

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.10
第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM_{2.5} 垂直分布及输送 肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)

肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析 衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)

沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放因子及碳组分源谱 赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)

城市生活垃圾露天焚烧排放 PM_{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)

某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估 王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)

南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制 邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)

广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性 李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)

郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)

基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)

北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)

民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)

利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)

镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能 魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)

长江源区大气降水化学特征及离子来源 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)

连续极端降雨对东江流域水质影响分析 车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)

基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)

金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)

太湖不同介质电导率时空变化特征 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)

大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析 施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)

基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)

草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价 张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)

太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律 祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)

淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)

岩溶区不同土地利用地下水碳同位素地球化学特征及生态意义 任坤, 潘晓东, 曾浩, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)

岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应 杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)

巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)

δ-MnO₂/沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮 马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)

不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果 熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)

不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)

启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)

聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析 孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)

典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)

5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)

Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用 卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)

滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)

贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)

渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)

不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)

小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)

微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)

药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制 肖亮亮, 丁园 (4668)

磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征 张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)

生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征 黄福义, 周曙屹聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)

有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)

灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)

柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应 游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)

增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响 张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)

O₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)

2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)

《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)

利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性

王闰芳¹, 马晓丹¹, 赵天良^{1*}, 王红磊¹, 丁涵¹, 郑小波²

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044;

2. 贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550000)

摘要: 用 10 a(2003~2012 年)的 MACC(monitored atmospheric composition and climate)再分析臭氧资料与同期中国大陆 6 个地面观测站的臭氧数据, 以及 AIRS(atmospheric infrared sounder)卫星资料反演的大气臭氧数据进行对比分析. 结果表明, MACC 臭氧柱浓度与所有地面站臭氧柱浓度相对偏差基本控制在 17% 之内, 相关系数在 0.79~0.97 之间, MACC 臭氧柱浓度与地面站臭氧柱浓度具有很好的一致性. 对于多年平均臭氧柱浓度空间分布, MACC 再分析与 AIRS 卫星反演臭氧柱浓度的相对偏差在 -3%~5% 之间, MACC 臭氧柱浓度相比 AIRS 柱浓度在青藏高原、南部沿海地区偏高, 在东北地区偏低. 各季节空间变化, MACC 臭氧柱浓度与 AIRS 基本一致. 在瓦里关站, MACC 近地面臭氧与地面观测臭氧浓度月平均变化趋势存在一致性. MACC 再分析近地面臭氧数据可以反映春季、夏季和秋季地面臭氧浓度的变化趋势, 但冬季 MACC 近地层臭氧资料出现了较大的偏差.

关键词: 臭氧; MACC 产品; AIRS 卫星; 中国

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4412-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904029

Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations

WANG Run-fang¹, MA Xiao-dan¹, ZHAO Tian-liang^{1*}, WANG Hong-lei¹, DING Han¹, ZHENG Xiao-bo²

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550000, China)

Abstract: A comparative analysis was conducted using total ozone products derived from monitoring atmospheric composition and climate (MACC) reanalysis data validated with ozone data from the atmospheric infrared sounder (AIRS) satellite and ground-based ozone measurements. The results indicate that the relative deviation of total ozone from the MACC reanalysis data and the ground-based ozone total data is controlled within 17%, and all of the correlation coefficients were between 0.79 and 0.97. The total ozone values from the MACC reanalysis data showed good consistency with the ground-based ozone measurements. With respect to the spatial distribution of multi-year averages, the relative deviation of total ozone values in the MACC reanalysis data and the AIRS satellite data was between -3% and 5%. The total ozone values in the MACC reanalysis data were higher than those from AIRS measurements for the Qinghai-Tibet Plateau and the coastal areas of South China, and were lower for northeast China. Furthermore, the seasonal variations in total ozone values in the MACC reanalysis data were consistent with AIRS data. At Mt. Waliguan station, the monthly averaged trends for near-surface ozone in the MACC reanalysis data were also consistent with surface ozone concentrations; the MACC reanalysis data reflect the observed trends for surface-based ozone measurements in spring, summer, and autumn, but show a large deviation in winter.

Key words: ozone; MACC reanalysis; AIRS satellite; China

臭氧是大气中的重要痕量气体, 大部分集中在 10~30 km 的大气平流层, 其中 20~25 km 处浓度最高^[1], 能够大量吸收紫外线有效地保护地球生物, 其在全球的辐射平衡过程和大气加热率计算中都扮演了重要的角色, 并且是主要的温室气体^[2]. 在对流层中, 臭氧具有活泼的光化学性质, 能够发生多种光化学反应, 特别是在近地层, 臭氧是光化学烟雾的重要组成部分^[3], 过量的臭氧对人体健康^[4]和植物生长^[5]都不利. 近些年来, 人类排放导致近地面大气臭氧浓度不断升高^[6~8], 光化学烟雾频繁发生^[9, 10]. 当前, 我国臭氧污染形势日益严

峻, 尤其是夏日高温时臭氧污染最为严重^[11~13], 且大有赶超 PM_{2.5} 污染的势头.

欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Center of Medium-range Weather Forecasts) 的 MACC 再分析数据集提供了包括臭氧(O₃)在内的多种大气成分的分析场和气溶胶^[14]. Katragkou 等^[15]使用

收稿日期: 2019-04-02; 修订日期: 2019-05-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203304); 国家自然科学基金项目(41830965, 91744209); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_1027)

作者简介: 王闰芳(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境变化, E-mail: wangrunfang1995@163.com

* 通信作者, E-mail: tlzhao@nuist.edu.cn

MACC 再分析资料对 2003 ~ 2010 年欧洲地面臭氧进行了研究, 结果表明近地表臭氧在冬季呈现负偏差, 在暖季呈现正偏差. Gaudel 等^[16] 使用 MOZAIC-IAGOS 数据评估了 2003 ~ 2010 年欧洲地区 MACC 数据的适用性, 并探究了臭氧和一氧化碳的分布情况. Georgoulas^[17] 等使用 CALIOP/CALIPSO 卫星观测对欧洲、北非和中东地区的 MACC 再分析沙尘产品进行三维评估. 目前为止用 MACC 再分析臭氧产品的研究基本都是针对欧洲区域. 然而, 由于中国区域缺乏较长序列臭氧地面观测数据, 对于 MACC 臭氧产品在中国地区评估仍然缺失, 因此, 进行这项工作很有必要. 本文将 10a (2003 ~ 2012 年) 中国区域的 MACC 再分析臭氧数据与同期中国 6 个地面站的观测臭氧数据, 以及 AIRS 卫星反演的臭氧数据进行对比, 比较分析大气臭氧柱浓度的时空变化, 及近地面臭氧浓度的时间变化, 探讨 MACC 资料的在中国区域的适用性, 以期为中国区域地面臭氧分布和变化研究中, 合理选用 MACC 再分析臭氧资料提供借鉴和参考.

1 材料与方法

1.1 MACC 再分析

MACC 再分析数据集是由 CAMS (the Copernicus Atmosphere Monitoring Service) 提供的全球大气成分数据集. MACC 再分析数据集是通过将卫星数据同化到一个基于 ECMWF 综合预报系统 (IFS) 的全球模式数据同化系统里建立的. 其中, IFS 已扩展到包括化学反应气体^[18, 19]、气溶胶^[20]和温室气体^[21], 以便其具有的四维变分数据同化 (4D-Var) 系统可以用来同化全球尺度上大气成分的卫星资料. 将化学传输模型 MOZART 与 IFS 耦合, 为反应气体提供初始场、化学生成和损失率^[18]. MACC 再分析数据同化系统包括气象场, 大气成分的分析场[臭氧(O_3)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、甲醛(HCHO)和气溶胶^[14]]以及一个具有 12 h 分析窗的 4 维变分分析 (4D-Var). MACC 数据集提供全球范围数据, 水平分辨率为 ~80 km (T159 光谱分辨率) 和垂直方向分为 60 个混合西格玛压力层, 并延伸至 0.1 hPa.

表 1 为 MACC 再分析资料同化的臭氧卫星资料, MIPAS 和 MLS 分别在光谱的中红外和微波部分进行测量, 是 MACC 再分析中唯一不受光照条件影响的臭氧数据. 连同 GOME 的 O_3 廓线数据, 它们也是具有较高垂直分辨率的臭氧廓线同化数据, 这些卫星数据在 MACC 再分析同化系统中已被证明对于获得真实的臭氧垂直分布至关重要^[22, 23].

MACC 再分析同化系统利用 OASIS4 耦合器将化学输送模式 MOZART CTM 耦合到 ECMWF-IFS 之中, 并将 GOME 臭氧廓线数据、MIPAS 臭氧廓线数据、MLS 臭氧廓线数据、SBUV/2 臭氧廓线数据、SCIAMACHY 柱浓度臭氧数据及 OMI 臭氧柱浓度数据同化到 MACC 再分析同化系统之中, 同化实验能够显著改善臭氧积分场的模拟效果, 特别是能够改善控制实验模拟的南极臭氧洞不够“深”的现象; 但在对 MLS 臭氧廓线数据使用变分偏差校正方案时导致对流层臭氧增加, 但并没有影响臭氧柱浓度场. 2008 年 1 月 1 日 MLS 的偏差校正关闭后, 这个数据漂移问题不再出现. MACC 再分析数据集目前发布了 2003 ~ 2012 年期间的臭氧(O_3)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、甲醛(HCHO)、气溶胶和气象场数据, 以及 1979 ~ 2014 年期间的二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和一氧化二氮(N_2O)的大气成分分析场. 本文主要是对中国大陆地区 2003 ~ 2012 年期间 MACC 再分析数据集的臭氧资料进行评估. 本文选取的臭氧资料分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

1.2 AIRS 卫星数据

大气红外探测仪 (AIRS) 卫星资料提供了全球温度、水汽、臭氧等分布及变化. 目前, AIRS 发布的数据包含 V5 和 V6 版本, 由于基本的反演方法变化较少, V6 版本只做了稍许改进, 如不确定性减小^[24]. AIRS 的 level-2 和 level-3 产品中都有臭氧数据, 前者的分辨率约为 45 km. level-3 数据是 level-2 的数据处理后生成, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. Bian 等^[25] 的研究表明 AIRS 用 (41 个) 通道测量臭氧柱浓度, 不确定度估计在热带地区为 5%, 在极地地区为 5% ~ 40%; Rajab 等^[26] 使用 AIRS 反演的资料对马来西亚半岛臭氧特征进行了分析. 潘亮等^[27] 的研究表明 AIRS 在中国地区有很大的应用潜力. 从表 1 可看出, MACC 未使用 AIRS 资料进行同化, 因此, 可以使用 AIRS 资料对 MACC 再分析资料进行评估. 本文选择的是 NASA GES DISC 提供的 2003 ~ 2012 年 V6 版本 level-3 月臭氧产品, 利用 NCL 的插值函数 interp2 将 AIRS 数据插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的格点上.

1.3 地面臭氧观测

根据中国地理特征及数据获取的便利性, 选取了龙凤山站、香河站、临安站、瓦里关站、拉萨站以及昆明站这 6 个地面站观测的臭氧柱浓度数据同 MACC 臭氧柱浓度进行对比, 站点分布具体信息如图 1 和表 2 所示. 龙凤山站位于黑龙江省五常市, 可代表东北区域; 香河地处华北平原北部廊坊市,

表 1 MACC 再分析资料同化的臭氧卫星资料

Table 1 Ozone satellite data included in the MACC reanalysis

仪器	卫星	提供者	参数类型	日期(年-月-日)	文献
GMOE	ERS-2	RAL	O ₃ 廓线	2003-01-01 ~ 2003-05-31	[28]
MIPAS	Envisat	ESA	O ₃ 廓线	2003-01-27 ~ 2004-03-26	[29]
MLS	AURA	NASA	O ₃ 廓线	2004-08-08 ¹⁾	[30]
OMI	AURA	NASA	O ₃ 柱浓度	2004-01-01 ¹⁾	[31]
SBUV	NOAA-16	NOAA	O ₃ 廓线	2004-01-01 ¹⁾	[32]
SBUV	NOAA-17	NOAA	O ₃ 廓线	2003-01-01 ¹⁾	[32]
SBUV	NOAA-18	NOAA	O ₃ 廓线	2005-06-04 ¹⁾	[32]
SBUV	NOAA-19	NOAA	O ₃ 廓线	2011-01-01 ¹⁾	[32]
SCIAMACHY	Envisat	KNMI	O ₃ 柱浓度	2003-01-01 ¹⁾	[33]

1) 卫星数据沿用至今

表 2 臭氧地面观测站点的信息

Table 2 Summary of ground-based monitoring stations for total ozone

站点号	站名	仪器	纬度 N/(°)	经度 E/(°)	海拔/m	参数	日期(年-月)
STN208	香河	Dobson	39.975	116.370	80	臭氧柱浓度	2003-01 ~ 2012-12
STN209	昆明	Dobson	25.030	102.683	1917	臭氧柱浓度	2003-01 ~ 2009-08
STN295	瓦里关	Brewer	36.287	100.898	3810	臭氧柱浓度 地面臭氧浓度	2003-01 ~ 2010-09 ¹⁾ 2011-12 ~ 2012-12 ¹⁾
STN326	龙凤山	Brewer	44.730	127.600	314	臭氧柱浓度	2003-01 ~ 2010-09 2011-12 ~ 2012-12
STN325	临安	Brewer	30.300	119.730	132	臭氧柱浓度	2003-01 ~ 2007-06
STN349	拉萨	Brewer	29.670	91.130	3650	臭氧柱浓度	2008-01 ~ 2009-11 2011-12 ~ 2012-12

1) 同时也是地面臭氧浓度数据选取的时段

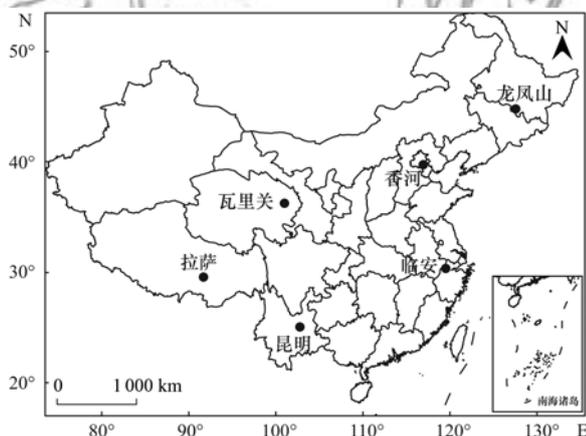


图 1 臭氧地面观测站点分布示意

Fig. 1 Distribution of ground-based monitoring stations for total ozone

可作为华北平原代表站；临安站位于浙江杭州，可代表长三角区域；青海的瓦里关和西藏的拉萨可代表青藏高原；昆明地处云贵高原中部，可代表中国西南。其中香河站和昆明站的地基臭氧柱浓度数据分别取自于 Dobson#075 和 Dobson#003 光谱仪的观测数据。龙凤山站、瓦里关站和临安站分别是来自于 Brewer#054、Brewer#076 和 Brewer#077 光谱仪的观测臭氧柱浓度。这些仪器测得的大气臭氧柱浓度单位是 DU (Dobson unit)，为垂直单位气柱中的臭

氧分子总数换算到标准温压状况下的厚度，也称为大气厘米， $1\text{DU} = 10^{-3} \text{atm}\cdot\text{cm} = 2.69 \times 10^{16}$ 臭氧分子。另外，还选取 2003 ~ 2012 年瓦里关站地面臭氧浓度数据同 MACC 再分析近地层臭氧资料进行比较。

2 结果与讨论

2.1 大气臭氧柱浓度时间变化

用这 6 个地面观测站的逐日臭氧柱浓度数据，与同时期的 MACC 再分析臭氧柱浓度进行对比，图 2 为两种逐日臭氧柱浓度随时间的变化曲线，图 3 为各个地面站两种逐日臭氧柱浓度的相对偏差（即 MACC 柱浓度减去地面观测柱浓度，除以地面观测柱浓度）。各站点的臭氧柱浓度平均值如表 3 所示。由图 2 可看出臭氧柱浓度呈周期性变化，春季柱浓度较高，秋季柱浓度低。香河站地面观测资料的连续性最好，观测臭氧柱浓度变化趋势与 MACC 的变化相当一致，地面观测的臭氧柱浓度平均值为 343.92DU，MACC 的臭氧柱浓度平均值为 339.08DU，相对偏差基本控制在 15% 之内。在龙凤山站，观测臭氧柱浓度的变化趋势与 MACC 臭氧柱浓度变化一致性较好，地面观测的臭氧柱浓度平均值为 362.34DU，MACC 的臭氧柱浓度平均值为

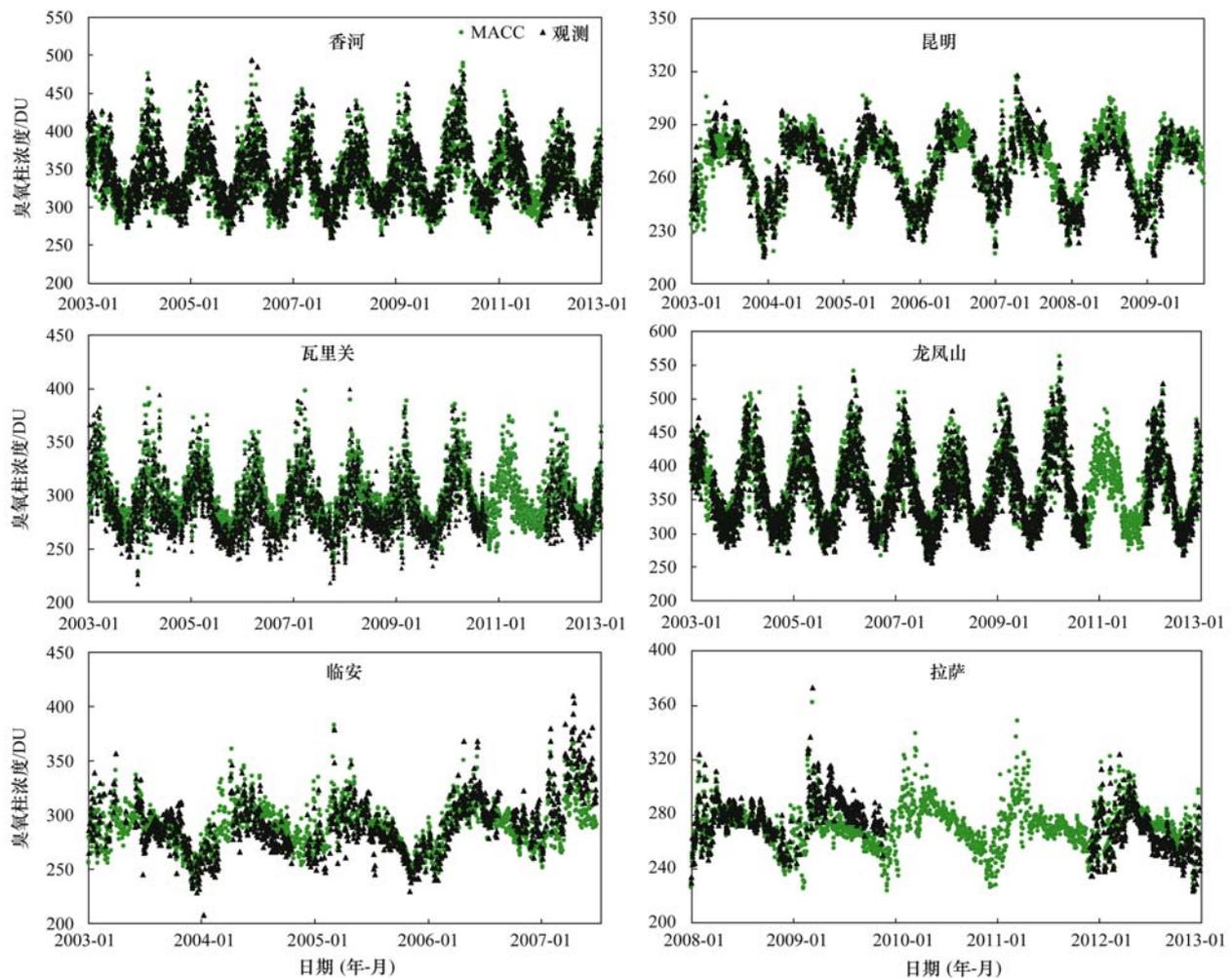


图2 各地地面站观测的逐日臭氧柱浓度和 MACC 再分析臭氧柱浓度比较

Fig. 2 Daily variations in total column ozone concentrations retrieved from the MACC reanalysis and ground-based observations

366.84DU, 相对偏差小于 17%。在昆明站, 观测臭氧柱浓度的变化趋势与 MACC 臭氧柱浓度变化一致, 地面观测臭氧柱浓度平均值为 264.51DU, MACC 臭氧柱浓度平均值为 267.86DU, 整体相对偏差基本在 8% 之内。在瓦里关站, MACC 臭氧柱浓度整体相比于观测资料偏大, 但相对偏差基本控制在 12%, 地面观测的臭氧柱浓度平均值为 288.75DU, MACC 的臭氧柱浓度平均值为 297.48DU。临安站在 2004 年至 2006 年 8 月期间 MACC 臭氧柱浓度相比于地面观测的偏大, 但相对偏差基本控制在 17% 之内。在拉萨地面站, 2008 ~ 2009 年期间 MACC 臭氧柱浓度相比于地面观测偏小, 2011 年后 MACC 偏大, 但偏差都在 10% 之内。总的来说, MACC 臭氧柱浓度与地面站观测的臭氧柱浓度具有很好的一致性。

图 4 为各个地面站观测的臭氧柱浓度和相应 MACC 臭氧柱浓度的线性回归, 回归系数如表 3 所示。各站点 MACC 臭氧柱浓度与地面观测柱浓度的线性相关性都很高, 相关系数在 0.79 ~ 0.97 之间。

不同站点 MACC 臭氧柱浓度与观测柱浓度的相关系数都大于 0.7, 特别是香河、昆明、瓦里关和龙凤山的相关性更为明显, 达到 0.9 以上。其中龙凤山站整体的相关系数最高, 达到 0.97, 斜率为 0.97。相关系数最小的是拉萨站, 为 0.79, 斜率为 0.93。所有站点均通过了置信区间 99.9% 的显著性检验, 表明 MACC 再分析臭氧柱浓度数据可靠性较高。

表 3 MACC 再分析臭氧柱浓度与地面观测站臭氧柱浓度的平均值及其间的线性回归系数

Table 3 Mean ozone concentrations and coefficients of linear regression for total ozone from the MACC reanalysis and ground-based observations

站点	MACC 臭氧柱浓度平均值/DU	地面观测臭氧柱浓度平均值/DU	斜率	相关系数
香河	339.08	343.92	0.95	0.95
昆明	267.86	264.51	0.95	0.94
瓦里关	297.48	288.75	1.01	0.96
龙凤山	366.84	362.24	0.97	0.97
临安	291.24	290.15	1.05	0.84
拉萨	271.38	272.93	0.93	0.79

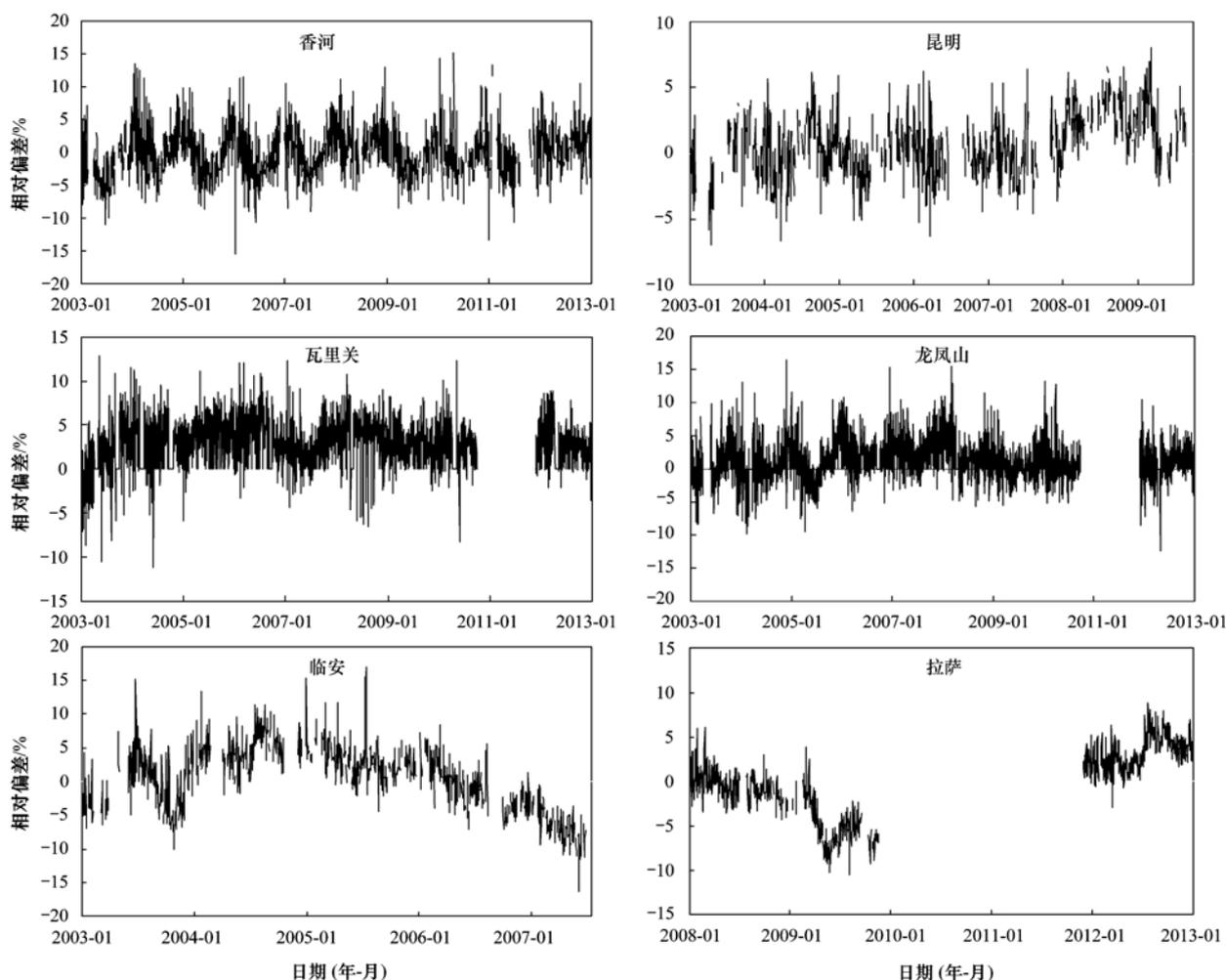


图3 各地地面站观测的逐日臭氧柱浓度和 MACC 再分析臭氧柱浓度的相对偏差

Fig. 3 Relative differences in total column ozone concentrations retrieved from the MACC reanalysis and ground-based observations

2.2 大气臭氧柱浓度空间变化

从图5中可知,在空间尺度上,MACC和AIRS的臭氧柱浓度分布基本一致,呈现较明显的纬向分布,从低纬度向高纬度逐渐增高,在青藏高原出现明显的低值中心,这与周秀骥等^[34]的研究结果一致.中国区域臭氧柱浓度值基本在260DU以上.导致臭氧柱浓度空间分布变化的主要原因是太阳辐射和大气环流影响.臭氧柱浓度在青藏高原出现最低值,主要是由于高海拔引起的^[35,36].

图6为2003~2012年AIRS臭氧柱浓度与MACC臭氧柱浓度的相对偏差(即MACC柱浓度减去AIRS柱浓度,除以AIRS柱浓度).从中可知,两种数据空间分布基本一致,MACC与AIRS的臭氧柱浓度的相对偏差在-3%~5%之间,其中,在东北地区,MACC的臭氧柱浓度小于AIRS的臭氧柱浓度,相对偏差大约在1%~3%之间.在南部沿海,MACC的臭氧柱浓度大于AIRS的臭氧柱浓度,相对偏差大约在1%~2%之间.另外,在青藏高原,MACC的臭氧柱浓度大于AIRS的臭氧柱浓度,

相对偏差最大可达5%.这可能是青藏高原不适当的地表反照率输入到了MACC资料同化的卫星反演算法中引起,而具体原因有待进一步探究.总体看来,MACC臭氧柱浓度与AIRS的臭氧柱浓度的空间分布基本一致,偏差基本控制在6%之内,说明MACC再分析臭氧柱浓度能够揭示出臭氧柱浓度的空间差异.

2.3 大气臭氧柱浓度季节分布

为探究MACC臭氧柱浓度资料在各季节的适用性,将2003~2012年春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)和冬(12月~次年2月)四季的MACC臭氧柱浓度和AIRS臭氧柱浓度进行了对比,见图7和8.臭氧柱浓度存在明显的季节性变化,而且高纬度地区臭氧柱浓度季节变化更为明显.其主要原因是太阳辐射的季节变化,尤其是太阳紫外辐射的季节变化引起,它是大气中产生臭氧光解作用的关键性因素.高纬度地区太阳辐射的季节变化较大,因此,由 O_2 光解产生 O_3 的变化也较大^[37].对于各季节,MACC臭氧柱浓度和AIRS臭氧柱浓

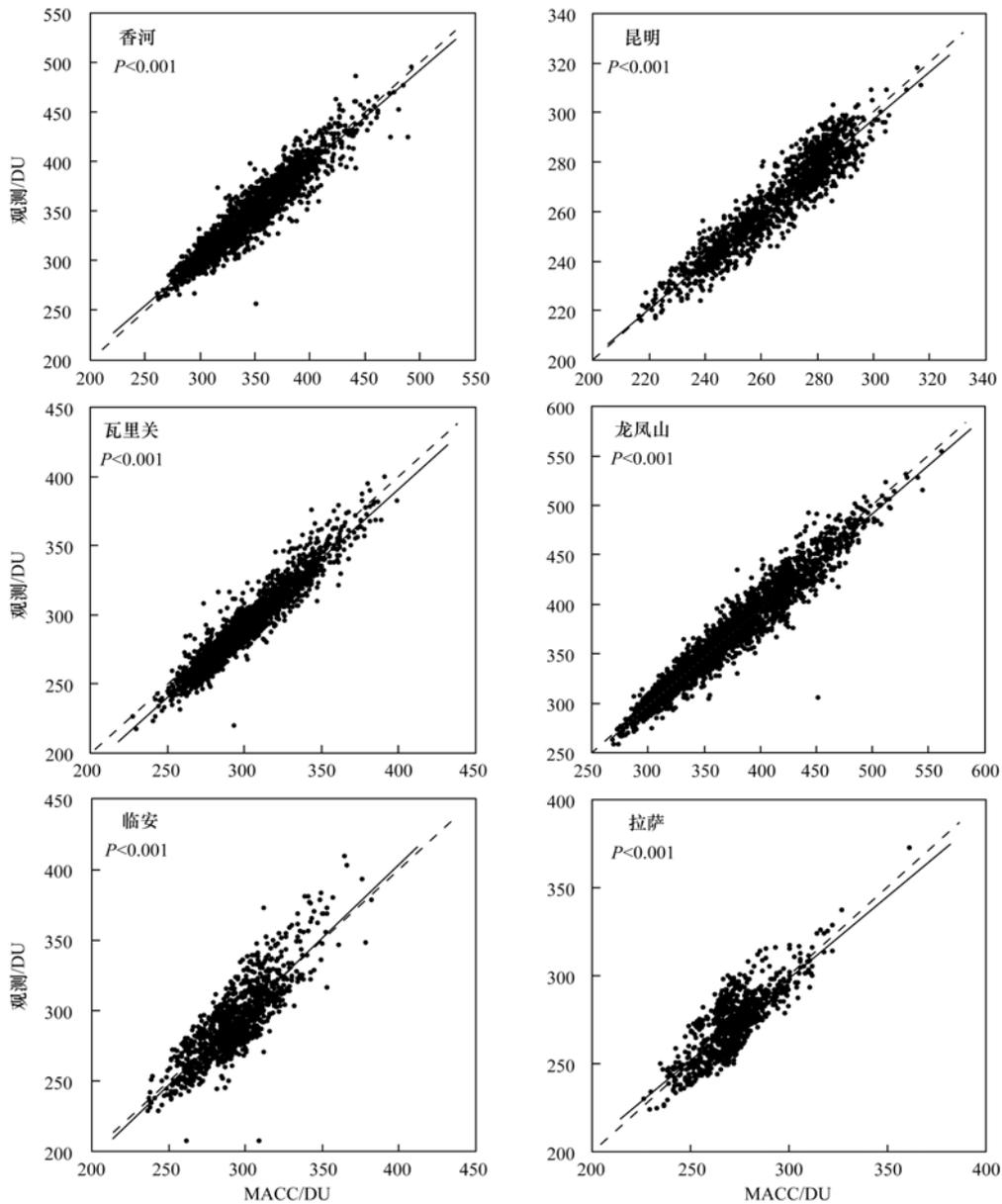


图 4 各地面站点逐日臭氧柱浓度和 MACC 再分析臭氧柱浓度相关性分析

Fig. 4 Correlation analyses of daily variations in total ozone from the MACC reanalysis and ground-based observations

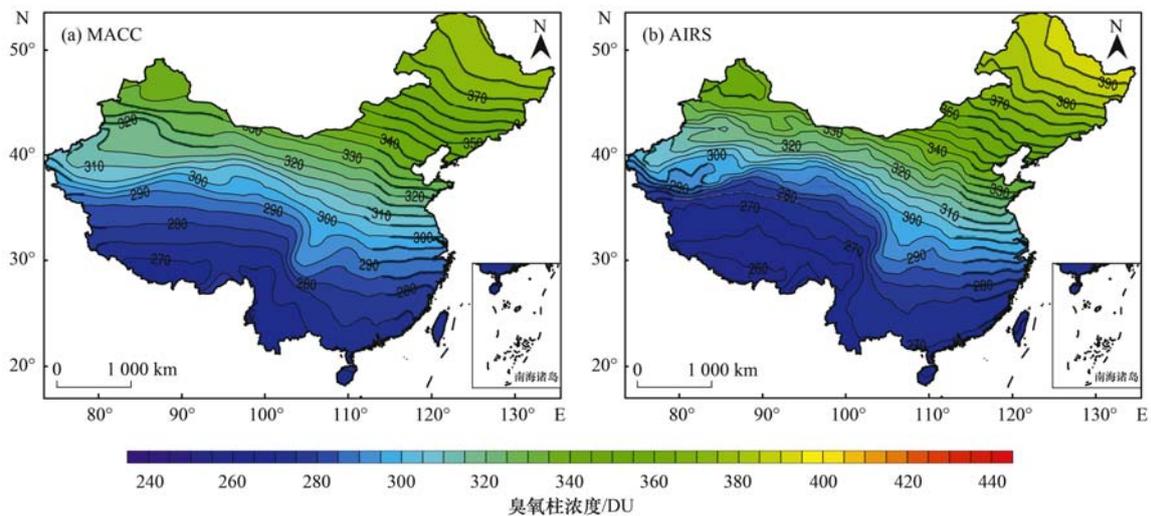


图 5 2003 ~ 2012 年 MACC 再分析和 AIRS 卫星的大气臭氧柱浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of total ozone derived from the MACC reanalysis and ground-based observations during 2003-2012

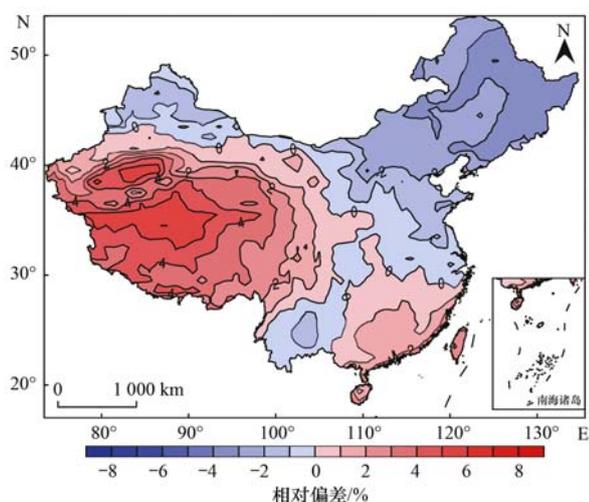


图6 2003~2012年MACC和AIRS卫星的大气臭氧柱浓度空间相对差异

Fig. 6 Difference values for total ozone between MACC and AIRS datasets during 2003-2012

度空间分布基本一致. 结合图9也可以看出, MACC与AIRS臭氧柱浓度在一些地区存在差异, 春季, 在青藏高原及南部沿海地区MACC臭氧柱浓度相比于AIRS的偏高, 相对偏差在2%~6%之间; 而在东北地区略偏低, 相对偏差在2%~3%之间; 夏季, 在青藏高原MACC臭氧柱浓度比AIRS

的高, 相对偏差为2%~5%, 而在东北地区MACC臭氧柱浓度偏低, 相对偏差最高达到6%; 秋季, 在青藏高原及其周边地区MACC臭氧柱浓度偏高, 最大相对偏差为6%, 相对偏差高值中心出现在塔里木盆地地区; 冬季, 在青藏高原及其周边地区和南部沿海地区MACC臭氧柱浓度偏高, 相对偏差大约为2%~5%. 虽然MACC和AIRS的臭氧数据存在一定的误差, 但是最大相对偏差仅为6%, 说明MACC臭氧柱浓度可以揭示出臭氧柱浓度季节变化特征.

2.4 地面臭氧浓度分析

图10为2003~2012年瓦里关站地面臭氧浓度与MACC近地面臭氧数据对比分析, 从中可知, 瓦里关站近地面臭氧浓度具有准周期季节波动. MACC近地面臭氧浓度可以大致反映出这种变化趋势, 但部分时间段内MACC臭氧数据偏差较大, 其中冬季整体偏大, 相对偏差最大超过50%. 表明MACC近地面臭氧可以反映出近地面臭氧浓度月际变化的大致趋势.

图11为瓦里关站地面观测臭氧浓度与MACC近地面臭氧浓度的季节变化对比. 春季, MACC近地面臭氧浓度与地面观测值具有相同的变化趋势,

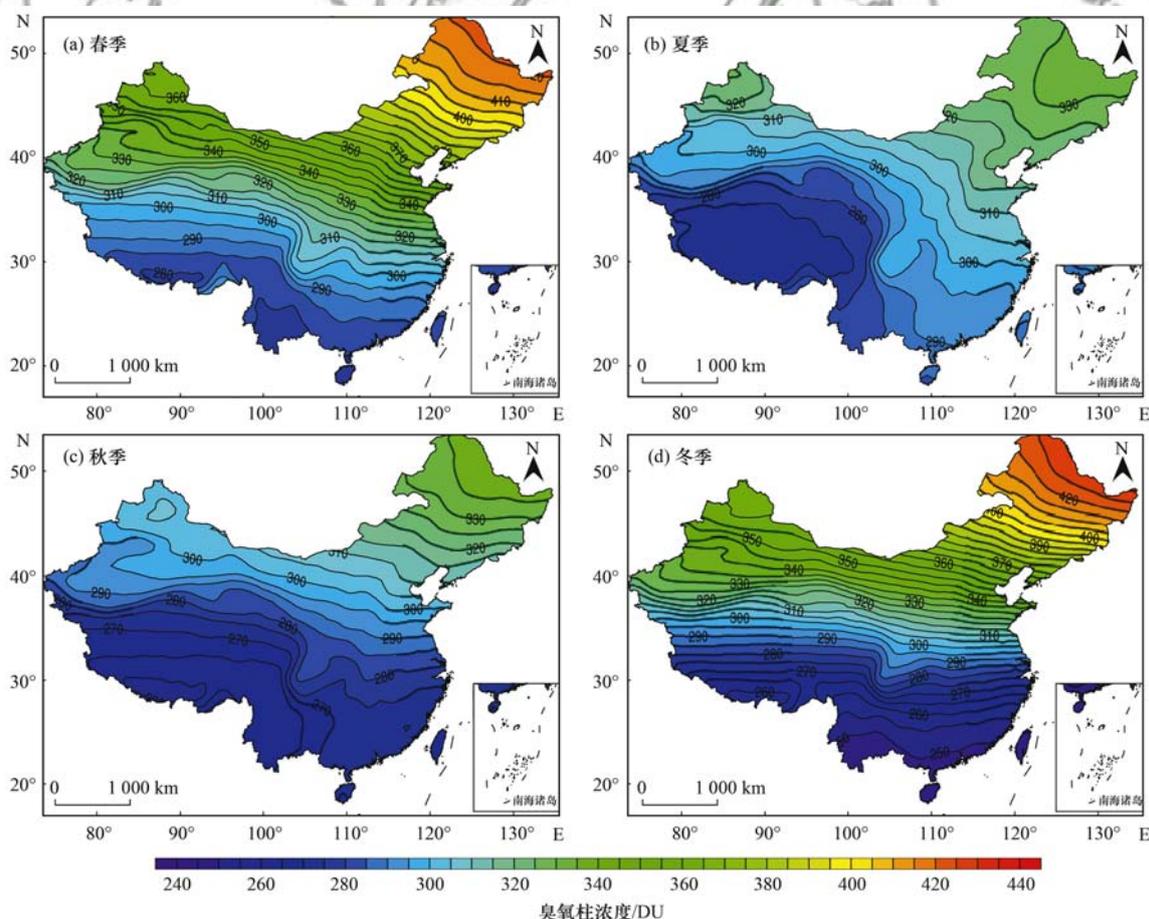


图7 2003~2012年MACC再分析的大气臭氧柱浓度各季节空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of total ozone derived from the MACC reanalysis during 2003-2012

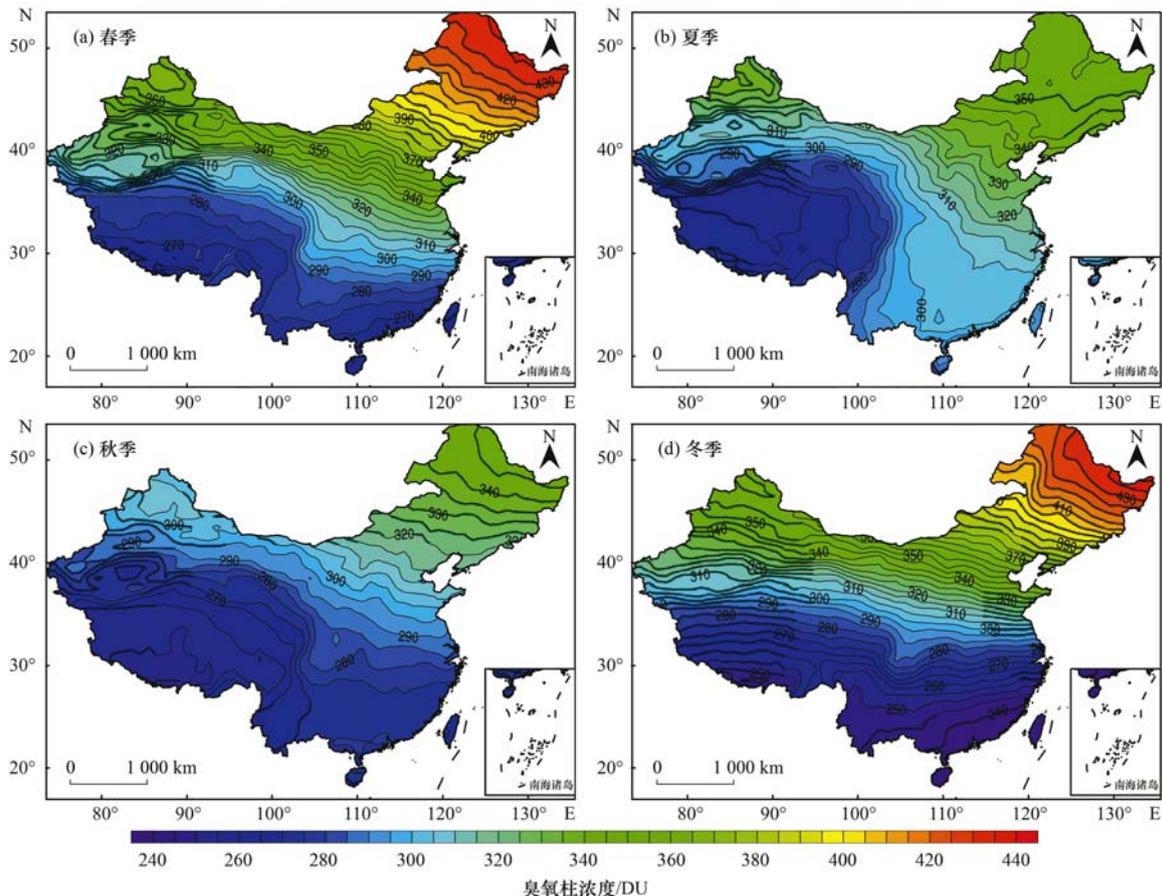


图 8 2003 ~ 2012 年 AIRS 卫星的大气臭氧柱浓度 (DU) 各季节空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of total ozone derived from ground-based observations during 2003-2012

相关系数达到 0.75, 但具体数值存在一些差异, 相对偏差控制在 $\pm 20\%$ 之内. 夏季, MACC 近地面臭氧浓度与地面观测的一致性较好, 但 MACC 比地面观测的值整体偏高, 相对偏差在 $-10\% \sim 22\%$. 秋季, MACC 近地面臭氧浓度可以反映出地面臭氧浓度的变化趋势, 但是具体数值差异偏大, 最大差异超过 30%. 冬季, MACC 近地面臭氧浓度与地面观测的一致性较差, MACC 臭氧值整体比地面观测臭氧值大, 相对偏差最大超过 50%. 根据以上分析, MACC 近地面臭氧浓度基本可以反映地面臭氧浓度季节变化特征, 其中, 在春夏秋三季较好地反映了地面的变化趋势, 但冬季 MACC 近地面臭氧浓度与地面资料相比出现了较大的偏差. 图 12 为瓦里关站观测的年平均地面臭氧浓度和同期 MACC 近地面臭氧浓度年平均值对比分析. 在 2004 ~ 2010 年 MACC 与地面观测的臭氧浓度值变化趋势一致, MACC 整体偏高, 其余年份 MACC 偏低, 但总的来说, MACC 近地面臭氧浓度与地面观测臭氧浓度数值上差异较小, 相对偏差控制在 12% 之内. 表明 MACC 近地面臭氧数据可以较好地反映出地面臭氧浓度年际变化.

综上所述, 从瓦里关站的比较看, MACC 反演

局地短时间尺度的地面臭氧浓度变化尚存在局限性. 出现这种现象可能是瓦里关站地处青藏高原东北坡, 地形复杂, 地表状态变化较为频繁^[38], 不准确的地表反照率输入卫星遥感反演算法中引起卫星资料不准确; 此外, 选取的 MACC 资料分辨率较粗 (约 55 km), 用“面上”的平均数据与地面观测点进行比较难免会出现一些匹配差距. 因此, 在使用冬季的 MACC 近地面臭氧浓度资料时必须非常谨慎.

3 结论

(1) MACC 臭氧柱浓度与 6 个地面站观测的臭氧柱浓度相对偏差基本控制在 17% 之内, 相关系数均在 0.79 ~ 0.79 之间, 两种臭氧柱浓度资料具有很好的一致性.

(2) MACC 臭氧柱浓度与 AIRS 卫星资料臭氧柱浓度的相对偏差在 $-3\% \sim 5\%$ 之间, 主要出现在青藏高原、南部沿海和东北地区. 总体看来, MACC 臭氧柱浓度与 AIRS 臭氧柱浓度值的空间分布基本一致.

(3) 在瓦里关站, MACC 近地层臭氧数据可以反映出地面臭氧浓度月际变化的大致变化趋势. 从季节看, MACC 再分析月平均近地层臭氧数据基本

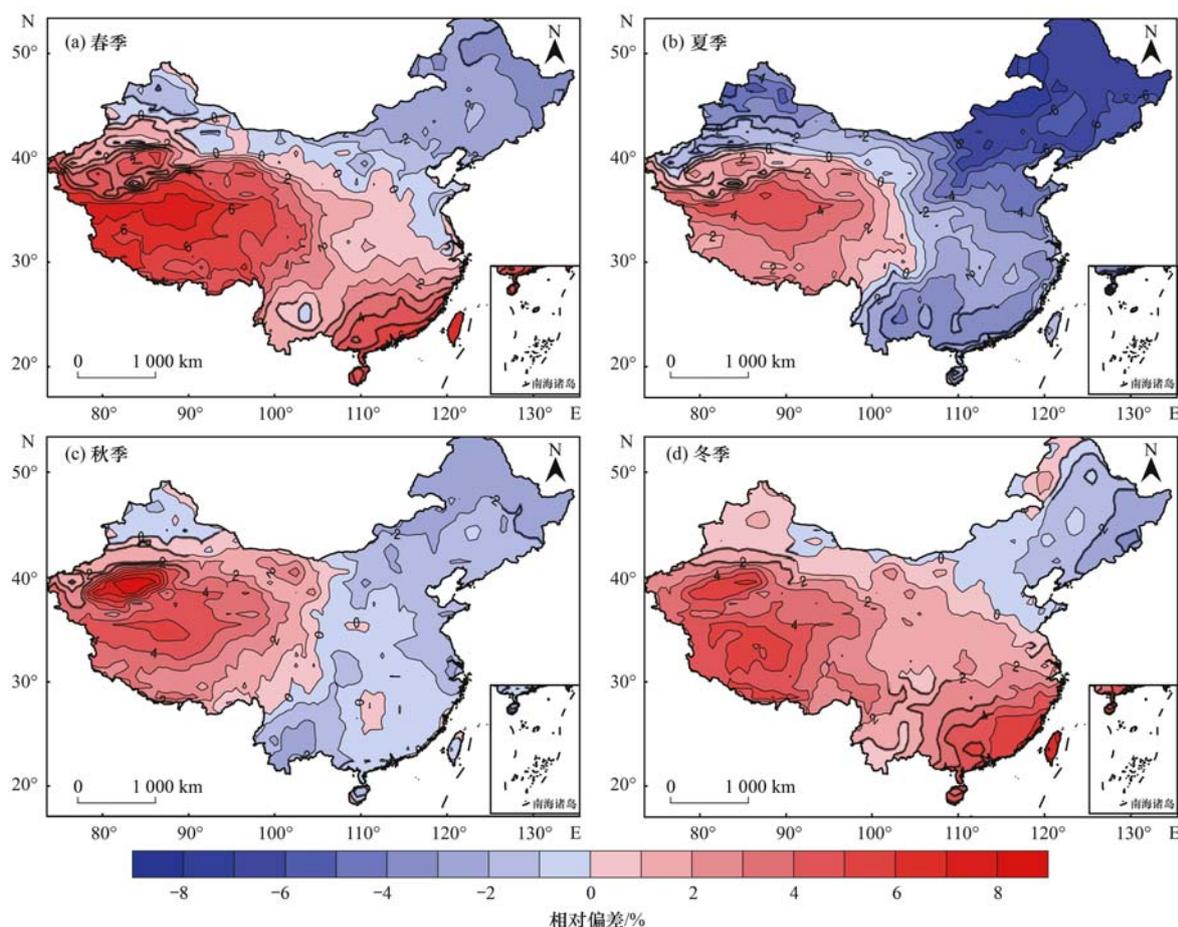


图9 2003~2012年MACC和AIRS的大气臭氧柱浓度(DU)空间相对差异

Fig. 9 Difference values for total ozone between the MACC reanalysis and AIRS datasets during 2003-2012

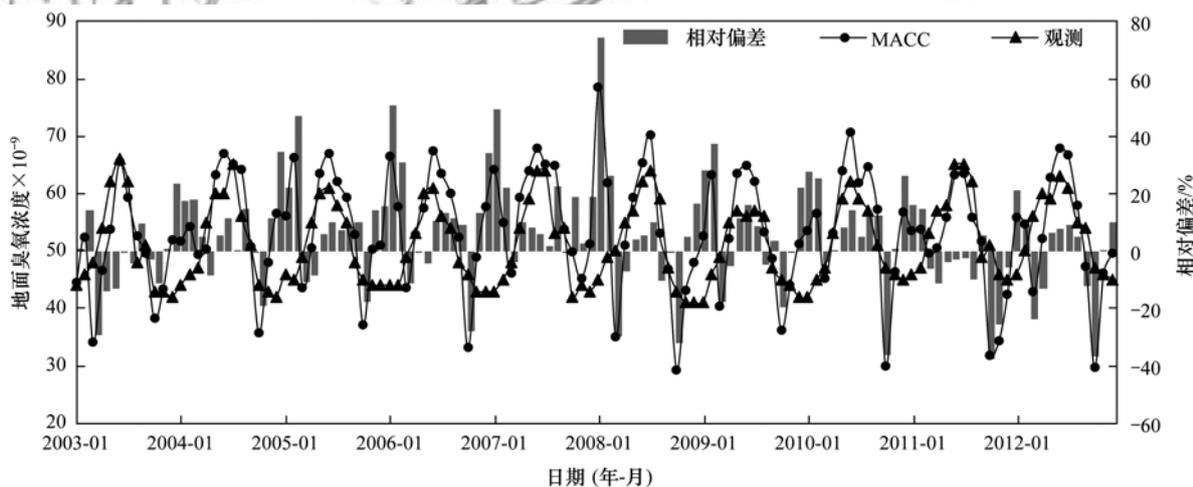


图10 MACC近地层月平均臭氧浓度和地面观测的月平均地面臭氧浓度对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of monthly averaged ozone concentrations from the MACC reanalysis and ground-based observations

可以反映地面臭氧浓度的季节变化特征,但在冬季出现了较大的偏差.此外,MACC近地面臭氧可以较好地反映出地面臭氧浓度年际变化.

(4)MACC对于研究本世纪以来中国地面臭氧柱浓度时空变化有较好的参考意义.从瓦里关站比较的情况看,由于我国地面臭氧观测站点相对较少、分布不均,获取大范围、长序列的臭氧数据比

较困难,在国内大部分地区使用MACC资料进行地面月或者年尺度臭氧分析研究不乏为一种替代方法.但是,MACC反演局地短时间尺度的地面臭氧浓度变化尚存在局限性.今后还需要应用更多低海拔地区地面测站的资料与MACC进行比较验证后,才能对MACC资料在反演地面臭氧的适应性进行较为全面的评价.

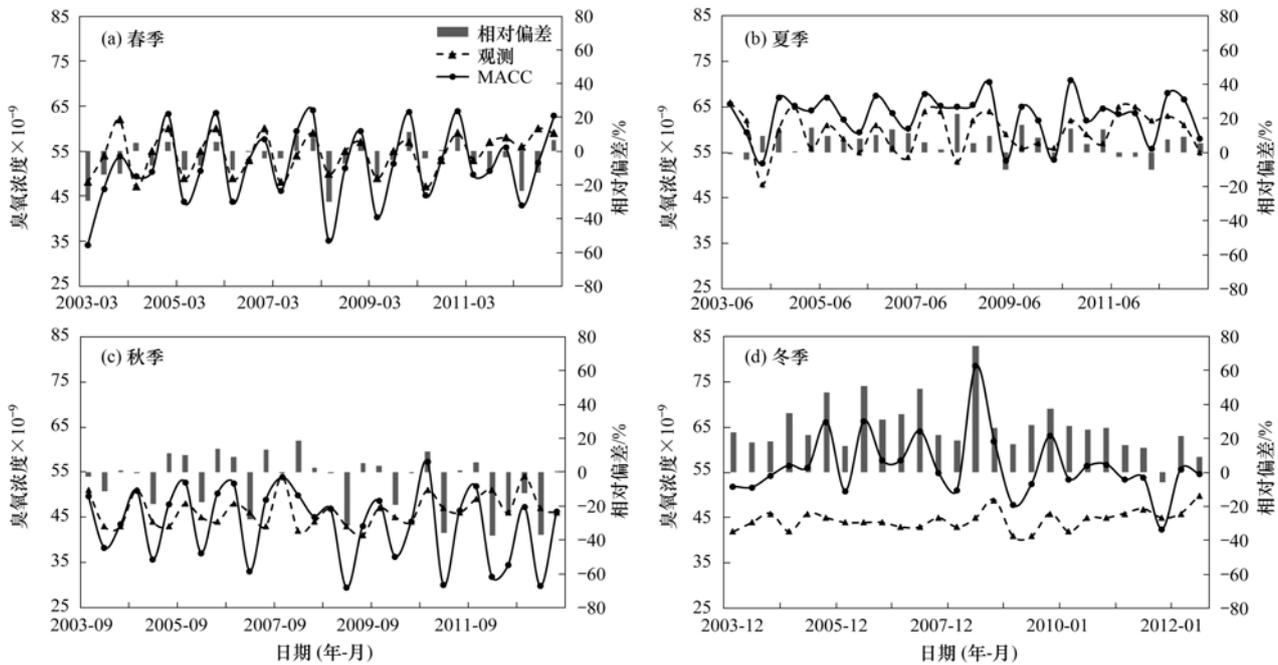


图 11 MACC 近地层臭氧浓度和地面观测臭氧浓度的季节变化对比

Fig. 11 Seasonal comparative analysis of ozone concentrations from the MACC reanalysis and ground-based observations

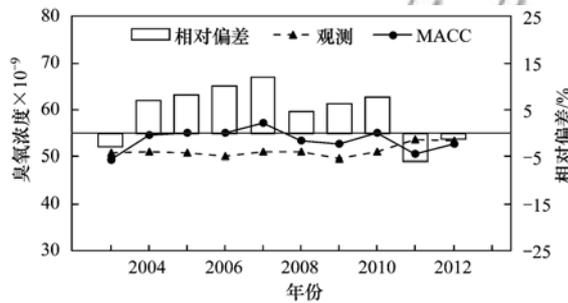


图 12 MACC 近地层年平均臭氧浓度和地面观测的年平均地面臭氧浓度对比分析

Fig. 12 Comparative analysis of annually averaged ozone concentrations from the MACC reanalysis and ground-based observations

参考文献：

[1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.

[2] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[3] Berntsen T, Isaksen I S A, Wang W C, et al. Impacts of increased anthropogenic emissions in Asia on tropospheric ozone and climate[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1996, **48**(1): 13-32.

[4] 孔琴心, 刘广仁, 李桂忱. 近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响[J]. 气候与环境研究, 1999, **4**(1): 61-66. Kong Q X, Liu G R, Li G C. Surface ozone concentration variation and possible influences on human health[J]. Climatic and Environmental Research, 1999, **4**(1): 61-66.

[5] 王春乙, 关福来. O₃ 浓度变化对我国主要农作物产量的可能影响[J]. 应用气象学报, 1995, **6**(S1): 69-74. Wang C Y, Guan F L. The potential effects of O₃ concentration change on yield of main crops in China[J]. Quarterly Journal of

Applied Meteorology, 1995, **6**(S1): 69-74.

[6] Reinsel G C, Tiao G C, Wuehbles D J, et al. Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, **99**(D3): 5449-5464.

[7] Schneider N, Lezeaux O, de La Noë J, et al. Validation of ground-based observations of stratomesospheric ozone [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D17): 4540.

[8] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1132-1142. Zhang Q Q, Zhang X Y. Ozone spatial-temporal distribution and trend over China since 2013: insight from satellite and surface observation[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1132-1142.

[9] Mazzeo N A, Venegas L E, Choren H. Analysis of NO, NO₂, O₃ and NO_x concentrations measured at a green area of Buenos Aires city during wintertime [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(17): 3055-3068.

[10] Clapp L J, Jenkin M E. Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(36): 6391-6405.

[11] 单文坡, 殷永泉, 杜世勇, 等. 夏季城市大气 O₃ 浓度影响因素及其相关关系[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1276-1281. Shan W P, Yin Y Q, Du S Y, et al. Ozone pollution, influence factor and their correlation at urban area in summer [J]. Environmental Science, 2006, **27**(7): 1276-1281.

[12] 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. 中国科学: 化学, 2010, **40**(4): 407-420. Lu K D, Zhang Y H, Su H, et al. Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delta during summer time [J]. SCIENTIA SINICA Chimica, 2010, **40**(4): 407-420.

- [13] 沈劲, 黄晓波, 汪宇, 等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(12): 4449-4457.
Shen J, Huang X B, Wang Y, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and source apportionment in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(12): 4449-4457.
- [14] Inness A, Baier F, Benedetti A, *et al.* The MACC reanalysis: an 8 yr data set of atmospheric composition [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(8): 4073-4109.
- [15] Katragkou E, Zanis P, Tsikerdekis A, *et al.* Evaluation of near-surface ozone over Europe from the MACC reanalysis [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, **8**(7): 2299-2314.
- [16] Gaudel A, Clark H, Thouret V, *et al.* On the use of MOZAIK-IAGOS data to assess the ability of the MACC reanalysis to reproduce the distribution of ozone and CO in the UTLS over Europe [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2015, **67**(1): 27955.
- [17] Georgoulas A K, Tsikerdekis A, Amiridis V, *et al.* A 3-D evaluation of the MACC reanalysis dust product over Europe, northern Africa and Middle East using CALIOP/CALIPSO dust satellite observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(12): 8601-8620.
- [18] Flemming J, Inness A, Flentje H, *et al.* Coupling global chemistry transport models to ECMWF's integrated forecast system [J]. *Geoscientific Model Development*, 2009, **2**(2): 253-265.
- [19] Inness A, Flemming J, Suttie M, *et al.* GEMS data assimilation system for chemically reactive gases [R]. Shinfield Park, Reading: ECMWF, 2009.
- [20] Benedetti A, Morcrette J J, Boucher O, *et al.* Aerosol analysis and forecast in the European centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: 2. Data assimilation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D13): D13205.
- [21] Engelen R J, Serrar S, Chevallier F. Four-dimensional data assimilation of atmospheric CO₂ using AIRS observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**: D03303.
- [22] Dethof A. Assimilation of ozone retrievals from the MIPAS instrument on board ENVISAT [R]. Shinfield Park, Reading: ECMWF, 2003.
- [23] Flemming J, Inness A, Jones L, *et al.* Forecasts and assimilation experiments of the Antarctic ozone hole 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(5): 1961-1977.
- [24] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, *et al.* AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 253-264.
- [25] Bian J C, Gettelman A, Chen H B, *et al.* Validation of satellite ozone profile retrievals using Beijing Ozonesonde data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**: D06305.
- [26] Rajab J M, Matjafri M Z, Tan F, *et al.* Analysis of ozone column burden in Peninsular Malaysia retrieved from atmosphere infrared sounder (AIRS) data; 2003-2009 [A]. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques* [C]. Penang, Malaysia: IEEE, 2011. 29-33.
- [27] 潘亮, 牛生杰. AIRS/TOVS/TOMS 反演的臭氧总量的对比分析[J]. 遥感学报, 2008, **12**(1): 54-63.
Pan L, Niu S J. A Comparison of total column ozone values derived from AIRS, TOVS and TOMS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, **12**(1): 54-63.
- [28] Siddans R, Reburn W J, Kerridge B J, *et al.* Height-resolved ozone information in the troposphere and lower stratosphere from global ozone monitoring experiment (GOME) [R]. British: British Atmospheric Data Centre, 2007.
- [29] Carli B, Alpaslan D, Carlotti M, *et al.* First results of MIPAS/ENVISAT with operational Level 2 code [J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(7): 1012-1019.
- [30] Waters J W, Froidevaux L, Harwood R S, *et al.* The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the aura satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(5): 1075-1092.
- [31] Bhartia P K, Wellemeyer C. TOMS-V8 total O₃ algorithm, OMI algorithm theoretical basis document, Volume II, OMI Ozone Products [R]. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 2002. 15-31.
- [32] Bhartia P K, McPeters R D, Mateer C L, *et al.* Algorithm for the estimation of vertical ozone profiles from the backscattered ultraviolet technique [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D13): 18793-18806.
- [33] Eskes H J, Van Der A R J, Brinksma E J, *et al.* Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2005, **5**(4): 4429-4475.
- [34] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心[J]. 科学通报, 1995, **40**(15): 1396-1398.
- [35] 肖钟湧, 江洪. 利用遥感监测青藏高原上空臭氧总量 30a 的变化[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2569-2574.
Xiao Z Y, Jiang H. Variation of total ozone over Tibetan Plateau during 30 years monitored by remotely sensed data [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2569-2574.
- [36] 乜虹, 牛生杰, 王治邦, 等. 青藏高原清洁地区近地面层臭氧的特征分析[J]. 干旱气象, 2004, **22**(1): 1-7.
Nie H, Niu S J, Wang Z B, *et al.* Characteristic analysis of surface ozone over clean area in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Arid Meteorology*, 2004, **22**(1): 1: 7.
- [37] Coldevey-Egbers M, Weber M, Lamsal L N, *et al.* Total ozone retrieval from GOME UV spectral data using the weighting function DOAS approach [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(4): 1015-1025.
- [38] 陈爱军, 曹晓云, 韩琛惠, 等. 2000~2016 年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化[J]. 气候与环境研究, 2018, **23**(3): 355-365.
Chen A J, Cao X Y, Han C H, *et al.* Spatial-temporal distribution and variation of land surface albedo over the Tibetan Plateau during 2000-2016 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, **23**(3): 355-365.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PNA Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	Ji Xiao-qing, Qi Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)