

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.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李泽民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

MODIS C006 气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性

王海林¹, 刘琼¹, 陈勇航^{1,2*}, 孙冉¹, 李霞², 张华³, 魏刚², 胡俊¹, 刘统强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; 3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 100081)

摘要: 选取3个代表京津冀地区典型环境背景下的站点——北京、香河和兴隆, 利用 AERONET 地基观测的气溶胶光学厚度 (AOD) 数据, 研究了 MODIS 针对暗地表的 C051 暗像元法 (DT C051) 和 C006 暗像元法 (DT C006), 针对亮地表的 C006 深蓝算法 (DB C006), 以及融合了暗像元法和深蓝算法的融合产品 (Combined C006), 探讨了基于上述算法的 AOD 产品在京津冀地区的适用性。结果表明: ① C006 算法的改进对北京和香河站点反演 AOD 的精度改善较大, 而在兴隆站点改善不明显; 北京站点, C006 深蓝算法 AOD 适用性最佳; 位于城郊的香河站, C006 暗像元法 AOD 最接近 AERONET AOD; 植被茂盛的兴隆站, Combined C006 AOD 反演精度最高。② MODIS DT C006 在北京站点的反演误差可能是由气溶胶模型与地表反照率共同造成的; MODIS DB C006 在香河站点反演误差主要来源于春季的地表反照率和冬季的气溶胶模型两方面。③ 相较于 DT C051 AOD, DT C006 有效数据覆盖率有所降低, 但 DB C006 和 Combined C006 的数据覆盖率有所增加, 且 Combined C006 AOD 产品数据覆盖率最广; 结合 MODIS AOD 与各站点 AERONET 的对比较验证, 结果表明, Combined AOD 产品在京津冀地区适用性最佳。

关键词: 中分辨率成像光谱仪 (MODIS); 气溶胶光学厚度; 暗像元法; 深蓝算法; 气溶胶融合产品

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0044-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804155

Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region

WANG Hai-lin¹, LIU Qiong¹, CHEN Yong-hang^{1,2*}, SUN Ran¹, LI Xia², ZHANG Hua³, WEI Gang², HU Jun¹, LIU Tong-qiang¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological, Beijing 100081, China)

Abstract: By fitting with the aerosol optical depth (AOD) from AERONET ground observations at sites in Beijing, Xianghe, and Xinglong with different environmental backgrounds, MODIS C051 Dark Target (DT C051), C006 Dark Target (DT C006), C006 Deep Blue (DB C006), and C006 Deep Blue/Dark Target merged AOD products were compared and evaluated to understand their applicability in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The main conclusions are as follows: ① The comparison of the C051 and C006 algorithms shows that the accuracy of the AOD at the Beijing and Xianghe sites notably improved, while an improvement was not observed at the Xinglong site; the DB C006 AOD is closest to the AERONET AOD at the Beijing site and the DT C006 AOD is closest to the AERONET AOD at the Xianghe site; the combined C006 AOD is closest to the AERONET AOD at the Xinglong site. ② The inversion error of the MODIS DT C006 at the Beijing site is caused by the improper selection of the aerosol model and surface reflectance; the inversion error of the MODIS DB C006 is mainly due to surface reflectance in spring and the aerosol model in winter. ③ Compared with the DT C051 AOD, the effective data coverage of the DT C006 is reduced, but that of DB C006 and the combined C006 increased; the combined C006 AOD data have the largest coverage. The results show that the application of the combined AOD product is best for the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words: MODerate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS); aerosol optical depth; dark target; deep blue; combined AOD

近年来, 京津冀的大气污染问题虽有缓解但依然严峻。气溶胶作为大气污染物的重要组成部分, 不仅是形成京津冀地区雾、霾的重要因素, 而且还会影响其气候环境。气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 是反映气溶胶消光特性的一个重要光学参数, 也是评估大气颗粒物污染程度、研究气溶胶辐射效应的关键因子, 在环境监测、大气辐射传输、遥感应用以及气候变化等领域具有重要

的科学意义和应用价值^[1~3]。气溶胶光学厚度主要通过地基遥感和卫星遥感获得。地基遥感多为单点观测, 虽然精度高, 但通常无法同时获取大范围

收稿日期: 2018-04-19; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91644211, 41375021); 2015 年新疆高层次人才引进工程项目

作者简介: 王海林 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境遥感, E-mail: w18354255623@163.com

* 通信作者, E-mail: yonghangchen@126.com

的大气气溶胶特征^[4]; 卫星遥感具有大范围同步观测、相对成本低等优势, 能够反映区域甚至全球大气气溶胶的时空变化规律, 其中搭载于 Terra/Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS (MODerate-resolution imaging spectroradiometer) 提供的 AOD 产品具有较高的时空分辨率, 数据质量良好, 使得该产品在大气环境业务科研领域得到了最为广泛的应用^[3~5].

相比于利用太阳光度计等地基遥感反演得到的 AOD 数据, MODIS AOD 仍存在一定误差^[6]. 由于 AOD 数据的准确性会直接影响大气环境和气候效应等的定量研究, 因此, 为了提高其精度, 科研人员一直在改进 AOD 的反演算法^[7,8], 并对其在不同地区的适用性进行验证^[5,9]. 云是影响 MODIS AOD 反演精度的一个重要因素^[10], 当出现严重气溶胶污染且气溶胶粒子较大时 (如沙尘), MODIS 采用的云检测算法可能会将气溶胶误判为云, 并将其剔除, 最终影响 AOD 的反演精度^[11]. 针对上述问题, MODIS C006 气溶胶产品在云检测算法、气溶胶模型和地表反照率估算等方面进行了改进. 已有研究显示^[12], 全球区域海洋上平均 AOD (DT) 下降 0.02, 陆地上平均 AOD 增长 0.02, 同时 AOD 有效覆盖率有所增加. 我国学者也开展了 MODIS C006 气溶胶产品在中国适用性的研究, 朱于红^[13]对比了浙江地区 MODIS C051 暗像元法和 C006 融合了暗像元法和深蓝算法的 AOD 数据, 结果发现相较于 C051, C006 的 AOD 在植被覆盖度较高的地区反演精度有所提升, 但城市地区的反演精度有所下降; 赵仕伟等^[3]基于 AERONET 地基观测数据对我国西北地区的 MODIS AOD 融合产品进行了验证, 发现 MODIS AOD 融合产品的覆盖度良好, 产品数据精度较好; Wang 等^[14]评估了 MODIS C051 与 C006 的暗像元法和 C006 深蓝算法 AOD 产品在京津冀地区的适用性, 结果发现 C006 暗像元法较 C051 略有改善, 符合期望误差的数据增加了 9%; Wei 等^[15]和 Bilal 等^[16]研究了 MODIS C051 与 C006 多种 AOD 产品在北京、香河等地的适用性, 结果发现 C006 深蓝算法 AOD 更加接近 AERONET AOD; Zhang 等^[17]利用东灵山和北京的 CSHNET 站点地基 AOD 分析了 MODIS C051 和 C006 多种 AOD 产品的精度与误差, 结果发现 C006 暗像元法 AOD 产品精度没有明显提高. 由此可见, MODIS C006 AOD 在不同地区仍有不同程度误差, 虽然上述研究开展了 MODIS 不同版本不同算法的气溶胶产品在我国不同地区反演精度的验证工作, 但是对于其反演误差来源的分析尚不足, 也缺乏 MODIS C006 气

溶胶产品对京津冀地区城市、城郊和森林这 3 种典型环境背景下的适用性研究.

因此, 本文以京津冀为研究区域, 选取北京、香河和兴隆这 3 个代表城市、城郊和森林下垫面的 AERONET 地基观测站的 AOD 数据为参照, 分别研究 C051 和 C006 版本的 4 种 MODIS AOD 产品在典型环境背景下的反演精度, 并分析其误差来源, 最后在此基础上揭示京津冀地区 AOD 时空分布特征, 以期为进一步准确评估 MODIS AOD 产品在不同地区的适用性及其反演算法的改进提供新的参考依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文以京津冀地区的北京、香河和兴隆 3 个 AERONET 站点的 AOD 数据作为卫星资料的对比数据, 研究区域及站点分布情况见图 1, 具体站点信息和资料时段见表 1. AERONET 的 AOD 数据分为 3 级: L1.0 没有云过滤和质量验证; L1.5 完成了去云处理但没有质量验证; L2.0 完成了去云处理和质量验证. 本文选用 L2.0 级 AOD 数据.

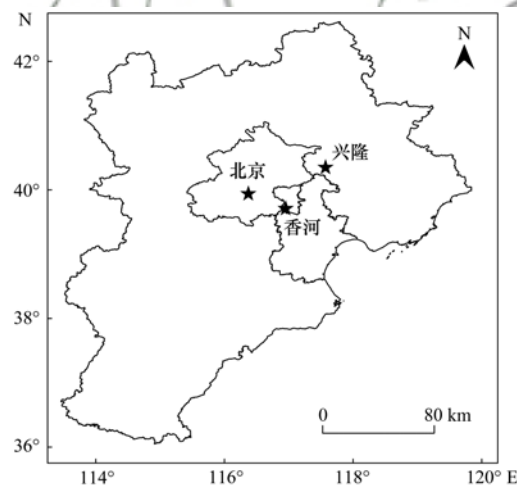


图 1 本文研究所用的京津冀地区 AERONET 站点位置

Fig. 1 Location of AERONET sites in the Beijing-Tianjin-Hebei region in this paper

本文使用的是时间范围为 2006-01-01 ~ 2015-12-31 的 AQUA-MODIS C051 Level 2 和 AQUA-MODIS C006 Level 2 气溶胶数据集, 提取的 4 种 MODIS AOD 产品 (DT C051 AOD、DT C006 AOD、DB C006 AOD 和 Combined AOD) 均为波长为 0.55 μm 处质量控制最优数据, 即 AOD 产品质量等级 (详见表 2) 为 3 的数据.

Combined AOD 是依据以下融合方案产生的: 基于归一化植被指数 (NDVI) 将地表分为 3 类: 当 NDVI > 0.3 时选择 DT AOD; 当 NDVI < 0.2 时选择

表 1 本文所用 AERONET 站点的基本信息

Table 1 Information about the AERONET sites used in this paper

站点名称	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	站点下垫面信息	所用资料时间段 (年-月-日)	数据等级
北京	116.38	39.98	城市	2006-01-01 ~ 2015-12-31	L2.0
香河	116.96	39.75	城郊	2006-01-01 ~ 2015-12-31	L2.0
兴隆	117.58	40.39	森林	2006-02-19 ~ 2012-05-09	L2.0

DB AOD; 当 $0.2 < \text{NDVI} < 0.3$ 时, 如果 DT 和 DB 的 AOD 产品质量等级 $\text{QA_DT} = 3$ 或 $\text{QA_DB} \geq 2$, Combined AOD 选二者中最优, 若两者 QA 均为 3, 则取二者平均值, 如果 $\text{QA_DT} < 3$ 且 $\text{QA_DB} < 2$, Combined AOD 为无效值^[11].

表 2 MODIS AOD 产品质量控制(QA)标志

Table 2 Quality assurance (QA) flags of the MODIS AOD product

QA 标志	质量等级说明
0	差(bad)或不可信(no confidence)
1	边缘等级(marginal)
2	好(good)
3	非常好(very good)

1.2 处理方法

由于 MODIS AOD 为 $0.55 \mu\text{m}$ 波长处的 AOD, 而 AERONET AOD 无此波长, 需利用 Ångström 公式将 $0.44 \mu\text{m}$ 和 $0.67 \mu\text{m}$ 波长下的 AOD 进行插值得到 $0.55 \mu\text{m}$ AOD. Ångström 关系式^[18]描述了满足 Junge 谱分布的气溶胶粒子在无水汽影响波段上气溶胶光学厚度(τ)与波长(λ)之间的定量关系:

$$\tau_{\alpha}(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

式中, α 为描述粒子大小的 Ångström 指数, β 为大气浊度系数, λ 为波长(μm).

计算好波段后, 即可通过时间窗口与空间范围的确定, 完成地基与卫星 AOD 数据的匹配. 时间窗口的选取规则是: 以卫星过境时间为依据, 选择该时刻前后 30 min 内 AERONET 站的 AOD 数据并取平均值; 空间范围的选取规则是: 以 AERONET 站点为中心, 选取其周围 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$ 经纬度范围内 MODIS AOD 数据并取平均值. 最终形成 AERONET-MODIS 时间与空间分辨率相匹配的 AOD 数据集. 格点处理方法为: 将京津冀地区划分为 445 个格点, 每个格点是边长为 0.3° 的矩形, 以该矩形的中心经纬度代表该格点经纬度, 并对该格点内 AOD 取平均值或统计 AOD 样本数.

本文采用的季节划分标准是: 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12 月~次年 2 月为冬季.

1.3 拟合及评估方法

经过对 AERONET AOD 数据进行波长插值, 并与 MODIS 数据进行时空匹配后, 对两者进行线性

拟合分析. 将得到如下线性回归曲线:

$$\tau_{\text{MODIS}} = a\tau_{\text{AERONET}} + b \quad (2)$$

拟合结果将由线性回归的斜率 a , 截距 b , 相关系数 R 等参数评价; 同时计算均方根误差 (root-mean-square-error, RMSE)、相对平均偏差 (relative-mean-bias, RMB) 和 期望误差 (expected-error, EE) 等指标, 综合评价和分析 MODIS 气溶胶产品的反演精度.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{AOD}_{(\text{MODIS})i} - \text{AOD}_{(\text{AERONET})i})^2} \quad (3)$$

$$\text{RMB} = \overline{\text{AOD}_{(\text{MODIS})}} / \overline{\text{AOD}_{(\text{AERONET})}} \quad (4)$$

$$\text{EE} = \pm (0.05 + 0.2\tau) \quad (5)$$

此外, 利用误差比 (error-ratio, ER) 来定量评估 MODIS AOD 产品质量, 误差比定义为样本真实误差落在期望误差范围内的百分比, 即:

$$\text{ER} = N_{\text{EE}} / N \times 100\% \quad (6)$$

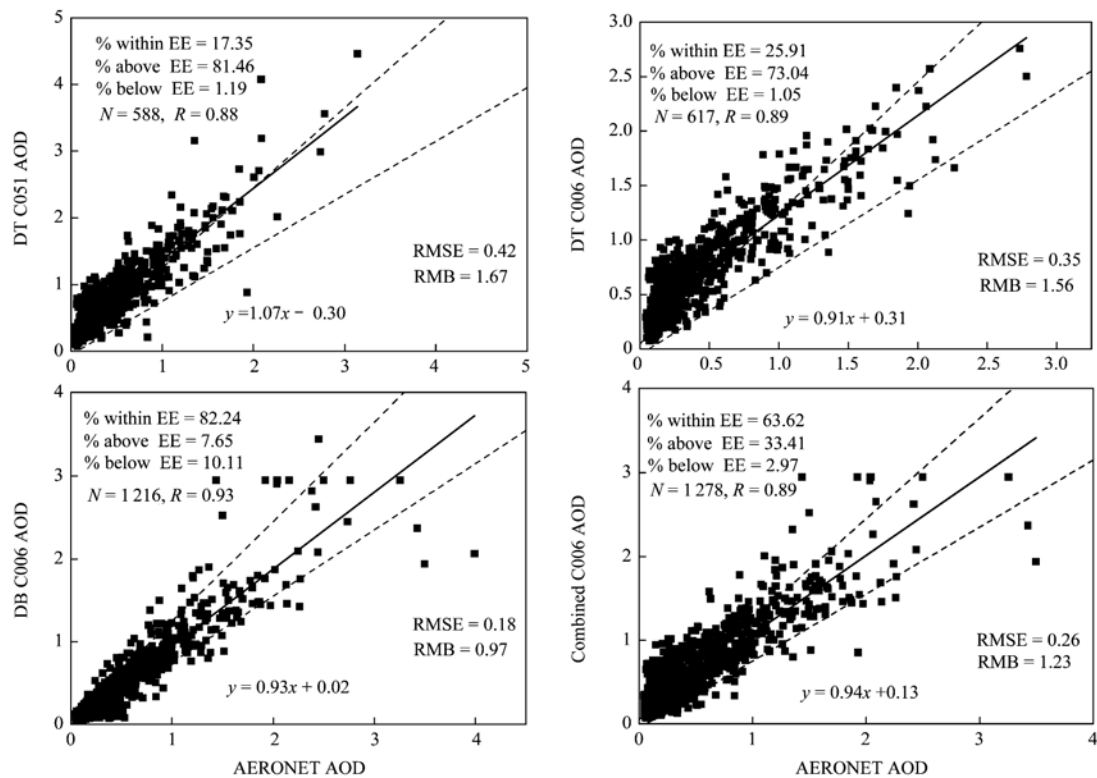
式中, N_{EE} 为误差落在期望误差范围的的样本个数; N 为样本总数. ER 值越大, 代表数据质量越高.

2 结果与讨论

2.1 MODIS AOD 与 AERONET AOD 对比分析

北京作为城市下垫面的代表, DT C051 与 DT C006 落在期望误差范围内的样本数百分比仅有 17.35% 和 25.91%, 其中分别有 81.46% 和 73.04% 的样本超出了期望误差上限, 且 MODIS AOD 平均值比 AERONET AOD 分别偏高 67.42% 和 56.15% (图 2), 表明暗像元法的 AOD 在该站点严重高估. 这主要是因为城市地区植被覆盖率较低, 适用于暗像元法反演所需的浓密植被较少, 且城市地区地表异质性高, 增加了地表反照率估算的不确定性^[14]. DB C006 AOD 落在期望误差范围内的样本数为 82.24%, 可见 C006 深蓝算法较大程度减少了暗像元法在城市亮地表的高估问题. 此外, MODIS AOD 相对于 AERONET 地基观测值结果存在高估, 还可能与云检测不彻底导致残留云的存在有关^[19].

香河站代表城郊, 4 种 MODIS AOD 产品中, DT C006 AOD 与 AERONET AOD 拟合结果最好. 从



实线:回归曲线;虚线:期望误差线;% Within EE:落在误差范围内的样本数百分比;

% above EE:超出误差范围上限的样本数百分比;% below EE:低于误差范围下限的样本数百分比,下同

图2 北京站点 MODIS-AERONET 对比验证结果

Fig. 2 AERONET validation results of MODIS for the Beijing sites

该站点 DT C051、DT C006、DB C006 和 Combined C006 AOD 与 AERONET AOD 的拟合效果来看(图3), 相关系数 R 分别为 0.96、0.96、0.93 和 0.95, 落在期望误差范围内的样本数比例分别为 66.67%、79.31%、69.55% 和 73.85%, 斜率分别为 1.17、1.11、1.04 和 1.14, 表明 DT C006 AOD 更加适用于该站点, 这是因为香河站点被稀疏的建筑和农田环绕, 在暗像元法反演中地表反照率比北京站点的取值更准确^[14]。

兴隆站作为森林下垫面的代表, 综合拟合系数、落在期望误差范围内的样本比例等方面(图4)可知, 兴隆站 C006 DT AOD 较 C051 产品质量改善不明显, 但与北京、香河两个站点相比, 该站点 DT AOD 与 AERONET AOD 拟合结果最佳, 这是因为良好的植被覆盖使得地表反照率更容易准确设定^[13]。DT C051、DT C006、DB C006 和 Combined C006 AOD 与 AERONET AOD 的拟合系数 R 分别为 0.92、0.83、0.88 和 0.89, 落在期望误差范围内的样本比例依次为 77.03%、76.36%、96.23% 和 76.88%, 虽然 DB C006 落在期望误差范围内样本最多, 但是该算法的 AOD 均值显著低于 AERONET AOD 均值, RMB 仅为 0.83, 低估最严重, 而其他 3 种 AOD 产品 RMB 分别为 0.9、0.92 和 0.93, 低估

相对较好。同时, 该站点 DT 算法 AOD 反演结果整体优于 DB 算法, 说明在植被覆盖度较高的地区暗像元法较深蓝算法反演结果更精确。

综上所述, 与 C051 相比, C006 AOD 反演算法在北京、香河所代表的城市或城郊站点的改进是十分明显的; 而在兴隆这种植被覆盖度较高的暗地表改善并不明显, DT C051 在该点与 AERONET 拟合度最高。这与朱于红^[13]研究 C006 AOD 反演算法在杭州城市站点稍有下降的结果不同, 说明改进的 C006 AOD 反演算法在不同地区的适应性是不同的。3 种 MODIS C006 AOD 反演产品中, DB AOD 产品在北京站的适用性最佳, Combined AOD 产品其次, DT AOD 产品最差; DT AOD 产品在香河站的适用性最佳, Combined AOD 产品其次, DB AOD 产品最差; Combined AOD 产品在兴隆站的适用性最佳, DT AOD 产品其次, DB AOD 产品最差。

2.2 MODIS DT C006 与 DB C006 AOD 误差来源分析

MODIS AOD 反演的误差主要来源于两个方面: 地表假设和气溶胶模型假设。Levy 等^[20]认为当 $AOD < 0.15$ 时, 气溶胶影响相对较小, 这时卫星接收到的信号主要来源于地表的贡献, 此时不准确的地表反照率是反演误差的主要来源; 当 $AOD > 0.4$ 时, 相对于气溶胶信号, 地面的信号可以忽略, 此

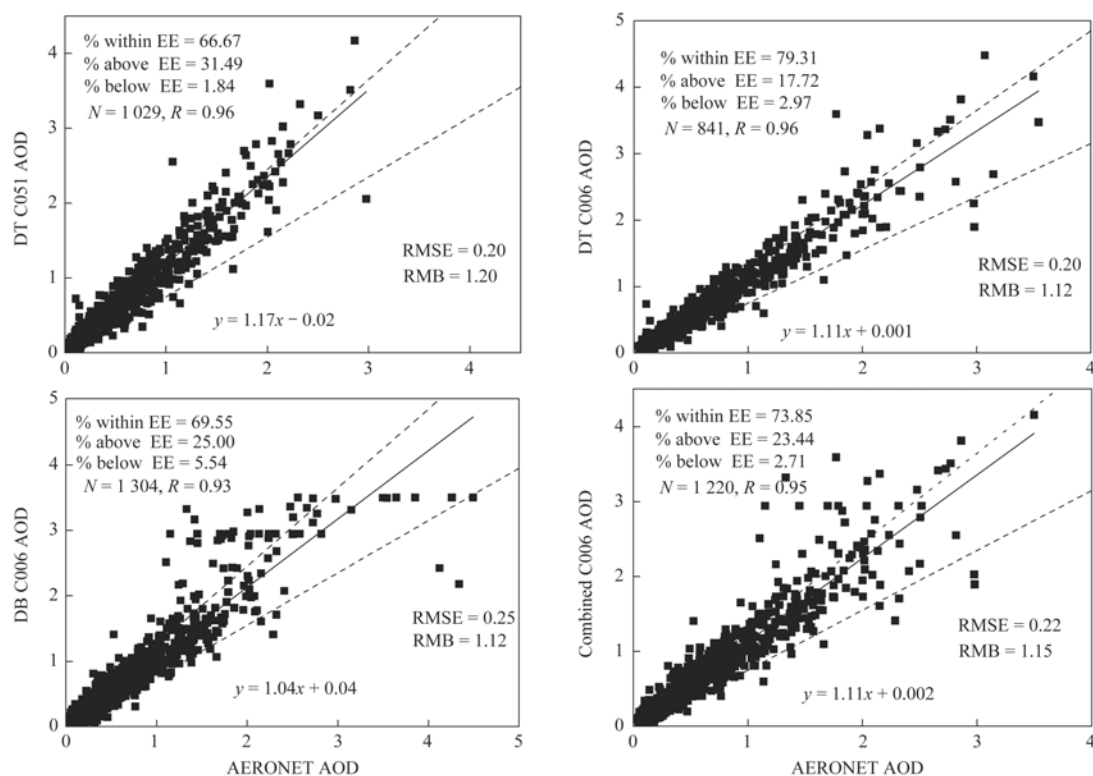


图3 香河站点 MODIS-AERONET 对比验证结果

Fig. 3 AERONET validation results of MODIS for the Xianghe sites

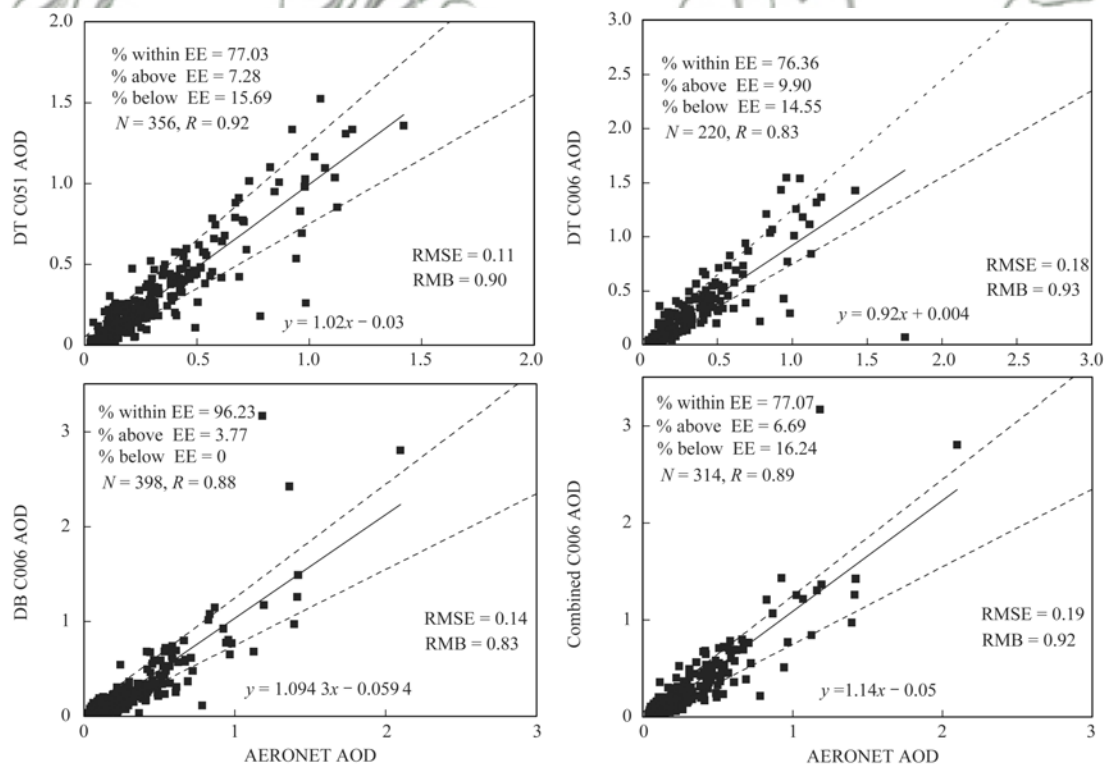


图4 兴隆站点 MODIS-AERONET 对比验证结果

Fig. 4 AERONET validation results of MODIS for the Xinglong sites

时气溶胶模型假设的不合理是反演误差的主要原因。因此,利用误差比ER分析DT AOD和DB AOD反演算法的误差来源。当AOD < 0.15时,若ER < 60%,则AOD的误差主要来源于地表;当AOD >

0.4时,若ER < 60%,AOD的误差则主要来源于气溶胶模型。

表3中列出了香河、北京和兴隆站全年与各季节两种算法AOD < 0.15和AOD > 0.4时的误差

比 ER. 北京站的 MODIS DT AOD <0.15 的样本太少, 无法得到此时的 ER; 当 MODIS DT AOD >0.4 时, 北京站全年与各个季节的 ER 都小于 60%, 误差较大, 可见此时 MODIS DT 反演误差主要来自不合适的气溶胶模型. DB AOD 在两种情况下只有当 AOD >0.4 时夏季 ER 仅为 53.57%, 低于 60%, 而其他情况全年与其他季节的 ER 均大于 60%, 说明 DB AOD 在北京站总体反演效果较好, 同时深蓝算法在夏季选取的气溶胶模型精度还需进一步修正.

香河站的 MODIS DT AOD 在两种情况下误差比 ER 均大于 60%, 说明香河站总体反演效果较好, 不过值得注意的是, 当 AOD >0.4 时, 春季 ER 最低, 为 60.81%, 说明在香河站春季的 MODIS 暗像元法选取的气溶胶模型还需进一步改善. 深蓝算法相对与暗像元法在该站点的两种情况下全年的

ER 分别降低了 14.84% 和 0.99%, 说明深蓝算法在该站点反演效果不如暗像元法, 与 2.1 节结果相符, 同时, 当 MODIS DB AOD <0.15 时, ER 最低值出现在春季, 为 55.56%; 当 MODIS DB AOD >0.4 时, ER 最低值出现在冬季, 为 51.72%; 说明该算法在香河站春季和冬季的反演误差分别来源于地表反照率和气溶胶模型.

与北京和香河站相比, 兴隆站除夏、秋和冬这 3 个季节的深蓝算法以及夏季的暗像元法样本数过少, 无法计算 ER 值外, 其他情况 (AOD <0.15 和 AOD >0.4) DT 和 DB 算法的 ER 值均大于 60%, 表明地表反照率和气溶胶模型的选取相对更合适, 因此该站点 MODIS DT 和 DB 算法反演的 AOD 结果均较好. 但是值得注意的是, DB C006 在 AOD >0.4 时的样本数过少, 所以该站点研究结果有待进一步验证.

表 3 各站点每个季节平均误差比 (ER)
Table 3 Error ratio (ER) at each site and for each season

站点	时段	MODIS DT C006				时段	MODIS DB C006			
		AOD <0.15		ADO >0.4			AOD <0.15		AOD >0.4	
		N	ER/%	N	ER/%		N	ER/%	N	ER/%
北京	全年	9	100	445	22.25	全年	322	82.61	400	79.00
	春季	0	—	160	15.63	春季	172	88.37	43	81.40
	夏季	0	—	198	20.20	夏季	43	76.74	84	53.57
	秋季	9	100	87	39.08	秋季	71	83.09	107	94.39
	冬季	0	—	0	—	冬季	114	63.16	88	96.59
香河	全年	174	94.83	410	69.51	全年	238	78.99	591	68.52
	春季	19	89.00	148	60.81	春季	36	55.56	204	73.53
	夏季	35	91.43	143	68.53	夏季	44	70.45	96	63.54
	秋季	109	86.33	115	80.87	秋季	89	86.52	146	81.51
	冬季	12	100	4	—	冬季	69	86.96	145	51.72
兴隆	全年	93	83.87	54	70.37	全年	264	83.33	44	90.91
	春季	24	62.5	25	68.00	春季	74	72.97	32	90.63
	夏季	13	84.62	12	69.23	夏季	18	77.78	4	—
	秋季	54	90.74	18	61.11	秋季	113	91.1	5	—
	冬季	2	—	0	—	冬季	59	83.0	3	—

2.3 MODIS AOD 有效数据覆盖度分析

为了研究 C006 算法改进对京津冀地区有效数据 (AOD 产品质量等级均为 3) 覆盖的影响, 本文给出了 MODIS 4 种 AOD 产品的有效数据样本数分布情况 (图 5), 发现有效数据多分布在北京、天津以及河北南部, 而北部的数据覆盖度较低. DT C006 AOD 样本区域均值 (2520) 较 DT C051 (3203) 减少了 683 个有效数据样本, 表明在京津冀地区 DT C006 有效数据的覆盖度下降, 而云检测算法的改动是一个重要原因^[12, 13]; Combined 与 DB C006 AOD 有效样本区域均值分别为 3 469 和 3 457 个, 比 DT C051 增加了 266 和 254 个样本, 说明 DB C006 及 Combined C006 增加了该区域的有效数据覆盖

率, 这与 levy 等^[12]对 C006 AOD 产品全球区域验证结果相同.

由 MODIS AOD 样本在京津冀的季节分布 (图 6) 可以看出, 样本覆盖度在秋季最高, 这是因为京津冀地区秋季满足反射率阈值的像元数最多 (DT 像元数为 35 789 351 个, DB 像元数为 51 208 273 个) 且云量较少 (秋季平均云量为 58.16%, 如表 4), 夏季 DT C006 和 C051 AOD 数据覆盖度较高, 植被覆盖度增加使得暗像元法 AOD 产品在京津冀地区的适用性增强^[14]. 而冬季 C006 DB AOD 与 Combined AOD 有效样本覆盖度增加, 是因为地表植被稀疏, 深蓝算法及暗像元法与深蓝算法融合的 AOD 产品更加适用于京津冀的地区.

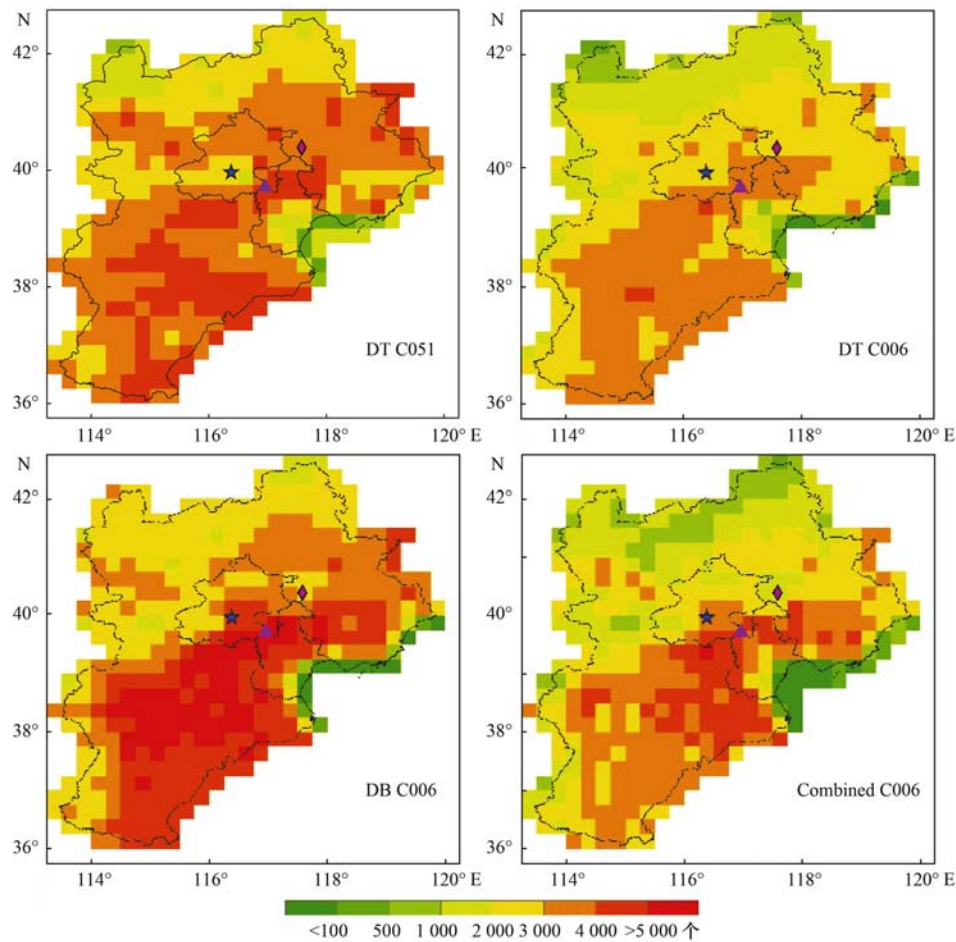


图 5 京津冀 2006~2015 年有效样本数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the number of effective data retrievals for the period 2006-2015 in the Beijing-Tianjin-Hebei region

表 4 京津冀地区各季节平均云量及像元数

Table 4 Seasonal average cloud cover and seasonal number of pixel in the Beijing-Tianjin-Hebei region

季节	云量/%	DT 像元数/个	DT 样本数/个	DB 像元数/个	DB 样本数/个
春季	56.84	21 340 621	226 900	40 175 139	429 849
夏季	65.56	29 783 391	317 096	20 760 606	225 052
秋季	58.16	35 789 351	363 861	51 208 273	537 914
冬季	78.23	677 225	8 830	32 513 484	345 538

2.4 MODIS AOD 时空分布特征分析

综合 2.1 节及 2.3 节的分析, Combined AOD 产品在京津冀地区适用性最强. 因此, 下面使用 Combined AOD 产品进行京津冀地区气溶胶光学厚度的分布研究.

从京津冀地区 2006~2015 年平均 AOD 空间分布来看(图 7), AOD 高值区主要集中在北京、天津以及河北南部(AOD > 0.7), 而低值区均在京津冀北部地区(AOD < 0.3), 京津冀北部多为山区, 植被覆盖度较高、人口密度较低, 而往南人口密度较大, 工业污染源较多^[21], 因此造成 AOD 高值区集中在北京、天津及河北南部, 低值区多分布在京津冀北部.

京津冀地区 MODIS AOD 的四季空间分布特征

(图 8)与其多年平均分布特征相似. 夏季 AOD 均值最高(0.6), 消光作用最强且影响范围最广, 这主要是因为夏季温度高使得气溶胶光化学反应更活跃, 生成大量二次气溶胶^[22~25], 二次气溶胶是细粒子的主要组成, 细粒子气溶胶在高湿度的情况下易吸湿增长^[26, 27], 显著增强气溶胶消光作用^[28]. 春季该地区常受沙尘远距离传输的影响, 且干燥的气候也有利于本地扬尘的产生^[29], 颗粒物粒径较大, 消光作用较强, 因此春季 AOD 均值也偏高(0.46)仅低于夏季. 冬季, AOD 值较低(0.37), 一是因为京津冀地区冬季常受到西北或偏北气流带来的清洁干空气影响^[30], 二是可能与污染物的边界层高度的季节性变化有关^[31]. 秋季 AOD 最低(0.34), 这可能与 8 月以后该地区降水增加、大气

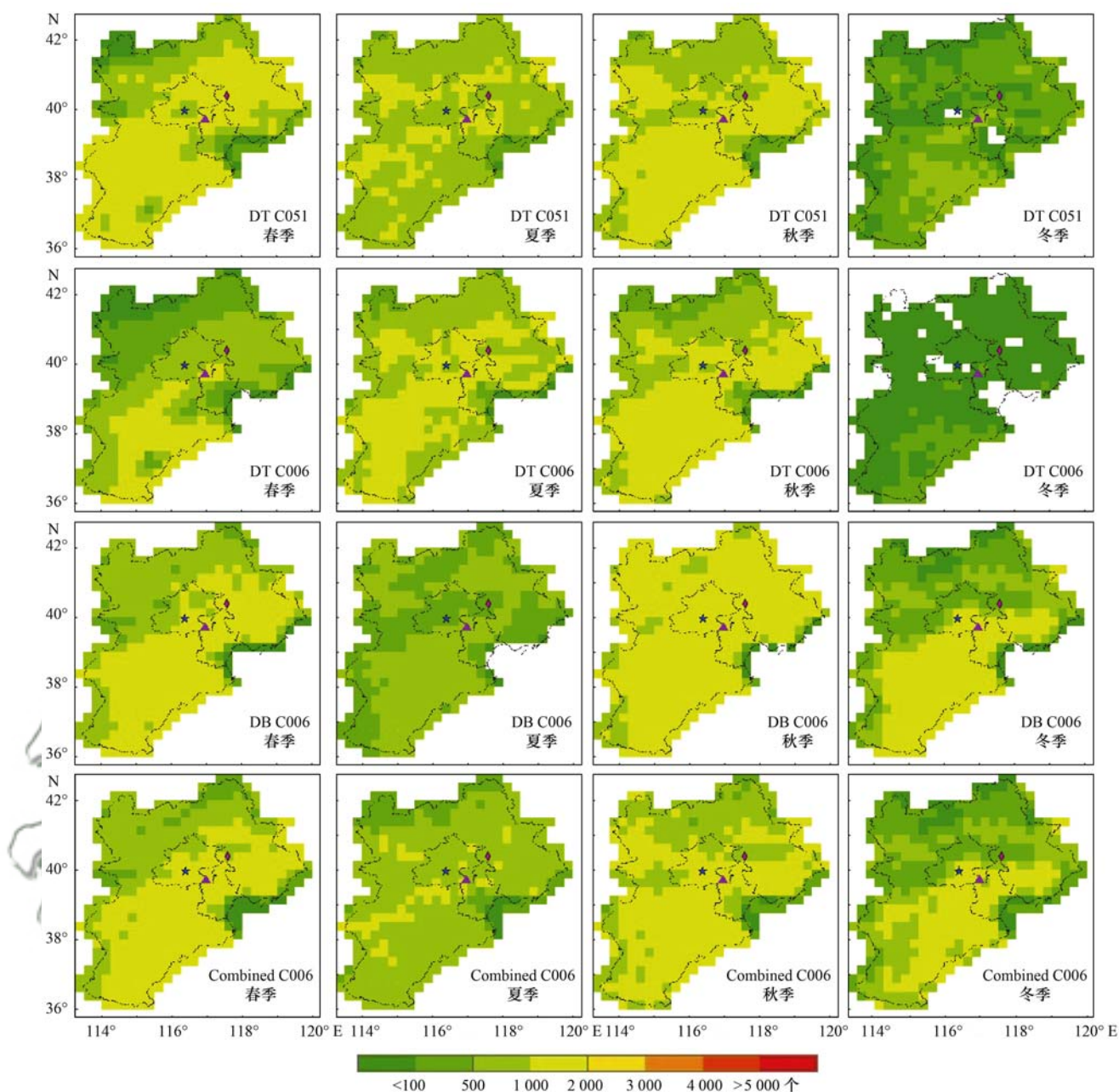


图6 京津冀 2006~2015 年有效样本数季节空间分布

Fig. 6 Seasonal spatial distribution of the number of effective data retrievals for the period 2006-2015 in the Beijing-Tianjing-Hebei region

气溶胶湿沉降的增加有关^[32].

3 结论

(1) 与 MODIS C051 AOD 产品相比, C006 AOD 反演算法在北京、香河所代表的城市或城郊站点的改进是十分明显的;而在兴隆这种植被覆盖度较高的暗地表改善并不明显. 在 C006 产品中, DB AOD 在代表城市的北京站的适用性最佳, Combined AOD 产品其次, DT AOD 产品最差. DT AOD 产品在位于城郊的香河站的适用性最佳, Combined AOD 产品其次, DB AOD 产品最差; Combined AOD 产品在植被茂盛的兴隆站的适用性最佳, DT AOD 产品其次, DB AOD 产品最差.

(2) DT C006 在北京站点的反演误差可能是由气溶胶模型与地表反照率共同造成, DB C006 在夏季选取的气溶胶模型精度还需进一步修正;香河站春季的 DT C006 反演算法选取的气溶胶模型还需进一步改善, DB C006 在香河站春季和冬季的反演误差主要来源分别是地表反照率和气溶胶模型. 与前两个站点相比, 兴隆站 DT 和 DB C006 地表反照率和气溶胶模型的选取相对更合适, 但该站点也存在样本数过少情况, 所以该站点研究结果有待进一步验证. 同时, 反演算法的误差分析是一项复杂的工作需要地表反照率、气溶胶模型等多方面的基础性研究结果进行支撑, 本文给出的是初步的结果, 后续还需要综合考虑多方面因素进行不断量化, 提

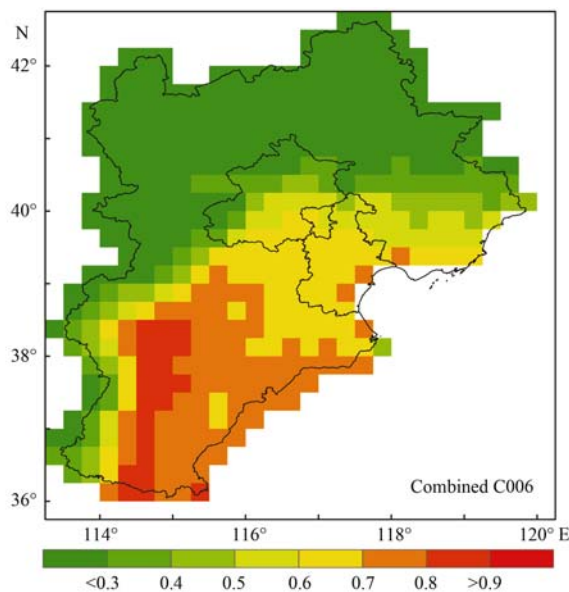


图7 京津冀2006~2015年平均AOD空间分布

Fig. 7 Mean spatial distribution of the mean AOD retrievals for the period 2006-2015 in the Beijing-Tianjing-Hebei region

高反演算法的精度.

(3) 有效样本数在京津冀地区的分布特征表明,相较于DT C051 AOD, DT C006 AOD有效数据覆盖率有所降低,而DB C006和Combined C006则增加了数据覆盖率,且Combined C006 AOD产品有效样本数最多.结合MODIS产品与各站点AERONET对比验证结果表明,Combined AOD产品对京津冀地区整体而言适用性最佳.

(4) 京津冀地区的AOD多年平均及季节空间分布结果表明,AOD高值区分布在北京、天津以及河北东南部,最高值约达0.9;低值区主要分布在京津冀北部.AOD季节分布结果表明,夏季AOD均值(0.6)最高,春季的AOD值略低于夏季,其次为冬季,秋季最低.

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

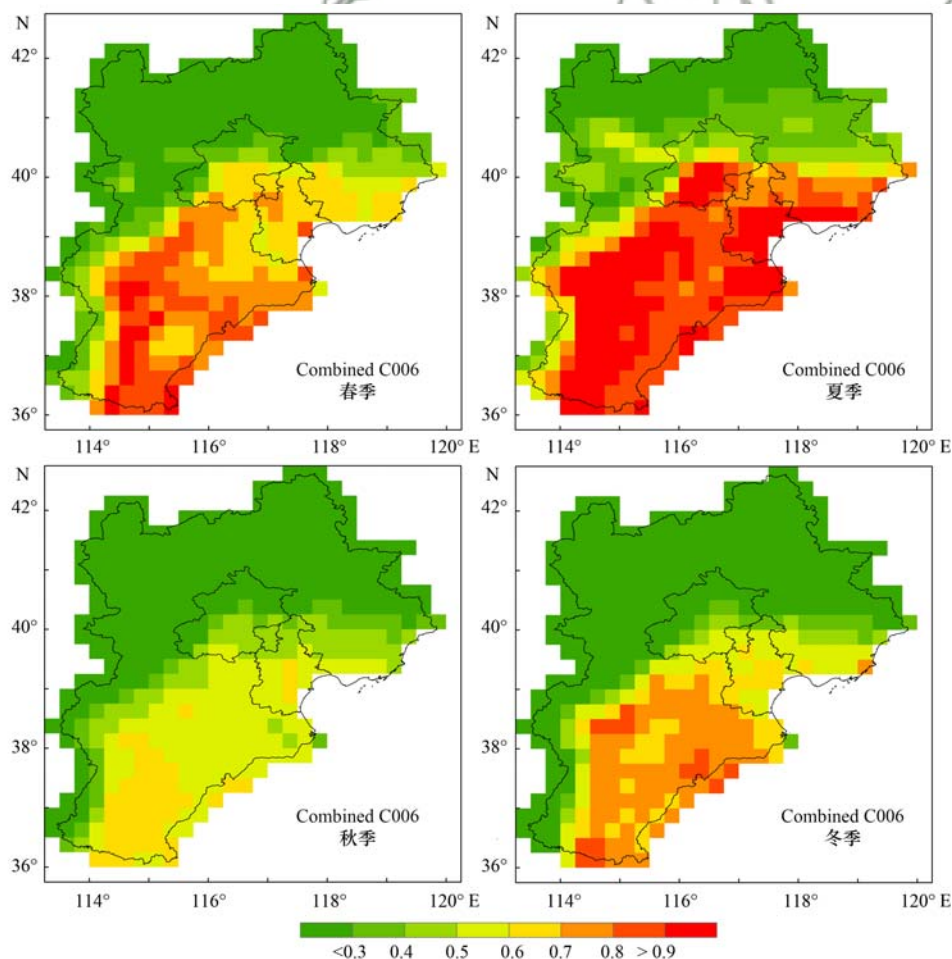


图8 京津冀2006~2015年平均AOD季节空间分布

Fig. 8 Seasonal spatial distribution of the mean AOD retrievals for the period 2006-2015 in the Beijing-Tianjing-Hebei region

参考文献:

- [1] Ramachandran S. Aerosol optical depth and fine mode fraction variations deduced from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) over four urban areas in India[J].

Journal of Geophysical Research, 2007, **112** (D16): D16207, doi: 10.1029/2007JD008500.

- [2] 刘玉杰,牛生杰,郑有飞.用CE-318太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J].南京气象学院学报, 2004, **27**(5): 615-622.

- Liu Y J, Niu S J, Zheng Y F. Optical depth characteristics of Yinchuan atmospheric aerosols based on the CE-318 sun tracking spectrophotometer data [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, **27**(5): 615-622.
- [3] 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.
- [4] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 826-834.
- Lin H F, Xin J Y, Zhang W Y, *et al.* Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 826-834.
- [5] 周春艳, 柳钦火, 唐勇, 等. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价[J]. *遥感学报*, 2009, **13**(5): 854-872.
- Zhou C Y, Liu Q H, Tang Y, *et al.* Comparison between MODIS aerosol product C004 and C005 and evaluation of their applicability in the north of China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(5): 854-872.
- [6] Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, *et al.* Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(35): 6317-6325.
- [7] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D14): 17051-17067.
- [8] 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.
- [9] Papadimas C D, Hatzianastassiou N, Mihalopoulos N, *et al.* Assessment of the MODIS Collections C005 and C004 aerosol optical depth products over the Mediterranean basin [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(9): 2987-2999.
- [10] Twohy C H, Coakley Jr J A, Tahnk W R. Effect of changes in relative humidity on aerosol scattering near clouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D5): D05205.
- [11] Charlson R J, Ackerman A S, Bender F A M, *et al.* On the climate forcing consequences of the albedo continuum between cloudy and clear air [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, **59**(4): 715-727.
- [12] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [13] 朱于红. MODIS C006 气溶胶产品评估及其在省域大气污染研究中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Zhu Y H. Evaluation of MODIS Aerosol product collection 006 and its application to air pollution research in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [14] Wang K, Sun X J, Zhou Y B, *et al.* Validation of MODIS-aqua aerosol products C051 and C006 over the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(9): 172.
- [15] Wei J, Sun L. Comparison and evaluation of Different MODIS aerosol optical depth products over the Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(3): 835-844.
- [16] Bilal M, Nichol J E. Evaluation of MODIS aerosol retrieval algorithms over the Beijing-Tianjin-Hebei region during low to very high pollution events [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(15): 7941-7957.
- [17] Zhang Q, Xin J Y, Yin Y, *et al.* The variations and trends of MODIS C5 & C6 products' errors in the recent decade over the background and urban areas of North China [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(9): 754.
- [18] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. *Tellus*, 1964, **16**(1): 64-75.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 张西雅, 扈海波. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究 [J]. *大气科学*, 2017, **41**(4): 797-810.
- Zhang X Y, Hu H B. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(4): 797-810.
- [22] Jang M, Czoschke N M, Lee S, *et al.* Heterogeneous atmospheric aerosol production by acid-catalyzed particle-phase reactions [J]. *Science*, 2002, **298**(5594): 814-817.
- [23] Claeys M, Graham B, Vas G, *et al.* Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene [J]. *Science*, 2004, **303**(5661): 1173-1176.
- [24] Lim Y B, Tan Y, Perri M J, *et al.* Aqueous chemistry and its role in secondary organic aerosol (SOA) formation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(21): 10521-10539.
- [25] Ehn M, Thornton J A, Kleist E, *et al.* A large source of low-volatility secondary organic aerosol [J]. *Nature*, 2014, **506**(7489): 476-479.
- [26] He Q S, Li C C, Geng F H, *et al.* Aerosol optical properties retrieved from Sun photometer measurements over Shanghai, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D16): D16204, doi: 10.1029/2011JD017220.
- [27] 李琦, 银燕, 顾雪松, 等. 南京夏季气溶胶吸湿增长因子和云凝结核的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 337-346.
- Li Q, Yin Y, Gu X S, *et al.* An observational study of aerosol hygroscopic growth factor and cloud condensation nuclei in Nanjing in summer [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 337-346.
- [28] 陈一娜, 赵普生, 何迪, 等. 北京地区大气消光特征及参数化研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3582-3589.
- Chen Y N, Zhao P S, He D, *et al.* Characteristics and parameterization for atmospheric extinction coefficient in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3582-3589.
- [29] 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.
- [30] 晏利斌, 刘晓东. 京津冀地区气溶胶季节变化及与云量的关系[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(8): 924-931.
- Yan L B, Liu X D. Seasonal variation of atmospheric aerosol and its relation to cloud faction over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22** (8): 924-931.
- [31] 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.
- [32] 罗宇翔, 陈娟, 郑小波, 等. 近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(5): 876-883.
- Luo Y X, Chen J, Zheng X B, *et al.* Characteristics of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21** (5): 876-883.

环 境 科 学

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)