

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃和N₂O)减排效果比较:以夏玉米季为例 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄分压特征分析 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce³⁺与Cu²⁺协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO₂光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硝酸盐的吸附解吸作用研究 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚硝酸盐的吸附特征 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺的吸附特性 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析

陈卓, 刘峻峰*, 陶玮, 陶澍

(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 二次有机气溶胶(SOA)由于其在大气污染、气候变化与人体健康方面的影响,是我国大气环境中一种重要的污染物. 确定中国 SOA 分布规律以及产生来源是大气污染防治的前提. 利用全球化学传输模型(Model for Ozone and Related Chemical Tracers, Version 4, MOZART4)并集成多相 SOA 参数化方案,模拟了中国地区 SOA 的时空分布,并按前体物分区域进行了来源分析. 结果表明,受 SOA 前体物排放分布的影响,中国地区的 SOA 主要分布在东部和南部地区,并且夏季 SOA 产量是冬季产量的 2.5 倍. 中国地区分布的 SOA 由人为源排放产生占 55%,高于自然源(45%);并且境内排放贡献了我国 SOA 产量的 77%,主要影响东部近地面大气的浓度分布. 境外排放主要影响我国西部地区,尤其是对高空 SOA 分布影响显著.

关键词: 二次有机气溶胶; 来源分析; 数值模拟; 全球化学传输模型; 参数化

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2815-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.001

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China

CHEN Zhuo, LIU Jun-feng*, TAO Wei, TAO Shu

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Secondary organic aerosol (SOA) is an important pollutant due to its significant impact on atmospheric pollution, climate change and human health. Understanding the source and distribution of SOA is the prerequisite of air pollution control. This study utilized the global chemical transport model MOZART4 (Model for Ozone and Related Chemical Tracers, Version 4) coupled with the parameterizations of SOA multiphase formation, to simulate the spatial and temporal distribution of SOA in China, and analyzed the source contributions of SOA from the aspects of different precursors and regions. Our results indicate that the majority of SOA production happened over the east and the south China due to the availability of SOA precursors, with the summertime production a factor of 2.5 higher than that in winter. Anthropogenic emissions played a dominant role in SOA production, accounting for 55% of SOA source in China, with the rest from biogenic sources (45%). The domestic emissions contributed 77% of SOA production in China, mainly influencing the SOA concentration distribution near the surface of eastern China, especially over North China Plain. Foreign emissions mainly dominated the SOA abundance in western China, especially at higher altitudes mainly due to the rare domestic emission over these areas and the long-range transportation of SOA.

Key words: secondary organic aerosol (SOA); source attribution; numerical simulation; global chemical transport model; parameterization

二次有机气溶胶(SOA)是大气中挥发性有机物或者半挥发性有机物经过一系列物理化学过程形成的气溶胶^[1]. 由于 SOA 扰动辐射平衡,对气候造成不可忽视的影响^[2],另外 SOA 作为 PM_{2.5}的重要组成部分^[3,4],对人体健康具有潜在的威胁^[5-7],所以 SOA 的污染问题日益受到国内外学界的重视.

SOA 前体物众多,既包括来自自然源排放的异戊二烯、单萜烯、倍半萜烯等^[8-10],也包括来自人为源排放的芳香烃、烯烃、长链烷烃、环烷烃等^[11,12]. 而 SOA 的形成过程也十分复杂:挥发性的有机气体(VOC)与大气中的活性自由基·OH、O₃和·NO₃等发生光氧化反应,再进一步氧化生成一系列低挥发性的物种,然后再经过气/粒分配,一部分有机组分留在颗粒相形成 SOA^[13,14];此外,液相反应也被认为是 SOA 的重要形成机制^[15]. 一些水溶性有机物,比如乙二醛,可以溶解入云滴中,然后进

一步反应,生成一系列低挥发性产物,当云滴蒸发后,这些产物保留在颗粒相成为 SOA^[16-18]. 此液相 SOA 来源已被航测研究证实^[19-21].

由于 SOA 前体物数量多,反应机制复杂,并且经历了多相转移、异相反应等过程,对 SOA 形成的了解尚存在很多局限性. 所以在大尺度 SOA 数值模拟上通常采用参数化方式. 近年来,国外已有一些 SOA 参数化方案的研究^[22-27],而国内对 SOA 的参数化研究也有针对特定区域的报道^[28,29],但是在全国尺度上的研究尚鲜见报道,特别是针对液相 SOA 的模拟更为鲜见. 本研究将多相 SOA 参数化方案耦合进全球化学传输模型 MOZART4 中,对中

收稿日期: 2016-02-22; 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41222011, 41130754, 10972009)

作者简介: 陈卓(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为气候模型数值模拟, E-mail: chenzhuo01@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jfliu@pku.edu.cn

国地区的 SOA 进行了模拟,探讨中国地区 SOA 时空分布的特征,并分析境内外人为源排放与自然源排放对我国 SOA 的贡献,以期为 PM_{2.5} 污染防治提供参考.

1 研究方法

为了较为准确地模拟中国地区的 SOA,本研究在全球化学传输模型 MOZART4 中耦合了 SOA 参数化方案. 具体 MOZART4 配置与参数化方案如下.

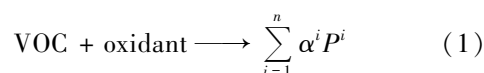
1.1 模型设置

MOZART4 是一款针对对流层化学物质传输及反应的全球三维模型. 关于该模型的具体介绍详见文献[30]. 本研究水平分辨率设为 1.9° × 1.9°; 垂直分辨率从地面到平流层(2 hPa)共分为 28 层; 时间步长为 15 min. 气象场采用 NCAR/NCEP 再分析资料. 排放源中自然源 VOC 采用的是 MOZART4 标准排放,来自 GEIA 数据库,而人为源则采用的是 HTAP-V2,2010 年的排放清单. 本研究中 SOA 前体物的排放包括异戊二烯、单萜烯、芳香烃和长链烷烃. 模拟时间从 2009 年 1 月到 2010 年 12 月,其中第一年为模型的启动时间,不参与后期分析. 为了探究境内外地区人为源和自然源排放对境内 SOA 浓度的影响,本研究针对不同地区的排放进行了敏感性实验分析: ①关闭中国地区人为源 VOC 排放;

②关闭中国地区所有人为源排放;③关闭中国地区自然源 VOC 排放;④关闭中国地区所有排放;⑤关闭境外所有排放.

1.2 SOA 参数化方案

本研究对 SOA 参数化采用 VBS(volatility basis set)方案. 其假设各种 VOC 在大气中与·OH、·NO₃ 和 O₃ 等反应生成活性中间体,主要以过氧自由基(·RO₂)的形式存在,然后活性中间体再继续反应生成一系列有机氧化产物. 其按照挥发性的不同可以分成 4 类或者更多种. 大部分研究^[31-35]假设产物按照挥发性分为 4 类,在 300K 下的饱和蒸气压分别为 1、10、100 和 1 000 μg·m⁻³,本研究也沿用该假设,即:



式中,VOC 代表挥发性有机物,是 SOA 的前体物,oxidant 代表活性自由基,包括·OH、·NO₃ 和 O₃,代表不同挥发性的中间产物,为不同挥发性产物的产率. 由于·RO₂在不同 NO_x 浓度下的反应机制不同,在高浓度 NO_x 下,·RO₂ 主要与 NO 反应,而在低浓度 NO_x 下,·RO₂ 主要与·HO₂ 和·RO₂ 反应. 此两种不同的反应机制导致的 SOA 产率有所不同. 因此, Lane 等^[36]根据·RO₂ 与 NO 反应的比例 *B* (branch ratio) 来调节不同浓度 NO_x 下的产率:

$$B = \frac{(\text{RO}_2 + \text{NO}) \text{ 反应速度}}{(\text{RO}_2 + \text{NO}) \text{ 反应速率} + (\text{RO}_2 + \text{HO}_2) \text{ 反应速度} + (\text{RO}_2 + \text{RO}_2) \text{ 反应速率}} \quad (2)$$

$$\alpha_n^i = B\alpha_n^{i,\text{high}} + (1 - B)\alpha_n^{i,\text{low}} \quad (3)$$

式中, $\alpha_n^{i,\text{high}}$ 和 $\alpha_n^{i,\text{low}}$ 是高浓度 NO_x 和低浓度 NO_x 下的产率,通过烟雾箱实验获得. 本研究采用的各参数见文献[37]. 由于产物仍具有一定挥发性,会经气-粒分配过程,一部分留在颗粒相形成 SOA. 分配过程基于文献[38]:

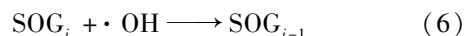
$$c_i^{\text{gas}} = \frac{c_i^{\text{aer}}}{c_{\text{tot}} c_i^*} \quad (4)$$

式中, c_i^{gas} 和 c_i^{aer} 分别为产物 *i* 在达到气液平衡时的气相浓度(μg·m⁻³)和液相浓度(μg·m⁻³), c_i^* 则为饱和蒸气压(μg·m⁻³),而 c_{tot} 为总的有机气溶胶的浓度(μg·m⁻³),包括一次气溶胶(POA)和 SOA. 该方程需要通过牛顿迭代法求解. 由于饱和蒸气压与温度有关,故根据克拉伯龙方程:

$$c_i^*(T) = \frac{T}{T_0} \exp\left[\frac{\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \times c_i^*(T_0) \quad (5)$$

式中, $c_i^*(T_0)$ 为 SOA 特定温度(300K)下的饱和蒸气压(μg·m⁻³),即 1、10、100 和 1 000 μg·m⁻³.

$c_i^*(T)$ 为温度 *T* 时的饱和蒸气压(μg·m⁻³), ΔH 为蒸发焓(kJ·mol⁻¹),本研究取 30 kJ·mol⁻¹^[35],*R* 为理想气体参数,取 8.314 J·(mol·K)⁻¹. 该方法还考虑到 SOA 挥发到气相中的部分(SOG)仍然可以被·OH进一步地氧化,使得挥发性高的 SOG 形成挥发性低的 SOG,该过程称为老化:



该反应的速率常数取 1 × 10¹¹ cm³·mol⁻¹·s⁻¹^[26]. 由于 VBS 假设自然源产生的 SOG 的老化过程会导致模拟 SOA 浓度的高估^[31, 35],并且自然源 SOG 的老化过程通常被认为已包括在箱实验中^[33],所以本研究只考虑人为源 SOG 的老化过程.

除了气相中形成的 SOA,还有很大一部分 SOA 通过云水反应形成. 本研究也考虑了云水源 SOA 的形成. Liu 等^[39]在全球化学传输模型 AM3 中基于详细的多相化学反应机制,对云水源 SOA 进行了模拟. He 等^[25]根据模拟结果,分析了温度、OH 浓

度、 O_3 浓度、云水量、碳损失速率和 VOC/NO_x 等在时空分布上与 SOA 产量的相关性,并以此得到了 SOA 产生速率与云水量和碳损失速率的参数化方案:

$$P = \alpha \cdot LWC \cdot TC_{loss}^{\gamma} + \beta \quad (7)$$

式中, P 为 SOA 产生速率 [$kg \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}$], LWC 为云水量 ($kg \cdot kg^{-1}$), TC_{loss} 为总碳损失速率 [$kg \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}$]. He 等^[25]考虑了几种主要 SOA 前体物的碳损失速率:

$$TC_{loss} = 0.012 \times (5 \times L_{isop} + 10 \times L_{terp} + 7 \times L_{tol}) \quad (8)$$

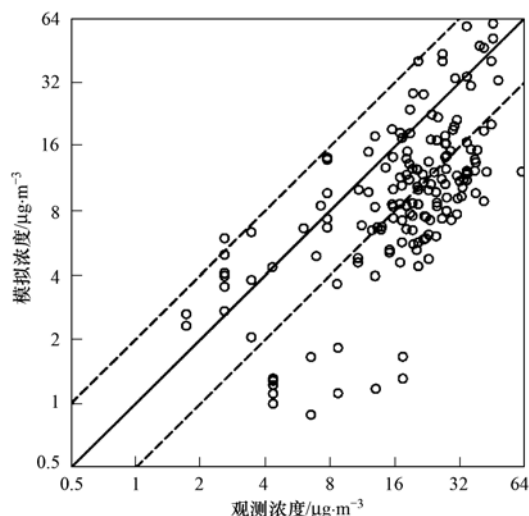
式中, L_{isop} 、 L_{terp} 和 L_{tol} 分别为异戊二烯、单萜烯和芳香烃的碳损失速率 [$kg \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}$]. $\alpha = 6.29 \times 10^{-5}$, $\beta = 6.29 \times 10^{-5}$, $\gamma = 0.84 \times 10^{-17}$.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

本研究采用文献[40]中的观测数据作为对比. 该研究提供了 2006 年中国位于 16 个不同地区观测站点的细颗粒物各组分的地表浓度月均值. 由于有机碳浓度(OC)缺乏准确的手段来区分 POA 和 SOA 的贡献,本研究将模拟的总 OC 浓度与观测站点的 OC 浓度进行比较. 图 1 结果为观测站点数据与对应月份的模拟值对比结果,整体而言,模拟结果是可以接受的,大部分模拟数据都在 4 倍误差以内,并且平均归一化偏差(mean normalized bias, MNB)为 -0.41 ,与文献[41]的结果相近. 这可能是由于全球模型的空间分辨率较低,使得模拟值整体偏

低^[42]. 但是模拟值与观测值之间的相关性较好,相关系数 $R = 0.60$. 所以本研究对中国地区的 SOA 的模拟结果是较为可靠的.



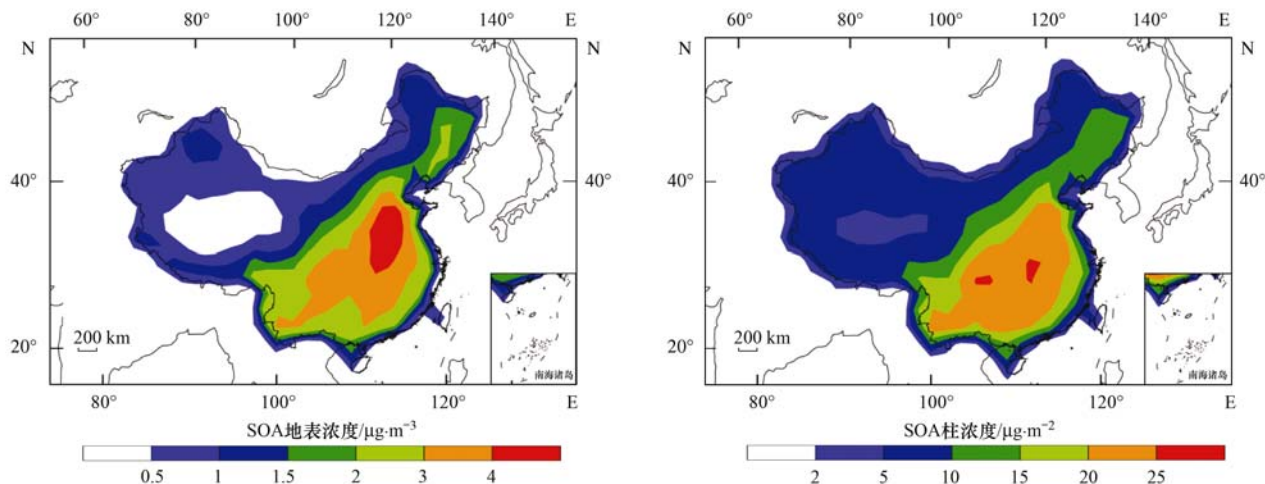
黑色实线代表模拟: 观测 = 1:1, 虚线代表两倍误差线

图 1 中国地区地表 OC 的观测与模型结果对比

Fig. 1 Comparison of modeling and observed surface OC concentrations over China

2.2 中国 SOA 的区域分布

图 2 展示了中国地区 SOA 地表浓度和柱浓度分布的模拟结果. 总体上中国地区的 SOA 分布呈现较大的区域差异. 东部地区的 SOA 地表浓度和柱浓度均高于西部地区,南部地区高于北部地区. 这与 SOA 前体物的排放分布和气候特征有关. 中国地区 SOA 前体物的排放主要集中在东部和南部,而前体物排放分布分别以人为源和自然源为主. 且南方的温暖气候,有利于 SOA 前体物的气相反应,



台湾的数据暂缺,下同

图 2 中国地区 SOA 的地表浓度和柱浓度分布

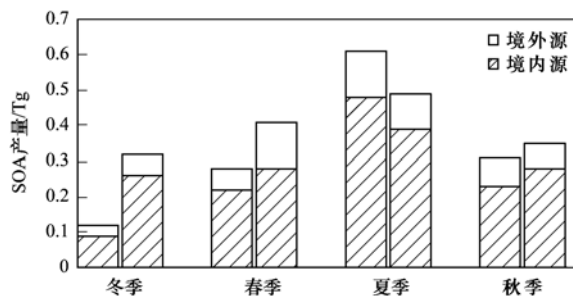
Fig. 2 Horizontal distribution of SOA in China

进而增加 SOA 的产生. 图 2 同时显示出 SOA 的地表浓度和柱浓度分布高度吻合, 但 SOA 地表浓度的高值出现在华北平原, 而柱浓度的高值区则出现在南方中部地区. 这表明 SOA 分布随高度上升而改变.

2.3 源排放对 SOA 产量的贡献

由于异戊二烯和单萜烯的排放几乎全部来自于植物排放, 而绝大多数芳香烃和长链烷烃的排放来自人为源, 所以本研究近似划归异戊二烯和单萜烯生成的 SOA 为自然源 SOA, 由芳香烃和长链烷烃生成的 SOA 为人为源 SOA. 图 3 展示了中国地区不同季节自然源与人为源 SOA 的产量. 与全球尺度 SOA 产量不同 (自然源排放产生的 SOA ($37.1 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 68.3%) 高于人为源排放产生的 SOA ($17.3 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 31.7%), 中国地区人为源 SOA 产量 ($2.11 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$) 略高于自然源 SOA 产量 ($1.75 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$), 分别占 54.6% 和 45.4%. 这主要是由于中国地区人为源 VOC 的排放较高造成的.

然而中国地区不同季节的 SOA 产量差异较大. 总体来讲, 夏季产量最高, 为 1.5 Tg , 占据了全年的



柱状图左侧为自然源 SOA 产量, 右侧为人为源 SOA 产量

图 3 不同季节不同来源的 SOA 产量

Fig. 3 SOA production from different source and in different seasons

38%, 春秋季次之, 而冬季产量最少, 只有夏季产量的 40%. 虽然人为源与自然源 SOA 产量在不同季节的分布与总体 SOA 产量一致, 但是人为源 SOA 产量在不同季节差异不大, 都在 $0.4 \sim 0.6 \text{ Tg}$ 左右, 而不同季节自然源 SOA 产量差距很大. 夏季自然源 SOA 产量 0.81 Tg , 冬季仅 0.16 Tg , 只有夏季的 1/5. 这主要是因为植物在气温较高的生长期中释放的异戊二烯和单萜烯更高. 这也导致了中国冬季 SOA 的产量超过 70% 来自人为源排放.

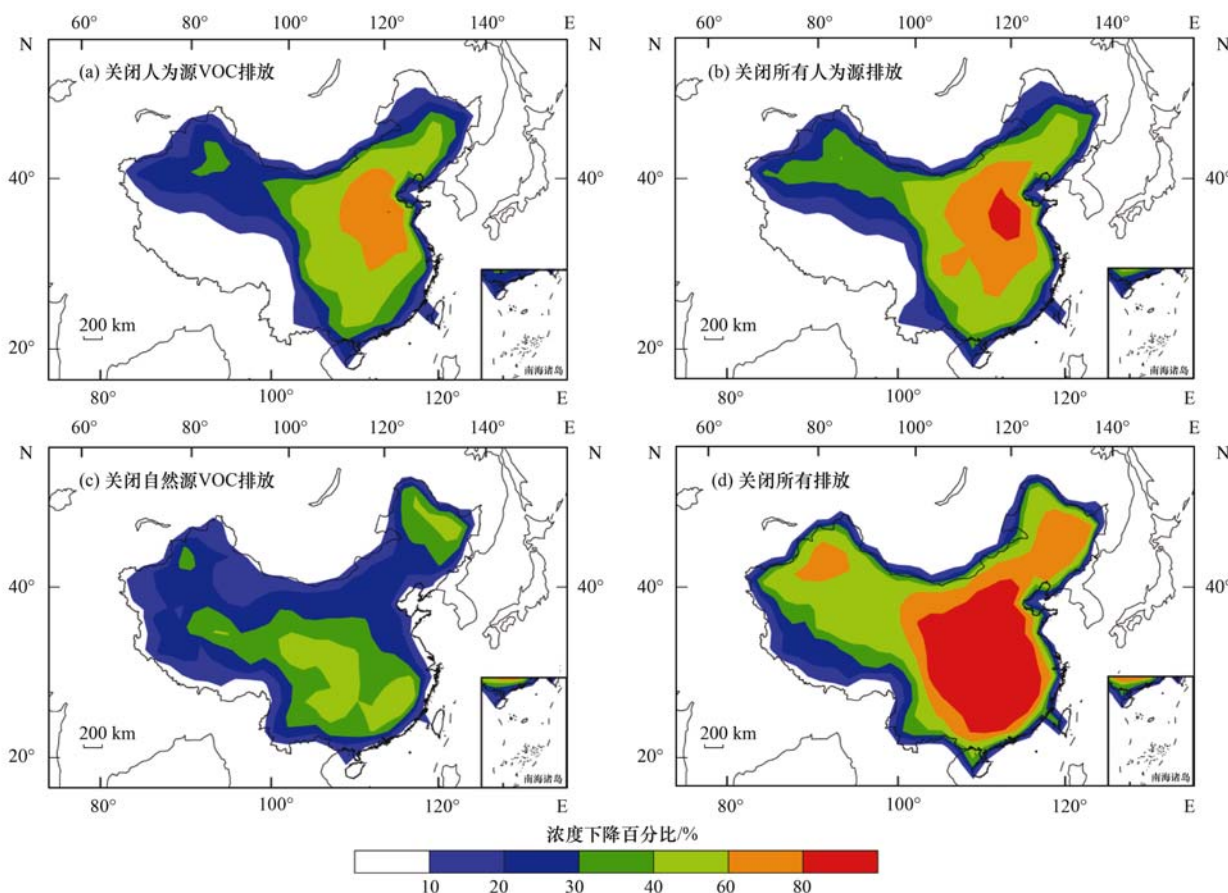


图 4 不同排放下中国地区 SOA 地表浓度的下降比例

Fig. 4 Fractional decrease in surface SOA concentrations over China under different emission reduction scenarios

此外,中国地区的 SOA 产量主要由境内排放产生,约 $2.2 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总产量的 77%. 而且境内源与境外源的比例季节差异较小,除春季境内贡献为较小的 72%,其余季节的贡献均在 77% ~ 80% 之间.

2.4 源排放对 SOA 浓度的影响

2.4.1 境内排放对 SOA 浓度的影响

图 4 和图 5 展示了不同排放下中国地区的 SOA 表面浓度和柱浓度的下降比例. 总体来说,中国地区排放减少时,东部地区 SOA 地表浓度和柱浓度相较于西部地区都显著减少,但是地表浓度影响更大. 当关闭中国地区人为源 VOC 排放时,大部分东部地区 SOA 表面浓度下降 40% 以上,柱浓度下降 30% 以上,华北地区影响最大,地表浓度与柱浓度下降均超过 60%. 一部分西部地区,比如西藏,几乎没有影响,主要是由于该区域人为源 VOC 排放很小. 当关闭中国地区所有人为源排放时,地表浓度和柱浓度分布特征仍然与图 5(a) 的结果相近,但是 SOA 地表浓度下降比例整体略高于图 5(a) 中的结果,华北地区的 SOA 地表浓度下降 80% 以上. VOC 以外的人为源排放的其它污染物对 SOA 的形成影响比较

复杂,一方面 POA 排放减少会使 SOA 的气液分配平衡向气相移动;另一方面, NO_x 的排放减少,使得气相 SOA 的反应机制偏向于高 VOC/ NO_x 环境下的机制,其产率较高. 所以在本研究中,POA 的排放减少的影响略大于 NO_x 的排放减少的影响. 当关闭中国地区自然源 VOC 排放时,整体影响不如关闭人为源排放,即使是影响较大的东部地区,SOA 地表浓度下降也小于 60%. 而且,影响最大的区域也不再是图 5(b) 与图 5(c) 中的华北区域,而是自然源排放相对充足的中西部. 当关闭中国地区所有排放时,SOA 在东部地区地表浓度和柱浓度大面积下降,分别超过了 80% 和 60%,即使是影响较小的西部区域,表面浓度也在西北部下降了 40% 以上. 由于中国 SOA 污染最严重的是东部地表,尤其是华北平原,所以应当重视人为源 VOC 排放的控制.

2.4.2 境外排放对 SOA 浓度的影响

为了探究境外排放对我国境内 SOA 浓度的贡献,本研究还模拟了关闭境外排放对中国地区 SOA 分布的影响. 图 6 展示了关掉境内排放与关闭境外排放时,中国地区 SOA 地表浓度和柱浓度

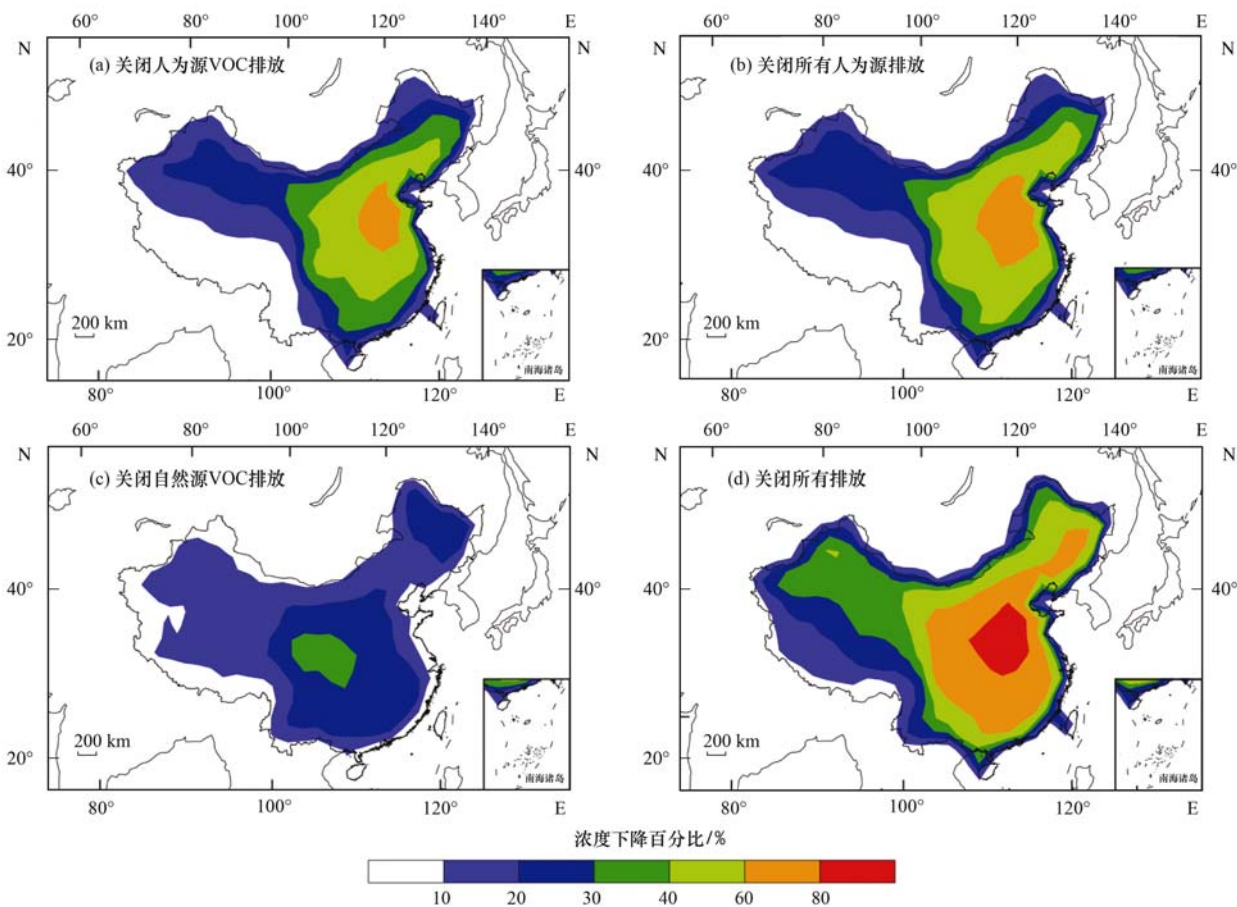


图 5 不同排放下中国地区 SOA 柱浓度下降比例

Fig. 5 Fractional decrease of SOA column concentrations over China under different emission reduction scenarios

的下降比例. 与境内排放的贡献相反, 境外排放对中国地区 SOA 柱浓度的贡献大于地表浓度, 对西部地区的贡献大于东部地区. 当关闭境外排放时, 西部地区的柱浓度下降 70% 左右, 而地表浓度也下降了 50% 以上. 而在境内排放影响最大的华北平原, 地表浓度与柱浓度仅仅下降不到 20% 与 30%. 而关闭境内排放的结果也验证了境外排放

在西部地区的柱浓度和地表浓度贡献分别在 70% 和 50% 以上, 而在华北平原的柱浓度和地表浓度贡献则非常小. 境外源排放对中国西部地区尤其是高空的较大影响主要因为: ①本地源排放在这些区域较小, ②SOA 具有较强的远距离传输能力^[43]. 所以对于中国西部地区的 SOA 污染控制, 更需要关注境外排放.

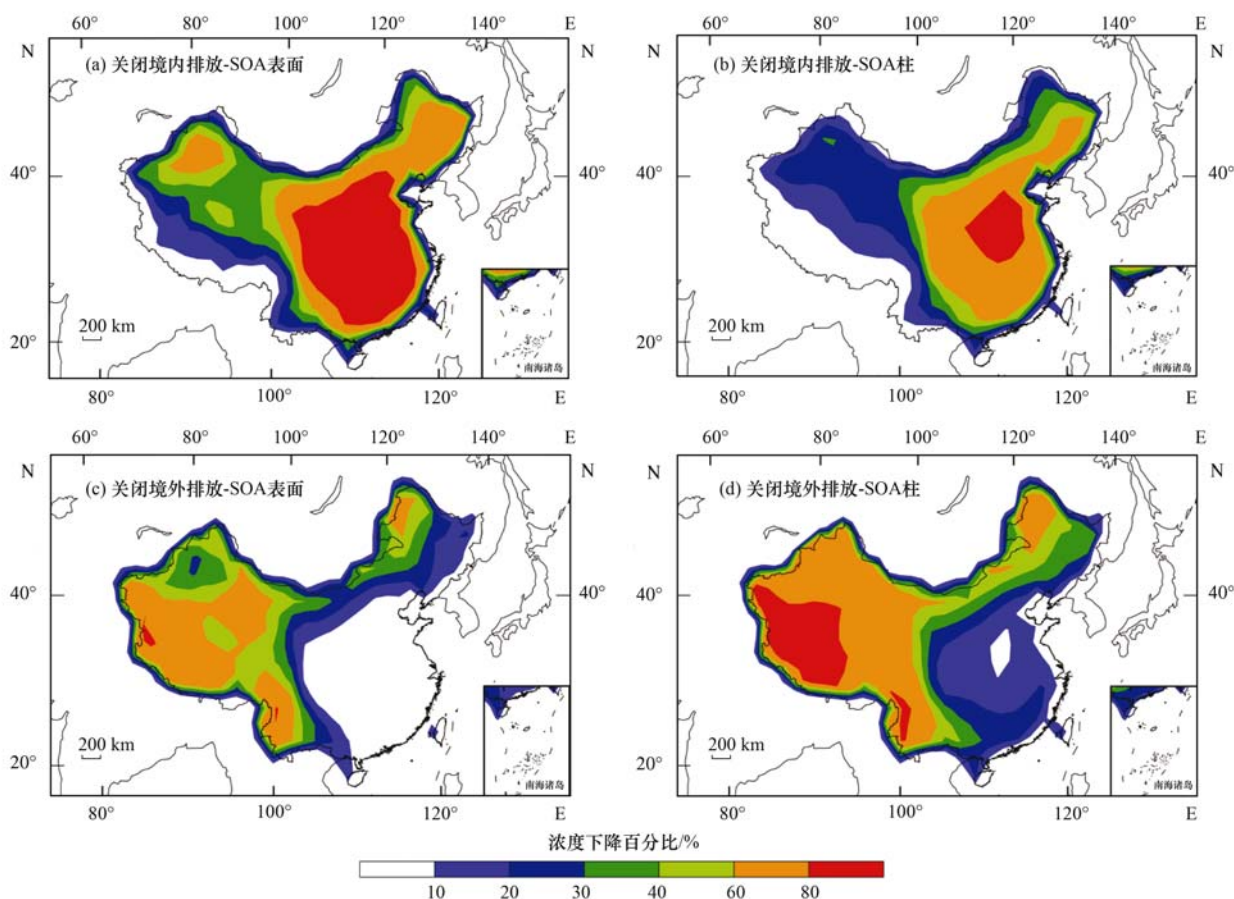


图 6 关闭境内外排放时 SOA 浓度下降比例

Fig. 6 Fractional decrease of SOA concentrations when turning off emission in or out of China

2.5 展望

本研究对 SOA 参数化方案中的参数采用的是其它研究的值. 由于这些参数具有较大的不确定性, 下一步的研究将考虑优化这些参数, 提高模拟效果. 同时考虑到 SOA 与 $PM_{2.5}$ 在来源、形成机制和政策制定上的紧密联系, 下一步的工作将把 SOA 作为 $PM_{2.5}$ 的一部分, 建立针对 $PM_{2.5}$ 的模拟方案, 以期对 $PM_{2.5}$ 的污染控制提供参考.

3 结论

(1) 耦合了 SOA 参数化方案的 MOZART4 模型结果显示, 中国地区 SOA 具有显著的时空分布特征: 由于前体物排放的影响, 浓度高值区主要出现在东部

和南部, 并且夏季 SOA 产量是冬季的 2.5 倍.

(2) 中国地区的 SOA 产量 55% 来自人为源排放, 45% 来自自然源排放; 并且境内排放占据主导地位, 占中国地区 SOA 总产量的 77%.

(3) 中国境内排放对中国地区的 SOA 的地表浓度影响高于柱浓度, 对东部地区的影响高于西部地区, 境内人为源排放的贡献高于自然源排放. 而境外排放则对中国西部地区的 SOA 和高空的 SOA 贡献更大. 因此对于中国东部地区尤其是华北平原的 SOA 污染, 应当控制人为源排放, 而对西部地区的 SOA 污染, 则更应当关注境外排放.

参考文献:

[1] Tkacik D S, Presto A A, Donahue N M, et al. Secondary

- organic aerosol formation from intermediate-volatility organic compounds: cyclic, linear, and branched alkanes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (16): 8773-8781.
- [2] Laskin A, Laskin J, Nizkorodov S A. Chemistry of atmospheric brown Carbon[J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 4335-4382.
- [3] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12** (2): 779-799.
- [4] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, *et al.* Sources, composition and absorption Ångström exponent of light-absorbing organic components in aerosol extracts from the Los Angeles Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (8): 3685-3693.
- [5] Gehring U, Gruzjeva O, Agius R M, *et al.* Air pollution exposure and lung function in children: the ESCAPE project[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, **121**(11-12): 1357-1364.
- [6] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [7] Zhou P, Guo J, Zhou X Y, *et al.* PM_{2.5}, PM₁₀ and health risk assessment of heavy metals in a typical printed circuit boards manufacturing workshop[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(10): 2018-2026.
- [8] Budisulistiorini S H, Canagaratna M R, Croteau P L, *et al.* Real-time continuous characterization of secondary organic aerosol derived from isoprene epoxydiols in downtown Atlanta, Georgia, using the aerodyne aerosol chemical speciation monitor [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (11): 5686-5694.
- [9] Saleh R, Donahue N M, Robinson A L. Time scales for gas-particle partitioning equilibration of secondary organic aerosol formed from alpha-pinene ozonolysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(11): 5588-5594.
- [10] Krechmer J E, Coggon M M, Massoli P, *et al.* Formation of low volatility organic compounds and secondary organic aerosol from isoprene hydroxyhydroperoxide low-NO oxidation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (17): 10330-10339.
- [11] Jathar S H, Miracolo M A, Tkacik D S, *et al.* Secondary organic aerosol formation from photo-oxidation of unburned fuel: experimental results and implications for aerosol formation from combustion emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(22): 12886-12893.
- [12] Hunter J F, Carrasquillo A J, Daumit K E, *et al.* Secondary organic aerosol formation from acyclic, monocyclic, and polycyclic alkanes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(17): 10227-10234.
- [13] Chung S H, Seinfeld J H. Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D19): AAC 14-1-AAC 14-33.
- [14] 李莹莹, 李想, 陈建民. 植物释放挥发性有机物(BVOC)向二次有机气溶胶(SOA)转化机制研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3588-3592.
- [15] Ervens B, Turpin B J, Weber R J. Secondary organic aerosol formation in cloud droplets and aqueous particles (aqSOA): a review of laboratory, field and model studies[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(21): 11069-11102.
- [16] Nozière B, Dziedzic P, Córdoba A. Products and kinetics of the liquid-phase reaction of Glyoxal catalyzed by Ammonium Ions (NH₄⁺)[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2009, **113** (1): 231-237.
- [17] Perri M J, Seitzinger S, Turpin B J. Secondary organic aerosol production from aqueous photooxidation of glycolaldehyde: laboratory experiments[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43** (8): 1487-1497.
- [18] 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.
- [19] Sorooshian A, Varutbangkul V, Brechtel F J, *et al.* Oxalic acid in clear and cloudy atmospheres: analysis of data from international consortium for atmospheric research on transport and transformation 2004 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D23): D23S45.
- [20] Sorooshian A, Lu M L, Brechtel F J, *et al.* On the source of organic acid aerosol layers above clouds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(13): 4647-4654.
- [21] Sorooshian A, Murphy S M, Hersey S, *et al.* Constraining the contribution of organic acids and AMS *m/z* 44 to the organic aerosol budget: on the importance of meteorology, aerosol hygroscopicity, and region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(21): L21807.
- [22] Donahue N M, Robinson A L, Stanier C O, *et al.* Coupled partitioning, dilution, and chemical aging of semivolatile organics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (8): 2635-2643.
- [23] Fu T M, Jacob D J, Wittrock F, *et al.* Global budgets of atmospheric glyoxal and methylglyoxal, and implications for formation of secondary organic aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113** (D15): D15303.
- [24] Ervens B, Carlton A G, Turpin B J, *et al.* Secondary organic aerosol yields from cloud-processing of isoprene oxidation products [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(2): L02816.
- [25] He C, Liu J, Carlton A G, *et al.* Evaluation of factors controlling global secondary organic aerosol production from cloud processes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 1913-1926.
- [26] Shrivastava M, Zelenyuk A, Imre D, *et al.* Implications of low volatility SOA and gas-phase fragmentation reactions on SOA loadings and their spatial and temporal evolution in the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(8): 3328-3342.
- [27] Tsigaridis K, Daskalakis N, Kanakidou M, *et al.* The AeroCom evaluation and intercomparison of organic aerosol in global models [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (19): 10845-10895.
- [28] 程艳丽, 李焱焱, 白郁华, 等. 珠江三角洲区域大气二次有机气溶胶的数值模拟[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3441-

- 3447.
- [29] 郭晓霜, 司徒淑娉, 王雪梅, 等. 结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1654-1661.
- [30] Emmons L K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4)[J]. Geoscientific Model Development, 2010, **3**(1): 43-67.
- [31] Lane T E, Donahue N M, Pandis S N. Simulating secondary organic aerosol formation using the volatility basis-set approach in a chemical transport model [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(32): 7439-7451.
- [32] Murphy B N, Pandis S N. Simulating the formation of semivolatile primary and secondary organic aerosol in a regional chemical transport model [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(13): 4722-4728.
- [33] Farina S C, Adams P J, Pandis S N. Modeling global secondary organic aerosol formation and processing with the volatility basis set: implications for anthropogenic secondary organic aerosol[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, **115**(D9): D09202.
- [34] Tsimpidi A P, Karydis V A, Zavala M, *et al.* Evaluation of the volatility basis-set approach for the simulation of organic aerosol formation in the Mexico City metropolitan area[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(2): 525-546.
- [35] Ahmadov R, McKeen S A, Robinson A L, *et al.* A volatility basis set model for summertime secondary organic aerosols over the eastern United States in 2006 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, **117**(D6): D06301.
- [36] Lane T E, Donahue N M, Pandis S N. Effect of NO_x on secondary organic aerosol concentrations [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(16): 6022-6027.
- [37] Pankow J F. An absorption model of the gas/aerosol partitioning involved in the formation of secondary organic aerosol [J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(2): 189-193.
- [38] Kroll J H, Ng N L, Murphy S M, *et al.* Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(6): 1869-1877.
- [39] Liu J F, Horowitz L W, Fan S M, *et al.* Global in-cloud production of secondary organic aerosols: implementation of a detailed chemical mechanism in the GFDL atmospheric model AM3 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, **117**(D15): D15303.
- [40] Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, *et al.* Carbonaceous aerosol composition over various regions of China during 2006 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, **113**(D14): D14111.
- [41] Lin G, Penner J E, Sillman S, *et al.* Global modeling of SOA formation from dicarbonyls, epoxides, organic nitrates and peroxides [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(10): 4743-4774.
- [42] Stroud C A, Makar P A, Moran M D, *et al.* Impact of model grid spacing on regional-and urban-scale air quality predictions of organic aerosol [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(7): 3107-3118.
- [43] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1148-1153.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行