

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 李明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

天津市非道路移动源污染物排放清单开发

张意^{1,2}, Andre Michel³, 李东⁴, 张欣⁵, 吴琳^{1,2}, 张衍杰^{1,2}, 马超^{1,2}, 邹超^{1,2}, 毛洪钧^{1,2*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 南开大学城市交通污染防治研究中心, 天津 300071; 3. 法国国家交通研究院, 法国里昂 690675; 4. 天津市机动车排污检控中心, 天津 300191; 5. 新港海事局, 天津 300456)

摘要: 基于天津市非道路移动源污染管控需求, 根据调研收集到的 2015 年非道路移动源活动水平数据, 采用环保部《非道路移动污染源排放清单编制技术指南(试行)》推荐的核算方法, 建立较为完整的天津市非道路移动源排放清单, 分析污染物的时空分布。2015 年, 天津市非道路移动源排放 CO 6.15×10^3 t、HC 2.45×10^3 t、NO_x 2.90×10^4 t、PM 1.45×10^3 t、SO₂ 1.37×10^4 t。船舶污染物排放占比最高, 为所有非道路移动源污染物排放总量的 73.66%, 主要分布于天津港区; 其次是非道路移动机械, 占 21.66%, 主要分布于市郊种植业和养殖业区县、城市建设和人群活动较为密集的城区; 民航飞机和铁路机车占比较小, 分别为 3.55% 和 1.13%, 主要分布于机场和铁路沿线。总体上, 非道路移动源从 3 月开始排放量逐渐升高, 而年底和年初(冬季)排放量相对较低。

关键词: 非道路移动源; 活动水平; 排放清单; 时空分布; 不确定性分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4447-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704268

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin

ZHANG Yi^{1,2}, Andre Michel³, LI Dong⁴, ZHANG Xin⁵, WU Lin^{1,2}, ZHANG Yan-jie^{1,2}, MA Chao^{1,2}, ZOU Chao^{1,2}, MAO Hong-jun^{1,2*}

(1. College of Environmental Science & Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Centre for Urban Transport Emission Research, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. French Institute of Science and Technology for Transport, Spatial Planning, Development and Networks (IFSTTAR), Lyon 690675, France; 4. Tianjin Vehicle Emission Control Center, Tianjin 300191, China; 5. Xingang Maritime Safety Administration, Tianjin 300456, China)

Abstract: Based on the collected data of activity level in 2015, a non-road mobile source emissions inventory for Tianjin was developed following the recommended method from the Compilation Guide for a Vehicle Emissions Inventory (trial edition) released by the Ministry of Environmental Protection. In 2015, the emissions of CO, hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x), particulate matter (PM) and SO₂ from non-road mobile sources in Tianjin were 6.15×10^3 t, 2.45×10^3 t, 2.90×10^4 t, 1.45×10^3 t, and 1.37×10^4 t, respectively. Marine sources were identified as the largest non-road mobile source contributor accounting for 73.66% of total emissions, followed by non-road mobile machinery (21.66%). Emissions from civil aircraft and locomotives were relatively lower. Generally, emissions from non-road mobile sources increase from March (spring) to November and decrease from the beginning and the end of the year (winter). Emissions are mainly distributed in suburban districts where there is flourishing agriculture, downtown areas with dense populations, urban construction areas, ports, railway lines, and airports. Uncertainty in the inventory results is mainly due to the lack of key data, such as local emission factors and actual activity levels.

Key words: non-road mobile source; activity level; emission inventory; spatiotemporal distribution; uncertainty analysis

移动源是指由发动机牵引、能够移动的各种客运、货运交通设施和机械设备, 分为道路移动源(机动车)和非道路移动源(分为非道路移动机械、船舶、铁路机车、飞机)^[1]。其中, 非道路移动源通常以柴油和重油为主要燃料, 排放标准远低于道路机动车, 整体仅相当于国 I、国 II 标准, 普遍具有技术水平低、使用年限长、维护保养差、燃油消耗高和污染物单机排放量大等特点^[2,3], 其尾气中 NO_x、SO₂ 和 PM 的排放量较高, 严重影响空气质量和人体健康^[4,5]。

长期以来, 我国移动源污染控制主要着眼于机动车^[6,7]。随着淘汰黄标车、提高新车排放标准和

油品质量、发展公共交通等措施的实施, 机动车污染控制成效显著^[8,9]。但由于基础研究薄弱、标准制定滞后、涉及部门众多等原因, 非道路移动源的污染管控则相对落后^[2]。这两个因素直接导致原本居于次要位置且较少受到关注的非道路移动源污染物排放占比不断升高, 减排地位也日益凸现^[10,11]。

排放清单是环境空气质量管理的基础和依据,

收稿日期: 2017-04-26; 修订日期: 2017-06-02

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B02); 科技部科技基础性工作专项(2013FY112700-02)

作者简介: 张意(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为移动源排放清单、机动车排放模型, E-mail: zy403657583@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: hongjun_mao@hotmail.com

而国内非道路移动源清单研究尚处于起步阶段^[12,13]. 张礼俊等^[14]建立了珠三角地区非道路移动源清单,发现非道路移动源已成为该地区第三大 NO_x 和 SO_2 排放贡献源. 隗潇^[15]建立了京津冀地区非道路移动源排放清单,发现非道路移动源排放主要集中在该地区东南部. 鲁君等^[16]对长三角地区典型城市上海和杭州的非道路移动机械排放清单进行了研究,发现非道路移动机械 NO_x 排放分别占两城市所有污染源的 11.1% 和 16.1%. 作为环渤海经济圈核心、北方国际航运和物流中心,加之承接首都客运和产业转移以及大规模城市建设开发,近年来,天津市非道路移动源的活动愈发频繁,污染物排放增长迅速.

本研究基于天津市非道路移动源污染管控需求,根据调研收集到的 2015 年非道路移动源活动水平数据,采用环保部《非道路移动污染源排放清单编制技术指南(试行)》(《指南》)推荐的核算方法^[17],初步建立较为完整的天津市非道路移动源排放清单,分析污染物的时空分布,重点解决污染物“底数不清”的现状,以期对相关大气环境科学研究和空气质量改善决策提供参考和支撑.

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究核算 2015 年天津市非道路移动源排放清单,包括非道路移动机械(主要为工程机械和农业机械)、船舶(包括天津近海和远洋船舶、渔船和海河上的内河船舶)、铁路机车(指以内燃机为动力装置的火车)、民航飞机(主要为天津滨海国际机场的进出港航班). 污染物种类为 CO 、 HC 、 NO_x 、 PM

和 SO_2 .

1.2 核算方法

基于《指南》方法建立相关数学计算模型,核算各类非道路移动源排放清单.

非道路移动机械、船舶、铁路机车大气污染物排放量计算如公式(1)所示:

$$E_1 = (Y \times EF_1) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, E_1 为非道路移动机械、船舶、铁路机车的 CO 、 HC 、 NO_x 和 PM 的排放量, t; Y 为燃油消耗量, kg; EF_1 为排放系数(以燃料计), $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

民航飞机大气污染物排放量计算如公式(2)所示:

$$E_2 = (C_{\text{LTO}} \times EF_2) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, E_2 为民航飞机的 CO 、 HC 、 NO_x 和 PM 的排放量, t; C_{LTO} 为民航飞机起飞着陆循环次数, 次; EF_2 为排放系数(以 LTO 循环计), $\text{kg} \cdot \text{次}^{-1}$. LTO (land and taking-off) 起飞着陆循环是指飞机从高空降落至机场, 又重新起飞至高空的一个封闭过程. 理想的 LTO 循环包括起飞、爬升、着陆、滑行这 4 个工况.

SO_2 排放量根据燃油中的硫含量来计算, 如公式(3)所示:

$$E_{\text{SO}_2} = (2 \times Y \times S) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, E_{SO_2} 为非道路移动源 SO_2 的排放量, t; Y 为燃油消耗量, kg; S 为燃油硫含量(以燃料计), $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.3 排放因子

非道路移动源排放因子采用《指南》推荐的平均排放系数(表 1), 其来源主要包括实测、物料核算和文献调研.

表 1 非道路移动源排放因子及数据来源

Table 1 Emission factors of non-road mobile sources and their data sources

源类别	子类别/燃料	CO	HC	NO_x	PM
非道路移动机械(以燃料计)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	工程机械/柴油	10.72	3.39	32.79	2.09
	农业机械/柴油	10.94	3.37	35.04	1.74
船舶(以燃料计)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	柴油	23.80	6.19	47.60	3.81
	燃料油	7.40	2.70	79.30	6.20
铁路机车(以燃料计)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	柴油	8.29	3.11	55.73	2.07
民航飞机(以 LTO 循环计)/ $\text{kg} \cdot \text{次}^{-1}$	航空燃油	9.14	2.68	16.29	0.54

1.4 活动水平

非道路移动源活动水平数据主要来自相关统计年鉴、实际走访调查、文献调研等(表 2). 根据调研、统计和核算结果, 2015 年天津市非道路移动机械、船舶、铁路机车、民航飞机燃料消

耗量分别为 2.35×10^5 、 1.92×10^7 、 8.97×10^3 、 1.01×10^5 t. 此外, 2015 年天津船舶进出港 3.99×10^5 艘次, 铁路机车保有量客运占 60.12%、货运占 35.23%、调车占 4.65%, 民航飞机起降 1.26×10^5 架次.

表 2 非道路移动源活动水平数据类型及获取方法

Table 2 Data types for activity level of non-road mobile sources and their collection methods

源类别	数据类型	获取方法
非道路移动机械	保有量及技术水平、运行时间、活动区域、燃油消耗量	中国统计年鉴、中国工程机械工业年鉴、中国内燃机工业年鉴、中国农业机械工业年鉴、天津市统计年鉴、实际走访调查、文献调研等
船舶	保有量及技术水平、吞吐量、进出港时间、活动区域、燃油消耗量	中国交通年鉴、公路水陆交通运输行业发展统计公报、实际走访调查、文献调研等
铁路机车	保有量及技术水平、运行时间、活动区域、燃油消耗量	中国统计年鉴、中国交通年鉴、天津市统计年鉴、实际走访调查、文献调研等
民航飞机	起降架次、进出港时间、机型、燃油消耗量	民航机场生产统计公报、实际走访调查、公开的航班信息、文献调研等
	各类源燃料硫含量	实际走访调查、文献调研等

2 结果与讨论

2.1 排放清单结果

2.1.1 排放量

天津市 2015 年非道路移动源污染物排放量如表 3 所示。2015 年,天津市非道路移动源排放 CO 6.15×10^3 t、HC 2.45×10^3 t、NO_x 2.90×10^4 t、PM

1.45×10^3 t、SO₂ 1.37×10^4 t。

2.1.2 排放占比

各类非道路移动源的污染物排放占比如图 1 所示。船舶污染物排放占比最高,为所有非道路移动源污染物排放总量的 73.66%;其次是非道路移动机械,占 21.66%;民航飞机和铁路机车占比较小,分别为 3.55% 和 1.13%。

表 3 天津市 2015 年非道路移动源污染物排放量/t

Table 3 Total non-road mobile source emission from Tianjin in 2015/t

项目	CO	HC	NO _x	PM	SO ₂	总计
非道路移动机械	2 530.08	733.37	7 549.69	443.38	164.65	11 421.17
船舶	2 985.76	1 520.62	19 931.45	949.85	13 448.57	38 836.25
铁路机车	55.18	27.76	484.61	21.59	6.28	595.42
民航飞机	574.42	168.43	1 023.77	33.94	70.71	1 871.27
总计	6 145.43	2 450.18	28 989.51	1 448.77	13 690.22	52 724.11

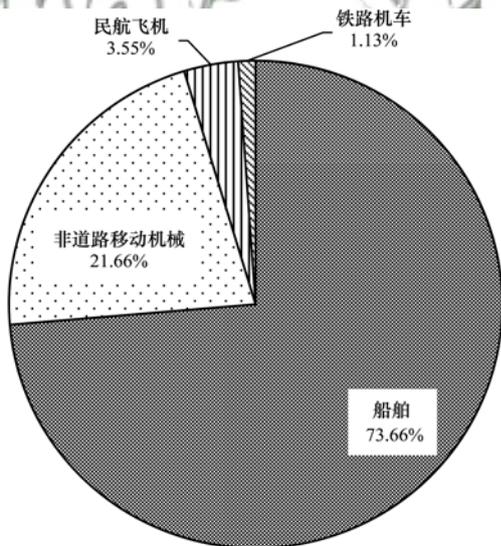


图 1 各类非道路移动源污染物排放占比

Fig. 1 Emission proportion of different non-road mobile sources

各类非道路移动源不同污染物的排放分担率如图 2 所示。船舶为非道路移动源排放 CO、HC、NO_x、PM 和 SO₂ 的最大贡献源,分别占该类污染物

的 48.59%、62.06%、68.75%、65.56% 和 98.23%;其次为非道路移动机械,分别占非道路移动源 CO、HC、NO_x、PM 和 SO₂ 总排放量的 41.17%、29.93%、26.04%、30.60%、1.20%。

对污染物排放占比较大的船舶和非道路移动机

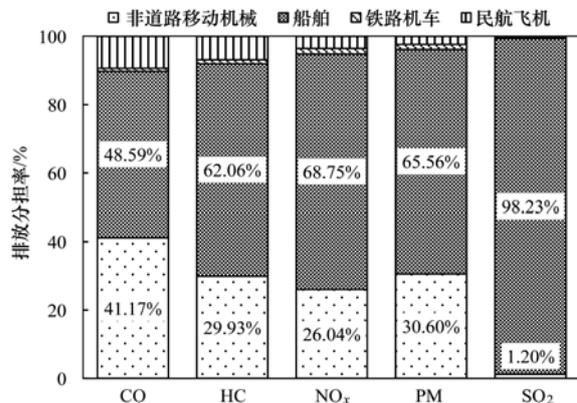


图 2 各类非道路移动源不同污染物的排放分担率

Fig. 2 Contribution of different non-road mobile sources to different pollutants

械进一步细分(图3、图4)可以发现,近海和远洋船舶占各类船舶污染物排放的90.33%,这主要是因为天津港口航运发达,天津港是世界等级最高、中国最大的人工深水港,也是吞吐量世界第四的综合性港口^[18],船舶在港区的频繁活动造成了大量的污染物排放;内河船舶、渔船保有量较低且载重量小,因此排放占比也较小,仅为9.67%。农业机械则占各类非道路移动机械污染物排放的62.57%,主要为拖拉机(31.40%)和农用运输车(20.78%);工程机械占各类非道路移动机械污染物排放37.43%,主要为挖掘机(14.23%)和压路机(8.82%)。

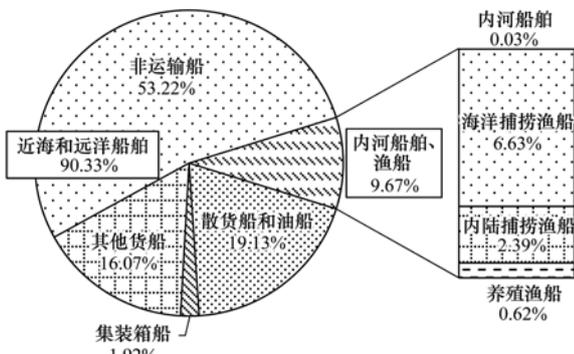


图3 各类船舶污染物排放占比

Fig. 3 Emission proportion of different marine sources

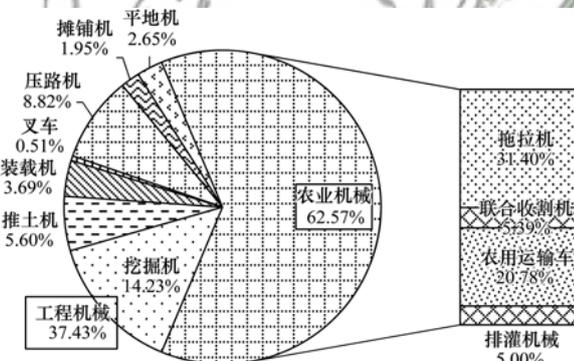


图4 各类非道路移动机械污染物排放占比

Fig. 4 Emission proportion of different non-road mobile machinery sources

2.2 排放清单时空分布

基于各类非道路移动源的实际活动水平(保有量及技术水平、运行时间、活动区域、燃油消耗量、运行时间、进出港时间、吞吐量、起降架次等),得到其排放清单的时空分布。

2.2.1 时间分布

各类非道路移动源的污染物排放的月变化趋势如图5所示。总体上,非道路移动源从3月(春季)开始排放量逐渐升高,而年底和年初(冬季)排放量

相对较低。其中,非道路移动机械的污染物排放量受季节影响明显,3~11月相对较高,1、2、12月相对较低,这主要是由于工地施工和农业生产主要集中在春、夏、秋三季,而冬季相关生产活动较少,因此工程机械和农业机械的污染物排放也表现出相应的趋势。船舶的污染物排放量也是从3月开始升高,年底逐渐减少,与港口吞吐量变化趋势基本一致;其中,6~9月为渤海禁渔期,渔船进入渔港停靠,活动水平较低,在此期间船舶污染物排放总量会出现一定的下降。由于铁路机车和民航飞机的客运和货运班次安排相对固定且波动不大,因此二者污染物排放量月变化较小。

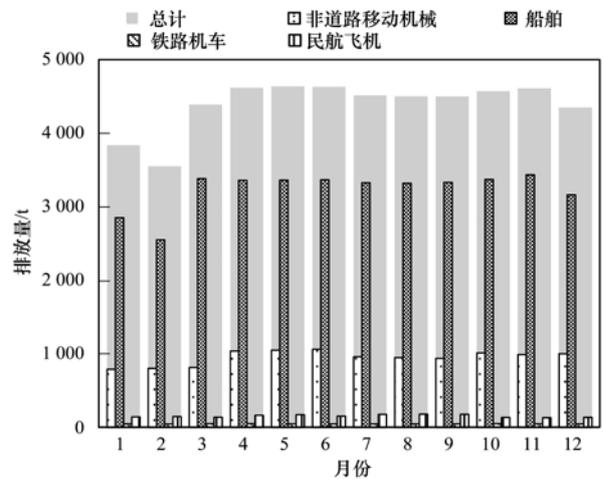


图5 各类非道路移动源污染物排放月变化趋势

Fig. 5 Monthly emission trends for different non-road mobile sources

此外,考虑到中国民航的航班时刻特征通常以一个自然周为周期^[19],本研究在2015年每月选取一个自然周统计天津滨海国际机场的航班起降信息(7×24 h),从而获得基于LTO的民航飞机污染物排放量的日变化和小时变化趋势(图6)。从日变化

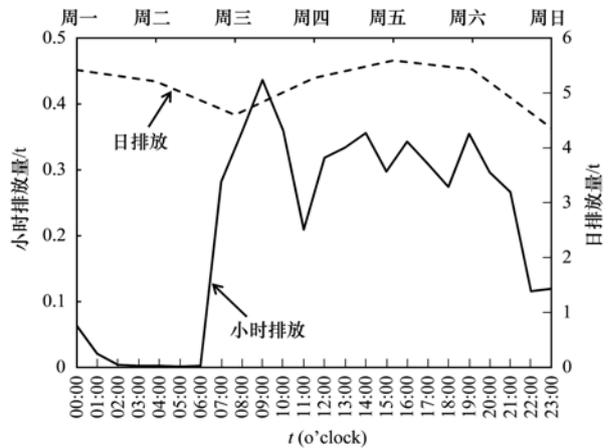


图6 民航飞机污染物排放日变化和小时变化趋势

Fig. 6 Daily and hourly emission trends for civil aircraft

趋势来看,每周五航班起降出现最高峰,因此污染物的排放量也达到最大值,其次为周一、周六,而每周三、周日的排放量相对较少。从小时变化趋势来看,绝大部分的污染物排放发生在白天时段;09:00~20:00,会出现污染物排放的几个连续峰值;21:00以后,污染物排放量急剧减少;每日02:00~07:00,由于基本没有航班起降,因此排放量也趋于零。

2.2.2 空间分布

根据各类非道路移动源的活动特点,结合工地、耕地、港口、铁路和机场的分布,采用GIS技术生成

非道路移动源网格化排放清单(图7)。其中,非道路移动机械[图7(a)]中农业机械的排放主要分布于武清、宝坻、蓟州、宁河、静海等市郊种植业和养殖业区县;工程机械的排放主要分布于城市建设和人群活动较为集中的中心城区、滨海新区和津南区。船舶[图7(b)]污染物排放主要集中在位于滨海新区的天津港港区和航道,内河(海河)分布较少。铁路机车[图7(c)]污染物排放主要分布在客运和货运铁路沿线。飞机[图7(b)]污染物排放集中在位于东丽区的天津滨海国际机场的飞机跑道及其周边区域的近地面和低空。

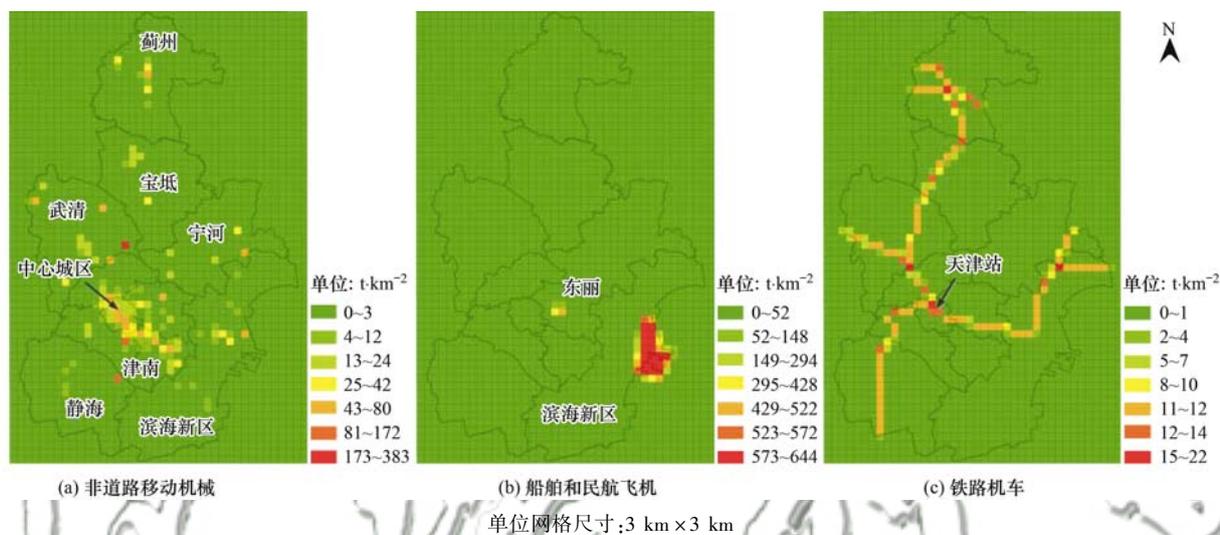


图7 天津市非道路移动源的空间分布(以 NO_x 为例)

Fig. 7 Spatial distributions of non-road mobile source emissions for Tianjin

2.3 不确定性分析

本研究的不确定性主要来源于本地排放因子和实际活动水平等关键数据的缺乏。

对于非道路移动机械,目前我国尚未建立相关登记备案制度,且涉及部门众多甚至有些机械类型无管理部门,统计口径也存在差异^[20],因此样本的代表性存在一定不确定性。对于船舶,实际巡航、靠岸和停泊过程中不同工况对排放的影响存在较大差异^[21,22],因此采用基于客货周转量和部门调研数据得到的燃油消耗量来计算排放量时,也存在一定不确定性。对于飞机,不同机型、发动机、工作模式的排放水平各异^[23,24],《指南》方法是建立在标准LTO循环基础上对实际情况的一种理想平均,所以存在一定误差。对于铁路机车,由于实际运行时间、负载等因素与排放的关系获取较为困难^[25],暂未考虑在清单计算中,因此与实际情况也存在一定出入。

此外,现阶段非道路移动源排放因子数据十分匮乏,而《指南》推荐的排放因子主要采用欧盟

EMEP/CORINAIR数据、国内外研究成果、部分实测结果和国际民航组织通用数据,难以完全真实反映非道路移动源在本地实际工况和运行状态下的排放水平。而 SO_2 排放量的核算则是利用基于燃油消耗的物料平衡法,其不确定性除了来自参考统计年鉴和部门调查结果估算的油耗量外,更来自于对燃油含硫量的平均假设。

3 结论

(1)根据调研收集到的2015年天津市非道路移动源活动水平数据,采用环保部《指南》推荐的方法,建立较为完整的天津市非道路移动源排放清单,分析污染物的时空分布,可为相关研究和管理决策提供参考和支撑。

(2)2015年,天津市非道路移动源排放 CO 6.15×10^3 t、 HC 2.45×10^3 t、 NO_x 2.90×10^4 t、 PM 1.45×10^3 t、 SO_2 1.37×10^4 t。船舶污染物排放占比最高,为所有非道路移动源污染物排放总量的

73.66%；其次是非道路移动机械，占 21.66%；民航飞机和铁路机车占比较小，分别为 3.55% 和 1.13%。

(3) 各类非道路移动源的污染物排放量从 3 月(春季)开始逐渐升高，而年底和年初(冬季)排放量相对较低。

(4) 非道路移动机械中农业机械的排放主要分布于武清、宝坻、蓟州、宁河、静海等市郊种植业和养殖业区县；工程机械的排放主要分布于城市建设和人群活动较为集中的中心城区、滨海新区和津南区。船舶污染物排放主要集中在位于滨海新区的天津港港区和航道，内河(海河)分布较少。铁路机车污染物排放主要分布在客运和货运铁路沿线。飞机污染物排放集中在位于东丽区的天津滨海国际机场的飞机跑道及其周边区域的近地面和低空。

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 环境空气颗粒物来源解析监测方法指南(试行) [EB/OL]. (第二版). http://www.cnemc.cn/publish/112/news/news_40443.html, 2014-03-11.
- [2] 鲍晓峰, 刘泽民, 朱仁成. 移动源污染减排现状及控制对策[J]. 环境保护, 2015, 43(21): 25-27.
Bao X F, Liu Z M, Zhu R C. Current situation and countermeasures of mobile emission reduction in China [J]. Environmental Protection, 2015, 43(21): 25-27.
- [3] Kean A J, Sawyer R F, Harley R A. A fuel-based assessment of off-road diesel engine emissions[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50(11): 1929-1939.
- [4] 殷小鹤. 非道路移动源燃油品质改善对污染排放影响的成本效益分析[D]. 天津: 南开大学, 2010.
Yin X G. Cost-benefit analysis on the influence of non-road mobile machinery fuel quality to emission[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [5] 陈国磊, 周颖, 程水源, 等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4069-4079.
Chen G L, Zhou Y, Cheng S Y, et al. Air pollutant emission inventory and impact of typical industries on PM_{2.5} in Chengde [J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4069-4079.
- [6] 鲍晓峰. 强化机动车污染防治促进大气灰霾治理[J]. 环境保护, 2014, 42(24): 19-22.
Bao X F. Enhancing vehicle emission control and promoting haze pollution mitigation [J]. Environmental Protection, 2014, 42(24): 19-22.
- [7] 袁盈. 让非道路移动源污染不再“无控”[N]. 科技日报, 2007-12-27(008).
- [8] 张意, 吴琳, 毛洪钧, 等. 天津市机动车污染物排放清单及控制对策研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2017, 50(1): 90-96.
Zhang Y, Wu L, Mao H J, et al. Research on vehicle emission inventory and its management strategies in Tianjin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2017, 50(1): 90-96.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 2016 年中国机动车环境管理年报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016.
- [10] 马冬, 尹航, 黄志辉, 等. 我国非道路移动源排放管理现状及展望[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 36-40.
Ma D, Yin H, Huang Z H, et al. The outlook and status of non-road mobile source emission management in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 36-40.
- [11] 肖翠翠, 杨姝影. 美国移动源污染排放管理及对我国的启示[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(1): 33-38.
Xiao C C, Yang S Y. The vehicle emission management experiment of the United States and its implication to China [J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(1): 33-38.
- [12] 熊跃辉. 实施《清洁空气研究计划》推动大气污染物排放清单支撑体系建设[J]. 环境保护, 2015, 43(8): 12-15.
Xiong Y H. Implementing “Clean Air Research Program (CARP)” to promote the construction of national air pollutants emission inventory supporting system [J]. Environmental Protection, 2015, 43(8): 12-15.
- [13] 谢铁嵩, 郑新梅. 南京市非道路移动源大气污染物排放清单及特征[J]. 污染防治技术, 2016, 29(4): 47-51.
Xie Y S, Zheng X M. Atmospheric pollutant emission inventory from non-road mobile sources in Nanjing and its characteristics [J]. Pollution Control Technology, 2016, 29(4): 47-51.
- [14] 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 886-891.
Zhang L J, Zheng J Y, Yin S S, et al. Development of non-road mobile source emission inventory for the Pearl River Delta Region [J]. Environmental Science, 2010, 31(4): 886-891.
- [15] 隗潇. 京津冀非道路移动源排放清单的建立[A]. 见: 中国环境科学学会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 昆明: 中国环境科学学会, 2013: 1631-1637.
- [16] 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 等. 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2738-2746.
Lu J, Huang C, Hu Q Y, et al. Air pollutant emission inventory of non-road machineries in typical cities in eastern China [J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2738-2746.
- [17] 环境保护部. 关于发布《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 5 项技术指南的公告[EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm? keywords = % E5% A4% A7% E6% B0% 94% E6% B1% A1% E6% 9F% 93% E7% 89% A9% E6% 8E% 92% E6% 94% BE% E6% B8% 85% E5% 8D% 95% E7% BC% 96% E5% 88% B6% E6% 8A% 80% E6% 9C% AF% E6% 8C% 87% E5% 8D% 97, 2014-12-31.
- [18] 方正. 天津港: 全球货物吞吐量第四大港[N]. 人民日报, 2016-05-19(013).
- [19] 夏卿. 飞机发动机排放对机场大气环境影响评估研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Xia Q. Research on the atmospheric environment impact assessment from aircraft engine emissions in airport [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [20] 陈洁, 张静. 南京市典型施工工地非道路移动机械活动水平及排放清单研究[J]. 环境科技, 2016, 29(6): 22-25.

- Chen J, Zhang J. The non-road mobile machinery activity and emission inventory of typical construction site in Nanjing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, **29**(6): 22-25.
- [21] 杨静, 尹佩玲, 叶斯琪, 等. 深圳市船舶排放清单与时空特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- Yang J, Yin P L, Ye S Q, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in the city of Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- [22] 叶斯琪, 郑君瑜, 潘月云, 等. 广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 537-547.
- Ye S Q, Zheng J Y, Pan Y Y, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 537-547.
- [23] 韩博, 黄佳敏, 魏志强. 民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4524-4530.
- Han B, Huang J M, Wei Z Q. Gaseous emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4524-4530.
- [24] 何吉成. 30年来中国民航运输行业的大气污染物排放[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 1-7.
- He J C. Air pollutant emissions of aircraft in china in recent 30 years[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 1-7.
- [25] 樊守彬, 杨涛, 田刚, 等. 北京铁路机车尾气排放清单的建立[J]. *安全与环境学报*, 2010, **10**(1): 90-93.
- Fan S B, Yang T, Tian G, *et al.* Estimating exhaust emissions from railway vehicles in Beijing [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, **10**(1): 90-93.

环境科学

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)