

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.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	《环境科学》征稿简则(5039)
信息(4782, 4979, 5056)	

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素

陈香月^{1,2}, 丁建丽^{1,2*}, 王敬哲^{1,2}, 葛翔宇^{1,2}, 梁静^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 气溶胶光学厚度(AOD)描述了气溶胶对光的衰减作用, 并在一定程度上反映区域大气污染程度. 本研究以2000年~2015年长时间序列MOD09A1数据为本底, 在生成查找表的基础上, 采用深蓝算法(DB)对艾比湖流域2000年~2015年Landsat TM/ETM+/OLI数据进行AOD遥感估算, 分析艾比湖流域AOD时空变化特征, 结合环境变量选用随机森林模型(RF)对AOD进行预测及因子贡献度排序. 结果表明: ①艾比湖流域AOD呈现显著的季节性变化特征, AOD值春季(0.414) > 夏季(0.390) > 秋季(0.287), 其中春季变化幅度最大. ②艾比湖流域平均AOD为0.374, 年际变化整体表现为上升趋势, 但在2010~2015年间AOD增加较快, 年际增幅达到32.32%, 表明该流域近15年间的大气污染不断加剧, 近5年尤甚. ③艾比湖流域AOD空间分布从艾比湖北部到南部呈阶梯式上升变化, 其中, 精河县污染最为突显, AOD值达到0.483. ④RF模型对AOD的预测效果较好, $R^2 = 0.866$, RMSE = 0.042, 其中蒸散发对艾比湖流域AOD影响最为显著.

关键词: 气溶胶光学厚度(AOD); 随机森林模型(RF); 深蓝算法(DB); 艾比湖流域; 时空变化

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4824-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904200

Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin

CHEN Xiang-yue^{1,2}, DING Jian-li^{1,2*}, WANG Jing-zhe^{1,2}, GE Xiang-yu^{1,2}, LIANG Jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Aerosol optical depth (AOD) describes the attenuation of light by aerosols and reflects the degree of regional air pollution to some extent. This study was based on the data from the long-term sequence MOD09A1 from 2000 to 2015 and the generation of a lookup table using the deep blue algorithm (DB) to perform AOD remote sensing estimation on the Landsat TM/ETM+/OLI data from the Ebinur Lake Basin to analyze the temporal and spatial variation characteristics of AOD in the Ebinur Lake Basin and to perform an AOD prediction and factor contribution ranking using the random forest model (RF) combined with environmental variables. The results showed that: ① AOD of Ebinur Lake Basin has significant seasonal variation characteristics, and the AOD values were spring (0.414) > summer (0.390) > autumn (0.287), with the largest variation in spring. ② The AOD average of the Ebinur Lake Basin was 0.374, and the interannual variation as a whole showed an upward trend. However, the AOD increased rapidly during 2010-2015, with an interannual increase of 32.32%, which indicated increasing air pollution in the basin over the past 15 years, especially the past five years. ③ The spatial distribution of AOD in the Ebinur Lake Basin was stepped up from the north to the south of Lake Ebinur. In this area, the pollution in Jinghe County was the most prominent, and the AOD value reached 0.483. ④ The RF model had a good predictive effect on AOD, $R^2 = 0.866$, RMSE = 0.042, and evapotranspiration had the most significant effect on AOD in the Ebinur Lake basin.

Key words: aerosol optical depth (AOD); random forest model (RF); deep blue algorithm (DB); Ebinur Lake Basin; spatial and temporal changes

气溶胶是悬浮在大气中直径为 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 固态或液态颗粒构成的多相体系的总称^[1], 通过吸收、散射太阳辐射等方式直接、间接或半直接影响全球气候变化. 气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 作为气溶胶最基本的光学特性之一, 该参数描述了气溶胶对光的衰减作用, 一定程度上可作为局域空气污染程度的指示特征.

传统的 AOD 一般通过地基站点获得, 缺乏空间连续性, 无法满足区域性研究需要. 遥感基于其自身的优势, 使得大范围时空尺度上获取 AOD 变得可行, 可最大限度地弥补地基观测数据的不足,

解决数据缺乏和空间分布不均问题. 在我国中东部地区气溶胶遥感已积累大量研究, 但受限于站点数据的缺乏, 目前对西北干旱半干旱地区的相关研究相对有限. 针对不同卫星数据和不同地区气候、地形等特点, 学者们先后提出了多种 AOD 反演算法, 目前可用于陆地 AOD 反演的主要有暗目标法^[2]、

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771470); 自治区研究生科研创新项目

作者简介: 陈香月(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区环境遥感, E-mail: cxy.19940520@gmail.com

* 通信作者, E-mail: watarid@xju.edu.cn

结构函数法^[3]、深蓝算法(deep blue algorithm, DB)^[4,5]、偏振算法^[6]和多角度算法^[7]等。但大多数算法对亮目标地区 AOD 反演并不适用或应用性较低,针对亮地表的陆地气溶胶反演,DB 已成功应用于撒哈拉沙漠、阿拉伯半岛等干旱、半干旱地区,且由于其自身特性和简单易行成为亮目标 AOD 反演主流算法。王中挺等^[8]和田信鹏等^[9]分别基于 HJ-1 和 Landsat OLI 卫星应用深蓝算法实现了北京地区高空间分辨率的气溶胶厚度反演,Sun 等^[10,11]利用 GF-1WV 数据反演获得武汉市局部气溶胶的空间分布。目前针对 AOD 的研究已从传统的地面观测转向地基遥感,卫星遥感协同研究等,但大多数工作集中在公里级空间尺度上 AOD 研究,且对于干旱半干旱区典型内陆湖流域少有涉及。艾比湖流域作为干旱区典型流域,是新疆维吾尔自治区尤其是北疆地区天然的生态屏障,具有极其重要的战略地位。但近些年来,由于自然和人为因素影响,加之其生态系统脆弱性,湖泊干涸,大量湖床裸露出来,对周围地区尤其是下风向地区带来了严重危害。

基于此,本研究以艾比湖流域为靶区,通过 MOD09A1 数据蓝光波段构建地表蓝光波段地表反射率数据库,分析不同典型地物在 Landsat TM \ ETM+ \ OLI 传感器蓝波段和 MODIS 蓝波段的反射

率关系,完成传感器校准,利用改进的 DB 实现 Landsat 数据逐像元角度 AOD 反演,并首次将逐像元角度反演的方法用于干旱半干旱区域 AOD 分辨率反演,得到了艾比湖流域多年的 500 m 分辨率 AOD,获取大气 AOD 的时空分布信息,并通过 RF 进行预测和影响因子的重要度排序,以期为全面了解和认识艾比湖流域 AOD 浓度及分布状况提供参考,并为艾比湖流域大气环境治理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖流域($43^{\circ}38' \sim 45^{\circ}52' \text{N}$, $79^{\circ}53' \sim 85^{\circ}02' \text{E}$)位于欧亚大陆腹地,三面环山,东北部与古尔班通古特沙漠相连(图 1),欧亚大陆桥从湖西南部穿过。属典型的温带大陆性气候,蒸降比高,全年多大风天气。受地形、地貌特征和气候条件的影响,艾比湖水质矿化度高,富含盐离子成分,湖面萎缩造成大面积干涸湖底裸露,大量盐尘裸露出地面,土壤盐渍化严重^[12]。裸露盐尘在来自西北部阿拉山口的强风影响下以颗粒物的形式悬浮在空中,向周围扩散形成盐尘暴,对下风向的生态系统造成了严重的影响,部分粉尘颗粒上升至高空大气,经传播甚至可到达华北等地区,对途经地区的社会、经济、生活等造成严重影响^[13]。

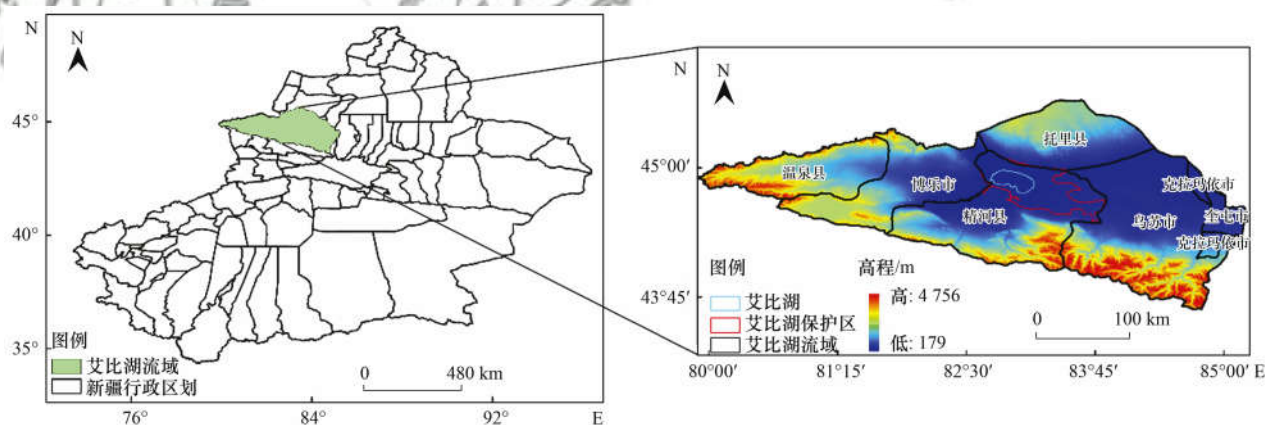


图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Location of study area

1.2 卫星遥感数据

1.2.1 Landsat 系列数据

本研究采用了 Landsat TM、ETM、OLI 遥感影像,其中 2000 年是 Landsat ETM,2005 年和 2010 年为 Landsat TM 数据,2015 年是 Landsat OLI,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d。通过 USGS 网站分别下载 2000、2005、2010 和 2015 年过境艾比湖流域的 Landsat 系列数据,数据每年分四季,每季为 5 景,行列号分别为 145/28、145/29、146/28、

146/29 和 147/29,对应季节可能出现影像缺失,选择前后年同期影像予以补充,每景影像云量控制在 15% 内,选取优质晴空影像共计 80 景,对影像进行辐射定标,大气校正,裁剪,镶嵌等预处理后,进行波段运算分类等信息提取,得到艾比湖流域湖泊面积及归一化植被指数(normalized difference vegetation, NDVI)等环境协变量。

1.2.2 MODIS 数据

MODIS 提供了从可见光波段($0.4 \mu\text{m}$)到中红

外波段(14 μm)的长时间序列全球观测资料,时间分辨率为1~2 d. 本研究从NOAA官网下载2000~2015年的8天合成产品MOD09A1反射率构建地表反射率数据集,行列号为H23V04、H24V04,空间分辨率为500 m. 通过MRT工具进行投影转换,镶嵌,利用ENVI软件进行每个月地表反射率最小值合成,尽可能地避免云的干扰,使地表反射率尽量接近于真实情况,得到MOD09A1蓝光波段的地表反射率月数据集;同时下载与Landsat影像过境时间同一天的MOD04_L2_C006 AOD数据,分辨率为10 km,该数据提供基于暗像元和DB两种算法的AOD,本研究选用DB辅助验证.

1.3 气象数据

气象数据资料由新疆地区气象站点提供,数据包括温度、降水、蒸散发等. 根据通用气象划分法划分标准将3~5月划分为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12月~翌年2月为冬季,并常把4、7、10和1月作为春、夏、秋和冬季的代表月份. 为与反演的气溶胶数据进行时间尺度匹配,选取2000、2005、2010和2015年这4个年份3~11月计36个月的气象数据,分别对每年的3~5、6~8和9~11月求平均,得到季平均温度、降水和蒸散发.

1.4 太阳光度计采样数据

本文AOD观测使用的是MicrotopsII太阳光度计,这是一款便携式手持多波段太阳光度计,选取观测波段分别为440、675、870、936和1020 nm^[13],在艾比湖下风向精河县和乌苏市两地设立太阳光度计观测点. 观测时间为每年供暖结束后的4月和夏季代表月份7月,观测时段为北京时间09:30~21:00,采样时间间隔设置为15 min. 基于DB算法反演获取的是550 nm处的AOD值,为将太阳光度计实测AOD与遥感反演AOD进行对比分析,利用地基观测数据通过Ångström指数公式计算获取太阳光度计在波长为550 nm处AOD值,得到AOD_{550 nm}处的值^[14]. 为降低时间尺度的影响,将卫星过境前后0.5 h内共5次实测AOD_{550 nm}地基观测结果进行平均,利用其对Landsat卫星DB反演AOD进行辅助验证.

1.5 气溶胶反演原理

大气气溶胶遥感是基于传感器所获取的大气顶辐射亮度与地表反射率特性之间的关系来达到求解气溶胶相关参数的目的. 事实上,卫星传感器所受到的大气顶层辐射能量来源广泛,是电磁波与地气系统多次相互作用耦合呈现. 假设地面是朗伯体,在大气条件均一的情况下,卫星传感器在可见

光-近红外波段收到的辐射能量 L_{TOA} 可表示为^[15]:

$$L_{\text{TOA}}(\mu_s, \mu_v, \varphi) = L_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{r}{1 - rS} \mu_s F_0 T(\mu_s) T(\mu_v) \quad (1)$$

式中, μ_s 与 μ_v 分别为太阳天顶角与观测天顶角的余弦, ϕ 为相对方位角, L_0 为观测方向的路径辐射项, r 为朗伯体地表反射率, S 为大气整层向下的半球反射率, T 为大气透过率, F_0 为大气层顶太阳光的辐射通量密度.

利用卫星遥感反演陆地AOD的难点在于气溶胶模式的确定和地表反射率贡献的去除,卫星气溶胶遥感的实质即从卫星接收到的辐射信号中将地表反射率噪声剔除,获取大气气溶胶信息的过程. 故地表反射率的准确量化是气溶胶遥感估算中至关重要的一环^[16]. Kaufman等^[2]的研究表明,地表反射率0.01的误差会造成通过遥感估算的AOD反演误差达到0.1. 在本文反演中首先利用MODIS 500 m分辨率的MOD09A1反射率数据产品构建了地表反射率数据集,构建方法是利用2000、2005、2010和2015年的覆盖研究区范围地表反射率数据产品,镶嵌后通过最小值合成得到每月MOD09A1蓝光波段500 m分辨率的最小值地表反射率月产品数据集,采用最小值合成方法可以有效消除云的影响;其次,基于不同卫星传感器其自身光谱条件的差异性,使得具有相同反射特性的同一地物在不同的传感器上可能表现出不同的反射光谱特征. 基于此,对传感器进行光谱转换校正到同一基准后,基于6S辐射传输模型模拟在不同大气条件(主要是不同气溶胶模式)和观测几何条件下各参数之间的关系,构建查找表,利用DB算法逐像元角度去除地表贡献实现地气解耦,反演得到AOD.

1.6 随机森林模型

随机森林(random Forest, RF)算法是通过集成学习(ensemble Learning)的思想将多颗决策树(decision Tree)集成的一种分类和回归机器学习算法,当使用RF进行回归时,输出结果是所有决策树输出的平均值^[17,18]. RF具有适用于变量多、样本少的优点,还能对变量的控制因素进行排序,并提供每个变量的相对重要性^[19],对于不平衡的样本,RF还能平衡误差,在避免过拟合和降低泛化误差等方面具有独到的优势^[20]. 本研究以艾比湖流域AOD作为因变量,以气温、降水量、蒸散发、艾比湖湖泊面积、NDVI这5个环境协变量作为自变量. 本研究利用RF模型对艾比湖流域AOD进行模拟,并得出各环境协变量对AOD的贡献程度.

2 结果与分析

2.1 反演验证

为验证该算法在艾比湖流域的适用性, 利用手持太阳光度计实测数据和 MODIS/Terra 气溶胶产品 (MOD04_L2) 分别对结果进行验证 (图 2). MODIS AOD 产品已被大量学者广泛接受、应用和认可^[21-25], 通过将反演 AOD 与 MODIS AOD 产品进

行对比验证, 发现 $R=0.928$, $R^2=0.861$, $RMSE=0.024$, 反演效果与 MODIS AOD 整体趋势较为一致. 通过与手持太阳光度计实测数据进行对比分析, 得到 $R=0.920$, $R^2=0.847$, $RMSE=0.073$, 拟合曲线与 1:1 线高度一致, 反演精度高. 且无论是与 MOD04_L2 亦或是手持太阳光度计观测数据, 二者与遥感反演 AOD 的趋势一致, 故通过 DB 算法反演的艾比湖流域 AOD 数据质量较为可信.

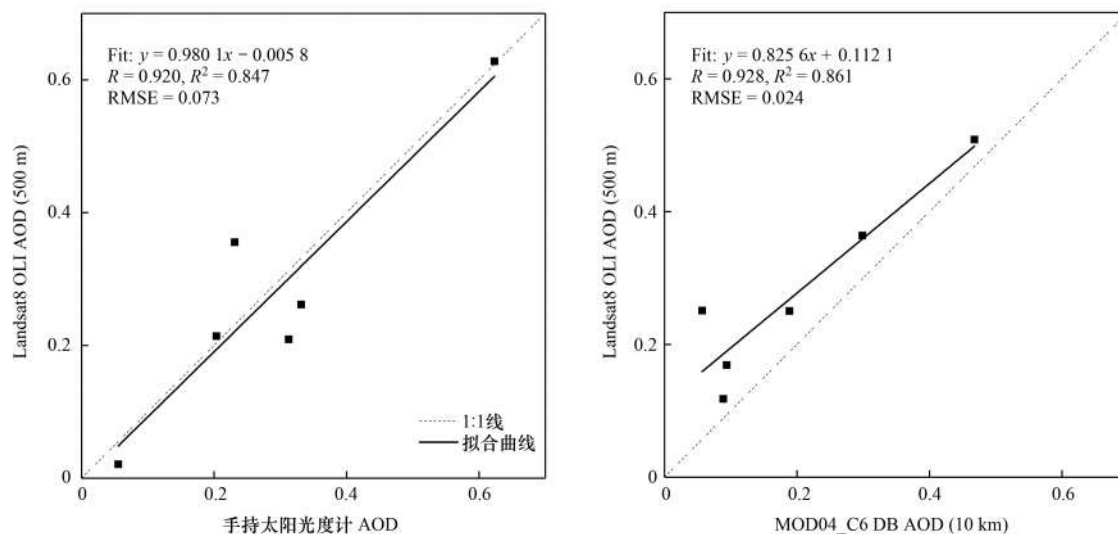


图2 Landsat 8 OLI 反演结果与 MOD04 产品及太阳光度计地基观测值对比

Fig. 2 Comparison between AOD retrieved from Landsat8 OLI images, the MOD04 product, and ground-based observations of a solar photometer

2.2 艾比湖流域 AOD 时空分布特征

由于研究区特殊的地理位置和自然条件, 艾比湖流域地表冬季长期被大量积雪覆盖, 地表反射率过高, 对估计气溶胶对太阳辐射贡献产生很大干扰, 极其不利于地气解耦. 且冬季艾比湖流域下垫面被积雪覆盖, 不易起尘, AOD 浓度较低, 研究的意义有限. 故以下着重分析艾比湖流域春夏秋三季 AOD 时空变化特征, 反演结果如图 3 所示.

2.2.1 AOD 季节分布特征

通过对 Landsat 系列影像利用 DB 进行 AOD 反演, 分别获取 2000、2005、2010 和 2015 年艾比湖流域春、夏和秋三季平均 AOD. 在此基础上, 比较分析艾比湖流域 AOD 季节空间分布. 由图 3 和图 4 可知, 艾比湖流域 AOD 整体空间分布趋势呈现为精河县 AOD 值最高, 其次是乌苏、博乐市, 托里县 AOD 浓度最低. 可以发现, 艾比湖东南部的精河县平均 AOD 浓度在 3 个季节里都占有绝对的优势, 其中春季平均 AOD 浓度最高, 达到了 0.537 左右, 夏季次之, 秋季最低, 但都高于流域内其他市县. 在精河县内, 相较于其他区域, 艾比湖保护区 AOD 浓度居高不下, 对整个县的 AOD 贡献最大, 主要高值区分布在裸露湖床及艾比湖下风向, 其中春季

AOD 高值区向东南方向扩张最远, 夏季次之, 秋季最近, 但都有向下风向扩散的趋势, 这主要是由于春季为大风多发期, 冰雪初融, 地面大量裸露, 裸露的盐尘在大风的作用下刮起来向下风向扩散. 相较于精河县的高 AOD 值, 乌苏市与博乐市 AOD 浓度不相上下, 但在不同的季节里略有偏差, 春季乌苏市平均 AOD 浓度为 0.417, 博乐市平均 AOD 为 0.393, 乌苏市平均 AOD 浓度略大于博乐. 这主要是由于乌苏市位于艾比湖流域的东南方向, 刚好处于阿拉山口的下风向, 裸露的盐尘在春季大风的作用下刮起来向下风向扩散, 导致乌苏春季 AOD 高, 但夏季博乐市 AOD 浓度比乌苏高. 位于艾比湖流域北部的托里县 AOD 浓度最低. 春季 AOD 高值点均分布于艾比湖的东南方位, 表明春季艾比湖流域大气污染严重, 下风向空气质量状况出现大范围下降区.

2.2.2 AOD 季节时序变化

对研究区域内进行区域空间像素点平均, 得到了艾比湖流域 15 年间典型年份平均 (2000-03 ~ 2016-02) AOD 季节时间变化特征. 如图 3 和图 5 所示, 艾比湖流域 AOD 整体分布趋势时间尺度上表现为: 在整个研究区内, 春季 AOD 浓度均值为三季

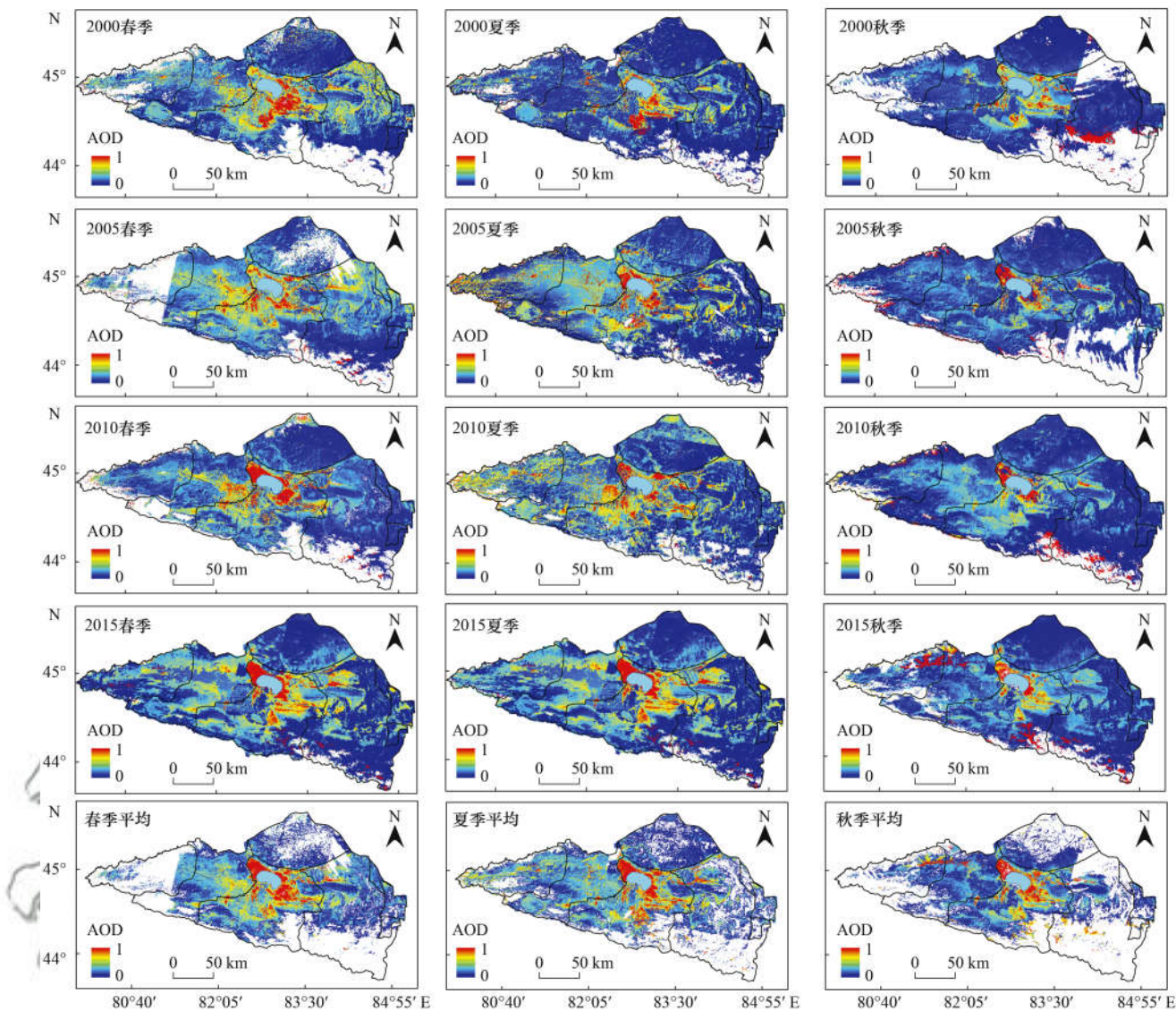


图3 典型年份(2000~2015年)Landsat数据AOD反演结果
Fig. 3 Retrieved AOD for Landsat data from typical years 2000-2015

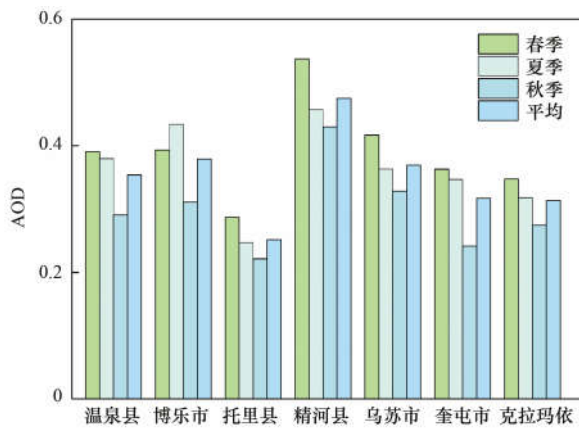


图4 AOD季节空间分布
Fig. 4 Seasonal spatial distribution of average AOD

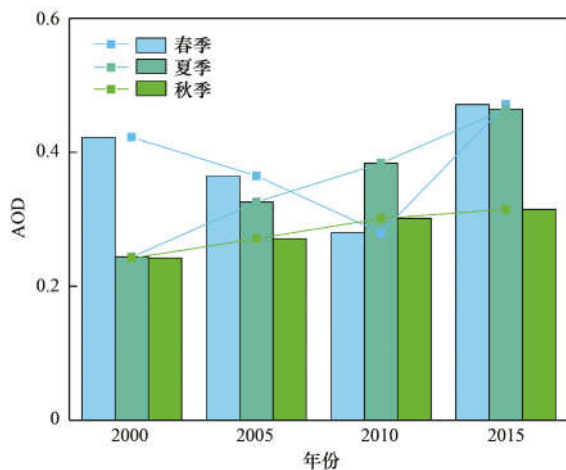


图5 平均AOD季节变化
Fig. 5 Seasonal variation of average AOD

最高,说明春季艾比湖流域大气污染情况较夏、秋而言严重,空气质量相对而言最差。艾比湖流域多年的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浓度达四季最大值0.414,夏季、秋季次之,AOD在秋季达四季最小值0.286,变化趋势较稳定。从春季到秋季,AOD浓度呈降低趋势,说明该地区尘暴天气多发于春

季. 这主要是因为春季大风天气频发, 空气湿度较低, 冰雪初融, 大量荒漠土裸露出来, 加上春耕等人类活动某种程度上加剧了干涸湖底及周边重度盐渍化土壤的风蚀和起尘活动. 夏季地表空气温度较高, 大气透明度好, 地表植被覆盖度大大增加, 故由地表进入大气的气溶胶粒子数据减少, 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^[26], 表现为夏季 AOD 浓度较春季出现下降, 同时艾比湖流域由于有艾比湖的存在, 夏季蒸发较其他季节显著增加, 大气中水汽含量高, 而水汽对 AOD 增长起着贡献作用^[27], 降雨清洗和水汽贡献等多方面作用使得夏季 AOD 仍维持在比较高水平下. 秋季 AOD 均值为三季最低, AOD 变化幅度亦为三季最小, 而秋季 AOD 出现低值的原因不同于夏季, 主要是由于研究区秋季大气受局部高压控制, 大气系统较稳定^[28]. 由图 5 可知, 从 2000 ~ 2015 年, 夏、秋季节 AOD 均呈一个增长趋势, 春季呈先降低再升高的特征, 其中春季变化幅度大, 这主要是由于春季处于一个尘暴多发期, 但总的趋势说明艾比湖流域空气质量在恶化, 这主要源于人类不合理的水资源配置和不合理的土地开发利用.

2.2.3 AOD 年变化分析

通过对由 Landsat 反演得到的 2000、2005、2010 和 2015 年这 4 年艾比湖流域 AOD 数据进行分析, 得到了该流域这些年的 AOD 年内变化和年际变化特征. 如图 6 所示, 从 2000 ~ 2015 年 AOD 浓度呈递增趋势, 尤其在 2010 ~ 2015 年, AOD 增加幅度最大, 年际增幅分别为 15.75%、6.15% 和 32.32%. 其中精河县 AOD 值最高, 达到了 0.483, 博乐和乌苏不分上下, 托里县 AOD 最低不到 0.290. 温泉县 AOD 主要是由于自身特殊的地理位置和地热资源, 配合阿拉山口的大风进入艾比湖流域与干涸湖床作用, 大风中携裹着大量含盐粉尘向东南向扩散时遇博罗科努山的分支, 气流被分为两支, 一支沿天山北坡向东南方向扩散, 影响天山北坡经济带乌鲁木齐等重要城市; 另一支气流折向西北博乐、温泉方向, 这可能是博乐、温泉空气质量不佳的原因之一^[29]. 由图 7 可知, 各县市的 AOD 在 15 年间均呈增加趋势, 其中精河年均值远远高于其他县市, 是受艾比湖尘暴影响最严重的区域; 其次是博乐和乌苏, 其走势较为一致, 托里县受到影响最小.

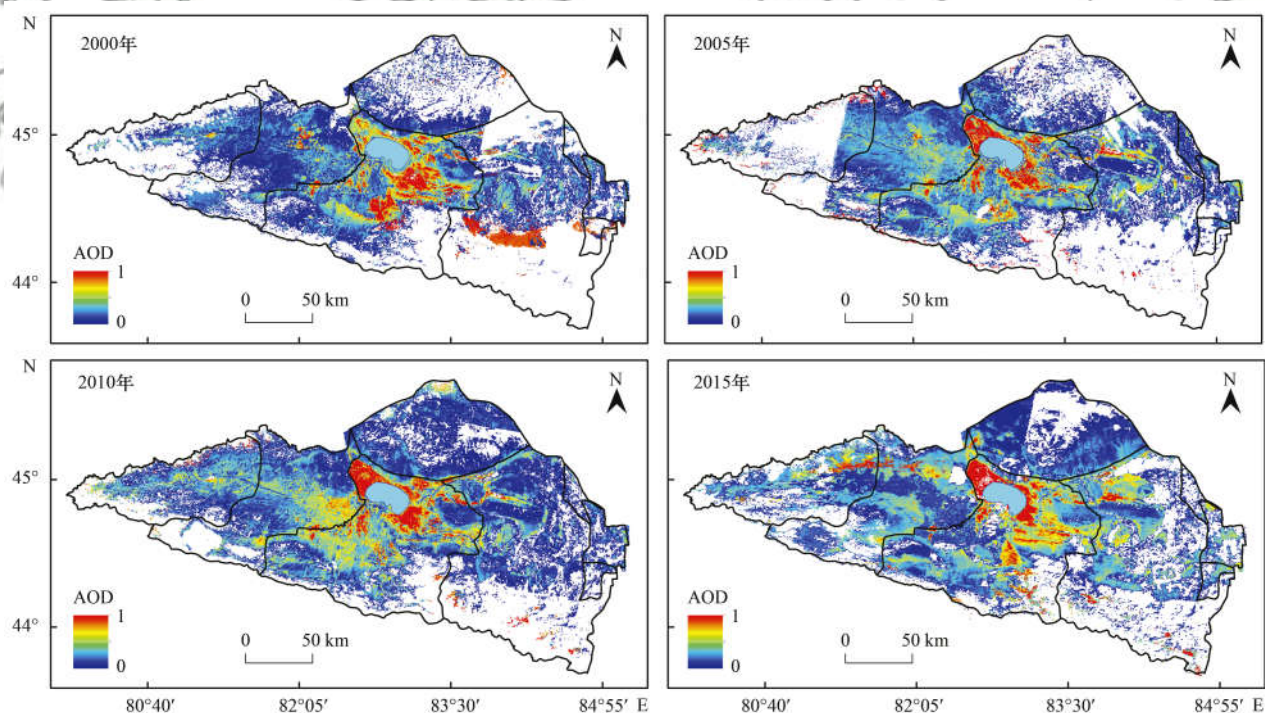


图 6 典型年份(2000 ~ 2015 年)气溶胶年均 AOD 分布

Fig. 6 Spatial distribution of mean AOD during typical years 2000-2015

2.3 艾比湖流域 AOD 与环境要素的综合估算模型

本研究表明利用 RF 通过所选环境协变量估算 AOD 具有很好的应用潜力, 如图 8 所示. RF 预测值与反演值高度一致, R^2 达到 0.866, RMSE 为 0.042, 且均匀分布在 1:1 线左右. 其中, 环境协变

量对 AOD 影响排序为蒸散发 > 温度 > 湖面面积 > NDVI > 降水, 蒸散发对 AOD 影响最大, 降水最小, 权重分别对应为 0.029 和 0.005. 可以看出, 降水对艾比湖流域 AOD 不是主要影响因素, 这可能是由于该区地处亚欧大陆腹地, 降水稀少引起. 可得

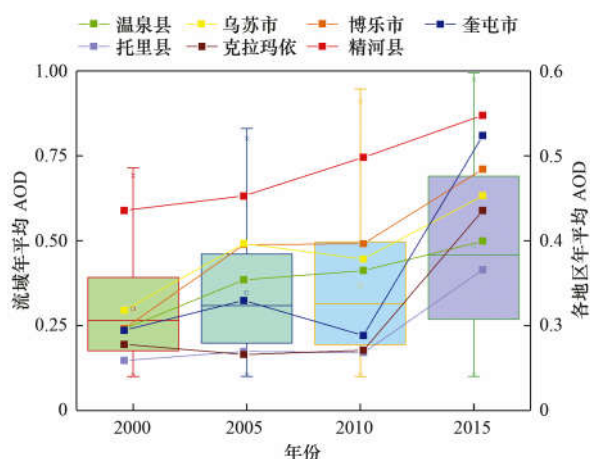


图7 年际 AOD 空间分布变化

Fig. 7 Interannual spatial distribution of AOD

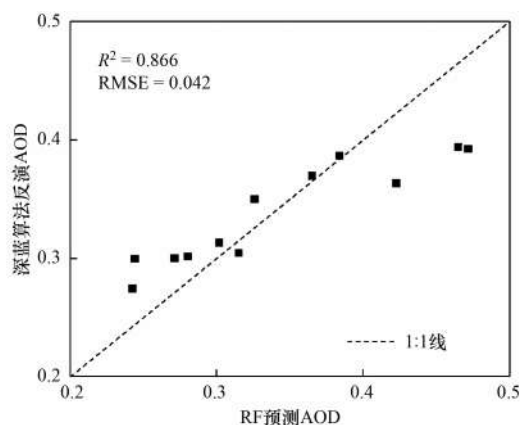
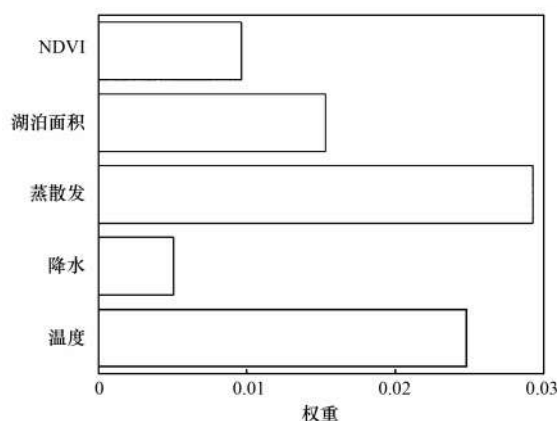


图8 RF 模拟 AOD 效果

Fig. 8 AOD by RF simulation



度和高时间分辨率上获取 AOD 变得可行. 研究采用 Landsat 系列数据, 重返周期为 16 d, 时间跨度从 19 世纪 70 年代至今, 具有长时间序列优点. 通过 DB 反演很好地克服了传统气溶胶产品粗分辨率的问题, 分辨率达到研究气溶胶空间特性较好尺度 500 m. 地表反射率数据集通过最小值合成很好地规避了外界环境的影响, 提供了贴近真实地表的地表反射率信息, 很好地达到地气解耦的目的.

现用于气溶胶遥感反演算法中, DB 无疑是最适宜干旱/半干旱地区的 AOD 反演算法, 对于亮地表有着较好的反演能力. 反演过程中, 为了避免不同的几何位置对 AOD 的影响, 对影像进行了逐像元的角度差值, 保证每一个像元都有其自己的观测几何, 而不是一景影像共用一个角度值. 对于气溶胶反演结果, 可以发现, 站点实测和 MODIS AOD 产品与 Landsat 反演 AOD 的关系存在略微差异. 虽然 MODIS AOD 与反演 AOD 相关性更高, 但可以看出反演数据比 MODIS AOD 值偏高; 站点观测数据虽然相关性略低, 但反演的 AOD 与实测数据拟合得更好, 均匀地分布在 1:1 线附近, 表明通过 DB 反

出影响艾比湖流域 AOD 的主导因素是蒸散和温度, 强蒸散比通过直接或间接的方式影响 AOD 浓度. 总体上, RF 模型具有较好估算 AOD 能力.

3 讨论

地面定点监测无法全面反映区域大气环境质量空间分布特征和变化趋势, 而传统的气溶胶研究多停留在地面站点观测, 只能反映取样点周围很小范围内的 AOD 情况, 且不具备空间连续性, 数据获取成本高, 很难用于区域性研究. 尤其是在西北干旱/半干旱地区, 地域广袤但测站点奇缺, 很难满足研究需求. 气溶胶遥感技术很好地解决了实测数据缺乏和空间分布不均的问题, 使得大范围空间尺

演的 AOD 比 MODIS AOD 效果更好.

对反演的 AOD 进行时空变化特征分析, 春节的 AOD 最高, 这主要与艾比湖流域的特殊地形有关. 春季处于大风多发日, 来自阿拉山口的风从西北角吹来, 此时, 刚好大地回暖, 冰雪消融, 大量土地裸露出来, 土质疏松, 大风将裸露地面的尘土刮起, 导致空气中颗粒物浓度大量增加, 且由于大风和地面特质的不确定性, 导致春季 AOD 值不仅高且变动幅度大. 该结果与张喆等^[30]关于艾比湖流域气溶胶光学特性研究结果一致. 通过 RF 对艾比湖流域 AOD 进行模拟, 其中, 选取了气温、降水量、蒸散发、艾比湖湖泊面积、NDVI 共 5 个环境协变量. 这主要基于艾比湖流域地处偏远, AOD 主要受自然条件的约束, 由于研究区地域的特殊性, 自然的约束无疑体现气温、降水和蒸散上, 人为干扰则集中在入湖水量上, 因为农业, 城市用水, 导致入湖水量的骤减, 结果表现在艾比湖湖泊面积上, 故选取了以上 5 个主体因素作为建模的输入变量. 结果表明, 蒸散对 AOD 变化的贡献最大, 其次是温度, 降水最少, 这可能是由于艾比湖流域属典型温

带大陆性气候, 全年高温少雨. 其降水稀少, 决定了降水不可能成为影响 AOD 最大的因子, 反倒是高温导致蒸散发大, 湖面变小, 裸露地表增大, 地面干燥度高, 易起尘.

由于手持太阳光度计观测的限制, 主要是观测时间和地点的限制, 使得可与卫星遥感反演的 AOD 可匹配的实测样本数较少, 对于二者间的相关分析只能提供部分参考, 具体还需要更多可用的观测数据参与验证. 基于 DB 气溶胶反演精度主要是由地表反射率估算精度和气溶胶模式决定. 本研究气溶胶反演的前提是: 假设短时间内, 地表反射率无变化或变化幅度很小, 事实上由于土地利用方式的改变、植被生长等因素存在, 地表反射率不可避免存在误差. 此外, 通过 6S 辐射传输模型构建查找表时, 气溶胶参数选择也会直接影响模拟结果, 从而对卫星反演的 AOD 产生影响, 这在下一步都是需要进一步探索优化的主题.

4 结论

(1) 艾比湖流域 AOD 均值呈现显著季节性变化特征, 从艾比湖北部到南部呈阶梯式上升变化. 四季表现为: 春季达最大值为 0.414, 夏季次之, 秋季最小为 0.286. 空间分布表现为: 精河县 AOD 值最大, 达到了 0.54, 其次是乌苏、博乐, 托里县 AOD 值最低为 0.25. 春季艾比湖流域区域大气污染最为严重, 其中, 又属精河县污染最为突出, 夏季、秋季污染变化相对稳定.

(2) 艾比湖流域 AOD 年内呈降低变化趋势. AOD 从春节到夏季, 再到秋季, AOD 浓度从 0.414、0.39 降到 0.287, 其中春节变化幅度大, AOD 值最不稳定.

(3) 艾比湖流域 AOD 均值为 0.374, 年际变化总体表现为上升趋势, 在 2010~2015 年期间 AOD 增加较快. 表明该流域大气污染状况有所加剧, 尤其在近 5 年, 大气环境恶化更为剧烈.

(4) RF 模型对 AOD 的预测效果较好, $R^2 = 0.866$, $RMSE = 0.042$, 环境协变量中蒸散发对艾比湖流域 AOD 影响最为显著.

参考文献:

- [1] Baltensperger U, Prévôt A S H. Chemical analysis of atmospheric aerosols[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, **390**(1): 277-280.
- [2] 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.
- [3] Liu G R, Chen A J, Lin T H, *et al.* Applying SPOT data to estimate the aerosol optical depth and air quality [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, **17**(1): 3-9.
- [4] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: the second generation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(16): 9296-9315.
- [5] Almazroui M. A comparison study between AOD data from MODIS deep blue collections 51 and 06 and from AERONET over Saudi Arabia[J]. *Atmospheric Research*, 2019, **225**: 88-95.
- [6] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER - ADEOS - 1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D5): 4913-4926.
- [7] Diner D J, Braswell B H, Davies R, *et al.* The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**(4): 495-518.
- [8] 王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从 HJ-1 数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2012, **16**(3): 596-610.
Wang Z T, Li Q, Wang Q, *et al.* HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, **16**(3): 596-610.
- [9] 田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空间分辨率气溶胶光学厚度反演[J]. *遥感学报*, 2018, **22**(1): 51-63.
Tian X P, Sun L, Liu Q, *et al.* Retrieval of high-resolution aerosol optical depth using Landsat 8 OLI data over Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(1): 51-63.
- [10] Sun K, Chen X L, Zhu Z M, *et al.* High resolution aerosol optical depth retrieval using Gaofen-1 WFEV camera data[J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(1): 89.
- [11] Sun K, Chen X L, Wang J L, *et al.* Investigation of air quality over the largest city in central China using high resolution satellite derived aerosol optical depth data [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(3): 584-593.
- [12] 曹灿, 张飞, 阿依尼格尔·亚力坤, 等. 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1568-1577.
Cao C, Zhang F, Ayinigeer · Yalikun, *et al.* Relationship between landscape pattern and water quality in the Ebinur lake region[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1568-1577.
- [13] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰. 艾比湖流域春季大气气溶胶光学性质[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 467-475.
Zhang Z, Ding J L, Wang J J. Aerosol optical properties over Ebinur region in spring [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 467-475.
- [14] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. *Tellus*, 1964, **16**(1): 64-75.
- [15] Tanre D, Herman M, Deschamps P Y, *et al.* Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties[J]. *Applied Optics*, 1979, **18**(21): 3587-3594.
- [16] Li Z, Zhao X, Kahn R, *et al.* Uncertainties in satellite remote sensing of aerosols and impact on monitoring its long-term trend: a review and perspective [J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(7): 2755-2770.
- [17] Chen S C, Liang Z Z, Webster R, *et al.* A high-resolution map of soil pH in China made by hybrid modelling of sparse soil data and environmental covariates and its implications for pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 273-283.
- [18] Wang J Z, Ding J L, Abulimiti A, *et al.* Quantitative estimation of soil salinity by means of different modeling methods and visible-near infrared (VIS-NIR) spectroscopy, Ebinur Lake

- Wetland, Northwest China[J]. *PeerJ*, 2018, **6**: e4703.
- [19] Hong Y S, Chen S C, Liu Y L, *et al.* Combination of fractional order derivative and memory-based learning algorithm to improve the estimation accuracy of soil organic matter by visible and near-infrared spectroscopy[J]. *CATENA*, 2019, **174**: 104-116.
- [20] 葛翔宇, 丁建丽, 王敬哲, 等. 基于竞争适应重加权采样算法耦合机器学习的土壤含水量估算[J]. *光学学报*, 2018, **38**(10): 1030001.
- Ge X Y, Ding J L, Wang J Z, *et al.* Estimation of soil moisture content based on competitive adaptive reweighted sampling algorithm coupled with machine learning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(10): 1030001.
- [21] 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.
- [22] Zhao C, Liu Z R, Wang Q, *et al.* High-resolution daily AOD estimated to full coverage using the random forest model approach in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **203**: 70-78.
- [23] Kim D, Kim J, Jeong J, *et al.* Estimation of health benefits from air quality improvement using the MODIS AOD dataset in Seoul, Korea[J]. *Environmental Research*, 2019, **173**: 452-461.
- [24] Zhang T H, Zhu Z M, Gong W, *et al.* Estimation of ultrahigh resolution PM_{2.5} concentrations in urban areas using 160 m Gaofen-1 AOD retrievals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **216**: 91-104.
- [25] 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.
- [26] 华凤蛟, 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 葛拥晓. 艾比湖干涸湖床风扬粉尘的发生及其潜在扩散特征研究[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院大学, 2016.
- [30] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 等. 艾比湖盐尘气溶胶光学特性卫星和地基遥感观测[J]. *遥感学报*, 2017, **21**(5): 665-678.
- Zhang Z, Ding J L, Wang J J, *et al.* Observational study on salt dust aerosol optical properties using the ground-based and satellite remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, **21**(5): 665-678.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)