

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

## 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 ..... 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM<sub>2.5</sub> 的影响 ..... 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM<sub>2.5</sub> 分布影响因素及交互效应 ..... 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 ..... 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 ..... 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 ..... 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 ..... 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 ..... 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 ..... 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 ..... 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 ..... 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 ..... 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 ..... 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 ..... 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 ..... 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 ..... 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 ..... 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 ..... 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 ..... 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 ..... 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 ..... 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 ..... 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 ..... 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 ..... 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 ..... 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 ..... 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 ..... 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 ..... 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 ..... 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 ..... 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 ..... 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 ..... 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 ..... 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 ..... 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 ..... 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 ..... 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 ..... 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 ..... 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 ..... 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 ..... 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 ..... 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 ..... 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 ..... 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 ..... 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 ..... 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 ..... 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 ..... 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

# 2000 ~ 2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响

王文锦<sup>1</sup>, 王卿<sup>2</sup>, 朱安生<sup>1</sup>, 黄凌<sup>1</sup>, 顾莹<sup>3</sup>, 王杨君<sup>1</sup>, 王敏<sup>2</sup>, 李莉<sup>1\*</sup>

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 上海工程技术大学航空运输学院, 上海 201620)

**摘要:** 根据 Landsat 卫星遥感影像解译了 2000 ~ 2018 年长江三角洲 (Yangtze River Delta, YRD) 城市群历史土地利用变化, 结合氮肥施用变化情况, 研究了由于土地利用变化带来的农田生态系统 (NH<sub>3</sub>) 排放变化. 结果表明, 伴随着快速的城市化进程, YRD 耕地面积逐渐减少, 耕地面积从 2000 年的 276 269 km<sup>2</sup> (占总面积的 49%) 减少到 2018 年的 244 001 km<sup>2</sup> (占总面积的 44%). 土地利用变化和氮肥施用变化对农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放的影响主要包括土壤本底和氮肥施用两部分. 2000 ~ 2018 年, YRD 氮肥施用产生的 NH<sub>3</sub> 排放量从 690 kt·a<sup>-1</sup> 减少到 541 kt·a<sup>-1</sup> (减少 22%); 土壤本底产生的 NH<sub>3</sub> 排放量从 32 kt·a<sup>-1</sup> 减少到 29 kt·a<sup>-1</sup> (减少 9%). 结果表明, 近 20 年来, YRD 城镇化进程加快, 耕地面积显著减少, 进一步带来氮肥施用量降低, 使得农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量减少.

**关键词:** 氨排放; 农业源; 土地利用变化; 氮肥施用; 长三角 (YRD)

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3442-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010202

## Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018

WANG Wen-jin<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>2</sup>, ZHU An-sheng<sup>1</sup>, HUANG Ling<sup>1</sup>, GU Ying<sup>3</sup>, WANG Yang-jun<sup>1</sup>, WANG Min<sup>2</sup>, LI Li<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Based on Landsat satellite remote sensing images, this study interprets land use changes in the Yangtze River Delta (YRD) region from 2000 to 2018. Combined with changes in nitrogen fertilizer application, the changes in ammonia emissions from farmland ecosystem due changes in land use and nitrogen fertilizer application were further investigated. The results show that along with the rapid urbanization process, the area of cultivated land in the YRD region has gradually decreased from 276 269 km<sup>2</sup> (49% of total land area) in 2000 to 244 001 km<sup>2</sup> (44%) in 2018. The effects of changes in land use and nitrogen fertilizer application on ammonia emissions from farmland ecosystems mainly include emissions from soil background and nitrogen fertilizer application. From 2000 to 2018, ammonia emissions due to the application of nitrogen fertilizer decreased from 690 kt·a<sup>-1</sup> to 541 kt·a<sup>-1</sup> (relative decrease by 22%), while the ammonia emissions from the soil background reduced from 32 kt·a<sup>-1</sup> to 29 kt·a<sup>-1</sup> (decrease by 9%). During the past 20 years, urbanization in the YRD region has accelerated, and the area of cultivated land and the total amount of nitrogen fertilizer application have significantly reduced, thus resulting in reductions in ammonia emissions from the farmland ecosystem.

**Key words:** ammonia emissions; agricultural sources; land use change; nitrogen fertilizer application; Yangtze River Delta (YRD)

NH<sub>3</sub> 作为大气中最重要碱性痕量气体, 是全球氮循环的关键成分<sup>[1]</sup>, 可以中和二氧化硫和氮氧化物的氧化产物生成二次无机盐 (SNA), 增加大气中细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 浓度. 已有研究表明, 我国 SNA 的质量占总 PM<sub>2.5</sub> 质量可高达 60%<sup>[2-5]</sup>, 进而降低城市能见度<sup>[6]</sup>, 在霾污染形成过程中具有十分重要的作用<sup>[7]</sup>; 在严重的霾天气中, PM<sub>2.5</sub> 浓度受 NH<sub>3</sub> 排放的影响更大<sup>[8]</sup>, 严重威胁人类健康<sup>[9,10]</sup>. NH<sub>3</sub> 排放源包括农业、生物质燃烧、人体排泄物、化工生产、废弃物处置和机动车尾气等<sup>[11-13]</sup>; 其中, 农业源是主要的 NH<sub>3</sub> 排放源, 其中又以氮肥施用和畜禽养殖为

主. 近年来有研究表明, 氮肥施用排放的 NH<sub>3</sub> 占全球 NH<sub>3</sub> 排放总量的 40%, 畜禽养殖排放的 NH<sub>3</sub> 占 50%<sup>[14]</sup>.

由于农业集约化生产的盛行, 20 世纪 NH<sub>3</sub> 排放迅速增高<sup>[15-17]</sup>. 在过去的几十年间, 中国 NH<sub>3</sub> 的排放总量整体上处于增高趋势, 从 1980 年的 4.7

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-12-24

基金项目: 上海市科技攻关计划项目 (19DZ1205007); 国家自然科学基金项目 (41875161, 42075144, 42005112); 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213600); 上海市扬帆计划项目 (19YF1415600)

作者简介: 王文锦 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: wwj722713@shu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: Lily@shu.edu.cn

$\text{Mt}\cdot\text{a}^{-1}$  (以氮计) 上升到 2016 年的  $11 \text{ Mt}\cdot\text{a}^{-1}$ , 增长了 2.4 倍<sup>[18]</sup>; 从 2000 年的  $12.1 \text{ Mt}\cdot\text{a}^{-1}$  增长到 2015 年的  $15.6 \text{ Mt}\cdot\text{a}^{-1}$ , 年增长率达 1.9%<sup>[19]</sup>. 国内学者对  $\text{NH}_3$  排放清单的研究结果表明, 畜禽养殖和氮肥施用产生的  $\text{NH}_3$  占我国总排放量的 80% 以上<sup>[12,20-22]</sup>. 作为我国东部三大典型城市群之一, 长江三角洲 (Yangtze River Delta, YRD) 地区的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度受到农业源  $\text{NH}_3$  排放的影响也较为显著. 2000~2017 年江苏省农业源  $\text{NH}_3$  排放平均 78% 来源于畜禽养殖, 22% 来源于氮肥施用, 2012 年  $\text{NH}_3$  排放量出现最大值 ( $837.64 \text{ kt}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>. 2013 年浙江省农业源的  $\text{NH}_3$  排放主要来自氮肥施用 (43%)<sup>[23]</sup>, 2017 年农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放量达到 36.06 kt, 并以氮肥施用贡献最大 (87%)<sup>[24]</sup>. 2006 年安徽省  $\text{NH}_3$  排放量为 320.2 kt, 其中 52.7% 来自农田生态系统<sup>[12]</sup>. 2006~2014 年, 氮肥施用是 YRD  $\text{NH}_3$  排放的最重要来源, 该来源排放量约占总  $\text{NH}_3$  排放量的 55%<sup>[25]</sup>. 城市化水平与  $\text{NH}_3$  排放具有负相关关系, 因此, 土地利用变化对  $\text{NH}_3$  排放的研究具有十分重要的意义<sup>[26]</sup>.

过去 20 年间, 学者们对农业  $\text{NH}_3$  排放的研究大多是对其排放变化趋势和时空分布特征的研究. 随着快速城市化和机动化进程, 在过去十几年间, YRD 城市群土地利用状况发生了巨大变化, 直接影响到农业  $\text{NH}_3$  的排放. 土地利用变化直接导致土壤本底  $\text{NH}_3$  排放的变化, 间接影响氮肥施用总量进而导致氮肥利用率的变化. 然而, 针对土地利用变化对  $\text{NH}_3$  排放影响的研究还相对匮乏, 利用高分辨率卫星遥感资料反演我国典型城市群下垫面土地利用演变, 并进而研究其对农业源  $\text{NH}_3$  排放的影响, 鲜见报道. 为了弄清楚 YRD 地区历史土地利用变化对农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放的影响, 本研究利用 Landsat 卫星遥感手段解译高分辨率 2000~2018 年历史土地利用状况, 采用自下而上的方法, 结合情景分析, 探讨了 YRD 在过去 20 年间由于历史土地利用变化对农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放变化的影响, 以期对 YRD 区域  $\text{PM}_{2.5}$  防控提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 卫星遥感影像解译土地利用变化

本研究涵盖了上海及江苏、浙江和安徽三省的长江三角洲土地利用范围, 采用基于 2000、2005、2010、2015 和 2018 年 Landsat 系列卫星遥感影像解译的 YRD 土地利用数据, 该数据采用全国生态 10a

土地覆被 I、II 级分类系统, 将 YRD 土地覆被类型分为林地、草地、水域、耕地、建设用地及未利用地 6 大类. 利用 ArcGIS 10.6 软件, 创建  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  格网, 提取各格网中的土地利用信息.

### 1.2 $\text{NH}_3$ 排放计算方法

本文主要研究 YRD 农田生态系统  $\text{NH}_3$  的排放, 主要涉及源类包括氮肥施用、土壤本底、固氮植物和秸秆堆肥, 本文采用排放因子法计算  $\text{NH}_3$  排放量, 计算公式如下:

$$E(\text{NH}_3) = \sum_{i,j} A_{i,j} \text{EF}(\text{NH}_3)_{i,j} \quad (1)$$

式中,  $i$  和  $j$  分别为地区和源类别,  $A$  为活动水平数据, 主要包括氮肥施用量、耕地面积、固氮植物的种植面积和田间堆肥的秸秆量;  $\text{EF}(\text{NH}_3)$  为  $\text{NH}_3$  的排放因子.

#### 1.2.1 活动水平

氮肥施用活动水平: 为 YRD 广泛使用的氮肥种类, 包括尿素、碳铵、硝酸铵和硫酸铵等, 其中以尿素和碳铵施用最为广泛. 氮肥施用总量来自 2000~2018 年各省市统计年鉴<sup>[27-31]</sup>, 各种氮肥施用占比参考全国各种氮肥生产比例和董艳强等<sup>[32]</sup>的研究, 其中尿素占 64%; 碳铵占 24%; 硝酸铵、硫酸铵及其他氮肥各占 4%.

土壤本底活动水平: 为该地区的耕地面积, 数据来自 2000、2005、2010、2015 和 2018 年 1:50 000 彩色航空遥感图像解译的土地利用类型数据.

固氮植物活动水平: 为该地区 2000~2018 年固氮植物 (豆类、花生和绿肥) 的种植面积, 数据来自 2000~2018 年各省市统计年鉴及农业农村局公布的数据.

秸秆堆肥活动水平: 为该地区 2000~2018 年主要用于堆肥的农作物 (水稻、小麦、玉米、棉花、豆类、花生和油菜) 的田间堆肥的秸秆量. 利用该地区作物产量、谷草比、秸秆堆肥比例三者乘积来估算田间堆肥量. 秸秆堆肥活动水平的计算公式如下:

$$A_j = H_j \times K_j \times D_j \times C \quad (2)$$

式中,  $j$  为作物类型,  $A$  为作物堆肥秸秆量;  $H$  为作物产量;  $K$  为秸秆与产品的比例;  $D$  为秸秆干物质比;  $C$  为秸秆堆肥率. 其中, 作物产量来自文献<sup>[27-31]</sup>,  $R$  和  $D$  值来自 Zhou 等<sup>[33]</sup>的研究.

#### 1.2.2 排放因子

氮肥施用源  $\text{EF}(\text{NH}_3)$  计算公式如下:

$$\text{EF}(\text{NH}_3)_i = \text{EF}_i \times P_i \times R \quad (3)$$

式中,  $i$  为地区,  $\text{EF}$  为基准排放因子,  $P$  为施肥率校正系数,  $R$  为施肥方式校正系数. 本文在计算 YRD 氮肥施用依据 YRD 农时情况主要考虑了水稻、小

麦、玉米、豆类和油菜种植过程所施基肥和追肥。上述 5 种作物的施肥时间主要发生在 4 ~ 10 月,见表

表 1 长三角主要施肥作物及施肥时间

Table 1 Major crop types and fertilization time in the YRD

作物	水稻	小麦	玉米	豆类	油菜
基肥时间	移栽期(5~7月)	播种期(10月)	播种期(4月)	播种期(3~4月)	播种期(9~10月)
追肥时间	分蘖期(5~8月)	拔节期(4~5月)	拔节期(5~6月)	—	抽苔期(4月)

根据文献[34],由于土壤酸碱性的差异,尿素、碳铵、硝酸铵、硫酸铵和其他氮肥的基准排放因子不同,YRD 各亚区域土壤酸碱性见表 2;每亩耕地施氮肥高于 13 kg 的地区, $P$  取 1.18,其它地区取 1.0;在覆土深施时  $R$  取 0.32,表面撒施时  $R$  为 1.0,本文  $R$  取平均值 0.66.

表 2 长三角各地区土壤酸碱性

Table 2 Soil acidity-alkalinity in various regions of the YRD

地区	上海	苏北	苏南	浙北	浙南	皖北	皖南
酸碱性	中性	碱性	中性	碱性	碱性	中性	酸性

土壤本底源  $EF(NH_3)$ :根据文献[34],土壤本底源  $EF(NH_3)$  (以氨计)取  $0.18 g \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$ .

固氮植物源  $EF(NH_3)$ :根据文献[34],固氮植物(大豆、花生和绿肥)源  $EF(NH_3)$  (以氨计)取值分别为  $0.10$ 、 $0.12$  和  $0.13 g \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$ .

秸秆堆肥源  $EF(NH_3)$ :根据文献[34],秸秆堆肥源  $EF(NH_3)$  (以氨计)取  $0.32 kg \cdot t^{-1}$ .

### 1.3 情景设置

农田生态系统  $NH_3$  排放的历史变化,一方面受到土地利用变化的影响,另一方面还受到氮肥施用变化的影响.随着城市化进程的加快,土地利用发生了变化;同时随着科技进步、农业生产方式的改变,氮肥施用量和施用方式也产生了变化.本研究依据 2000 ~ 2018 年 YRD 地区土地利用变化和氮肥施用变化设置了 9 种情景(见表 3),比较不同情景下  $NH_3$  的排放情况,以探讨土地利用变化影响、氮肥施用变化影响以及两者共同的影响.情景 1(S1)选用 2000 年土地利用和 2000 年氮肥施用率计算 2000 年农田生态系统  $NH_3$  排放量;情景 2(S2)选用 2005 年土地利用和 2000 年氮肥施用率;情景 3(S3)选用 2005 年土地利用和 2005 年氮肥施用率计算 2005 年农田生态系统  $NH_3$  排放量.分别比较情景 1 与情景 2(S2 - S1)、情景 2 与情景 3(S3 - S2)和情景 1 与情景 3(S3 - S1),得出 2000 ~ 2005 年土地利用变化、氮肥施用变化和两者共同变化对农田生态系统  $NH_3$  排放的影响.以相同的方式分别获得 2000 ~ 2010、2000 ~ 2015 和 2000 ~ 2018 年农田生态系统  $NH_3$  排放的影响.

1,该时间段内 YRD 大部分区域的平均气温为 20 ~ 30℃.

表 3 氨排放计算情景设置

Table 3 Scenarios of ammonia emission calculation

情景	情景描述	年份	
		土地利用	氮肥施用
S1	2000 年土地利用 + 2000 年氮肥施用	2000	2000
S2	2005 年土地利用 + 2000 年氮肥施用	2005	2000
S3	2005 年土地利用 + 2005 年氮肥施用	2005	2005
S4	2010 年土地利用 + 2000 年氮肥施用	2010	2000
S5	2010 年土地利用 + 2010 年氮肥施用	2010	2010
S6	2015 年土地利用 + 2000 年氮肥施用	2015	2000
S7	2015 年土地利用 + 2015 年氮肥施用	2015	2015
S8	2018 年土地利用 + 2000 年氮肥施用	2018	2000
S9	2018 年土地利用 + 2018 年氮肥施用	2018	2018

## 2 结果与讨论

### 2.1 2000 ~ 2018 年 YRD 土地利用变化

图 1 所示为基于 Landsat 卫星遥感解译的 2000 ~ 2018 年  $1 km \times 1 km$  分辨率土地利用变化情况.研究区域面积共计  $35.8 \times 10^4 km^2$ ,从总体空间分布来看,耕地主要分布在江苏、安徽平原及浙江北部;林地主要分布在安徽西南部以及浙江丘陵一带;建设用地主要呈现以上海为中心,长江入海口和沿岸一带为轴带,江苏的苏锡常和浙江的杭州湾城市连片发展的趋势;水域主要分布在长江、太湖和洪泽湖等大面积湖泊区域.

由图 2 可知,2000 ~ 2018 年 YRD 土地利用变化特征突出表现为,城市建设用地迅速扩张和耕地面积锐减.城市建设用地自 2000 年到 2010 年增幅明显,2000 年建设用地面积为  $36 326.14 km^2$ ,占比 10.15%,至 2010 年建设用地面积达  $53 044.62 km^2$ ,占比 14.81%,2000 ~ 2018 年建设用地共增长了 77.86%.耕地类型是城镇建设用地主要的转出类型,2000 ~ 2010 年为建设用地快速增加的时期,江苏省、上海市以及杭州湾等城市群连片发展,迅速扩张,占用了大量的耕地区域,导致耕地面积大幅下降.耕地面积在 2000 年到 2018 年持续减少,尤其在 2000 年至 2010 年降幅明显,研究时段内耕地面积共减少了 10%.林地面积从 2005 年开始保持小幅减少的趋势,从 2005 年占比 30.19% 下降至 2018 年的 30.06%.水域面积呈现先减少后增加的趋势,2010 ~ 2018 年增加了  $1 610.81 km^2$ .草地和未利用地则变化较小.

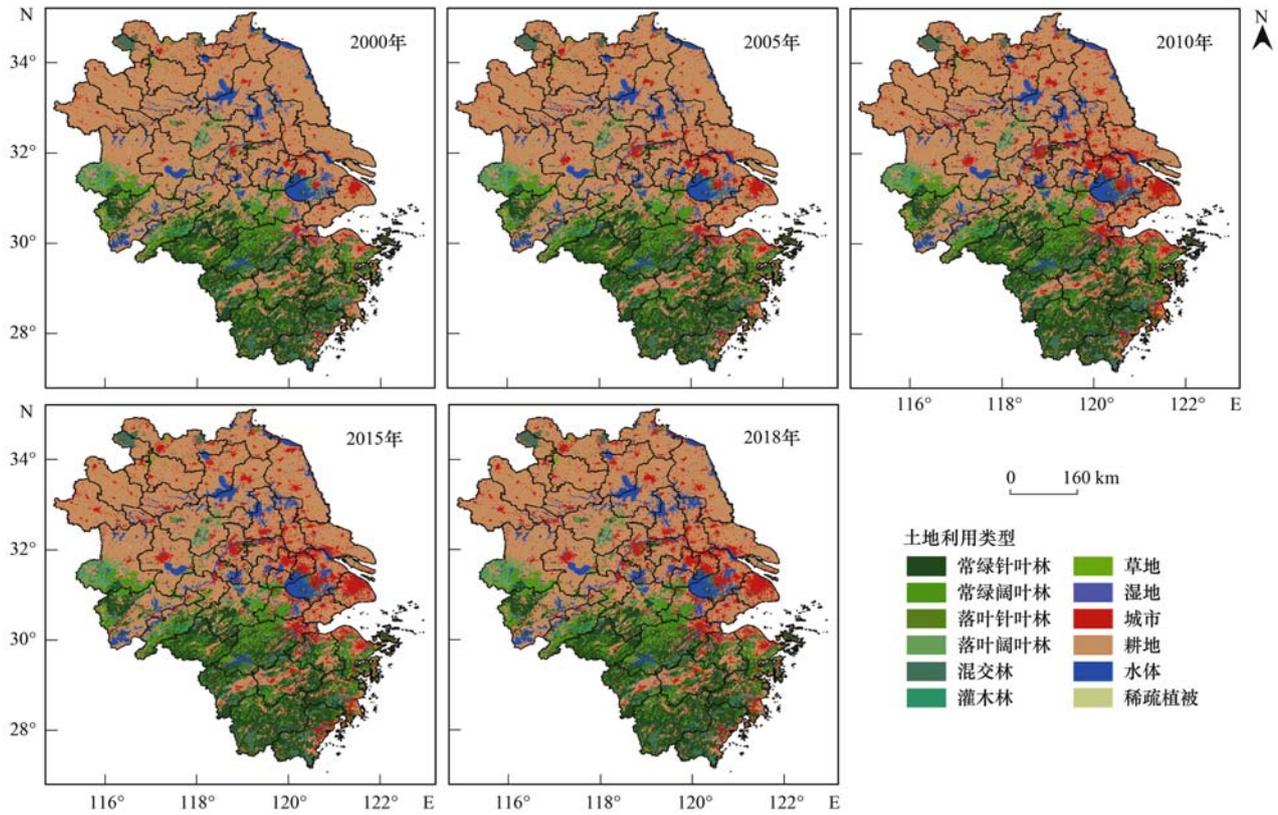


图 1 2000 ~ 2018 年长三角土地类型分布空间演变

Fig. 1 Changes in the spatial distribution of land use and structure in YRD from 2000 to 2018

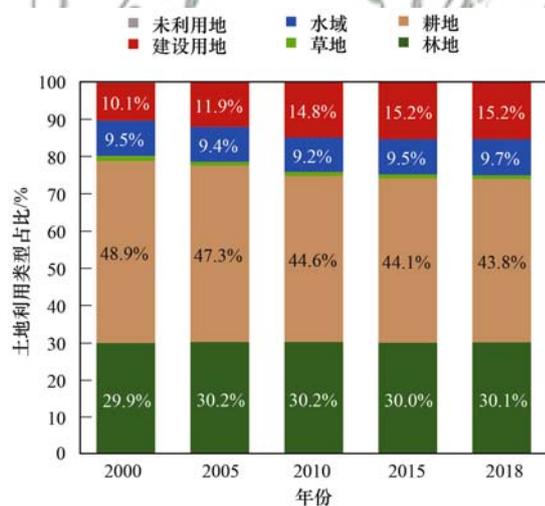


图 2 2000 ~ 2018 年长三角土地利用结构变化

Fig. 2 Changes in land use structure in the YRD from 2000 to 2018

由图 3、图 4 和表 4 可知,随着 YRD 城市化进程的推进,41 个城市 18 年来耕地面积均呈减少的趋势.其中,安徽省整体减幅最小,上海市最为明显,耕地面积减少了 1 438 km<sup>2</sup> (34.06%),这是由于 2000 ~ 2018 年上海市快速城市化所致.苏锡常地区经济发展迅速,城市化比率大幅提高,耕地面积也大幅减少,分别减少了 33%、28% 和 21%.安徽省亳州市、滁州市、六安市、池州市和淮北市耕地面积变化不大,均减少不到 10%,以上城市农业活动较多. YRD

耕地面积总量 2000 ~ 2010 年迅速减少,2010 年之后耕地面积减少速度放缓,主要是因为 2009 年 6 月国土资源部提出了“保经济增长、保耕地红线”行动<sup>[35]</sup>.

### 2.2 2000 ~ 2018 年农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放变化

图 5 所示为基于土地利用变化和氮肥施用量变化计算的 2000 ~ 2018 年 YRD 地区农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放的变化.从中可见,农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放较高的城市主要集中在苏北地区(盐城、淮安、宿迁、连云港和徐州市),该区域地势平缓、水源丰沛,利于农业发展,耕地较多、农业活动相对较多.而浙江省城市整体排放较少,因为该省城市化水平相对较高,西南部多为山地丘陵,难以形成集约化、规模化的农作物种植基地.安徽省则呈现出明显的区域差异,皖北排放明显高于皖南,淮河平原区地势平坦,河网密集,耕地占比大,NH<sub>3</sub> 排放多;南部地势较高,多山地,林地和草地较多,NH<sub>3</sub> 排放明显少于北部.

由图 6 可知,2000 ~ 2018 年 YRD 大部分城市的农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量都在减少,只有连云港市、淮安市、盐城市、嘉兴市、绍兴市、淮南市、马鞍山市、芜湖市和铜陵市 NH<sub>3</sub> 排放量有所增加,氮肥施用量的增加是 NH<sub>3</sub> 排放量增加的主要原因.其中,铜陵市和淮南市 NH<sub>3</sub> 排放量出现大幅增长的原因

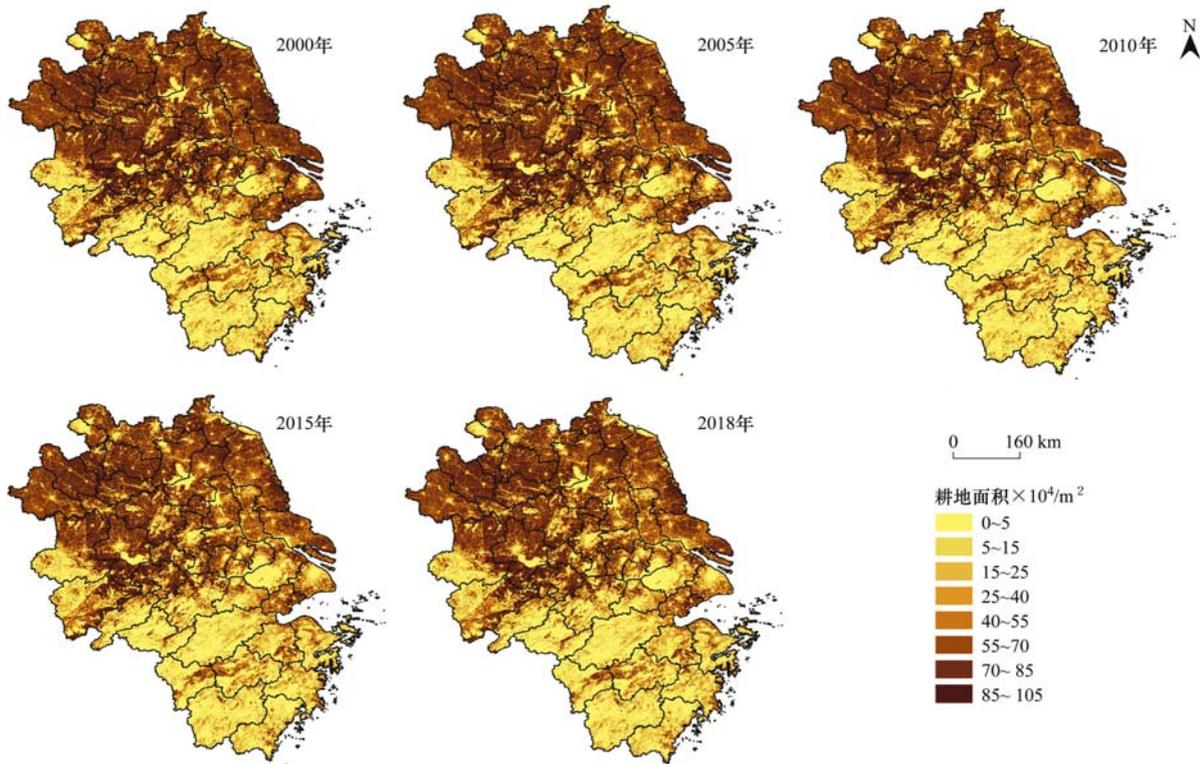


图3 2000~2018年长三角耕地面积变化

Fig. 3 Changes in cultivated land area in the YRD from 2000 to 2018

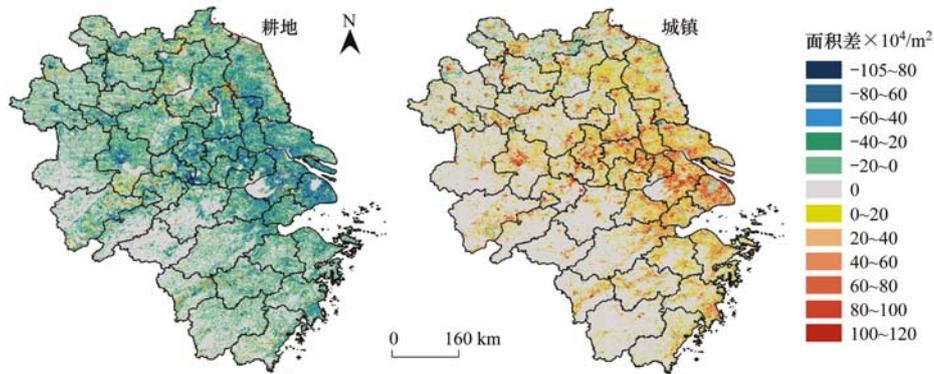


图4 2000~2018年长三角城镇及耕地面积变化

Fig. 4 Changes of urbanized and cultivated land area in the YRD from 2000 to 2018

主要是氮肥施用总量明显提高所致. 18年来,部分城市农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放量呈现先增长后降低的趋势,连云港、淮安、盐城、宿迁市和淮南等城市  $\text{NH}_3$  排放量在2000~2010年均持续增高,连云港市、盐城市、宿迁市、宣城市、池州市、六安市和安庆市在2010~2015年达到峰值随后降低,淮安市和淮南市在2015~2018年达到峰值随后降低. 有15个城市  $\text{NH}_3$  排放量在2010~2015年出现峰值,11个城市  $\text{NH}_3$  排放量在2015~2018年出现峰值,这种情况大多是由于氮肥施用引起. 41个城市中上海、苏州、徐州、合肥和亳州年排放量均大幅减少,减少量均在10 kt以上. 此外,温州市的年减排比最大,减少了85%. 但是,18年来淮南市农田生态系统  $\text{NH}_3$

排放量增高极大,年排放量增加了23 305 t(299%),主要是因为2010年以后该市在农业生产过程中大量增加氮肥用量,18年来该地区氮肥施用量(折纯)增加了81 801  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ .

江苏省的  $\text{NH}_3$  排放量整体大幅降低,在3个省中减排最大,之所以出现这种趋势,主要原因为江苏省农委自2015年制定了化肥使用量零增长行动计划<sup>[36]</sup>,近十年来全省氮肥施用量下降. 随着技术的发展和农业生产结构的改善,农业生产对肥料的需求逐渐减少<sup>[37]</sup>,部分城市氮肥施肥率校正系数有所降低,2015年后氮肥施用量急剧减少,2018年  $\text{NH}_3$  排放量达到最低水平. 浙江省全省减排最小,但减排比例最高,主要是因为该地区耕地减少最明显且氮

表 4 2000~2018 年长三角 41 个城市耕地面积/km<sup>2</sup>Table 4 Cultivated land area of 41 cities in YRD from 2000 to 2018/km<sup>2</sup>

省份	城市	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年	
上海市	上海市	4 222	3 825	3 011	2 810	2 784	
	南京市	4616	4081	3 626	3 651	3 592	
	无锡市	2332	2113	1 715	1 693	1 689	
	镇江市	2740	2518	7 511	7 541	7 503	
	常州市	2868	2634	2 324	2 296	2 254	
	苏州市	3599	3172	2 530	2 413	2 411	
	南通市	6369	5999	5 482	5 464	5 466	
	连云港市	5320	5312	5 091	5 113	5 092	
	淮安市	6534	6449	6 184	6 213	6 056	
	盐城市	11 049	11 001	10 233	10 086	10 162	
江苏省	扬州市	4 326	4 136	3 773	3 749	3 689	
	徐州市	7 846	7 749	2 219	2 218	2 215	
	泰州市	3 979	3 848	3 414	3 143	3 074	
	宿迁市	5 737	5 596	5 383	5 430	5 398	
	小计	67 314	64 608	59 486	59 008	58 601	
	浙江省	杭州市	2 644	2 310	2 098	2 057	2 076
		宁波市	2 704	2 521	2 285	2 296	2 294
		嘉兴市	2 830	2 733	2 494	2 424	2 411
		湖州市	2 223	2 021	1 821	1 683	1 658
		绍兴市	2 641	2 537	2 377	2 365	2 371
舟山市		272	252	230	220	237	
温州市		2 102	2 073	1 934	1 916	1 932	
金华市		3 119	3 035	2 829	2 797	2 792	
衢州市		1 851	1 875	1 765	1 736	1 731	
台州市		2 358	2 255	1 883	1 990	1 971	
丽水市	2 390	2 270	2 184	2 145	2 157		
小计	25 133	23 882	21 899	21 629	21 629		
安徽省	合肥市	9 038	8 675	8 349	8 205	8 216	
	淮北市	2 303	2 254	2 219	2 172	2 150	
	亳州市	7 105	7 107	7 064	6 994	6 965	
	宿州市	7 354	7 246	7 126	7 062	7 071	
	蚌埠市	4 750	4 609	4 593	4 582	4 563	
	阜阳市	7 755	7 716	7 536	7 482	7 265	
	淮南市	2 027	1 918	1 803	1 795	1 787	
	滁州市	9 862	9 803	9 379	9 311	9 231	
	六安市	9 525	9 687	9 470	9 363	9 335	
	马鞍山市	3 064	2 957	2 716	2 657	2 534	
芜湖市	4 474	4 427	4 290	4 197	4 150		
宣城市	4 617	4 597	4 479	4 380	4 309		
铜陵市	682	652	643	616	607		
池州市	2 373	2 340	2 281	2 257	2 185		
安庆市	6 794	6 737	6 654	6 588	6 521		
黄山市	1 206	1 172	1 163	1 108	1 081		
小计	82 930	81 896	79 765	78 768	77 971		
合计	179 599	174 211	164 161	162 216	160 986		

肥施用减少力度最大。安徽省之所以减排较低,是因为该省为农业大省,农业仍作为重要的经济组成部分,城市化进程较缓,许多城市农业活动密集,氮肥施用量及耕地面积减少不多。

由图 6 和图 7 可见,尽管部分城市氮肥施肥率增多,但由于耕地面积大量减少导致最终氮肥施用总量在减少,故氮肥施用源 NH<sub>3</sub> 排放量占农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放的比例呈现减小的趋势,而土壤本底源 NH<sub>3</sub> 排放量占比随之增长。近 20 年来,秸秆堆肥源 NH<sub>3</sub> 排放占比持续增高,主要是因为农业技术提高带来的农作物产量大幅提高及秸秆堆肥率的增高。

### 2.3 土地利用变化对农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放变化的影响

由表 5~7 可知,近 20 年来 YRD 地区土地利用变化对农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放的影响持续增大。相较于 2000 年,2005 年由于土地利用变化导致农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量仅减少了 23.2 kt(7.9%)。到 2010 年土地利用变化产生的影响明显增大,减少了 66.8 kt(22.7%),随后影响略有增大。2000~2015 年 YRD 大部分城市氮肥施肥率增加,并且秸秆产率及堆肥率有所提高,因此,氮肥施用变化导致农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量持续增长。但是 2015 年以后 NH<sub>3</sub> 排放量反而减小,主要是因为随着氮肥品质和种植技术的提高,以及氮肥施用量管控行动计划的实施, YRD 氮肥施肥率降低。2015~2018 年,氮肥施用变化所推动的农田生态系统 NH<sub>3</sub> 减排最明显,由 6.9 kt(2.3%)增长到 69.5 kt(23.6%),主要因为该时间段内绝大部分城市氮肥施肥率明显减少所致。2000 年以来,土地利用变化和氮肥施用变化共同导致农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量持续下降,相较于 2000 年,2015 年农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量下降 27.2%,其中土地利用变化和氮肥施用量的影响贡献分别为 91.2% 和 8.8%; 2018 年农田生态系统 NH<sub>3</sub> 排放量下降 49.8%,其中土地利用变化和氮肥施用量的影响贡献分别为 52.6% 和 47.3%。表明伴随着快速城镇化,耕地面积的减少带来 NH<sub>3</sub> 排放量明显下降;同时,随着农业作业方式的转变以及对氮肥施用量的控制, NH<sub>3</sub> 的排放也得到了显著控制。

表 5 9 种排放情景模拟结果/kt

Table 5 Simulation results of nine emission scenarios/kt

情景	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
参数	729	705	708	662	704	655	649	651	582

表 6 情景模拟结果比较/kt

Table 6 Comparison of scenario simulation results/kt

项目	2005 年			2010 年			2015 年			2018 年		
	S2 - S1	S3 - S2	S3 - S1	S2 - S1	S3 - S2	S3 - S1	S6 - S1	S7 - S6	S7 - S1	S8 - S1	S9 - S8	S9 - S1
参数	-23.2	2.1	-21.1	-66.8	42.6	-24.2	-73.2	-6.9	-80.1	-77.4	-69.5	-146.9

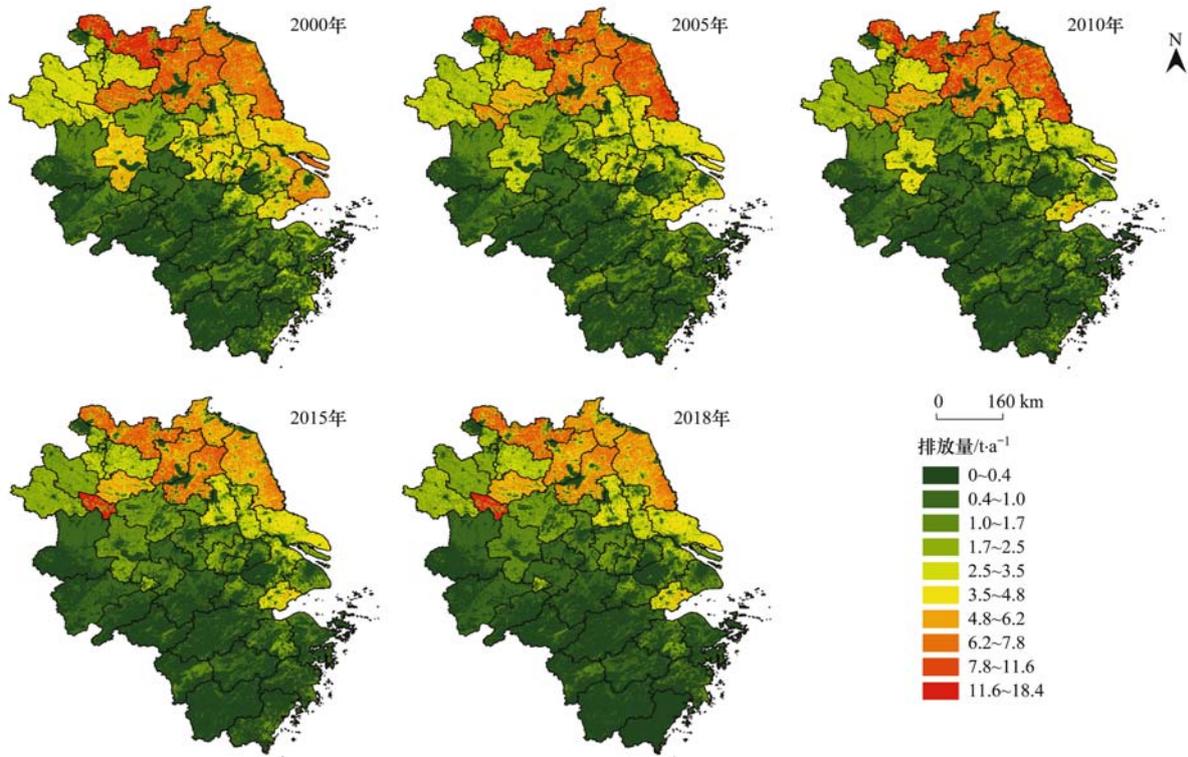


图 5 2000 ~ 2018 年长三角农田生态系统氨排放变化

Fig. 5 Changes in ammonia emissions from agriculture ecosystem in the YRD from 2000 to 2018

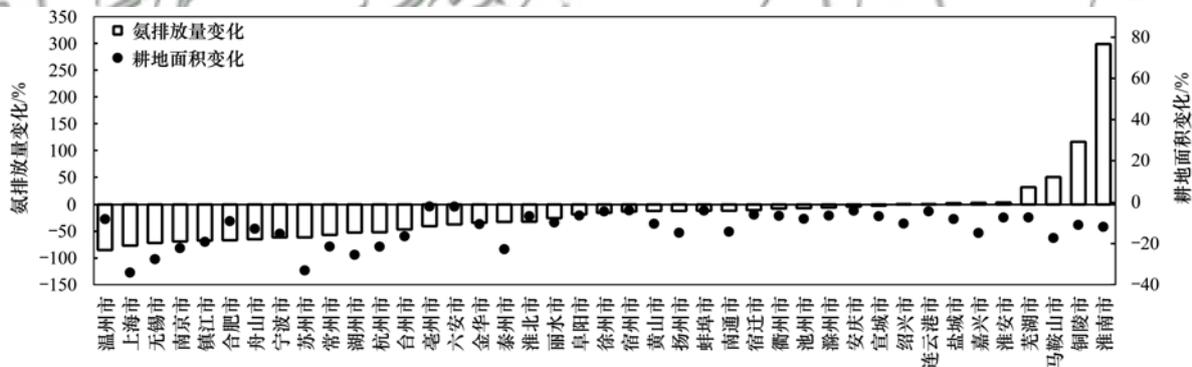


图 6 2000 ~ 2018 年长三角各市农田生态系统氨排放及耕地面积变化

Fig. 6 Changes in cultivated ammonia emissions from agricultural ecosystem and land area in YRD from 2000 to 2018

表 7 2005 ~ 2018 年相较于 2000 年在不同影响因素下对农田生态系统氨排放变化的影响/%

Table 7 Changes in ammonia emissions from agriculture under different influencing factors during 2005-2018 compared to 2000/%

年份	土地利用	氮肥施用	土地利用 + 氮肥施用	贡献率(土地利用: 氮肥施用)
2000	1	1	1	/
2005	-7.9	0.7	-7.2	/
2010	-22.7	14.5	-8.2	/
2015	-24.8	-2.3	-27.2	91.2: 8.8
2018	-26.2	-23.6	-49.8	52.6: 47.3

### 2.4 不确定性分析

土地利用类型数据的获取上,利用红外航空遥感图像解译具有一定的不确定性.  $\text{NH}_3$  排放的估算也具有一定的不确定性,主要是因为精确活动水平获取的困难性和排放因子数据匹配的问题. 本研究农田生态系统  $\text{EF}(\text{NH}_3)$  来自文献[34],根据该地区

实际情况校正排放因子,参数的选择还无法做到完全本地化,因此最终采用的排放因子会在一定程度上影响  $\text{NH}_3$  排放量的估算结果.  $\text{NH}_3$  排放活动水平中的氮肥施用量、固氮植物种植面积、秸秆堆肥的作物产量来自各市统计年鉴(部分来自农业农村局公布数据或省统计年鉴),由于个别城市氮肥施用量

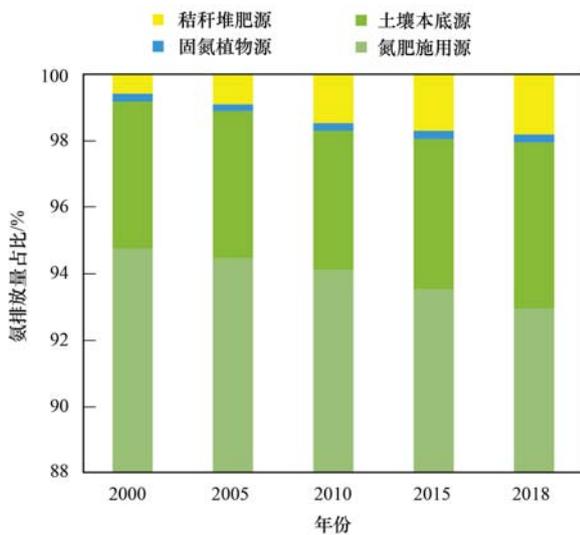


图7 2000~2018 年长三角农田生态系统各部分氨排放占比

Fig. 7 Composition of ammonia emissions from different sources of agricultural ecosystem in the YRD from 2000 to 2018

通过推算而来、固氮植物和秸秆堆肥数据不全,各类氮肥使用比例选取相关文献中的数据,以上因素对各来源的  $\text{NH}_3$  排放量均具有一定影响;耕地面积来自1:50 000红外航空遥感影像解译,在土地类型的分辨上存在一定的误差,因此,对土地利用变化和土壤本底源  $\text{NH}_3$  排放量均有一定影响.另外,本文在情景设置上虽然尽可能将土地利用的影响分离出来,但是不能做到将其他间接潜在影响因素完全剔除.

### 3 结论

(1)伴随着快速城市化进程,YRD 耕地面积逐渐减少,耕地面积从2000年的276 269  $\text{km}^2$  (49%)减少到2018年的244 001  $\text{km}^2$  (44%).土地利用变化对农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放的影响显著,表现在直接带来土壤本底  $\text{NH}_3$  排放变化,以及间接导致氮肥施用量变化进一步带来  $\text{NH}_3$  排放变化.2000~2018年,YRD 氮肥施用产生的  $\text{NH}_3$  排放量从690  $\text{kt}\cdot\text{a}^{-1}$ 减少到541  $\text{kt}\cdot\text{a}^{-1}$  (减少22%);土壤本底产生的  $\text{NH}_3$  排放量从32  $\text{kt}\cdot\text{a}^{-1}$ 减少到29  $\text{kt}\cdot\text{a}^{-1}$  (减少9%).

(2)由于土地利用变化所驱动的  $\text{NH}_3$  减排在2005~2010年十分明显,2010年以后减排不大.相较于2000年,由于氮肥施用变化导致2010年农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放增长了14.5%,2015年随着管控力度的加强急剧变化,减少了2.3%,随后大幅减少,2018年减排了23.6%.

(3)近20年来YRD 城镇化进程加快及农业技术提高,土地利用和氮肥施用变化显著,导致农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放量大幅减少.相较于2000年,二者

共同导致农田生态系统  $\text{NH}_3$  排放减少比例在2005年和2010年仅为7.2%和8.2%,到2018年达到49.8%,其中土地利用变化和氮肥施用的影响贡献分别为52.6%和47.3%.研究表明,伴随着快速城镇化,耕地面积的减少带来  $\text{NH}_3$  排放量明显下降;同时,随着农业作业方式的转变以及对氮肥施用量的控制, $\text{NH}_3$  的排放也得到了显著控制.

(4)由于农业源  $\text{NH}_3$  对于大气  $\text{PM}_{2.5}$  贡献突出,而农业源  $\text{NH}_3$  排放的主要来源之一为氮肥施用,建议控制氮肥施用量、优化氮肥施用方式,进一步降低  $\text{NH}_3$  排放水平.

### 参考文献:

- [1] Galloway J N, Zhao D W, Thomson V E, *et al.* Nitrogen mobilization in the United States of America and the People's Republic of China [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30** (10-11): 1551-1561.
- [2] Niu Y W, He L Y, Hu M, *et al.* Pollution characteristics of atmospheric fine particles and their secondary components in the atmosphere of Shenzhen in summer and in winter [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 2006, **49** (5): 466-474.
- [3] Ianniello A, Spataro F, Esposito G, *et al.* Chemical characteristics of inorganic ammonium salts in  $\text{PM}_{2.5}$  in the atmosphere of Beijing (China) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (21): 10803-10822.
- [4] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514** (7521): 218-222.
- [5] Wu S P, Schwab J, Yang B Y, *et al.* Two-years  $\text{PM}_{2.5}$  observations at four urban sites along the coast of southeastern China [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2015, **15** (5): 1799-1812.
- [6] Li Y C, Shu M, Ho S S H, *et al.* Effects of chemical composition of  $\text{PM}_{2.5}$  on visibility in a semi-rural city of Sichuan Basin [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2018, **18** (4): 957-968.
- [7] Huang J Y, Xiong R N, Fang L, *et al.* Estimation of interannual trends of ammonia emissions from agriculture in Jiangsu province from 2000 to 2017 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, **13** (3): 268-273.
- [8] Wu Y Y, Gu B J, Erisman J W, *et al.*  $\text{PM}_{2.5}$  pollution is substantially affected by ammonia emissions in China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 86-94.
- [9] Behera S N, Sharma M, Aneja V P, *et al.* Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20** (11): 8092-8131.
- [10] Pozzer A, Tsimpidi A P, Karydis V A, *et al.* Impact of agricultural emission reductions on fine-particulate matter and public health [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17** (20): 12813-12826.
- [11] Clarisse L, Clerbaux C, Dentener F, *et al.* Global ammonia distribution derived from infrared satellite observations [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2** (7): 479-483.
- [12] Huang X, Song Y, Li M M, *et al.* A high-resolution ammonia emission inventory in China [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26** (7), doi: 10.1029/2011GB004161.
- [13] Zeng Y, Tian S L, Pan Y P. Revealing the sources of

- atmospheric ammonia: a review[J]. *Current Pollution Reports*, 2018, **4**(3): 189-197.
- [14] Zhang L, Chen Y F, Zhao Y H, *et al.* Agricultural ammonia emissions in China: reconciling bottom-up and top-down estimates[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 339-355.
- [15] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**(2): 153-226.
- [16] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, *et al.* How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(10): 636-639.
- [17] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [18] Fu H, Luo Z B, Hu S Y. A temporal-spatial analysis and future trends of ammonia emissions in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138897.
- [19] Zhang X M, Wu Y Y, Liu X J, *et al.* Ammonia emissions may be substantially underestimated in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12089-12096.
- [20] Kang Y N, Liu M X, Song Y, *et al.* High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(4): 2043-2058.
- [21] Xu P, Zhang Y S, Gong W W, *et al.* An inventory of the emission of ammonia from agricultural fertilizer application in China for 2010 and its high-resolution spatial distribution[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**: 141-148.
- [22] Xu P, Liao Y J, Lin Y H, *et al.* High-resolution inventory of ammonia emissions from agricultural fertilizer in China from 1978 to 2008[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1207-1218.
- [23] 余飞翔, 晁娜, 吴建, 等. 浙江省2013年农业源氨排放清单研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(10): 41-46.  
Yu F X, Chao N, Wu J, *et al.* Research on agricultural ammonia emission inventory of Zhejiang Province in 2013 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(10): 41-46.
- [24] 赵睿东, 于兴娜, 侯新红, 等. 浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3976-3984.  
Zhao R D, Yu X N, Hou X H, *et al.* Establishment and spatial distribution of anthropogenic ammonia emission inventory in Zhejiang Province[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3976-3984.
- [25] Yu X N, Shen L, Hou X H, *et al.* High-resolution anthropogenic ammonia emission inventory for the Yangtze River Delta, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126342.
- [26] Ma S Y. High-resolution assessment of ammonia emissions in China: inventories, driving forces and mitigation [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **229**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117458.
- [27] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2006.
- [28] 上海市统计局, 国家统计局上海调查总队. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2006, 2011, 2016, 2019.
- [29] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2006, 2011, 2016, 2019.
- [30] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2006, 2011, 2016, 2019.
- [31] 安徽省统计局, 国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2006, 2011, 2016, 2019.
- [32] 董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(8): 1611-1617.  
Dong Y Q, Chen C H, Hang C, *et al.* Anthropogenic emissions and distribution of ammonia over the Yangtze River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(8): 1611-1617.
- [33] Zhou Y, Xing X F, Lang J L, *et al.* A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 2839-2864.
- [34] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/b34e5450ba1aa8114431d9fd.html>, 2014-08-19.
- [35] 梁杰. 保经济增长 保耕地红线[J]. *党建文汇*, 2009, (7): 52.
- [36] 江苏省农业委员会. 到2020年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/ztl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914\\_4827907.htm](http://www.moa.gov.cn/ztl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827907.htm), 2015-04-15.
- [37] 宋知远, 孙晓玲, 许雅婷, 等. 江苏省化肥施用强度时空演变及差异分析[J]. *安徽农业科学*, 2018, **46**(18): 5-8.  
Song Z Y, Sun X L, Xu Y T, *et al.* Spatio-temporal evolution and difference analysis of chemical fertilizer intensity in Jiangsu Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(18): 5-8.

## CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission .....	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM <sub>2.5</sub> Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period .....	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta Based on Grids .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration .....	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China .....	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China .....	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides .....	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake .....	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer .....	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City .....	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland .....	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou .....	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan .....	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface .....	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in Agricultural Region of Qingdao .....	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season .....	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments .....	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland .....	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay .....	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment .....	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China .....	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed .....	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles .....	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents .....	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants .....	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant .....	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge .....	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants .....	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR .....	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source .....	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System .....	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors .....	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure .....	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent .....	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 .....	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions .....	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil .....	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil .....	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province .....	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen .....	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil .....	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials .....	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau .....	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain .....	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost .....	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)