

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM _{2.5} 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 PM _{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 PM _{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/NH ₄ ⁺ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征

闫旭¹, 邱德志¹, 郭东丽¹, 齐星昊¹, 郑仕侃¹, 程轲¹, 孙剑辉¹, 刘建伟²

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007;
2. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044)

摘要: 城镇污水处理厂由于运行过程中能够大量产生二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O), 而被视为重要的人为温室气体释放源。采用基于污染物削减量的排放因子法建立了 2014 年中国城镇污水处理厂温室气体(CO₂、CH₄ 和 N₂O)排放清单, 并分析温室气体排放的时空分布和影响因素。结果表明, 2014 年中国城镇污水处理厂温室气体排放总量(以 CO₂-eq 计)为 7 348.60 Gg, CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量分别为 6 054.57 Gg、27.47 Gg(769.08 Gg, 以 CO₂-eq 计)和 1.98 Gg(524.95 Gg, 以 CO₂-eq 计); 各省份间排放量差异明显, 华东地区排放量较高, 西北地区排放量较低, 西藏几乎没有排放, 2005~2014 年这 10 年间中国通过城镇污水处理厂排放的温室气体总量增长了 229.4%, CO₂、CH₄ 和 N₂O 的涨幅分别为 217.9%、217.9% 和 520.3%; 地区经济的发展水平和污水处理量与当地城镇污水厂温室气体释放量相关性最大, 人均蛋白质供应量与城镇污水厂 N₂O 产生量密切相关。

关键词: 排放清单; 温室气体; 城镇污水处理厂; 空间分布; 时间分布

中图分类号: X16; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1256-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706079

Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China

YAN Xu¹, QIU De-zhi¹, GUO Dong-li¹, QI Xing-hao¹, ZHENG Shi-kan¹, CHENG Ke¹, SUN Jian-hui¹, LIU Jian-wei²

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;
2. Research Center of Beijing Sustainable Urban Drainage System Construction and Risk Control Engineering Technology, Beijing Climate Change Response Research and Education Center, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Urban wastewater treatment plants are considered important greenhouse gas resources with massive emissions of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) during operation. Based on the emission factor approach of pollutant reduction, the 2014 emission inventory of greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) from urban wastewater treatment plants in China was established. In addition, the temporal and spatial distribution and influencing factors of greenhouse gas emissions were analyzed in this study. The results showed that total emissions of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants in China was 7 348.60 Gg (CO₂-eq) in 2014, which included CO₂, CH₄, and N₂O emissions of 6 054.57 Gg, 27.47 Gg (769.08 Gg, CO₂-eq), and 1.98 Gg (524.95 Gg, CO₂-eq), respectively. The difference in greenhouse gas emissions among provinces was significant; high emissions appeared in the eastern areas of China, low emissions were observed in the northwest, and hardly any emissions were found in Xizang. From 2005 to 2014, annual greenhouse gas emissions from urban sewage treatment plants in China increased by 229.4%, and the rates of CO₂, CH₄, and N₂O increased by 217.9%, 217.9%, and 520.3%, respectively. The regional economic development level and number of wastewater treatment plants were correlated the most with the emissions of greenhouse gasses, and the per-capita protein supply was closely related with the N₂O emission.

Key words: emission inventory; greenhouse gas; wastewater treatment plants; spatial distribution; temporal distribution

大气中温室气体含量上升能够导致全球气候变暖等一系列严重的环境问题^[1~3]。城镇污水处理厂由于在运行过程中会不可避免地产生二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)^[4~9], 而被视为重要的人为温室气体释放源之一^[10,11], 近年来受到越来越多关注。

中国人口众多, 城镇污水产生量巨大。2016

年, 中国城市污水厂日处理能力达到 14 823 万 m³, 较 2005 年的 8 091 万 m³ 增长了 83.2%, 且城市污水处理率由 2005 年的 48.4% 增长到 92.4%^[12,13]。

收稿日期: 2017-06-08; 修订日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408199); 河南省科技攻关计划项目(162102310096)

作者简介: 闫旭(1984~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: yanxu@htu.cn

随着我国城镇化进程发展和环保要求不断提高, 城镇污水的产生量 and 处理率将持续攀升, 会导致更多温室气体通过城镇污水厂释放到大气^[6,14~17]. 因此, 充分了解我国污水处理行业温室气体的空间分布特征和时间变化规律是全面掌握我国碳排放基础数据的组成部分, 也是制定相关减排政策和规划该行业未来发展的重要依据.

排放源清单是环境空气质量管理工作的重要基础数据^[18~20], 时空分布信息能更好地说明其发展规律和变化趋势. 一些学者已经开始对我国污水处理行业温室气体排放清单进行研究. 周兴等^[21]采用 IPCC 提供的方法, 估算了 2003~2009 年间我国源自生活污水和工业废水的 CH₄ 和 N₂O 的排放量, 发现生活污水是 N₂O 的主要排放源, 造纸业废水是 CH₄ 的主要排放源, 人均温室气体排放量呈现递增趋势. 蔡博峰等^[22]建立了我国 2012 年污水处理行业的 CH₄ 排放清单, 结果显示当年生活污水和工业废水的 CH₄ 排放总量分别为 39.92 Gg 和 12.72 Gg. 整体而言, 我国对污水处理领域温室气体排放清单的研究还比较薄弱, 特别是针对城镇污水处理厂的碳排放量、空间分布、发展规律和影响因素研究还比较缺乏. 另外, 目前主流碳排放估算方法源自于 IPCC 发布的《2006 年国家温室气体清单指南》^[23], 其采用的排放因子主要来自于有限的基于国外污水处理厂的研究. 各国甚至每个地区的污水水质都各具特点, 污水厂管理水平也参差不齐, 因此, 采用基于我国污水处理厂相关研究的排放因子能更加准确地建立该行业的温室气体排放清单.

本研究采用基于污染物削减量的排放因子法建立了 2014 年中国城镇污水处理厂的温室气体 (CO₂、CH₄ 和 N₂O) 排放清单, 并分析了 3 种温室气体排放的时空分布和影响因素, 以期为污水处理行业提供准确的碳排放基础数据, 并为国家相关行业政策的制定提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

本研究的时间范围为 2005~2014 年, 区域范围为中国 31 个省市、自治区 (因香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省缺乏相关数据, 故暂未考虑), 研究对象为区域内城镇污水处理厂运行过程中释放的 3 种温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O.

1.2 温室气体排放清单估算方法

1.2.1 CO₂

城镇污水厂运行过程中的 CO₂ 排放量估算采用基于污水 COD 削减量的排放因子法. 其基本计算公式为:

$$\text{CO}_{2\text{Emissions}} = \text{COD}_{\text{removed}} \cdot \text{EF}_1 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

式中, CO_{2Emissions} 为 CO₂ 排放量, 单位为 Gg·a⁻¹; COD_{removed} 为城镇污水厂 COD 削减总量, 单位为 t·a⁻¹; EF₁ 为源自污水 COD 削减量的 CO₂ 排放因子, 单位为 kg·t⁻¹.

1.2.2 CH₄

城镇污水厂运行过程中的 CH₄ 排放量估算采用基于污水 COD 削减量的排放因子法. 本文仅考虑污水处理过程中产生的 CH₄, 排放量中不包括剩余污泥处理处置过程中产生的 CH₄, 未考虑 CH₄ 回收. 其基本计算公式为:

$$\text{CH}_{4\text{Emissions}} = \text{COD}_{\text{removed}} \cdot \text{EF}_2 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

式中, CH_{4Emissions} 为 CH₄ 排放量, 单位为 Gg·a⁻¹; COD_{removed} 为城镇污水厂 COD 削减总量, 单位为 t·a⁻¹; EF₂ 为源自污水 COD 削减量的 CH₄ 排放因子, 单位为 kg·t⁻¹.

1.2.3 N₂O

城镇污水厂运行过程中的 N₂O 排放量估算采用基于污水 TN 削减量的排放因子法. 其基本计算公式为:

$$\text{N}_2\text{O}_{\text{Emissions}} = \text{TN}_{\text{removed}} \cdot \text{EF}_3 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

式中, N₂O_{Emissions} 为 N₂O 排放量, 单位为 Gg·a⁻¹; TN_{removed} 为城镇污水厂 TN 削减总量, 单位为 t·a⁻¹; EF₃ 为源自污水 TN 削减量的 N₂O 排放因子, 单位为 kg·t⁻¹.

污水处理量、污染物削减量和污水处理厂数量等基本数据来自文献^[24], GDP 数据来自文献^[25], 人均蛋白质供应量来自世界粮农组织^[26].

1.3 排放因子

排放因子是估算温室气体排放量的重要参数^[27~29]. 目前国内针对实际城镇污水处理厂温室气体排放因子的研究相对较少, 通过收集对中国城镇污水处理厂实测数据, 选取各研究结果的平均值作为排放因子. 详见表 1.

2 结果与讨论

“全球增温潜势”通常用于评价不同温室气体对气候变化影响的相对能力, 文献^[37]显示, CO₂、CH₄ 和 N₂O 的百年全球增温潜势 (GWP) 分别为 1、28 和 265. 二氧化碳排放当量 (CO₂-eq) 是比较不同

表 1 城镇污水处理厂温室气体排放因子
Table 1 Greenhouse gas emission factors of urban
wastewater treatment plants

类别	排放因子	平均值	文献
CO ₂ (以 CO ₂ /COD _{removed} 计)/ kg·t ⁻¹	747.50	508.40	[30]
	269.30		[31]
CH ₄ (以 CO ₄ /COD _{removed} 计)/ kg·t ⁻¹	1.87	2.31	[31]
	5.78		[32]
	1.03		[33]
	0.54		[34]
	2.23		[31]
N ₂ O (以 N ₂ O/TN _{removed} 计)/ kg·t ⁻¹	1.56	2.08	[34]
	1.79		[35]
	2.73		[36]

种温室气体排放量时的一个通用尺度,一般以 CO₂ 作为比较基准,用温室气体排放量乘以 GWP 计算出 CO₂-eq,本研究将 3 种温室气体统一转化为 CO₂-eq 的形式,以比较不同温室气体对气候变化的贡献程度.

2.1 全国城镇污水处理厂 2014 年温室气体排放空间分布

图 1 显示了 2014 年中国各省市城镇污水处理厂数量和温室气体排放情况,图 2 显示了中国各省市 2014 年城镇污水处理厂温室气体对全国排放总量的贡献率,各省市当年人均城镇污水厂温室气体排放情况如图 3 所示.

2014 年,本研究涉及的全国 31 个省市城镇污水处理厂温室气体排放总量(以 CO₂-eq 计,下同)为 7 348.60 Gg,平均为 237.05 Gg,其中排放量最高的省份为山东,达 717.28 Gg,排放量最低的省份为西藏,0.97 Gg. 从图 1 和 2 可以看出,各省市城镇污水处理厂数量和污水处理厂的温室气体排放量呈正相关,并且地区分布极不平衡,差异显著. 污水厂排放温室气体量较多的省份主要集中在华东地区的山东、浙江、江苏等省份,其中山东、浙江两省温室气体排放量均达到 700.00 Gg 以上,两省合计约占全国总排放量的 19.5% (图 2). 而西北地区的青海、宁夏、甘肃,城镇污水处理厂数量较少,温室气体排放量也较低,均低于 40.00 Gg. 西藏由于气候环境特殊,地理位置海拔高,人口分布密度较小,导致污水处理量少,温室气体排放量较低.

用年温室气体排放总量除以城镇人口数,得到 2014 年各省市城镇人均污水厂温室气体排放量. 图 3 反映的是各省市 2014 年城镇污水处理厂温室气体人均年排放量分布情况,当年全国城镇人均通过污水处理厂排放温室气体(以 CO₂-eq 计,下同)为 9.74 kg·(人·a)⁻¹.

由于各地区面积、人口和经济发展情况存在差异,人均排放量能更好的反应各省市城镇污水处理程度和通过污水厂的温室气体产生情况. 由图 3 可

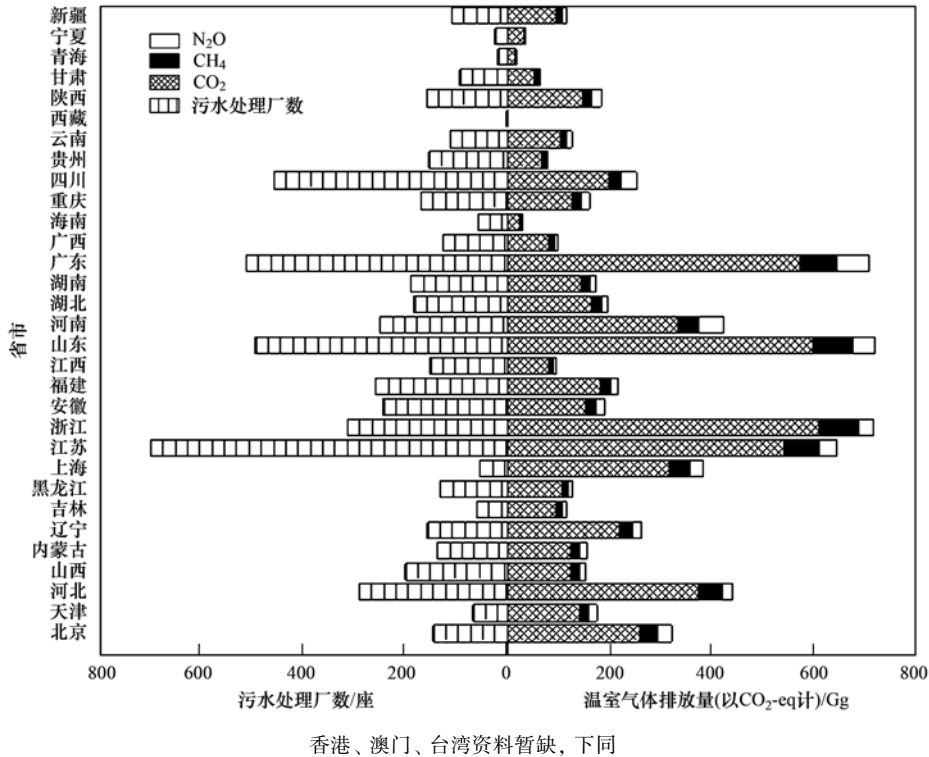


图 1 中国各省市 2014 年城镇污水处理厂数量与温室气体排放清单

Fig. 1 Number and greenhouse gas emission inventory of urban wastewater treatment plants for China in 2014

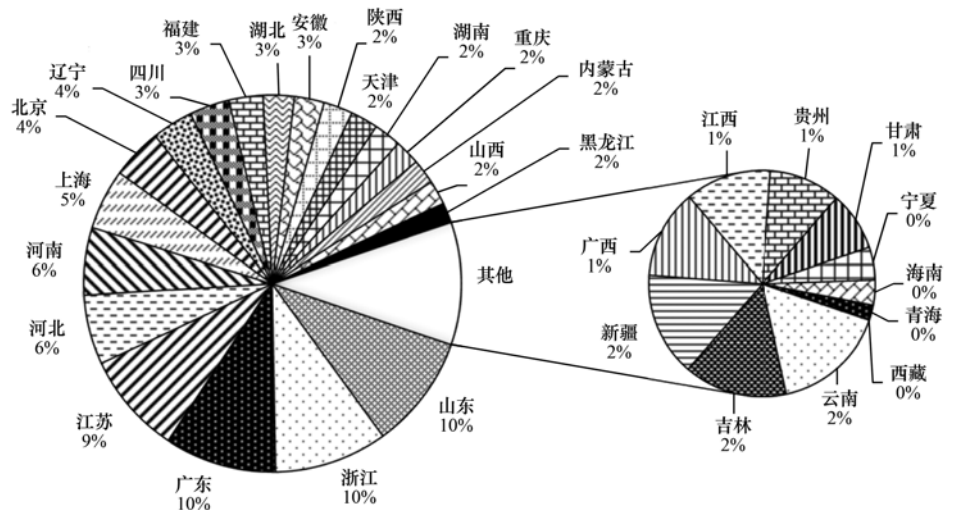


图 2 中国各省市 2014 年城镇污水处理厂温室气体排放贡献率

Fig. 2 Contribution rate of different provinces to greenhouse gas emission of urban wastewater treatment plants for China in 2014

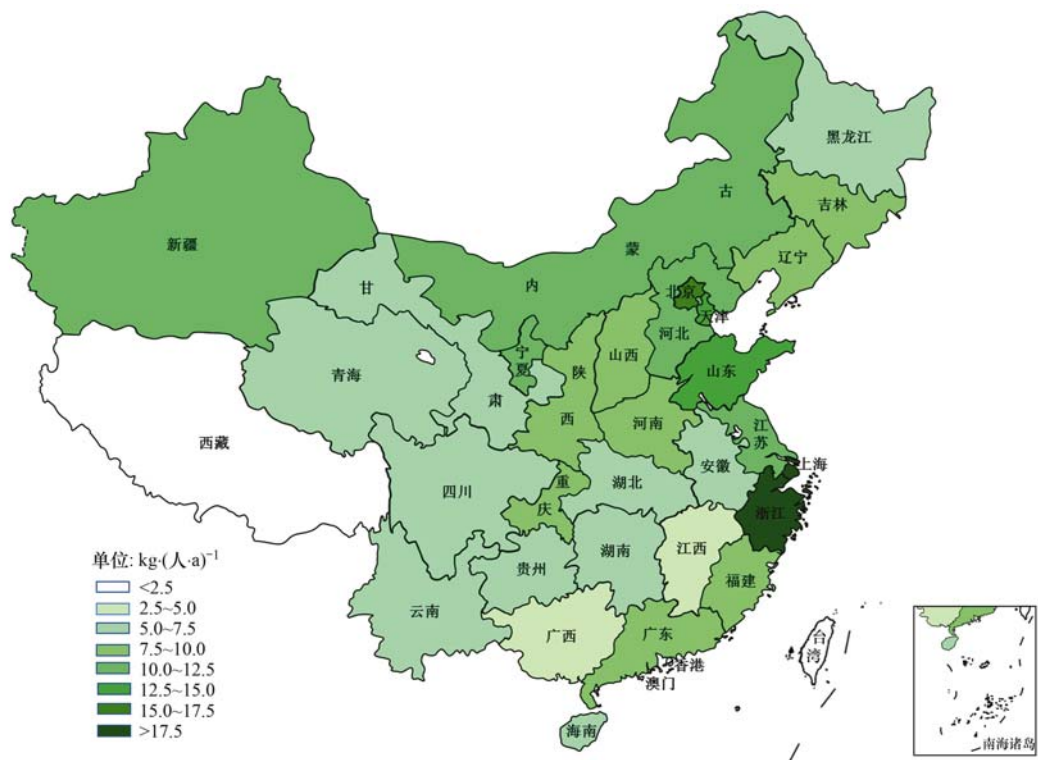


图 3 中国各省市 2014 年人均城镇污水处理厂温室气体排放量

Fig. 3 Provincial per-capita greenhouse gas emissions of urban wastewater treatment plants for China in 2014

以看出人均排放量在全国平均水平之上的省市主要分布在我国北部、东部和东南地区，其中浙江、上海、北京人均温室气体排放量较高，均达到 $17.00 \text{ kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$ 以上。而人均城镇污水处理厂排放量较低的省份主要分布在中南、西南和西北地区，其中西藏人均温室气体排放量最低，为 $0.89 \text{ kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$ 。

2.2 中国城镇污水厂温室气体排放量时间变化特征

图 4 显示了 2005 ~ 2014 年全国城镇污水处理

厂数量与温室气体年排放总量。10 年间，随着我国城镇人口数量和对环保重视程度的增加，全国城镇污水处理厂数量飞速增长，从 2005 年的 764 座增加到 2014 年的 6 031 座。与之对应的是通过污水厂排放的温室气体量，从 2005 年的 2 230.97 Gg 增加到了 2014 年的 7 348.60 Gg。

城镇污水处理厂释放的 3 种温室气体中， CO_2 量最大， CH_4 次之， N_2O 最少。这是由于在污水处理过程中，绝大部分被去除的有机物都被彻底降解

为 CO_2 和 H_2O , CH_4 和 N_2O 是该过程中的副产物, 两者分别产生于污水厂中有限的厌氧反应和生物脱氮过程^[23]. 然而, 2005~2014 年间, 这 3 种温室气体在排放总量中的比重发生了一些变化: CO_2 和 CH_4 所占比重逐渐减少, N_2O 所占比重则逐渐增加. 2005 年 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 在当年城镇污水厂温室气体排放总量中分别占 85.4%、10.8% 和 3.8%, 而在 2014 年, 三者的比重分别为 82.4%、10.5% 和 7.1%. 3 种温室气体的绝对排放量在 10 年间增长幅度也有明显差别, CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放量从 2005~2014 年分别上涨了 217.9%、217.9% 和 520.3%. 造成 N_2O 涨幅最高的主要原因可能与 10 年间我国环境压力增大, 对污水厂出水水质尤其脱氮效果的要求不断提高有关. 北京、天津等地区发布了地方城镇污水处理厂排放标

准^[38~40], 排放要求均高于国家环保总局发布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》^[41] (GB 18918-2002). 排放标准的提升对提高污水厂出水水质具有积极作用, 但同时, 污染物在污水处理过程中削减量的增加也加大了温室气体排放量.

3 种温室气体中, 作为污染物降解的最终产物, CO_2 的产生不可避免, 但 CH_4 和 N_2O 都能通过调控污水处理过程实现有效减排^[42~45]. 截至 2015 年底, 全国城市污水处理厂处理能力 1.4 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 全年累计处理污水量达 410.3 亿 m^3 ^[46], 随着我国经济发展和城镇化率的提高, 未来通过污水处理厂释放的温室气体量必将进一步增大, 如何通过提高管理水平和优化处理过程减少温室气体的排放, 已经成为污水处理行业面临的新问题.

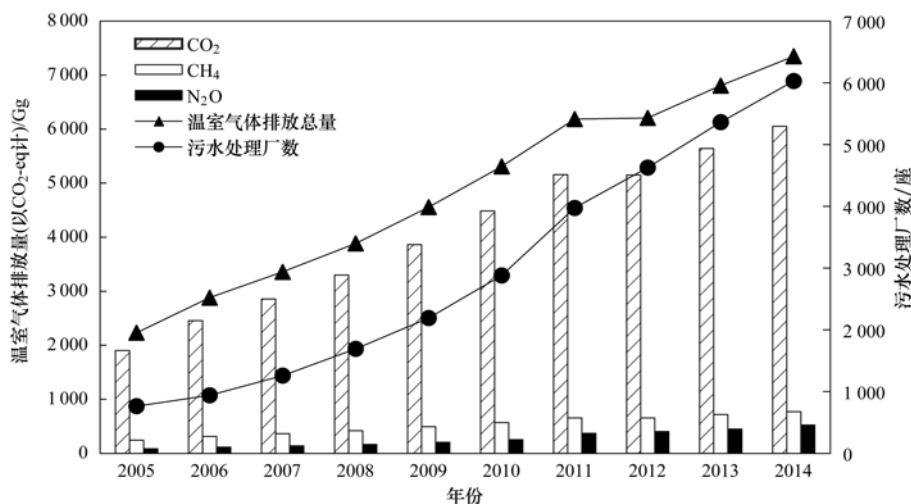


图 4 2005~2014 年城镇生活污水处理厂数与温室气体排放量

Fig. 4 Greenhouse gas emissions and number of urban wastewater treatment plants from 2005 to 2014

2.3 温室气体排放量影响因素分析

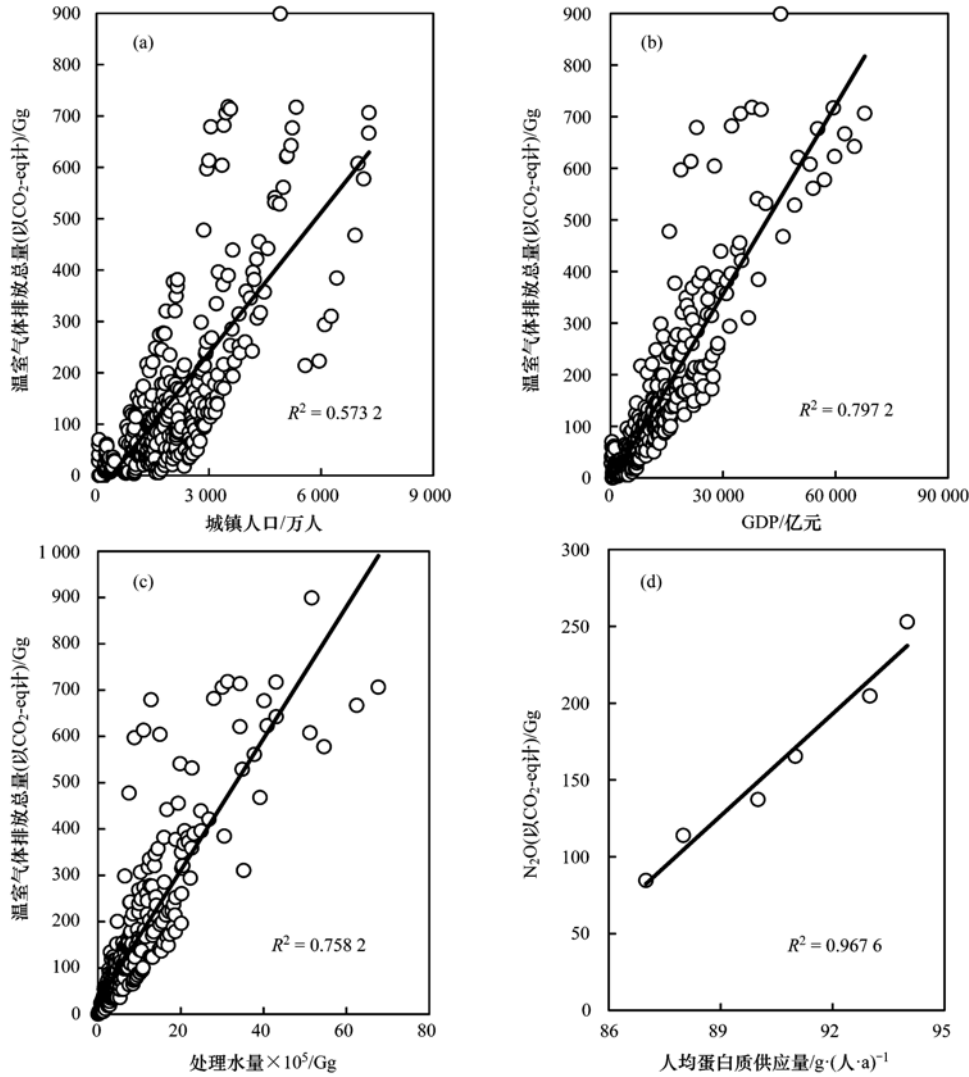
城镇生活污水处理厂温室气体排放量影响因素众多. 图 5(a)~5(c) 分别显示了 2005~2014 年各省市城镇污水处理厂年温室气体排放量和该地区城镇人口数、GDP 以及处理水量的线性关系, 图 5(d) 显示了 2005~2014 年中国城镇污水处理厂年 N_2O 排放量和当年人均蛋白质供应量的线性关系.

可以看出, 地区经济的发展水平和污水处理量与当地城镇污水厂温室气体释放量关系最为密切, 实际上, 城镇污水厂温室气体释放量一定程度上反映了当地环保设施的建设和运行情况. 经济发展水平越高的地区, 人口也相对越集中, 对环境的重视程度和投入也往往越大, 污水处理厂的建设数量和污水处理率也会高于平均水平, 从而造成污水厂温

室气体释放量较大. 地区城镇人口能够反映污水产生量, 但不能反映出当地污水处理率和处理效果, 因此, 与污水厂温室气体产生量相关性相对较低 [图 5(a)]. 污水中含氮污染物的增加会导致污水厂 N_2O 产生量加大, 而人体摄入的蛋白质是城镇污水氮元素的重要来源, 因此, 人均蛋白质供应量与城镇污水厂 N_2O 产生量密切相关 [图 5(d)].

2.4 排放量估算的误差来源

表 2 对比了本研究与其他学者关于中国城镇污水厂温室气体释放量的估算结果 (CO_2 目前未见类似研究), 可以看出, 本研究结果中 2010 年的 CH_4 释放量高于文献 [33], 2012 年的 CH_4 释放量低于文献 [22], 2010 年和 2011 年的 N_2O 释放量结果与对比目标均较为接近. 总体而言, 本文的估算结果



(a) ~ (c) 分别表示温室气体排放量与城镇人口、GDP、处理水量的相关关系，(d) 表示 N₂O 排放量与人均蛋白质供应量的关系

图 5 温室气体排放量影响因素分析

Fig. 5 Influence factor analysis of greenhouse gas emissions

表 2 与其他学者结果对比

Table 2 Comparison with other studies

年份	温室气体排放量/Gg		估算方法	文献
	CH ₄	N ₂ O		
2010	6.20	— ¹⁾	基于处理水量和人均排放量的排放因子法	[33]
2010	—	0.95 ~ 1.20	基于处理水量和人均排放量的排放因子法	[35]
2010	20.36	0.95	基于 COD 和 TN 去除量的排放因子法	本研究
2011	—	1.26	基于进水氮负荷的排放因子法	[47]
2011	—	1.40	基于 TN 去除量的排放因子法	本研究
2012	39.92	—	基于 COD 去除量的排放因子法	[22]
2012	23.37	—	基于 COD 去除量的排放因子法	本研究

1) “—”表示文献中未进行估算

与其他学者具有可比性，可以推断，所建立的基于实测 COD 和 TN 去除量的排放清单在排放基数上基本合理。

本研究建立的排放清单主要采用国内学者对实

际污水处理厂的研究数据，中国幅员辽阔，地区间气候、污水水质以及管理水平等因素均有所差别，并且不同研究间测试条件和采样方法也有所不同，造成产生因子间存在差异，进而对清单结果产生影

响。另外,目前国内对实际污水处理厂温室气体排放因子的研究数据十分有限,使本研究选取的排放因子数据具有一定局限性,导致本研究清单结果存在不确定性。未来可根据地域特点对中国进行区域划分,选取具有代表性的污水厂进行温室气体排放的长期监测,以获取准确的排放因子数据,提高研究结果的可靠性。

3 结论

(1)采用基于污染物削减量的排放因子法建立了2014年中国城镇污水处理厂的温室气体排放清单,温室气体排放总量为7 348.60 Gg, CO₂、CH₄和 N₂O 排放量分别为6 054.57 Gg、27.47 Gg(769.08 Gg,以 CO₂-eq 计)和1.98 Gg(524.95 Gg,以 CO₂-eq 计),地区差异明显,华东地区排放量较高,西北地区排放量较低。

(2)2005~2014年全国城镇生活污水处理厂温室气体年排放总量从2 230.97 Gg增加到7 348.60 Gg。3种温室气体所占质量分数发生变化,CO₂和CH₄分别从85.4%和10.8%下降到82.4%和10.5%,N₂O从3.8%上升到7.1%。

(3)影响因素中,地区经济发展水平和污水处理量与当地城镇污水厂温室气体释放量相关性最大,人均蛋白质供应量与城镇污水厂N₂O产生量密切相关。

参考文献:

- [1] Zickfeld K, Solomon S, Gilford D M. Centuries of thermal sea-level rise due to anthropogenic emissions of short-lived greenhouse gases[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(4): 657-662.
- [2] Liu L C, Wu G. The effects of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emission taxes: an empirical study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 1044-1054.
- [3] Kyung D, Kim M, Chang J, *et al.* Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **95**: 117-123.
- [4] 闫旭, 韩云平, 李琦路, 等. 污水处理过程中温室气体产生研究进展[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 853-862.
Yan X, Han Y P, Li Q L, *et al.* Greenhouse gas emission during wastewater treatment processes[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 853-862.
- [5] Short M D, Daikeler A, Wallis K, *et al.* Dissolved methane in the influent of three Australian wastewater treatment plants fed by gravity sewers[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 85-93.
- [6] 李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 等. 不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1640-1646.
Li H J, Peng D C, Liu W B, *et al.* Non-CO₂ greenhouse gas release from different biological wastewater treatment processes[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1640-1646.
- [7] Masuda S, Suzuki S, Sano I, *et al.* The seasonal variation of emission of greenhouse gases from a full-scale sewage treatment plant[J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 167-173.
- [8] Hwang K L, Bang C H, Zoh K D. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 881-884.
- [9] Zeng S Y, Chen X, Dong X, *et al.* Efficiency assessment of urban wastewater treatment plants in China: considering greenhouse gas emissions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, **120**: 157-165.
- [10] Sahely H R, Maclean H L, Monteith H D, *et al.* Comparison of on-site and upstream greenhouse gas emissions from Canadian municipal wastewater treatment facilities[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2006, **5**(5): 405-415.
- [11] Ma R, Hu Z, Zhang J, *et al.* Reduction of greenhouse gases emissions during anoxic wastewater treatment by strengthening nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **235**: 211-218.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2016年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2017.
- [13] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2005年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2006.
- [14] 于洋, 崔胜辉, 林剑艺, 等. 城市废弃物处理温室气体排放研究: 以厦门市为例[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3288-3294.
Yu Y, Cui S H, Lin J Y, *et al.* Study on greenhouse gas emissions from urban waste disposal system: a case study in Xiamen[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3328-3294.
- [15] Caniani D, Esposito G, Gori R, *et al.* Towards a new decision support system for design, management and operation of wastewater treatment plants for the reduction of greenhouse gases emission[J]. *Water*, 2015, **7**(10): 5599-5616.
- [16] Mannina G, Ekama G, Caniani D, *et al.* Greenhouse gases from wastewater treatment-A review of modelling tools[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 254-270.
- [17] 翟萌, 邵越, 徐福军. 西安污水处理厂温室气体排放及减排对策研究[J]. *环境工程*, 2016, **34**(2): 23-26.
Zhai M, Shao Y, Xu F J. Countermeasures on greenhouse gas emission reduction for the wastewater treatment plants of Xi'an[J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(2): 23-26.
- [18] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] 苏继峰, 朱彬, 康汉青, 等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1418-1424.
Su J F, Zhu B, Kang H Q, *et al.* Applications of pollutants released from crop residues at open burning in Yangtze River Delta region in air quality model[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1418-1424.
- [20] 苏航, 闫东杰, 黄学敏, 等. 西安市人为源大气氨排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4117-4123.
Su H, Yan D J, Huang X M, *et al.* Inventory and characteristics

- of anthropogenic ammonia emission in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4117-4123.
- [21] 周兴, 郑有飞, 吴荣军, 等. 2003—2009 年中国污水处理部门温室气体排放研究[J]. *气候变化研究进展*, 2012, **8**(2): 131-136.
- Zhou X, Zheng Y F, Wu R J, *et al.* Greenhouse gas emissions from wastewater treatment in China during 2003- 2009 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2012, **8**(2): 131-136.
- [22] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国污水处理厂甲烷排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3810-3816.
- Cai B F, Gao Q X, Li Z H, *et al.* Estimation of methane emissions of wastewater treatment plants in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3810-3816.
- [23] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Japan: IPCC, 2006.
- [24] 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2006-2015.
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015.
- [26] Food and Agriculture Organization (FAO). All faostat data[EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#home>, 2017-04-28.
- [27] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [28] 张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 等. 基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2775-2783.
- Zhang Y J, Kong S F, Tang L L, *et al.* Analysis on emission inventory and temporal-spatial characteristics of pollutants from key coal-fired stationary sources in Jiangsu province by on-line monitoring data [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2775-2783.
- [29] 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.
- [30] Bao Z Y, Sun S C, Sun D Z. Characteristics of direct CO₂ emissions in four full-scale wastewater treatment plants [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, **54**(4-5): 1070-1079.
- [31] Yan X, Li L, Liu J X. Characteristics of greenhouse gas emission in three full-scale wastewater treatment processes[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(2): 256-263.
- [32] Liu Y, Cheng X, Lun X X, *et al.* CH₄ emission and conversion from A²O and SBR processes in full-scale wastewater treatment plants[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 224-230.
- [33] Wang J H, Zhang J, Xie H J, *et al.* Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant [J]. *Bioresour Technology*, 2011, **102**(9): 5479-5485.
- [34] Ren Y G, Wang J H, Li H F, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from different treatment processes in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(21): 2917-2927.
- [35] Wang J H, Zhang J, Wang J, *et al.* Nitrous oxide emissions from a typical northern Chinese municipal wastewater treatment plant [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, **32**(1-3): 145-152.
- [36] Li H J, Peng D C, Liu W B, *et al.* N₂O generation and emission from two biological nitrogen removal plants in China [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(25): 11800-11806.
- [37] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [38] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- GB 18918-2002, Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant[S].
- [39] DB 11/890-2012, 城镇污水处理厂水污染物排放标准[S].
- DB 11/890-2012, Discharge standard of water pollutants for municipal wastewater treatment plants[S].
- [40] DB 32/1072-2007, 太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值[S].
- DB 32/1072-2007, Discharge standard of main water pollutants for municipal wastewater treatment plant & key industries of Taihu area[S].
- [41] DB 12/356-2008, 污水综合排放标准[S].
- DB 12/356-2008, Integrated wastewater discharge standard[S].
- [42] 闫旭. 污水处理过程中温室气体的产生与逸散特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [43] Sweetapple C, Fu G, Butler D. Multi-objective optimisation of wastewater treatment plant control to reduce greenhouse gas emissions[J]. *Water Research*, 2014, **55**: 52-62.
- [44] Mamais D, Noutsopoulos C, Dimopoulou A, *et al.* Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions[J]. *Water Science & Technology*, 2015, **71**(2): 303-308.
- [45] Yan X, Han Y P, Li Q L, *et al.* Impact of internal recycle ratio on nitrous oxide generation from anaerobic/anoxic/oxic biological nitrogen removal process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **106**: 11-18.
- [46] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [47] 王亚宜, 周东, 赵伟, 等. 污水生物处理实际工艺中氧化亚氮的释放: 现状与挑战[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(5): 1079-1088.
- Wang Y Y, Zhou D, Zhao W, *et al.* Nitrous oxide emissions from biological wastewater treatment plants: Current status and challenges[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(5): 1079-1088.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the USB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)