

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铨, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机胺的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铨, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事	(553)
《环境科学》征稿简则	(655)
信息	(664, 755, 885)

我国 PCDD/Fs 网格化大气排放清单

陈露露¹, 黄韬^{1*}, 陈凯杰¹, 宋世杰¹, 高宏¹, 马建民^{1,2}

(1. 兰州大学资源环境学院甘肃省环境污染预警与控制重点实验室, 兰州 730000; 2. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: PCDD/Fs 排放清单是进行 PCDD/Fs 控制、环境归趋行为研究和健康风险评估的基础。本研究基于我国官方发布的 2004 年各行业 PCDD/Fs 排放清单的基础上, 结合联合国环境规划署 (UNEP) 2013 年发布的最新《鉴别及量化 PCDD/Fs 类排放标准工具包》中 PCDD/Fs 排放因子, 估算了我国 2016 年各省各行业 PCDD/Fs 大气排放量, 并结合各行业网格化指代数据, 建立了我国 PCDD/Fs 大气网格化排放清单 ($1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 经纬度), 最后利用蒙特卡洛模型分析了清单的不确定性。结果表明, 2016 年我国 PCDD/Fs 大气排放量 (以 TEQ 计, 下同) 为 10 366 g, 与 2004 年相比增加了约 2 倍。从排放行业来看, 金属生产是我国大气中 PCDD/Fs 的主要来源, 2016 年排放量为 5 333 g, 其次为垃圾焚烧 (2 469 g), 供热和发电 (1 290 g) 和矿物产品生产 (933 g), 以上 4 个行业排放量占我国 PCDD/Fs 大气总排放的 97%。从空间来看, 我国大气 PCDD/Fs 排放主要集中在京津冀、长三角和珠三角地区, 其中京津冀和长三角地区 PCDD/Fs 排放主要来自钢铁生产, 珠三角地区主要来自垃圾焚烧。

关键词: 中国; 二噁英; 大气; 网格化; 排放清单; 排放特征

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0510-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908056

Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China

CHEN Lu-lu¹, HUANG Tao^{1*}, CHEN Kai-jie¹, SONG Shi-jie¹, GAO Hong¹, MA Jian-min^{1,2}

(1. Key Laboratory for Environmental Pollution Prediction and Control, Gansu Province, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: PCDD/Fs emission inventory is the basis for PCDD/Fs control, research on environmental fate behavior, and health risk assessment. In the present study, based on officially released PCDD/Fs emissions inventory for each industry in China in 2004, we estimated atmospheric PCDD/Fs emissions by sector in various provinces in 2016 by combining the emission intensity in the "Identification and Quantification of PCDD/Fs Emission Standards Toolkit" released by the United Nations Environment Program (UNEP) in 2013. Subsequently, using different gridding data for various sectors as surrogate data, we established atmospheric gridded emission inventory ($1/4^\circ \times 1/4^\circ$ latitude by longitude) for PCDD/Fs in China. Finally, the uncertainty of PCDD/Fs emission inventory was analyzed. Results show that the atmospheric emissions of PCDD/Fs in China in 2016 were 10 366 g, which was about two times higher than that in 2004. From the perspective of the emission sector, metal smelting is the largest emitter of PCDD/Fs in China, which released 5 333 g, followed by waste incineration (2 469 g), heating and power generation (1 290 g), and mineral production (933 g). These four sectors accounted for 97% of China's total PCDD/Fs emissions. In spatial terms, China's atmospheric PCDD/Fs emissions are mainly concentrated in the Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta, and Pearl River Delta regions. PCDD/Fs emissions from the Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River Delta regions originate mainly from steel smelting, and that from the Pearl River Delta region is mainly due to waste incineration.

Key words: China; dioxin; atmospheric; gridded; emission inventory; emission characteristics

二噁英是多氯二苯并-对-二噁英/呋喃 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and polychlorinated dibenzofurans, PCDD/Fs) 的总称, 包括多氯代二苯并-对-二噁英 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, PCDDs) 和多氯代二苯并呋喃 (polychlorinated dibenzofurans, PCDFs) 两类芳香族杂环化合物^[1], 它们是一类持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs)。因其具有免疫毒性、内分泌毒性、生殖毒性及强致癌性而受到广泛关注^[2]。PCDD/Fs 来源于人类活动副产物, 包括废物焚烧、金属生产、发电、化学制造、石油精炼、机动车排放和木材燃烧^[3~7]。由于 PCDD/Fs 的半挥发性和持久性特性, 排放进入环境的 PCDD/Fs, 可通过迁移

进入环境介质, 以及通过大气平流进行远距离传输, 继而影响全球环境^[8,9]。为了减少和控制 POPs (包括二噁英) 的区域和全球环境暴露, 2001 年 5 月 22 日在斯德哥尔摩通过《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(公约), 2004 年 5 月 17 日生效 (于 2004 年 11 月 11 日在中国正式生效)。根据该公约, 缔约国必须建立 POPs 排放清单。

排放清单是评估持久性有机污染物的环境行为

收稿日期: 2019-08-07; 修订日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877507, 41503089, 41671460)

作者简介: 陈露露 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为持久性有机污染物区域环境过程, E-mail: llchen18@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: huangt@lzu.edu.cn

和健康风险的重要依据^[10,11],还可为模拟 POPs 提供初始数据,以量化和预测区域尺度^[12,13]和全球尺度^[14,15]持久性有机污染物的源-汇关系。根据斯德哥尔摩公约官网统计(<http://chm.pops.int/Implementation/NIPs/NIPTransmission/tabid/253/Default.aspx>),截止目前共有 109 个国家建立了不同排放源的 PCDD/Fs 清单,其中有 18 个国家对清单进行了更新。国外对 PCDD/Fs 的排放清单的网格化研究较早,欧洲各国从 1990 ~ 2010 年,每 5 a 分别建立了国家级和行业级 PCDD/Fs 排放清单(50 km × 50 km)^[16]。Cohen 等^[17]收集来自设施、行业和监测机构在每个重要源类别中的 PCDD/Fs 排放数据,于 1996 年在美国和加拿大建立网格化 PCDD/Fs 排放清单(100 km × 100 km),并利用大气扩散模型模拟了 PCDD/Fs 在五大湖的沉降。

我国对常规大气污染物的清单研究较多^[18~20],但对 PCDD/Fs 的排放清单研究较少。2004 年 11 月 11 日公约在我国正式生效后,我国官方发布了 2004 年 PCDD/Fs 排放清单^[21],之后的研究很少对 PCDD/Fs 的清单进行全面的更新,且缺乏对 PCDD/Fs 进行网格化的分配。Wu 等^[22]基于不同技术和工艺估算 2012 年钢铁行业 PCDD/Fs 的排放量,Wang 等^[23]针对中国钢铁工业估算 PCDD/Fs 排放清单并进行时间趋势和空间分布,Gao 等^[24]采用自下而上的方法计算出中国钢铁工业 PCDD/Fs 排放清单并进行时空动态分布。Huang 等^[25]基于 2004 年 PCDD/Fs 排放清单建立了 2009 年中国 2,3,7,8-TCDD 网格化清单(0.25° × 0.25°),从而为本文提供了一个研究思路。

本研究在 2004 年为基准年发布的我国官方各行业 PCDD/Fs 排放清单的基础上,结合联合国环境规划署(UNEP)的《鉴别及量化 PCDD/Fs 类排放标准工具包》中公布的最新排放因子,估算我国 2016 年各省各行业 PCDD/Fs 大气排放量,并结合各行业网格化指代数据,建立我国大气网格化排放清单(1/4°经度 × 1/4°纬度),以期为制定相关污染控制政策提供科学依据,同时也为进一步模拟 PCDD/Fs 环境归趋行为和健康风险评估提供数据支持。

1 材料与方法

图 1 是建立中国 PCDD/Fs 网格化排放清单的主要步骤流程。首先,根据已有 2004 年国家不同行业部门的 PCDD/Fs 排放量^[21],从 10 个行业中收集其中 7 个主要的 PCDD/Fs 排放行业 2004 年和 2016 年的经济活动水平。这 7 个行业是:①金属生产;②发电和供热;③废物焚烧;④矿物产品生产;⑤交通运输;⑥农作物秸秆田间燃烧;⑦遗体火化。这些来源占中国 PCDD/Fs 总排放量的 98% 以上。然后,基于 2004 年全国(香港、澳门和台湾资料暂缺)各行业 PCDD/Fs 排放量,结合搜集的 2004 年和 2016 年各省 7 个重点行业经济活动量,获得 2016 年各省 7 个重点行业 PCDD/Fs 排放量。第三,考虑到部分行业排放因子产生变化(主要是焦炭生产、柴油发动机和重油发动机),利用 2013 年联合国环境规划署(UNEP)的发布的最新《鉴别及量化 PCDD/Fs 类排放标准工具包》(2013 年工具包, <http://chm.pops.int/Implementation/UnintentionalPOPs/ToolkitforUPOPs/ToolkitMethodology/tabid/196/Default.aspx>)中的排

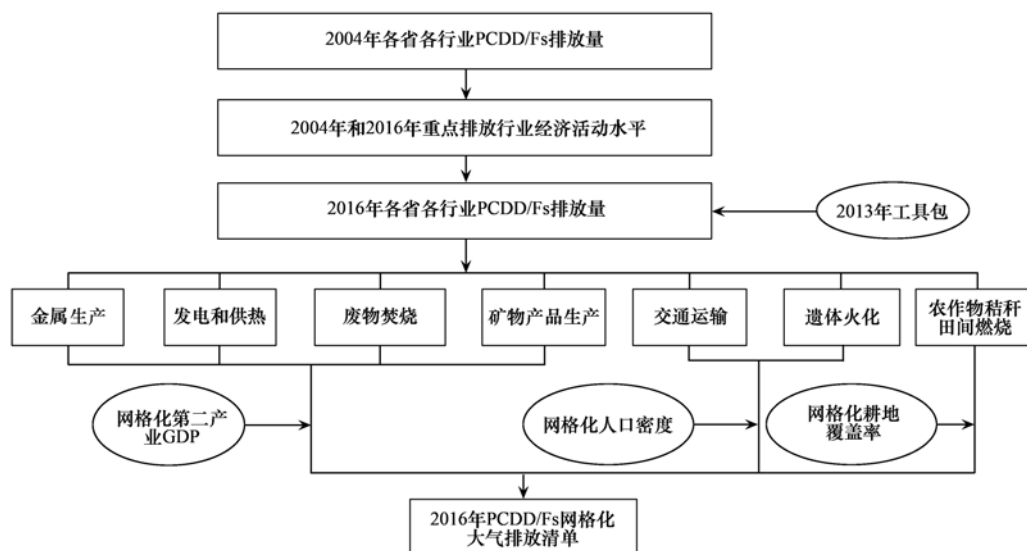


图 1 2016 年 PCDD/Fs 网格化(1/4°经度 × 1/4°纬度)排放清单的主要步骤流程示意

Fig. 1 Flow chart showing steps and procedures for updating and establishing gridded PCDD/Fs emission inventory (1/4° × 1/4° latitude by longitude) in 2016

放因子,结合 2004 年排放清单采用的排放因子,对 2016 年 PCDD/Fs 排放清单进行校正.最后,以网格化人口密度、耕地覆盖率和第二产业的 GDP 作为替代数据,通过插值建立我国(1/4°)经度 × (1/4°)纬度 PCDD/Fs 大气网格化排放清单.

1.1 省级不同行业部门排放量计算

2004 年不同部门的各省 PCDD/Fs 总排放量估计如下:

$$E_{ij,2004}^T = E_{j,2004}^T \times \frac{P_{ij,2004}}{C_{j,2004}} \quad (1)$$

式中, $E_{ij,2004}^T$ 是 2004 年 i 省 j 行业的 PCDD/Fs 的总排放量,其值来自我国 2004 年 PCDD/Fs 排放清单^[21]; $E_{j,2004}^T$ 是 2004 年 j 行业的 PCDD/Fs 总排放量; $P_{ij,2004}$ 是 2004 年 i 省 j 行业的产品产量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 或 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); $C_{j,2004}$ 为 2004 年 j 行业的产品产量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 或 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$).

基于 2004 年 i 省 j 行业的 PCDD/Fs 的总排放量,2016 年各省各行业 PCDD/Fs 排放量可根据下式获得.

$$E_{ij,2016}^T = E_{ij,2004}^T \times \frac{P_{ij,2016}}{P_{ij,2004}} \quad (2)$$

1.2 数据来源

各省各行业活动水平数据分别来自国家统计局(<http://data.stats.gov.cn/index.htm>)和文献[26~32].由于缺失 2017 年薪柴燃烧量,本研究使用的薪柴燃烧量参考 2010 年燃烧量^[33].

1.3 排放清单网格化

PCDD/Fs 排放清单的网格化是将各省排放量分配到一定空间网格,为此,需要选择合适的网格化替代数据进行空间插值. Huang 等^[25]的研究发现交通运输和遗体火化行业 PCDD/Fs 空间排放量与人口密度显著相关,农作物秸秆田间燃烧空间排放量与农作物利用耕地覆盖率显著相关,而金属生产、发电和供热、垃圾焚烧和非金属矿物产品生产行业排放量与第二产业国内生产总值(GDP)显著相关.基于此研究,利用以上 3 种指代数据对各省各行业 PCDD/Fs 排放量进行网格化插值.

2015 年全球网格化人口密度(2.5'纬度 × 2.5'经度)和 2000 网格化耕地数据(5'纬度 × 5'经度)从哥伦比亚大学的 CISEN (Center for International Earth Science Information Network) 中获得(<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/sets>),然后插值到 1/4°经度 × 1/4°纬度.考虑到 2015~2016 年之间人口密度和 2000 年至 2016 年农田网格数据的微小变化,本研究可以采用这些数据用以得出 2016 年的网格化排放清单.

由于缺少网格化 GDP 数据,夜间灯光强度已用于过去 20 多年的经济活动研究^[34,35],故利用卫星遥感测量的夜间灯光强度来计算 GDP 的空间分布.韩向娣等^[36]利用不同夜间光指数与第一产业、第二产业和第三产业的 GDP 之间的对数回归模型,创建了 1 km × 1 km 分辨率的中国网格化 GDP 地图.夜间灯光数据可在 NGDC 网站获得(<http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>).由于夜间灯光数据只更新到 2013 年,故选取 2013 年灯光数据代替 2016 年灯光数据.本研究基于韩向娣等^[36]的研究结果,获得 1 km × 1 km 分辨率的中国第二产业 GDP 计算公式为:

$$\ln \text{GDP}_2 = 0.733 \ln I + 14.424 \quad (3)$$

式中, GDP_2 是第二产业 GDP($10\,000 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2}$), I 是夜间灯光指数(无量纲).

最后将 1 km × 1 km 分辨率的我国第二产业 GDP 数据插值至 1/4°纬度 × 1/4°经度,用于第二产业行业 PCDD/Fs 排放量的空间插值.

2 结果与讨论

2.1 PCDD/Fs 大气排放量

2.1.1 PCDD/Fs 不同行业排放

本研究估算了 2016 年 PCDD/Fs 大气排放量,如表 1 所示,2016 年我国大气 PCDD/Fs 排放量(以 TEQ 计,下同)为 10 366 g,比 2004 年增加了约 2 倍的排放量.

表 1 不同排放类别的 PCDD/Fs 大气排放量(以 TEQ 计)/g

Table 1 Atmospheric PCDD/Fs emissions from different emission categories(TEQ)/g

项目	2004 年 ^[21]	2016 年	变化率/%
金属生产	2 460	5 333	116.8
发电和供热	1 072	1 290	20.3
废物焚烧	610	2 469	304.7
矿物产品生产	413	933	125.9
交通运输	117	216	84.6
农作物秸秆田间燃烧	47	83	76.6
遗体火化	44	42	-4.5
总排放	4 763	10 366	117.6

而从表 1 中 2016 年我国不同排放源 PCDD/Fs 排放量可以看出,金属生产排放最多,排放量为 5 333 g,占全国总排放量的 51.44%,其次为垃圾焚烧(23.82%),发电和供热(12.44%),矿物产品生产(9%),交通运输(2.08%).农作物秸秆田间燃烧和遗体火化排放量最小,这两个行业 PCDD/Fs 排放量占总排放量的 1.21%.

自 20 世纪 80 年代以来中国正经历着快速的工业化发展,尤其是金属制造工业.粗钢的产量从

2004 年的 2.52 亿 t^[37] 增长到 2016 年的 8.08 亿 t^[26], 其年均增长率为 11.2%。由于金属生产行业的快速发展, 从 2004 年到 2016 年, 我国大气 PCDD/Fs 的排放量增长了 1.2 倍。另外, 随着经济的增长和人民生活水平的提高, 我国每年生活垃圾的产生量十分庞大。据报道, 2016 年全国共有 214 个大、中城市生活垃圾产生量为 18 850.5 万 t, 工业危险废物产生量为 3 344.6 万 t, 医疗废物产生量为 72.1 万 t^[30]。由于垃圾焚烧有利于减少体积、彻底稳定、卫生和能源生产等优点, 在垃圾管理中发挥着越来越重要的作用, 因此地方政府多选择焚烧作为垃圾废物处理的主要方法^[38]。2016 年废物焚烧产生的 PCDD/Fs 向大气排放了 2 469 g, 相较于 2004 年增长了 3.1 倍。由于全国建筑业的高速发展, 其对矿产品行业的需求也快速增加, 例如, 2016 年水泥产量相较于 2004 年增加了 1.5 倍^[26,37]。因此, 从矿物加工过程

中排放的 PCDD/Fs 由 2004 年 413 g 增加到 2016 年的 933 g。基于汽车保有量的上升, 2016 年 PCDD/Fs 的交通运输排放比 2004 年增加了 84.6%。农作物秸秆田间燃烧排放的 PCDD/Fs 从 2004 年至 2016 年增加了 76.6%, 但 2004 年至 2016 年遗体火化排放的 PCDD/Fs 并没有发生显著变化。

图 2 为 2016 年不同省份不同排放源 PCDD/Fs 排放量, 可见, 西藏排放量最少, 其次是青海和海南。排放量最高的前 3 个省份是河北、江苏和山东, 其中河北排放最多, 约排放 1 372 g, 其金属生产的排放约占全省总排放量的 83% (图 3)。江苏约排放 1 180 g, 其中金属生产和垃圾焚烧排放的 PCDD/Fs 最多, 金属生产约占 57%, 垃圾焚烧约占 26%。山东约排放 990 g, 金属生产约占 56%。浙江、广东、上海和北京垃圾焚烧排放的最多, 分别占本地 PCDD/Fs 总排放量的 55%、47%、47% 和 84%。

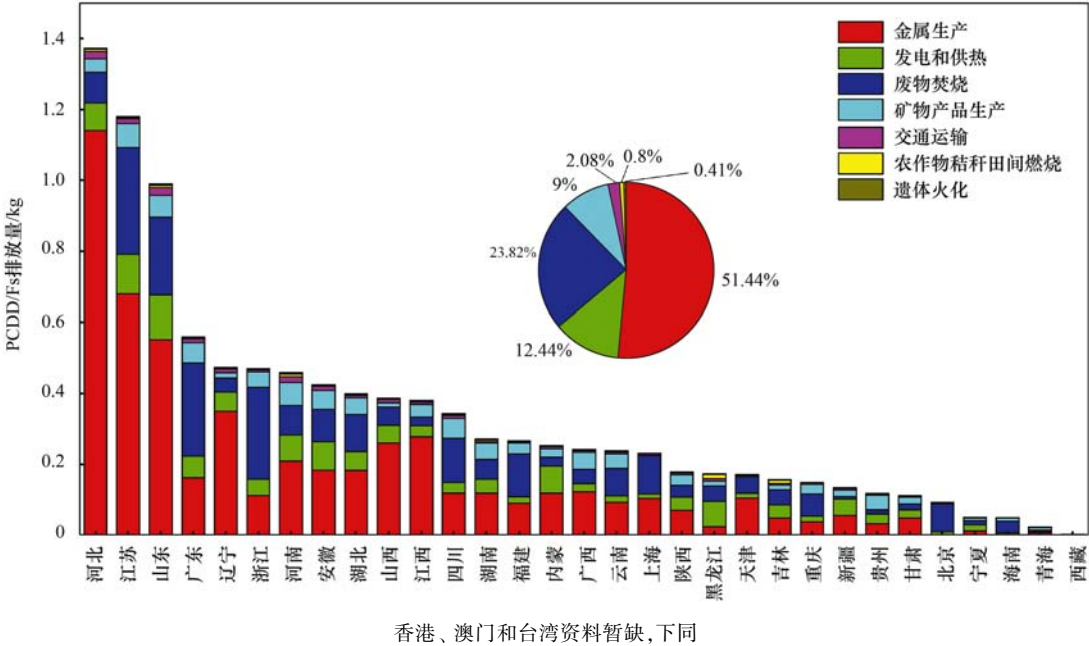


图 2 2016 年不同省份不同排放源 PCDD/Fs 排放量

Fig. 2 PCDD/Fs emissions from different sources in various provinces in 2016

2.1.2 不同行业不同省份 PCDD/Fs 排放空间分布

图 4 为 2016 年中国各省 PCDD/Fs 的排放。PCDD/Fs 排放最多的是河北省、江苏省和山东省, 其次是浙江省、广东省、河南省、辽宁省和江西省。金属生产排放的 PCDD/Fs 最多的是河北省、江苏省和山东省, 其次是辽宁省和江西省, 原因是产量较高的钢铁厂集中在河北省、辽宁省、江苏省和山东省, 而江西省再生铜产量较多。山东省和江苏省工业发达, 人口众多, 需要消耗大量的电力和热力, 故发电和供热排放的 PCDD/Fs 最多的是山东省和江苏省。不同省废物焚烧排放的 PCDD/Fs, 排放量最多

的是江苏省、广东省、浙江省和山东省, 主要是江苏省和山东省产生较多的工业危险废物, 而浙江省和广东省产生较多的医疗废物。矿物产品生产排放的 PCDD/Fs 主要集中在江苏省、山东省、广东省、河南省和四川省。交通运输排放的 PCDD/Fs 最多的是江苏省、山东省、河北省和河南省, 这些省份都是人口多, 工业发达的地区。而黑龙江省、吉林省、山东省和河南省是我国粮食主产区, 故农作物秸秆田间燃烧排放较多 PCDD/Fs。从图 4 可见, 遗体火化排放的 PCDD/Fs 最多的是山东省、河南省和四川省, 其次是广东省、江苏省、湖南省和河北省, 主要

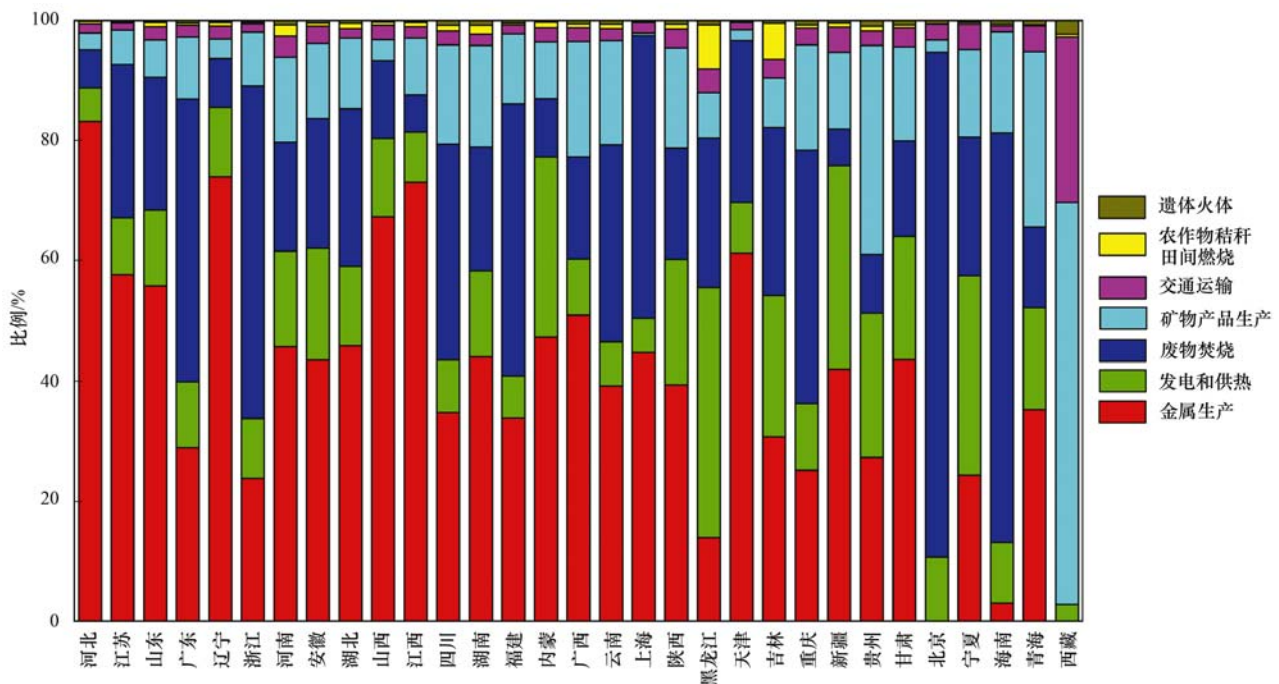


图3 不同省份 PCDD/Fs 各排放源的比例

Fig. 3 Percentage of PCDD/Fs emission from different emission sources in various provinces

是我国人口集中在广东省、河南省、山东省、四川省和江苏省。

2.2 PCDD/Fs 网格化排放

PCDD/Fs 的省级排放量只体现出该省的排放总量,而不能确定该省排放的空间差异。事实上,在一些地区 PCDD/Fs 排放量较大,而在有些地区如中国的西部排放量很少或几乎没有。这种省级排放清单可能造成点源评估的不确定性,并且不能输入大气污染模型,用来量化这种有毒污染物在我国的源-汇关系和大气传输行为。而这种缺陷可以采用更高空间分辨率的网格化排放清单进行改善。

本研究利用 ArcGIS 空间分析工具,以网格化人口密度、耕地覆盖率和第二产业 GDP 作为指代数据,通过空间插值建立了 2016 年我国重点排放行业大气网格化 PCDD/Fs 排放清单,结果见图 5。可以看出,我国 PCDD/Fs 的排放呈现出了一定的地域性,东部排放比西部的要高,京津冀、长三角和珠三角发达地区排放的 PCDD/Fs 要比全国其他地区排放的高,西南地区 PCDD/Fs 的排放主要集中在成都—重庆城市圈,东北地区 PCDD/Fs 的排放主要集中在辽东半岛,青藏高原地区的 PCDD/Fs 为全国最少。

金属生产排放的 PCDD/Fs 主要集中在河北省中部、山东半岛、江苏南部和辽宁省中部(图 5)。2008 年北京奥运会举办时,北京因建设国际化大都市,对环境保护不断提出更高的要求^[39]。中国十大钢铁企业之一的首钢集团将用 5 a 时间把钢铁产业

从北京搬迁到位于河北省唐山市的曹妃甸,因此河北有中国两大钢铁厂(首钢和河钢),2016 年河钢和首钢粗钢总产量之和达到 7 298 万 t^[28],因此河北的钢铁产量位居全国首位,造成了河北 PCDD/Fs 排放量的增加。辽宁鞍钢集团粗钢产量达到 3 319 万 t^[28],此外钢铁生产排放的 PCDD/Fs 约占辽宁排放量的 74%,这主要由于钢铁产量同样位于国内前列所致。江西的再生铜产量占全国首位^[27],因此再生铜生产产生的 PCDD/Fs 在江西不容忽视。电力与供热排放的 PCDD/Fs 主要集中在长三角,其次是京津冀、山东半岛和珠三角,京津冀、长三角和珠三角地区是中国经济发达地区,因此能源消耗相对较大。垃圾填埋是作为垃圾处理的一种方式,目前仍是城市垃圾处理的主要方法^[40]。此外,随着经济的发展,中国东部大城市的大型垃圾焚烧厂数量逐渐增加。1988 年,深圳从日本三菱公司进口的第一台城市垃圾焚烧炉,随后,北京、上海、广州等大城市相继建成了垃圾焚烧发电厂^[41],废物焚烧排放 PCDD/Fs 主要集中在长三角、京津冀和珠三角,其中长三角地区废物焚烧产生的 PCDD/Fs 最多,其次是重庆西南部和四川东部还有湖北南部区域。矿物产品生产排放 PCDD/Fs 主要集中在长三角和珠三角,此外,豫北和川中盆地由于采矿业的发展,也是 PCDD/Fs 排放较多区域(图 5)。交通运输排放的 PCDD/Fs 主要集中在京津冀、长三角和珠三角地区,这主要归因于相对较高的汽车保有量。农作物秸秆田间燃烧排放的 PCDD/Fs 主要

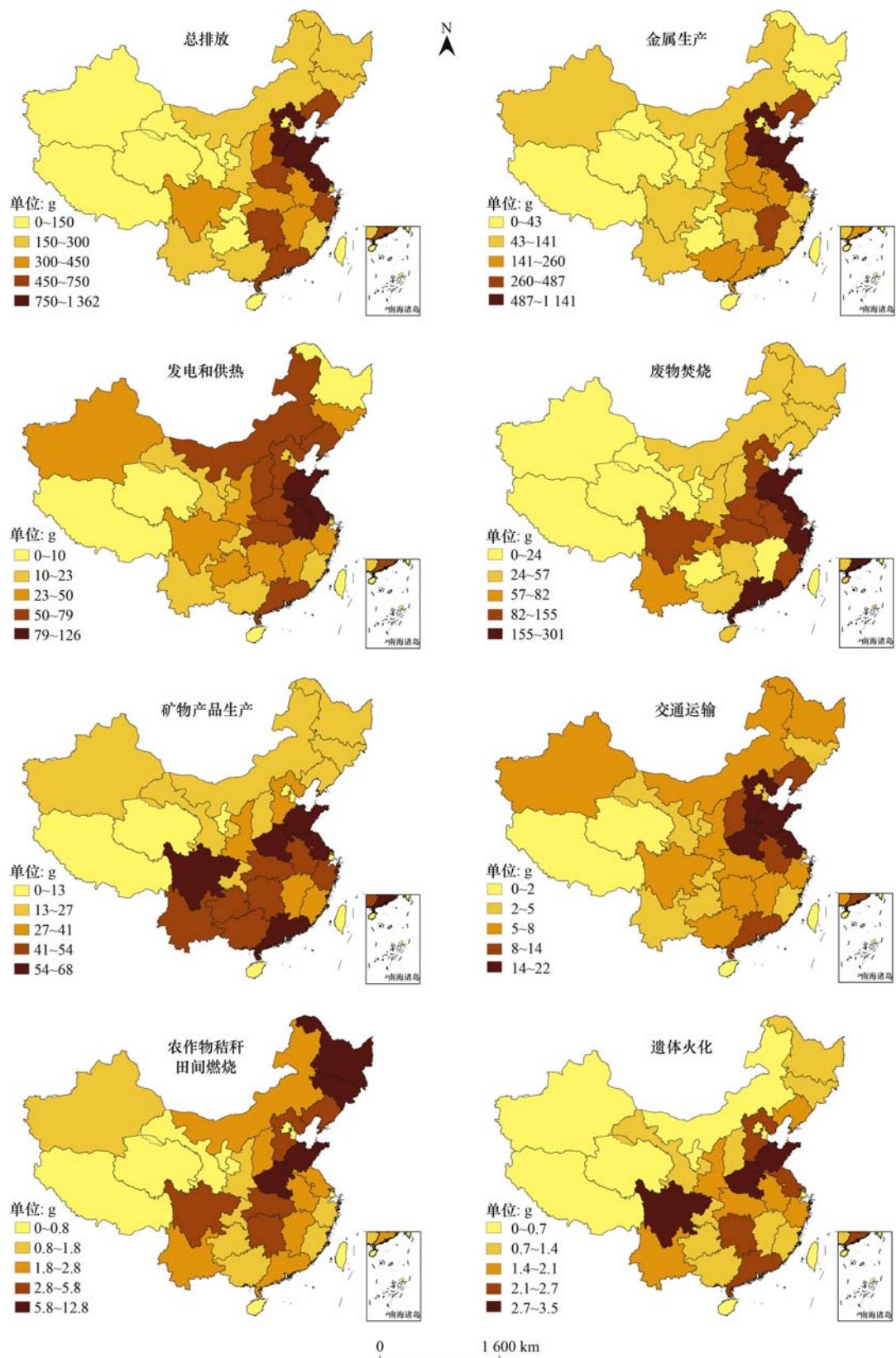


图4 2016年不同省份PCDD/Fs大气排放分布

Fig. 4 Spatial distribution of provincial atmospheric PCDD/Fs emission in 2016

是河南西北及南部地区、山东西部地区、辽宁东北部、吉林东部、黑龙江北部和河北东北部地区. 田间秸秆的燃烧残留物能明显提高土壤养分, 杀灭杂草, 并有利于作物生长^[42], 这增加了生物质

的燃烧, 因黑龙江省、河南省、山东省和吉林省是我国粮食的主产区, 故秸秆燃烧产生的 PCDD/Fs 比其他省较多. 遗体火化排放的 PCDD/Fs 主要集中在珠三角、长三角和京津冀, 这些地方经济发

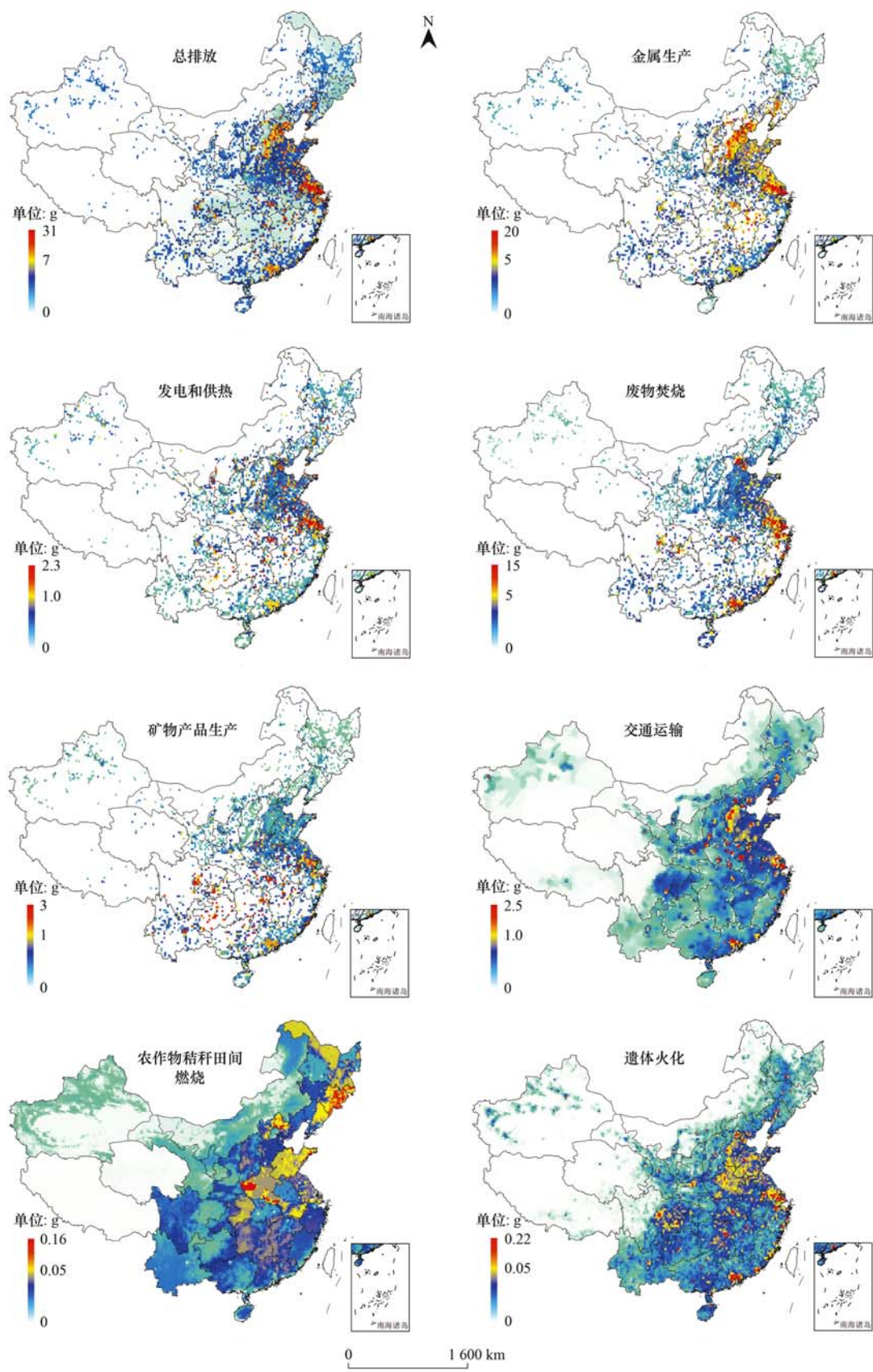


图 5 2016 年 PCDD/Fs 不同排放源网格化排放量

Fig. 5 Gridded PCDD/Fs emission from different sources in 2016

达,人口众多,此外,由于山东省、河南省和四川省是我国人口大省,山东半岛、河南东北部和四川东

部地区遗体火化排放的 PCDD/Fs 也较多. 总体而言,我国 PCDD/Fs 排放主要集中在人口密度大,经

济和工业化较发达的东部地区,而人口密度小,经济欠发达的西部排放较低。

2.3 不确定性分析

考虑到来自不同 PCDD/Fs 排放行业的经济活动数据和排放系数存在潜在误差,有必要对排放数据进行不确定性分析.本研究以已有 2004 年不同来源部门 PCDD/Fs 排放总量,以及 2004 年和 2016 年不同省份不同排放行业 PCDD/Fs 排放经济活动水平来估算 2016 年各省各行业 PCDD/Fs 排放量.用于计算 2004 年中国不同来源的 PCDD/Fs 排放总量的大多数排放因子是从联合国环境规划署(UNEP)推荐的 PCDD/Fs 排放标准工具包中获得的^[43].由于缺乏常规监测数据,不同 PCDD/Fs 释放行业的活动水平可能存在统计误差.所有这些元素都可能会造成 PCDD/Fs 排放清单的不确定性.替代数据仅用于将省级排放分配给网格单元,网格单元既不会改变省级和国家级的总排放量,也不会改变来自不同排放部门和类别的排放.因此,在排放清单的建立中的替代数据的不确定性本研究并不涉及.本研究使用蒙特卡罗模型^[8,44]对 PCDD/Fs 排放清单的不确定性进行评估.其变异系数参考 Huang 等^[25]建立的我国不同行业 2,3,7,8-TCDD 清单中的值,在 95% 的置信水平下,清单计算重复运行 10 000 次,给出各行业 PCDD/

Fs 排放量的不确定性信息.

图 6 为基于蒙特卡罗模型模拟的 2016 年我国大气 PCDD/Fs 总排放量的不确定性,可以看出,模拟的 PCDD/Fs 频数分布呈现正态分布,其平均值为 10 567.76 g,范围为 7 038.11 ~ 16 914.32 g,总体变化范围为 -33.4% ~ 60%.表 2 为基于蒙特卡罗模型模拟的各排放行业 PCDD/Fs 排放量的不确定性结果,可以看出,金属生产排放的 PCDD/Fs 不确定性变化范围为 -42.8% ~ 88.3%,发电和供热排放为 -36.3% ~ 70.0%,废物焚烧排放为 -38% ~ 66.5%,矿物产品生产排放为 -61.9% ~ 210.5%,交通运输排放的 PCDD/Fs 的不确定性变化范围为 -80.1% ~ 228.8%,农作物秸秆田间燃烧排放的 PCDD/Fs 的不确定性变化范围为 -89.4% ~ 814.4%,遗体火化排放的 PCDD/Fs 的不确定性变化范围为 -67.1% ~ 221.1%.农作物秸秆田间燃烧的不确定性最大,其范围为 -89.4% ~ 814.4%,变异系数为 25%,主要由秸秆露天燃烧量的水平不确定性导致的.废物焚烧的不确定性最小,其范围为 -38% ~ 66.5%,变异系数为 11%.另外,蒙特卡罗模型得到 PCDD/Fs 的中值与排放清单的计算结果较为接近,而平均值均高于排放清单的计算结果,这是由于数据不确定度传递导致的.

表 2 PCDD/Fs 排放不确定性分析

项目	PCDD/Fs 排放量/g				
	平均值	中值	95% 置信区间	不确定性/%	变异系数/%
金属生产	5 413.43	5 353.56	3 096.69 ~ 10 194.46	-42.8 ~ 88.3	12
发电和供热	1 318.61	1 306.04	840.09 ~ 2 241.97	-36.3 ~ 70.0	14
废物焚烧	2 497.94	2 478.35	1 546.81 ~ 4 159.59	-38.0 ~ 66.5	11
矿物产品生产	962.44	933.55	366.78 ~ 2 988.31	-61.9 ~ 210.5	17
交通运输	223.66	215.6	44.48 ~ 735.35	-80.1 ~ 228.8	18
农作物秸秆田间燃烧	90.40	83.6	9.6 ~ 826.63	-89.4 ~ 814.4	25
遗体火化	43.37	42.17	14.26 ~ 139.25	-67.1 ~ 221.1	16
总排放	10 567.76	10 499.32	7 038.11 ~ 16 914.32	-33.4 ~ 60.0	14

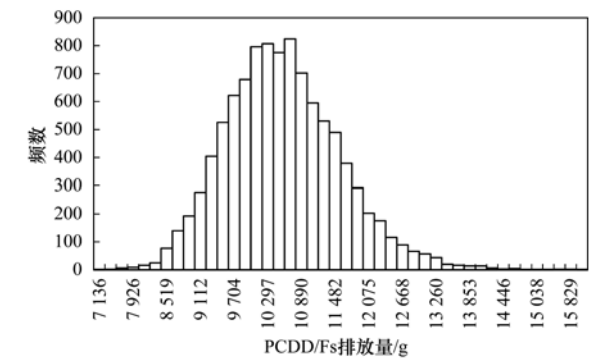


图 6 中国大气 PCDD/Fs 排放量的频数分布

Fig. 6 Frequency distribution of atmospheric PCDD/Fs emission in China

3 结论

(1) 2016 年我国大气 PCDD/Fs 排放量为 10 366 g,较 2004 年增加约 2 倍.从行业排放来看,金属生产排放的 PCDD/Fs 最多(5 333 g),其次是废物焚烧(2 469 g)及发电和供热(1 290 g).从排放的省份来看,河北省排放的 PCDD/Fs 最多(1 372 g),其次是江苏省(1 180 g)、山东省(990 g)、广东省(560 g)和辽宁省(474 g).

(2) 全国 PCDD/Fs 的排放主要集中在京津冀、长三角和珠三角地区.虽然北京-天津-河北、长江三角洲、珠江三角洲地区陆地面积仅占中国陆地总面

积的4%左右,但这3个地区2016年PCDD/Fs排放总量分别占中国总量的16%、22%和5.4%。

(3)我国PCDD/Fs总排放量的不确定性变化范围在-33.4%~60%,PCDD/Fs的中值与排放清单的计算结果较为接近,而平均值均高于排放清单的计算结果。

参考文献:

- [1] 李沐霏. 杭州市大气气溶胶PM_{2.5}中POPs污染特征及来源初探[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [2] 林海鹏, 于云江, 李琴, 等. 二英的毒性及其对人体健康影响的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(9): 93-97.
Lin H P, Yu Y J, Li Q, *et al.* Research progress on the dioxin's toxicity and its effect on human health [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(9): 93-97.
- [3] 刘劲松, 刘维屏, 巩宏平, 等. 城市生活垃圾焚烧炉周边环境空气及土壤中二英来源研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 1950-1956.
Liu J S, Liu W P, Gong H P, *et al.* Source identification for PCDD/Fs in ambient air and soil in the vicinity of a municipal solid waste incinerator [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(10): 1950-1956.
- [4] Zhang T T, Fiedler H, Yu G, *et al.* Emissions of unintentional persistent organic pollutants from open burning of municipal solid waste from developing countries [J]. Chemosphere, 2011, **84**(7): 994-1001.
- [5] 张晓岭, 卢益, 蹇川, 等. 西南地区新型干法水泥生产中的二英大气排放[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 35-40.
Zhang X L, Lu Y, Jian C, *et al.* Atmospheric Emission of PCDD/Fs from modern dry processing cement kilns with preheating in the Southwest Area, China [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 35-40.
- [6] 孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 等. 焦炉烟气中二英类物质排放水平研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2515-2519.
Sun P C, Li X L, Cheng G *et al.* Preliminary investigation on emission of PCDD/Fs and DL-PCBs through flue gas from coke plants in China [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2515-2519.
- [7] 邓芸芸, 彭平安, 任曼, 等. 广州市珠江隧道二噁英类化合物的含量与分布[J]. 环境化学, 2008, **27**(1): 110-113.
Deng Y Y, Peng P A, Ren M, *et al.* Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in Pearl River Tunnel, Guangzhou [J]. Environmental Chemistry, 2008, **27**(1): 110-113.
- [8] Cao H Y, Tao S, Xu F L, *et al.* Multimedia fate model for hexachlorocyclohexane in Tianjin, China [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(7): 2126-2132.
- [9] Morales L, Dachs J, González-Gaya B, *et al.* Background concentrations of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans, and biphenyls in the global oceanic atmosphere [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(17): 10198-10207.
- [10] Wania F, Mackay D. Global chemical fate of α -hexachlorocyclohexane. 2. Use of a global distribution model for mass balancing, source apportionment, and trend prediction[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(7): 1400-1407.
- [11] Shen H T, Ding G Q, Wu Y N, *et al.* Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/furans (PCDD/Fs), polychlorinated biphenyls (PCBs), and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in breast milk from Zhejiang, China [J]. Environment International, 2012, **42**: 84-90.
- [12] Macdonald R W, Barrie L A, Bidleman T F, *et al.* Contaminants in the Canadian Arctic: 5 years of progress in understanding sources, occurrence and pathways [J]. Science of the Total Environment, 2000, **254**(2-3): 93-234.
- [13] Van Jaarsveld J A, Van Pul W A J, De Leeuw F A A M. Modelling transport and deposition of persistent organic pollutants in the European region[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(7): 1011-1024.
- [14] Armitage J M, MacLeod M, Cousins I T. Modeling the global fate and transport of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanoate (PFO) emitted from direct sources using a multispecies mass balance model[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(4): 1134-1140.
- [15] Wania F, Mackay D, Li Y F, *et al.* Global chemical fate of α -hexachlorocyclohexane. 1. Evaluation of a global distribution model[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(7): 1390-1399.
- [16] EEA (European Environment Agency). European Union emission inventory report 1990-2010 under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution (LRTAP) [R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2012.
- [17] Cohen M D, Draxler R R, Artz R, *et al.* Modeling the atmospheric transport and deposition of PCDD/F to the Great Lakes [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(22): 4831-4845.
- [18] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5344-5358.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [19] 段文娇, 郎建奎, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on PM_{2.5} [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- [20] 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 等. 广东省秸秆燃烧大气污染物及VOCs物种排放清单[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 3995-4001.
Sun X B, Liao C H, Zeng W T, *et al.* Emission inventory of atmospheric pollutants and VOC species from crop residue burning in Guangdong province [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 3995-4001.
- [21] 郑明辉, 孙阳昭, 刘文彬. 中国二噁英类持久性有机污染物排放清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [22] Wu X C, Zhao L J, Zhang Y X, *et al.* Primary air pollutant emissions and future prediction of iron and steel industry in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(4): 1422-1432.
- [23] Wang K, Tian H Z, Hua S B, *et al.* A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: Temporal trends and spatial variation characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2016, **559**: 7-14.
- [24] Gao C K, Gao W G, Song K H, *et al.* Spatial and temporal dynamics of air-pollutant emission inventory of steel industry in China: A bottom-up approach[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, **143**: 184-200.
- [25] Huang T, Tian C G, Zhang K, *et al.* Gridded atmospheric

- emission inventory of 2, 3, 7, 8-TCDD in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **108**: 41-48.
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 2017 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [27] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 中国有色金属协会, 2017.
- [28] 《中国钢铁工业年鉴》编辑委员会. 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京: 《中国钢铁工业年鉴》编辑部, 2017.
- [29] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [30] 中华人民共和国环境保护部. 2017 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [31] 中国建筑材料工业年鉴编辑部. 中国建筑材料工业年鉴 2017 版[M]. 北京: 中国建筑材料工业年鉴编辑部, 2017.
- [32] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [33] 李延庆. 中国农村家庭能源消费结构研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [34] Doll C N H, Muller J P, Elvidge C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. *Ambio*, 2000, **29**(3): 157-162.
- [35] 柴子为, 王帅磊, 乔纪纲. 基于夜间灯光数据的珠三角地区镇级 GDP 估算[J]. *热带地理*, 2015, **35**(3): 379-385.
- Chai Z W, Wang S L, Qiao J G. Township GDP estimation of the Pearl River delta based on the NPP-VIIRS night-time satellite data[J]. *Tropical Geography*, 2015, **35**(3): 379-385.
- [36] 韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 夜间灯光遥感数据的 GDP 空间化处理方法[J]. *地球信息科学学报*, 2012, **14**(1): 128-136.
- Han X D, Zhou Y, Wang S X, *et al.* GDP spatialization in China based on nighttime imagery [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, **14**(1): 128-136.
- [37] 中华人民共和国国家统计局. 2005 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [38] Zhang H, He P J, Shao L M, *et al.* Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration in Shanghai[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **156**(1-3): 365-373.
- [39] Li Y M, Wang T, Wang P, *et al.* Reduction of atmospheric polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) during the 2008 Beijing olympic games [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(8): 3304-3309.
- [40] 卜永广, 范荣桂, 禄润卿, 等. 我国城市生活垃圾处理与处置现状分析[J]. *环境与可持续发展*, 2017, **42**(5): 95-98.
- Bu Y G, Fan R G, Lu R Q, *et al.* Analysis on the current status of the domestic garbage treatment and disposal in China[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, **42**(5): 95-98.
- [41] Yan J H, Chen T, Li X D, *et al.* Evaluation of PCDD/Fs emission from fluidized bed incinerators co-firing MSW with coal in China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **135**(1-3): 47-51.
- [42] 王爱玲, 高旺盛, 洪春梅. 华北灌溉区秸秆焚烧与直接还田生态效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, **11**(1): 142-144.
- Wang A L, Gao W S, Hong C M. Study on the ecological effect of crop residues burned or incorporated in field in north central irrigated area of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, **11**(1): 142-144.
- [43] UNEP Chemicals. Standardized toolkit for identification and quantification of dioxin and furan releases [R]. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals, 2005.
- [44] Xu Y, Tian C G, Ma J M, *et al.* Assessing cancer risk in China from γ -hexachlorocyclohexane emitted from Chinese and Indian sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(13): 7242-7249.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)