

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪林, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征

胡俊¹, 亢燕铭¹, 陈勇航^{1, 2*}, 刘鑫¹, 李霞², 刘琼¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用 2006~2015 年美国 NASA 地球观测系统(EOS)中分辨成像仪 MODIS Level 2 10 km 分辨率产品 MYD04_L2_C006 数据, 分析乌鲁木齐市存在轻度以上(包括轻度)大气污染状况下的 10 年气溶胶光学厚度变化特征。结果表明, 乌鲁木齐市 10 年平均 AOD 年内呈单峰分布, AOD 从 1~4 月逐渐增大, 4 月达全年峰值, 为 0.37 ± 0.19 , 10 月达到最低值, 为 0.22 ± 0.20 ; 受春季沙尘天气频发影响, AOD 季节变化特征表现为春季最大, 城区大气污染状况严重, 夏季、冬季次之, 秋季最小, 且乌鲁木齐市市区大气污染状况较郊区严重; 10 年 AOD 均值为 0.293; 2006 年出现 AOD 年均最高值为 0.33, 最低值出现在 2008 年, 为 0.24, 较 2007 年单年降幅达 23.3%。乌鲁木齐市 10 年 AOD 年际变化呈上升趋势, 且低值点与高值点较以往研究均有不同程度增幅, 虽然 2015 年出现减弱势头, 乌鲁木齐市近 10 年的大气污染状况仍较严重, 仍需加强控制。

关键词: MODIS_C006; 气溶胶光学厚度; 乌鲁木齐; 时空分布; 年际变化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3563-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201710125

Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006

HU Jun¹, KANG Yan-ming¹, CHEN Yong-hang^{1, 2*}, LIU Xin¹, LI Xia², LIU Qiong¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on the MYD04_L2_C006 dataset gained from Moderate resolution imaging spectroradiometer MODIS Level-2 at 10 km resolution of NASA's EOS (Earth Observing System) from 2006 to 2015, the aerosol optical depths (AODs) for 10 years under the condition of mild above-atmospheric pollution (including mild) were analyzed for Urumqi City. The results showed that the average AODs in Urumqi were unimodally distribution over the 10 years. From January to April, the AODs gradually increased. During a year, the annual peak of 0.37 ± 0.19 was in April, and the lowest value of 0.22 ± 0.20 was in October. Owing to the frequent occurrence of dust weather conditions in spring, the largest seasonal variation of AOD was in spring, as the air pollution in the entire area was very serious, followed by summer and winter, with the smallest in autumn. In addition, the urban area was the high AOD value area in Urumqi, as its air pollution was more severe than that in the suburbs. The average value of AOD during the 10 years was 0.293. The highest value of AOD was 0.33 in 2006, and the lowest value of 0.24 was in 2008, which declined to 23.3% of that in 2007. The annual change in AOD in Urumqi over the 10 years rose steadily. Compared with previous studies, the lowest and highest values were both higher to different degrees. Despite the deduction trend in 2015, air pollution in Urumqi was serious in the studied decade, and thus control of such needs to be strengthened.

Key words: MODIS_C006; aerosol optical depth(AOD); Urumqi City; spatial and temporal distribution; interannual variability

随着经济的迅速发展和城镇化进程的不断加快, 我国对城市区域的大气污染状况关注度持续上升。作为大气污染物的重要组成部分, 气溶胶对全球和区域气候变化影响显著^[1~3], 而气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)作为气溶胶光学特性的基本参数, 是研究气溶胶辐射效应的基础, 也是表征气溶胶含量及大气浑浊度的重要物理量。同时, AOD 的大小还定量反映了区域大气污染状况^[4~6]。对于气溶胶光学厚度, 我国针对中东部地区已有大量观测及研究, 但对西北典型半干旱地区的相关研究尚较少, 多与地基站点观测数据缺乏有

很大关系。乌鲁木齐市作为“一带一路”战略的西北重要城市, 全疆的政治、经济、文化、科教中心, 是人类活动和工业化进程引起严重大气污染问题的典型城市, 早年因缺乏 AOD 地面观测设备, Gueymard 等^[7]和邱金桓等^[8]提出并发展了宽带消光法, 利用气象站点太阳短波直射辐射观测数据, 反演给出了乌鲁木齐市 1980~1994 年晴天 AOD 变化特征; 李

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375021, 41675026)

作者简介: 胡俊(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多源遥感的城市资源环境, E-mail: hujun9852@126.com

* 通信作者, E-mail: yonghangchen@126.com

刚等^[9]和宗雪梅等^[10]提出通过地表漫射太阳辐射日总量数据反演出 AOD 的计算模式,并分别给出了 1986~1992 年和 1993~2002 年乌鲁木齐市 AOD 的变化特征;李霞等^[11,12]对乌鲁木齐市 2002~2003 年 CE318 太阳光度计数据的分析发现,AOD 日变化四季表现差异明显,春夏变化剧烈,秋冬趋势平缓,整层大气气溶胶变化与近地面颗粒物浓度变化存在差异;并认为 PM₁₀ 和 SO₂ 浓度对该乌鲁木齐市 AOD 贡献显著.以上研究多基于地基站点观测数据分析,而受地基观测条件限制,大空间尺度与长时间跨度的观测数据缺乏,使得对乌鲁木齐市 AOD 及大气污染状况研究缺乏近 10 年延续性最新讨论.

快速发展的卫星遥感技术,提供了覆盖空间广、时间连续性好的数据集,可最大限度地弥补地基观测数据的不足. MODIS/Aqua C006 遥感数据提供了接近覆盖所有地表的气溶胶信息,为准确评估 MODIS 遥感数据在我国西北地区的适用性提供可能^[13,14],因此,本文将应用 MODIS_C006 遥感数据

来研究乌鲁木齐最近 10 年存在轻度以上(包括轻度)大气污染状况下的 AOD 变化特征,并分析这一地区 10 年的大气污染变化状况,以期卫星遥感技术用于西部典型半干旱气候背景地区的大气环境监测与控制提供方法参考和科学依据.

1 资料与方法

1.1 研究区域

选取新疆乌鲁木齐市为研究对象,以地理坐标(87.39°E, 43.47°N)为中心,1°×1°矩形区域(见图 1).研究区域包括了乌鲁木齐市主城区及近郊人口密集区.乌鲁木齐市地处北疆准噶尔盆地的沿天山一带,市区高程在 900~1 300 m 之间,北部地形开阔,东、南、西三面环绕天山,地势东南高、西北低,从北到南逐渐收缩,形成了细长的条状峡谷,具有典型的峡谷地形特征及半干旱地区气候背景.乌鲁木齐的独特地形和复杂气象条件不利于大气污染物的扩散,且能源结构以燃煤为主,冬季燃煤供暖排放出的大量污染物易造成严重大气污染.

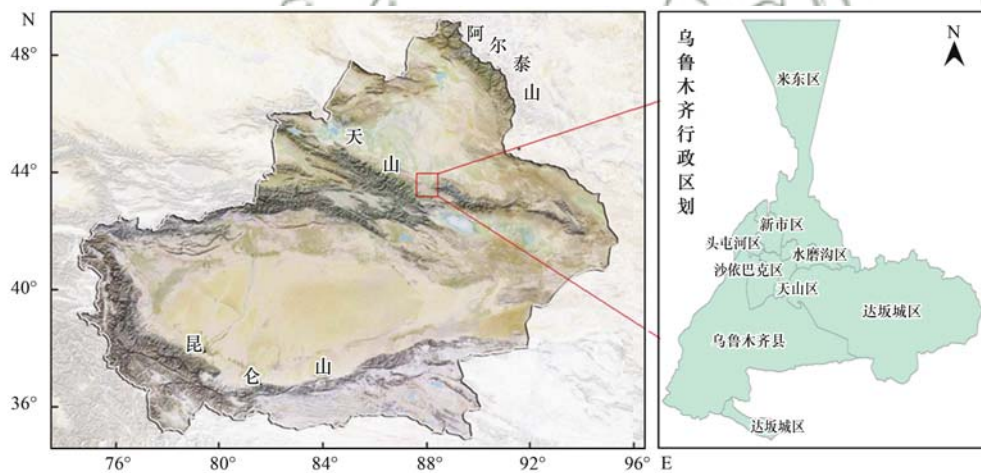


图 1 乌鲁木齐市地理位置示意

Fig. 1 Location of Urumqi City

1.2 数据与方法

选取搭载于 Aqua 卫星的中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Level 2 10 km 分辨率 MYD04_L2_C006 日产品数据,数据资料由美国地球观测系统(EOS)于 2014 年上半年发布.时间跨度为 2006 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日. Aqua 卫星飞行轨道高度为 705 km,扫描带宽为 2 330 km,覆盖全球时间为 1~2 d,提供了共 36 个光谱通道全球观测数据,覆盖总光谱范围为 0.4~14.4 μm ,卫星过境乌鲁木齐的时间为北京时间 15:00,空间分辨率为 10

km.

MYD04_L2_C006 数据沿用 MYD04_L2_C051 早期数据的算法模式,提供两种算法用于反演全球气溶胶特征:暗像元法(dark target, DT)适用于地表类型为海洋和土地植被覆盖区等暗背景表面,深蓝算法(deep blue, DB)适用于地表类型为沙漠或荒地等亮背景表面.根据 Kaufman 等^[15]提出的暗像元法,在清洁大气条件下,绿色植被表面的反射率在红、蓝和 2.1 μm 通道相似,表明它们之间存在着一定的关系.由于可见光通道受气溶胶散射的影响,而 2.1 μm 通道不受气溶胶的影响,故可合理

反映地表特征. 气溶胶层以下植被覆盖区地表的红、蓝通道反射率可从 2.1 μm 通道的反射率进行估算^[16], 即为:

$$\rho_{0.47}^* = \frac{\rho_{2.12}^*}{4}; \quad \rho_{0.66}^* = \frac{\rho_{2.12}^*}{2} \quad (1)$$

Levy 等^[17]在暗像元算法基础上改进了地表反射率的确定方法, 给出了 NASA V5.2 气溶胶反演算法, 成为 MODIS_C051 产品的陆地暗背景气溶胶反演应用的主要算法. 这一算法同时考虑了植被覆盖指数 (NDVI) 与散射角 (Θ) 影响, 利用可见光和中红外通道的反射率比值对 VIS/SWIR 表面反射率比进行参数化, 即 VIS/SWIR 表面反射率比参数化为 $\text{NDVI}_{\text{SWIR}}$ 和散射角 (Θ) 的函数, 所定义的新比值关系式如下:

$$\rho_{0.66}^s = f(\rho_{2.12}^s) = \rho_{2.12}^s \times \text{slope}_{0.66/2.12} + \text{yint}_{0.66/2.12} \quad (2)$$

$$\rho_{0.47}^s = g(\rho_{0.66}^s) = \rho_{0.66}^s \times \text{slope}_{0.47/0.66} + \text{yint}_{0.47/0.66} \quad (3)$$

$$\text{slope}_{0.66/2.12}^{\text{NDVI}_{\text{SWIR}}} = \text{slope}_{0.66/2.12}^{\text{NDVI}_{\text{SWIR}}} + 0.002\Theta - 0.27 \quad (4)$$

$$\text{yint}_{0.66/2.12} = 0.00025\Theta + 0.033 \quad (5)$$

$$\text{slope}_{0.66/2.12}^{\text{NDVI}_{\text{SWIR}}} = 0.48 + 0.2(\text{NDVI}_{\text{SWIR}} - 0.25) \quad (6)$$

$$\Theta = \cos^{-1}(-\cos\theta_0\cos\theta + \sin\theta_0\sin\theta\cos\varphi) \quad (7)$$

$$\text{slope}_{0.47/0.66} = 0.49, \text{yint}_{0.47/0.66} = 0.005 \quad (8)$$

$$\text{NDVI}_{\text{SWIR}} = \frac{(\rho_{1.24}^m - \rho_{2.12}^m)}{(\rho_{1.24}^m + \rho_{2.12}^m)} \quad (9)$$

$$\text{slope}_{0.66/2.12}^{\text{NDVI}_{\text{SWIR}}} = \begin{cases} 0.58 & (\text{NDVI}_{\text{SWIR}} < 0.25) \\ 0.48 & (\text{NDVI}_{\text{SWIR}} > 0.75) \\ 0.58 + 0.2 \times (\text{NDVI}_{\text{SWIR}} - 0.25) & (0.25 \leq \text{NDVI}_{\text{SWIR}} \leq 0.75) \end{cases} \quad (10)$$

式中, θ 为观测天顶角; θ_0 为太阳天顶角; φ 为太阳散射辐射方位角.

MODIS_C006 气溶胶产品的算法较早期 C051 产品予以改进, C006 暗像元法修正了辐射传输计算中瑞利散射, 修改了地表反射率与陆地气溶胶类型, 包括对气溶胶检测不确定性估计, 进行误差分析得出最佳数据集估计值^[18], 同时融合了暗像元法与深蓝算法用于反演整个陆地区域(亮背景和暗背景)AOD. 研究选取的 MYD04_L2_C006 数据, 源自暗像元法与深蓝算法相融合的算法模式, 名称为

“AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined”, 即提取可见光波长为 550 nm 处气溶胶光学厚度. Allen 等^[19]的研究表明:研究所取城市区域 AOD 为 0.02 时, 城区呈非常清洁状态; AOD 为 0.2 时, 城区大气环境整体较清洁, 局部区域出现轻度污染状况; AOD 达到 0.4 时, 城区出现明显大气污染状况. 本研究定义:MODIS 遥感数据反演所得乌鲁木齐 AOD 达到 0.1 时, 认为该市局部区域出现轻度大气污染状况. 在此基础上, 筛选分析出研究区域内 $\text{AOD} \geq 0.1$ 的像素点, 研究乌鲁木齐市存在轻度以上(包括轻度)大气污染状况下的 10 年气溶胶光学厚度变化特征.

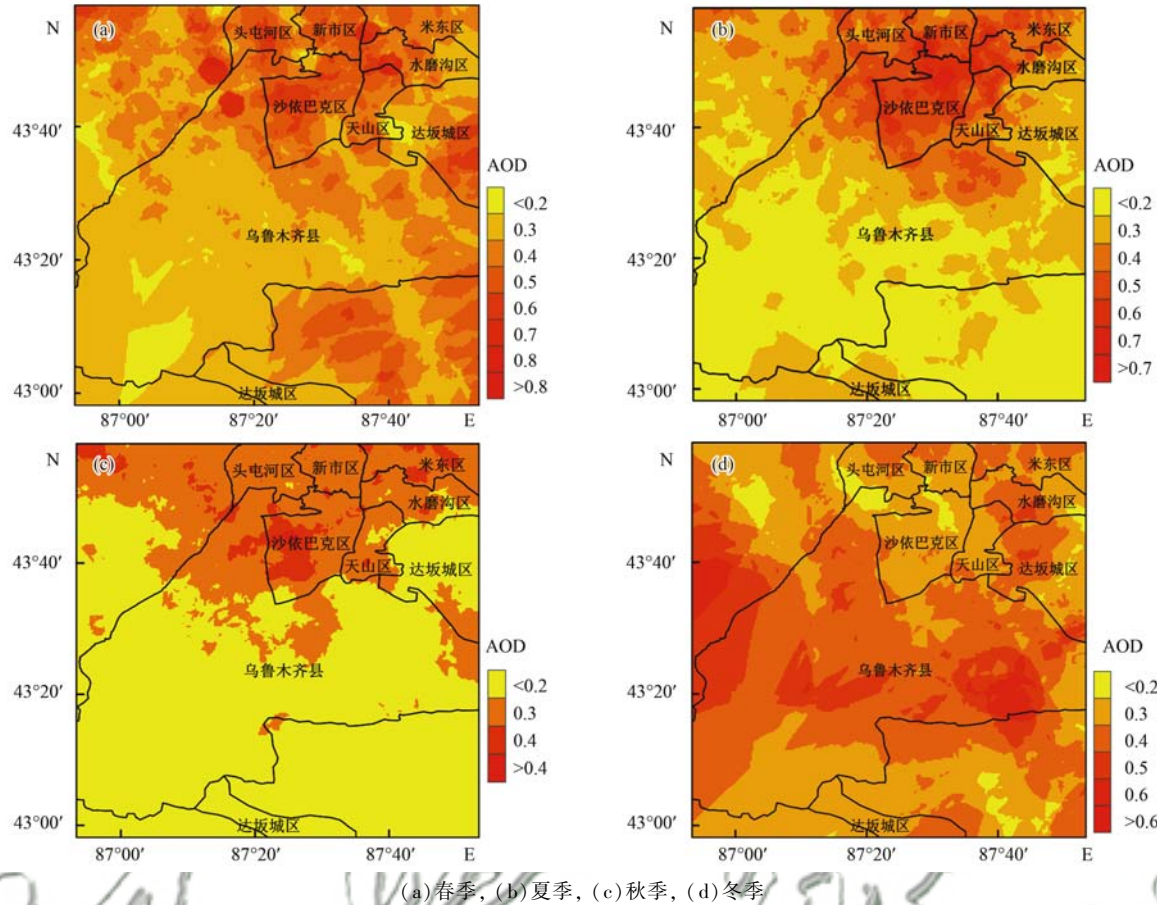
2 结果与讨论

2.1 10 年平均 AOD 季节空间分布

考虑到乌鲁木齐市独特的地理特征和半干旱气候背景, 四季划分采取气温划分原则, 夏季和冬季为乌鲁木齐市主导季节, 春秋季节为短暂过渡季节, 即春季为 4~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~10 月, 冬季为 11 月至次年 3 月. 在此基础上, 计算分析乌鲁木齐市 AOD 季节空间分布, 结果在图 2 中给出.

图 2 显示出, 乌鲁木齐市 AOD 整体分布趋势为市区高于郊区. 春季、夏季、秋季 AOD 高值区主要集中于乌鲁木齐市天山区、沙依巴克区、水磨沟区、新市区、头屯河区、米东区等市区位置, 而达坂城区、乌鲁木齐县等郊区位置处 AOD 低值区, 从郊区到市区 AOD 呈阶梯式上升变化趋势.

春季时, 整个城市研究区域内, AOD 均值分布范围明显高于其他三季, 4 个 AOD 高值点均靠近市区位置, 表明春季整个乌鲁木齐市大气污染严重, 城区空气质量状况出现大范围下降. 图 2(b)、2(c)显示出夏季和秋季乌鲁木齐市 AOD 高值区分布基本一致, 但夏季 AOD 数值上显著高于秋季, 且夏季 AOD 高值区呈局部聚集现象, 多集中于天山区、沙依巴克区等中心市区位置, 秋季该市整层大气较为洁净, 郊区大范围处于 AOD 低值区. 冬季城市进入大气层结构稳定期, 乌鲁木齐市独特的地形特征和气象条件不利于大气污染物扩散, 乌鲁木齐市冬季 AOD 较秋季有大幅上升, 整个研究区域内 AOD 分布均匀, 市区与郊区污染程度基本一致, 且乌鲁木齐县东南局部位出现 AOD 高值区, 表明冬季不利的扩散条件与独特地形特征对该市 AOD 增长起促进作用.



(a)春季, (b)夏季, (c)秋季, (d)冬季

图2 乌鲁木齐市 AOD 季节空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of AOD in Urumqi City

2.2 10 年平均 AOD 季节时间变化

在四季划分采取气温划分原则基础上,对研究区域内进行区域空间像素点平均,得到了乌鲁木齐市轻度以上(包括轻度)大气污染状况下的 10 年平均(2006-01 ~ 2015-12) AOD 季节时间变化特征,如图 3 所示.

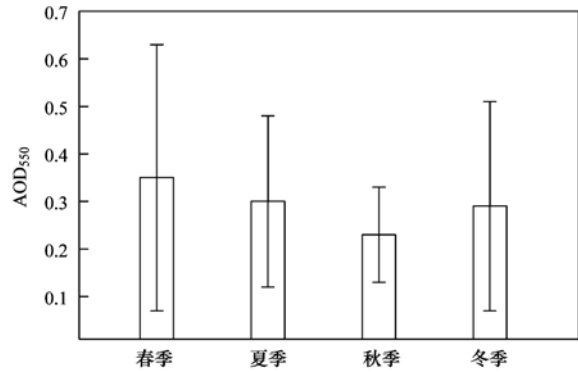


图3 乌鲁木齐 10 年 AOD 季节变化特征

Fig. 3 Characteristics of seasonal variation of AOD in the Urumqi area over the 10-year study period

从图 3 可知,乌鲁木齐市 10 年的 AOD 均值呈显著季节性变化. 主要表现为:春季 AOD 变化幅度

明显, AOD 达四季最大值为 0.35 ± 0.28 , 夏季 (0.30 ± 0.18)、冬季 (0.29 ± 0.22) 次之, 且冬季波动幅度高于夏季, AOD 在秋季达四季最小值为 0.23 ± 0.10 , 变化较稳定趋势. 图 3 的乌鲁木齐市四季 AOD 变化特征分析结果与张喆等^[20]利用 2002 ~ 2012 年 MODIS 三级标准月均值数据分析新疆干旱区气溶胶间接效应所得结果一致性较高, 且变化特征相同.

因乌鲁木齐市在全国城市建筑气候分区中属严寒地区, 寒冷季供暖期跨度长, 燃煤供暖排放的碳质气溶胶含量增高, 冬季不利的扩散条件造成碳质气溶胶对该市 AOD 增长起显著贡献作用^[21,22], 表现为冬季 AOD 均值处全年较高水平且季节波动幅度明显. 到春季时仍有一半时间处于供暖期, 整个寒冷季燃煤供暖产生的气溶胶累积效应促进了春季 AOD 增长, 同时春季正处乌鲁木齐扬尘、沙尘天气高发季节, 沙尘型气溶胶达到四季峰值, AOD 均值达四季最高值, 且受春季天气状况多变影响, AOD 季节波动幅度较大, 春季沙尘天气暴发条件下, 城区 MODIS 遥感观测地表 AOD 均值可达 1.5 左右.

夏季地表空气温度较高, 大气透明度好, 乌鲁木齐市郊区地表植被覆盖率提高, 由地表进入大气中气溶胶数量减少, 且夏季降水多于其他季节, 降雨对大气气溶胶的清洗作用明显^[23], 表现为夏季 AOD 较春季出现明显下降, 同时乌鲁木齐夏季大气中水汽含量高, 水汽对 AOD 增长起贡献作用^[24,25], 降雨清洗和水汽贡献等多方面作用使得夏季 AOD 仍维持在四季中高值水平, 且变化趋势稳定. 秋季 AOD 均值为四季最低值, AOD 变化趋势为四季最小, 而秋季 AOD 出现低值的原因不同于夏季, 秋季大气受高压控制, 大气系统较稳定, 扩散条件较好^[20].

2.3 AOD 年变化分析

通过对 2006~2015 年各月进行 10 年平均后得到的乌鲁木齐 MODIS 气溶胶光学厚度数据进行分析, 得到了该市 10 年来的地表 AOD 年内变化和年际变化.

图 4 给出了乌鲁木齐 2006~2015 年 AOD 月平均值, 年内变化趋势整体呈单峰分布. 该市气溶胶光学厚度从 1~4 月逐渐增大, 4 月 AOD 达到全年最大值, 为 0.37 ± 0.19 , 随后的 4~12 月期间, AOD 整体表现为下降趋势, 其中 4~8 月, AOD 平稳下降, 9~10 月, AOD 下降趋势明显, 在秋季 10 月达到全年最低值, 为 0.22 ± 0.20 , 入冬季后的 11~12 月, AOD 上升明显, 在 11 月达到次峰值, 为 0.24 ± 0.19 , 且 AOD 波动幅度显著.

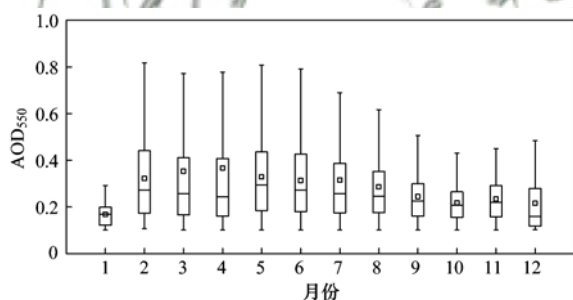


图 4 乌鲁木齐 AOD 年内变化特征

Fig. 4 Annual variation characteristics of AOD in the Urumqi area

图 4 的结果与邱金桓等^[8]利用宽带消光法反演所得的乌鲁木齐市 AOD 年内月均值变化趋势实际上是一致的. AOD 年内最大值出现在 4 月, 说明受春季沙尘天气频发影响, 整层大气污染严重. 乌鲁木齐市 6~8 月 AOD 呈稳定波动趋势, 且夏季大气气溶胶粒子类型以细粒子为主^[26,27]. 有研究发现 2006~2015 年的 AOD 最小值出现在秋季 10 月, 整层大气较为清洁^[28]. 乌鲁木齐市入冬季后的 12 月

至次年 2 月, 下垫面长时间受降雪覆盖影响, 地表反照率提高, 加以乌鲁木齐城市区域为反演亮背景, MODIS 遥感数据在 1 月出现部分过境数据缺失, 致使 1 月反演所得 AOD 整体偏小, 增大了冬季 AOD 反演难度, 且冬季全年出现静风频率最高, 大气易出现逆温层^[29,30], 污染物在 1 km 高空扩散出现停滞, 冬季长时间排放的污染物产生堆积^[31], 造成 11 月出现全年次峰值, 冬季各月的 AOD 均值维持较高水平, 呈明显波动趋势. 同时本研究发现, 10 年中乌鲁木齐市 AOD 呈整体上涨趋势, 低值点与高值点较以往研究有不同程度增幅, 表明该市最近 10 年的大气污染状况加剧.

图 5 所示为 MODIS_C006 版本 MYD04_L2 日产品数据分析所得乌鲁木齐市 10 年 AOD 年际变化特征, 该市 10 年 AOD 变化整体表现为平稳上升趋势, 10 年 AOD 均值为 0.293. 赵仕伟等^[13]利用 MODIS_C006 版本 MYD08_M3 月均值产品数据, 全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点分辨率, 分析了 2006~2015 年的中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征, 分别给出了北疆地区 ($42^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $80^\circ \sim 95^\circ \text{E}$) 和西北地区 ($29^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $74^\circ \sim 110^\circ \text{E}$) 的 10 年 AOD 均值. 可以看出, 10 年西北地区 AOD 均值维持在 $0.18 \sim 0.22$, 与全球陆地 AOD 均值 (0.19) 保持持平^[32], 北疆地区 AOD 均值处于较低水平, 而乌鲁木齐市 10 年 AOD 均值整体高于北疆和西北地区, 大气污染状况在西北地区中较为严重.

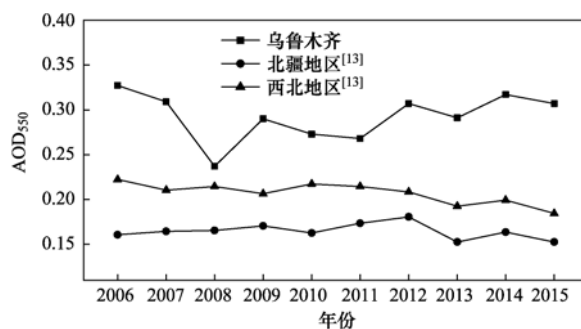


图 5 乌鲁木齐 AOD 年际变化特征

Fig. 5 Interannual variation characteristics of AOD in the Urumqi area

2006~2011 年, 北疆和西北地区 AOD 变化趋势平稳, 而乌鲁木齐市 5 年内 AOD 呈现明显波动趋势, AOD 在 2006 年出现 10 年平均最大值, 为 0.33, 市区年平均 SO_2 、 PM_{10} 和 NO_2 浓度较高, 其中年平均 PM_{10} 浓度严重超标, 大气污染状况严重^[33]. 随后 AOD 呈显著下降趋势, 2008 年出现 10 年 AOD 最低值为 0.24, 较 2007 年单年降幅达

23.3%, 乌鲁木齐市主要大气污染物 SO_2 和 PM_{10} 年均浓度出现下降, 污染程度降低^[34], 且在 2008 ~ 2011 年, 乌鲁木齐市 AOD 年均值维持在低值水平, 表明乌鲁木齐市大气污染治理初起成效。

本研究的后 5 年(2011 ~ 2015 年)中, 乌鲁木齐市 AOD 变化趋势与北疆和西北地区表现出良好的一致性, 但乌鲁木齐市城区 AOD 均值显著高于所处的北疆及西北地区, 是北疆地区人为活动造成大气环境污染的典型城市。2012 年后, 乌鲁木齐城市化进程发展增快, 米东区、新市区、头屯河区人类和工业活动增加, 城市机动车保有量呈现迅速增长趋势, 比 2011 年末增长 23.65%^[35], 机动车排放尾气对乌鲁木齐大气污染影响程度增加, 表现为 AOD 增长趋势明显, 较 2011 年单年增幅为 14.6%, 大气污染状况出现恶化。2012 ~ 2013 年乌鲁木齐市开始实行煤改气工程, 随后 2012 ~ 2015 全年 AOD 均值明显上升趋势出现停止且稳定波动, 碳质气溶胶及主要污染物浓度较煤改气前期分别下降^[36], 燃煤供暖对乌鲁木齐市 AOD 增长贡献减小, 表明乌鲁木齐市实行煤改气工程对该市大气环境的改善起促进作用。

3 结论

(1) 乌鲁木齐市 10 年 AOD 均值具有显著季节性变化特征, 且从郊区到市区呈阶梯式上升变化。四季表现为: 春季达最大值为 0.35 ± 0.28 , 夏季(0.30 ± 0.18)、冬季(0.29 ± 0.22)次之, 秋季最小为 0.23 ± 0.10 。春季城市区域大气污染最为严重, 夏季、秋季污染分布区域基本重合, 冬季 AOD 较秋季有较大范围增加, 研究区域内 AOD 分布均匀, 市区与郊区污染状况基本一致。

(2) 乌鲁木齐市 AOD 年内呈单峰分布变化趋势。AOD 从 1 ~ 4 月逐渐增大, 4 月达全年最大值, 为 0.37 ± 0.19 , 随后 4 ~ 12 月 AOD 下降, 在 10 月达到低值, 为 0.22 ± 0.20 , 冬季 11 ~ 12 月, AOD 有小幅回升, 且稳定波动。

(3) 乌鲁木齐市 10 年 AOD 均值为 0.293, 年际变化表现为平稳上升趋势。2006 年出现 10 年 AOD 峰值为 0.33, 2008 年 AOD 年均值下降显著为 0.24, 较 2007 年年均降幅达 23.3%, 2008 ~ 2011 年, AOD 年均值维持低值水平, 2012 年后, 城市化进程使 AOD 呈增长趋势, 年均增幅为 14.6%。10 年中乌鲁木齐市 AOD 呈整体上涨趋势, 表明该市最近 10 年的大气污染状况有所加剧。

致谢: 本研究卫星数据来自美国 NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center, 在此作者表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [2] Cusworth D H, Mickley L J, Leibensperger E M, *et al.* Aerosol trends as a potential driver of regional climate in the central United States: evidence from observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(22): 13559-13572.
- [3] 李刚, 石广玉, 张武, 等. 兰州远郊区春季碳气溶胶的质量浓度特征[J]. *科技导报*, 2015, **33**(6): 27-30.
Li G, Shi G Y, Zhang W, *et al.* Characteristics of mass concentration of carbonaceous aerosols over outskirts of Lanzhou during spring[J]. *Science & Technology Review*, 2015, **33**(6): 27-30.
- [4] Huang J P, Wang T H, Wang W C, *et al.* Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(19): 11398-11416.
- [5] Wang W C, Sheng L F, Jin H C, *et al.* Dust aerosol effects on cirrus and altocumulus clouds in Northwest China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, **29**(5): 793-805.
- [6] 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.
- [7] Gueymard C A. Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multicoefficient approach[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**(4): 414-435.
- [8] 邱金恒, 潘继东, 杨理权, 等. 中国 10 个地方大气气溶胶 1980 ~ 1994 年间变化特征研究[J]. *大气科学*, 1997, **21**(6): 725-733.
Qiu J H, Pan J D, Yang L Q, *et al.* Variation of atmospheric aerosols over 10 sites in China during 1980 ~ 1994[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, **21**(6): 725-733.
- [9] 李刚, 季国良. 中国西北地区大气气溶胶散射光学厚度分析[J]. *高原气象*, 2001, **20**(3): 283-290.
Li G, Ji G L. Analyses on aerosol scattering optical depth in the arid Region of North-West China[J]. *Plateau Meteorology*, 2001, **20**(3): 283-290.
- [10] 宗雪梅, 邱金恒, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2005, **10**(2): 201-208.
Zong X M, Qiu J H, Wang P C. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, **10**(2): 201-208.
- [11] 李霞, 陈勇航, 胡秀清, 等. 乌鲁木齐大气气溶胶的光学特性分析[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(Z1): 22-25.
Li X, Chen Y H, Hu X Q, *et al.* Analysis of atmospheric aerosol optical properties over Urumqi[J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(Z1): 22-25.

- [12] 李霞, 任宜勇, 吴彦, 等. 乌鲁木齐污染物浓度和大气气溶胶光学厚度的关系[J]. 高原气象, 2007, **26**(3): 541-546.
Li X, Ren Y Y, Wu Y, *et al.* Impact of pollutant concentration on aerosol optical depth in Ürümqi [J]. Plateau Meteorology, 2007, **26**(3): 541-546.
- [13] 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.
- [14] 孙晓雷, 甘伟, 林燕, 等. MODIS 3 km 气溶胶光学厚度产品检验及其环境空气质量指示[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1657-1666.
Sun X L, Gan W, Lin Y, *et al.* Validation of MODIS 3 km aerosol optical depth product and its air quality indication [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1657-1666.
- [15] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, *et al.* The MODIS 2.1- μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, **35**(5): 1286-1298.
- [16] 肖钟湧, 江洪, 陈健, 等. 利用 MODIS 遥感数据反演广州市气溶胶光学厚度[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(5): 577-584.
Xiao Z Y, Jiang H, Chen J, *et al.* The retrieval of aerosol optical thickness with high spatial resolution using MODIS data over Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(5): 577-584.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Allen W H. Dictionary of technical terms for aerospace use. NASA SP-7[R]. Washington, DC: NASA, 1965.
- [20] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 等. 新疆干旱区气溶胶间接效应区域性分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(12): 3521-3530.
Zhang Z, Ding J L, Wang J J, *et al.* Regional analysis of aerosol indirect effects in Xinjiang region [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(12): 3521-3530.
- [21] 韩茜, 钟玉婷, 陆辉, 等. 乌鲁木齐市碳质气溶胶季节变化及其对霾形成的影响[J]. 干旱区研究, 2016, **33**(6): 1174-1180.
Han X, Zhong Y T, Lu H, *et al.* Seasonal variation of carbonaceous aerosol and its effect on haze formation in Urumqi [J]. Arid Zone Research, 2016, **33**(6): 1174-1180.
- [22] Li X, Xia X, Che H, *et al.* Contrast in column-integrated aerosol optical properties during heating and non-heating seasons at Urumqi—its causes and implications [J]. Atmospheric Research, 2017, **191**: 34-43.
- [23] 华凤皎, 亢燕铭, 钟珂. 湍流效应对雨滴表面粒子捕集过程的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 13-20.
Hua F J, Kang Y M, Zhong K. Influence of turbulent effect on the collection process of aerosols by raindrops [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 13-20.
- [24] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 711-719.
Li X F, Zhang M J, Li Y J, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 711-719.
- [25] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源分析[J]. 水科学进展, 2013, **24**(5): 634-641.
Feng F, Li Z Q, Jin S, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, Eastern Tianshan [J]. Advances in Water Science, 2013, **24**(5): 634-641.
- [26] 黄观, 刘伟, 刘志红, 等. 乌鲁木齐市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM_{10} 浓度关系模型研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 649-657.
Huang G, Liu W, Liu Z H, *et al.* Relationship between MODIS aerosol optical depth and PM_{10} ground concentration in Urumchi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 649-657.
- [27] Yin H, Mu S Y, Zhao L, *et al.* Microscopic morphology and elemental composition of size distributed atmospheric particulate matter in Urumqi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **69**(7): 2139-2150.
- [28] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰. 中亚沙尘气溶胶时空分布特征及潜在扩散特性分析[J]. 地理学报, 2017, **72**(3): 507-520.
Zhang Z, Ding J L, Wang J J. Spatio-temporal variations and potential diffusion characteristics of dust aerosol originating from Central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(3): 507-520.
- [29] 刘增强, 郑玉萍, 李景林, 等. 乌鲁木齐市低空大气逆温特征分析[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(3): 351-356.
Liu Z Q, Zheng Y P, Li J L, *et al.* Temperature inversion characteristics of low-air atmosphere of Urumqi City [J]. Arid Land Geography, 2007, **30**(3): 351-356.
- [30] Jin L L, Li Z J, He Q, *et al.* Observation and simulation of near-surface wind and its variation with topography in Urumqi, West China [J]. Journal of Meteorological Research, 2016, **30**(6): 961-982.
- [31] 吴彦, 王健, 刘晖, 等. 乌鲁木齐大气污染物的空间分布及地面风场效应[J]. 中国沙漠, 2008, **28**(5): 986-991.
Wu Y, Wang J, Liu H, *et al.* Spatial distributions of atmospheric contaminations and effect of surface wind in Urumqi [J]. Journal of Desert Research, 2008, **28**(5): 986-991.
- [32] Remer L A, Kleidman R G, Levy R C, *et al.* Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, **113**(D14): D14S07.
- [33] Mamtimin B, Meixner F X. Air pollution and meteorological processes in the growing dryland city of Urumqi (Xinjiang, China) [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(7): 1277-1290.
- [34] 朱文玲, 李建刚, 李军, 等. 2006-2010 年乌鲁木齐市主要大气污染物浓度时空变化特征[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(5): 429-431.

- Zhu W L, Li J G, Li J, *et al.* The spatiotemporal variation characteristics of main air pollutants in Urumqi during 2006 to 2010[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, **29**(5): 429-431.
- [35] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015.

- [36] 李霞, 郭宇宏, 卢新玉, 等. 乌鲁木齐市大气污染治理成效的综合评估分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 307-313.
- Li X, Guo Y H, Lu X Y, *et al.* Evaluation and analysis on the effects of air pollution control in Urumqi [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 307-313.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.
图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.
会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.
学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.
报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.
专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)