Sigl M. Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE [J]. *Earth System Science Data*, 2017, **9**(2): 809-831.
- [28] Skouratov S. Influence of the Pinatubo eruption on the aerosol optical depth in the Arctic in the summer of 1993 [J]. *Atmospheric Research*, 1997, **44**(1-2): 125-132.
- [29] Langmann B. On the role of climate forcing by Volcanic Sulphate and Volcanic Ash[J]. *Advances in Meteorology*, 2014, **2014**: 340123.
- [30] He L J, Wang L C, Lin A W, *et al.* What drives changes in aerosol properties over the Yangtze River Basin in past four decades? [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **190**: 269-283.
- [31] 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.
- [32] 纪晓璐, 康丽妹. 京津冀辽鲁地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2017, **32**(1): 118-123.
- Ji X L, Lian L S. Temporal and spatial variation characteristics of aerosol in the circum-bohai-sea region[J]. *Journal of Shandong Normal University(Natural Science)*, 2017, **32**(1): 118-123.
- [33] Xia X, Che H, Zhu J, *et al.* Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: Aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 243-251.
- [34] 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 等. 长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5308-5314.
- Huang D D, Zhou M, Yu C G, *et al.* Physiochemical properties of the aerosol particles and their impacts on secondary aerosol formation at the background site of the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5308-5314.
- [35] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1-15.
- Mou Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in PM_{2.5} in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1-15.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)