

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略
楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铨, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤碳赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性柞木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑾, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布

董斯齐^{1,2}, 黄翀^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 入海河流携带的陆源总氮污染是海域无机氮的主要来源, 粤港澳大湾区 (GBA) 近岸海域无机氮污染严重, 劣四类水质分布广泛, 厘清粤港澳大湾区陆域总氮排放规模、来源结构和排海压力, 对海域氮污染治理有重要意义. 基于土地利用、社会经济统计和污染普查资料等多源数据, 从行政区单元和流域单元估算粤港澳大湾区及周边城市的总氮排放规模、来源结构及其区域差异. 结果表明: ①研究区陆域总氮排放量约 33.25 万 t, 居民生活是主要污染源, 占 55.4%, 其次为种植业, 占 28.18%, 养殖业和工业生产的污染贡献相对有限. ②总氮排放的区域差异明显, 粤港澳大湾区 11 个城市的总氮排放量 (23.14 万 t) 显著高于其周边 8 个城市 (10.11 万 t). ③海域污染分布状况与陆源氮污染排放压力强度具有空间一致性, 东江流域、西北江三角洲流域和潭江流域污染排放量最大, 其岸段承载的排放压力也最大, 对应的伶仃洋、珠海金湾海域和黄茅海污染严重.

关键词: 粤港澳大湾区 (GBA); 陆源污染; 氮; 污染压力; 空间分布

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5384-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202102105

Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

DONG Si-qi^{1,2}, HUANG Chong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Total nitrogen pollution from land-based sources carried by rivers is the main source of inorganic nitrogen entering the sea. Inorganic nitrogen pollution in the coastal waters of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) is a serious problem. The water quality of an adjacent large area of the sea is classified as poor-category IV. Therefore, clarification of the scale, structure, and discharge pressure of nitrogen emissions from the land area of the GBA is needed to manage marine nitrogen pollution. Based on multi-source data, including land use, socio-economic statistics, and pollution source census information, the scale, source structure, and regional differences of total nitrogen discharge in GBA and surrounding cities were evaluated using administrative and watershed units. The results show that: ①The total nitrogen emissions from the study area are approximately 332 500 t. Residential waste is the main source of pollution, accounting for 55.4%, followed by cultivation, with 28.18%, while the contribution from animal husbandry and industrial production is relatively limited. ②The regional differences of total nitrogen emissions are obvious, and the total emissions from GBA (231 400 t) are significantly higher than those from neighboring cities (101 100 t). ③The distribution of marine pollution and intensity of land-based nitrogen pollution emissions are spatially consistent, which indicates that there is a large number of pollution emissions in the East River Basin, Northwest River Delta Basin, and Tan River Basin; the shoreline sections belonging to the basins carry the greatest emission pressure, lead to serious pollution in the Lingding Sea, Jin Bay, and Huangmao Sea.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA); land-based pollution; nitrogen; pollution pressure; spatial distribution

陆源污染是近岸海域生态环境恶化的主要原因^[1-6]. 在全球尺度上, 陆源污染物占海洋污染来源的 80%^[7], 其中 85% 是经河流输入^[8]. 我国近岸水环境污染也以陆源污染为主^[5], 其中, 无机氮是影响我国近岸海域水质环境的主要污染因子, 而入海河流携带的陆源总氮是海域无机氮的主要来源^[9,10]. 改善近岸海域水环境, 关键在于陆源总氮的排放控制, 但陆域社会经济活动种类繁多, 污水排放强度、结构差异巨大, 因此厘清各类污染源的总氮排放量底数、来源结构和空间分布等特征尤为重要.

诸多学者对我国主要河流流域^[11-13] 和海湾^[14,15] 的陆域污染排放量进行了研究, 尤以非点源污染为主. 非点源污染具有空间上的广泛性和时间上的不确定性^[16], 其负荷计算方法应用较多的有:

统计分析法^[17,18]、输出系数法^[15,19] 和机制模型^[20,21] 等. 其中, 输出系数法将非点源污染产生的复杂过程简化, 对监测数据的依赖性较小, 侧重于分析污染源规模和强度, 适用于范围较大的社会经济活动污染排放压力估算, 已被广泛应用^[22-24]. 但这些研究多以单一行政区或流域为研究对象, 对其内部不同区域之间的总氮污染来源结构的探索仍不够充分, 同时对海域不同岸段污染排海压力及其陆域来源缺乏空间定位, 因而难以制定区域协调和陆海统筹的环境管理政策提供有效支撑.

近年来, 粤港澳大湾区 (大湾区, GBA) 经济迅

收稿日期: 2021-02-12; 修订日期: 2021-04-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41890854)

作者简介: 董斯齐 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境容量与调控, E-mail: dongsiqi95@163.com

* 通信作者, E-mail: huangch@leis.ac.cn

猛发展,工农业和生活排污随之增加,近岸海域由于接纳大量含氮污水,水质持续呈重度富营养化^[25]. 2010~2019年,大湾区近岸海域无机氮浓度持续超标^[26],水质长期为劣四类,海域氮污染风险居高不下^[27]. 本文以大湾区为研究对象,从行政单元和流域单元两个角度,分析研究区内部各城市和流域间总氮排放空间分布和结构,将流域污染排放压力分配至海域岸段,解析陆源污染压力与海域环境污染之间的空间对应关系,以期为大湾区陆源总氮污染排放总量控制及海域污染防治研究提供决策支持.

1 材料与方法

1.1 研究区与数据

1.1.1 研究区概况

研究区域主要包括大湾区 11 个城市(肇庆、东莞、珠海、江门、广州、深圳、惠州、佛山、中山、香港及澳门). 由于上游地区污染物排放对大湾区入海污染总量有重要影响,将大湾区周边的 8 个城市(阳江、云浮、清远、韶关、河源、汕尾、梧州和贺州)考虑为外来污染源,将其纳入氮污染排放估算的研究范围,总面积 $10.41 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于东经 $110^{\circ}19' \sim 116^{\circ}13'$,北纬 $21^{\circ}30' \sim 25^{\circ}31'$ 之间(图 1). 研究区整体地势为北高南低,地形相对封闭,属亚热带季风气候,雨量充沛,但年内分布不均. 区域

内河网密布,水道纵横交错,相互贯通,汇集了西江、北江、东江、潭江和漠阳江等众多河流. 研究区河口海湾众多,如珠江河口、大亚湾、大鹏湾、广海湾及海陵湾等.

1.1.2 数据与处理

本文所使用的数据包括社会经济统计数据、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、土地利用数据以及污染普查资料等. 研究区 2018 年社会经济统计数据来自各市统计年鉴和联合国粮农组织数据库,2018 年 1 km 人口空间分布数据来自 LandScan 全球人口动态统计分数数据集(<https://landscan.ornl.gov/index.php/>),2018 年 30 m 土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=264>),DEM 来自 MERIT DEM (multi-error-removed improved-terrain DEM) (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/),输出系数参考文献资料和污染源普查手册.

本文基于与总氮污染排放相关的社会经济统计指标对大湾区陆源污染排放量进行估算,由于社会经济数据以行政区为统计单元,为实现社会经济统计数据由行政单元向流域单元的转换,基于用地面积权重法^[28],以行政单元计算每类土地利用类型的面积,再计算各社会经济指标在不同土地利用类型

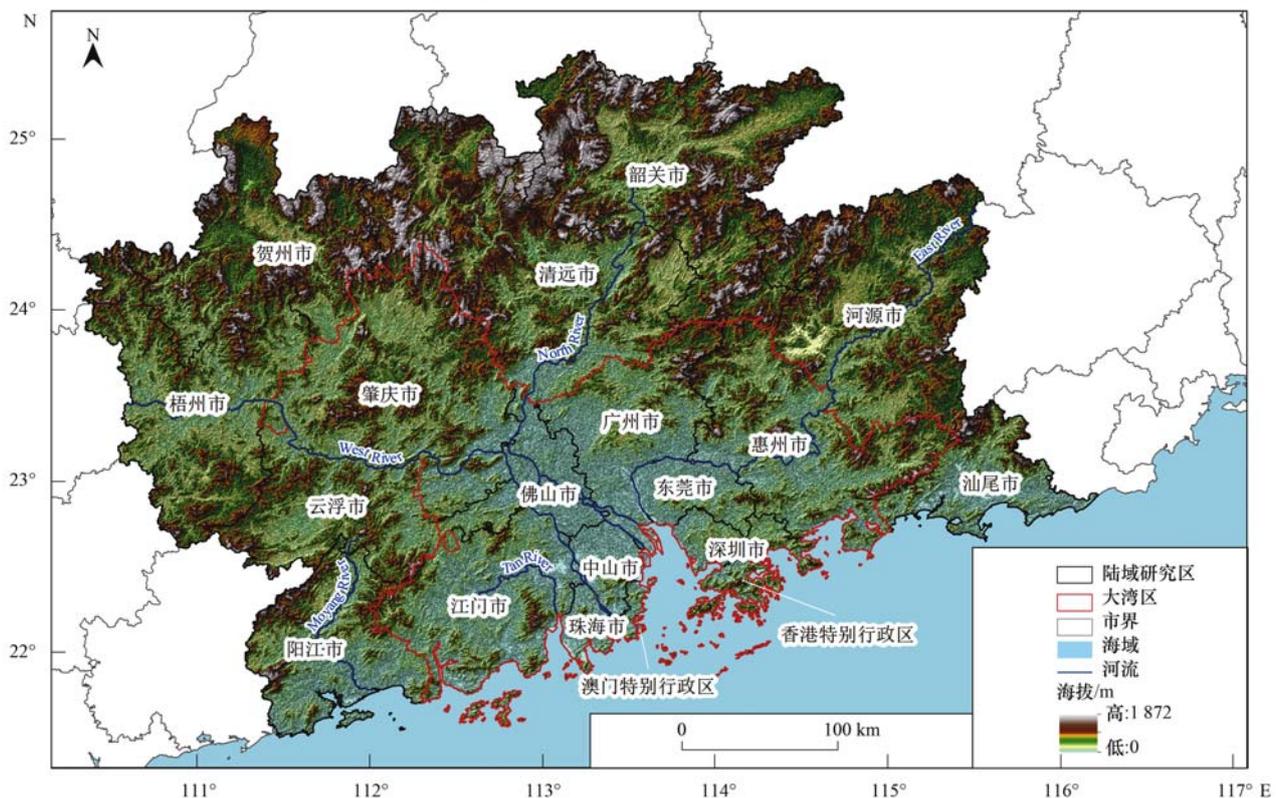


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Location of the study area

的密度值[公式(1)],将社会经济统计数据的空间表征由行政区替换为与之具有空间依附关系的土地利用类型单元.

$$d_i = \frac{S}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

式中, i 为一种土地利用类型, n 为社会经济统计指标所对应的行政单元内土地利用类型数; S 为行政单元的统计指标值; d_i 为行政单元内第*i*种土地利用类型的统计指标密度值, A_i 为行政单元内第*i*种土地利用类型的面积.

本文将总氮污染源分为林业种植(主要为果树种植)、农田种植、畜禽养殖、水产养殖、居民生活和工业生产等6类社会经济活动,参考王辉^[29]研究成果,构建6类活动与土地利用类型的对应关系

表1 土地利用类型与社会经济活动对应关系

Table 1 Correspondence between land use types and socio-economic activities

社会经济活动	土地利用类型	社会经济活动	土地利用类型
农田种植	水田和旱地	水产养殖	坑塘
林业种植	园地	居民生活	城镇用地和农村居民点
畜禽养殖	高、中覆盖草地	工业生产	工矿用地和城镇用地

1.2 研究方法

在对社会经济统计数据进行空间化后,首先基于DEM对研究区进行了流域划分,然后使用输出系数法构建6类社会经济活动的总氮排放估算模型,在此基础上对各行政单元和流域分区的总氮排放规模和来源结构进行估算,并采用岸段污染压力来表述流域氮污染排海强度.

1.2.1 流域划定

陆源水污染主要是通过河流入海,因此,通常将水污染源的的范围界定为流域,本文基于修复后的DEM数据,在Arc Hydro Tool水文分析工具的支持下,使用层级嵌套多尺度流域提取方法^[30],来划定流域边界,将大湾区及周边地区划分为L1~L8共8个流域(图2),各流域拥有入海口或连续岸线且空间不重叠,各流域内水污染物由入海口或沿海岸线排入大湾区近岸海域,近岸海域为由陆域研究区的岸段两 endpoint 向离岸方向至领海基线所围成海域范围.

1.2.2 污染排放量估算

采用输出系数法来估算林业种植、农田种植、畜禽养殖、水产养殖和居民生活的总氮排放量,其模型方程如下:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i \times A_i \times I_i + P \quad (2)$$

式中, L 为总污染负荷量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$), n 为污染源(人

(表1),将土地利用数据的26个二级类合并为8类,分别为水田、旱地、园地、高、中覆盖草地、坑塘、城镇用地、农村居民点和工矿用地,将社会经济统计数据空间化在对应的土地利用类型上,提高总氮污染排放量估算准确性.需要说明的是,现有的区域尺度的土地利用解译很难提取出规模化的养殖设施用地,因此,本研究利用中、高覆盖草地代表畜禽养殖用地^[29].这种方式在以牲畜放牧为主的区域较为合理,而在规模化家禽养殖地区,可能会存在一定偏差.

由于居民数量分布具有明显的聚集特征,因此对于城镇农村人口,本文使用2018年Landscan 1km分辨率的人口分布数据产品,用城镇用地和农村居民用地进行掩膜处理,基于统计年鉴对其进行修正,使得居民生活源的总氮排放空间分布更符合实际.

口、种植和养殖等)的数量, E_i 为第*i*种污染源的污染物输出系数, A_i 为第*i*类污染源的指标项, I_i 为第*i*种污染源的污染输入量, P 为降水输入的污染物量,本文未考虑降雨因素的影响.

参照模型所需参数,综合考虑指标的可操作性和获取便利性,筛选出影响总氮污染排放的社会经济指标(表2).

表2 与氮污染排放有关的主要社会经济指标

Table 2 Main socio-economic indicators of the impact of nitrogen emissions

指标类别	指标项
农田种植	农用氮肥施用量、复合肥施用量
林业种植	农用氮肥施用量、复合肥施用量
畜禽养殖	猪、肉牛、奶牛、猪和鸡存栏量
水产养殖	鱼、虾、蟹和贝类产量
居民生活	城镇人口、城市人均日生活用水量、农村人口和农村人均日生活用水量

输出系数模型的合理应用关键在于确定输出系数的值,现场监测和查阅文献是确定系数值的两个基本途径,本文主要应用文献查阅法来确定各污染源的输出系数.

农业种植、林业种植的总氮排放输出系数:主要考虑水田、旱地和园地中施用的农用氮肥随地表径流或地下径流进入水体.园地氮肥施用量与水田和旱地氮肥施用量按3:1分配^[31],复合肥施用量按33%折纯为氮肥施用量^[32].水田、旱地和园地的总

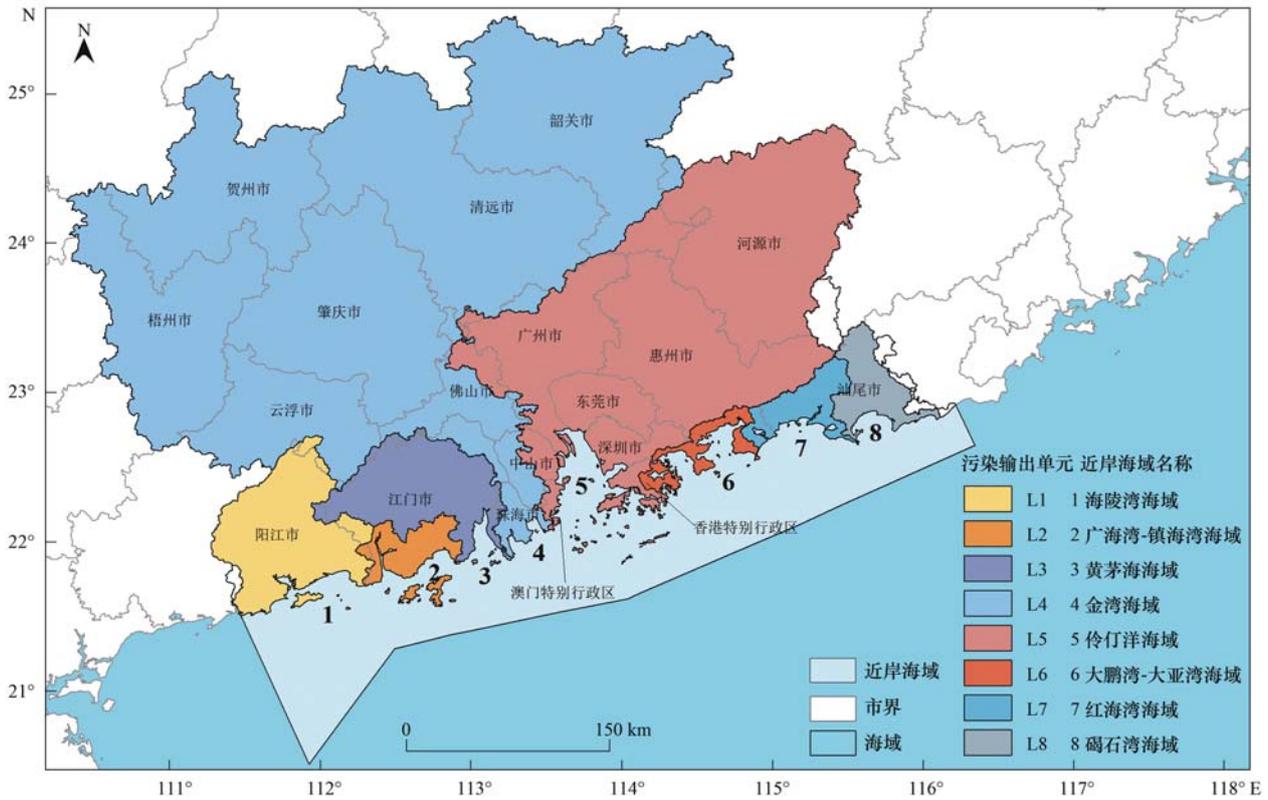


图2 流域单元划定结果

Fig. 2 Result of watershed delineation

氮入河系数取 1.052%、1.079% 和 1.331%^[35]。

畜禽养殖总氮排放输出系数：主要考虑各种畜禽排泄物中的总氮含量和进入水体的量来确定输出系数，各类型畜禽的排污系数和入河系数参考文献[34]确定，广东省 2018 年畜禽污水综合利用率约为 64%^[35]，根据文献[36]，取总氮去除率为 11.4%，对总氮输出系数进行修正，具体数值见表 3。

表3 畜禽养殖总氮输出系数^[34,36]

畜禽类	猪	奶牛	肉牛	鸡
排污系数/kg·(a·只) ⁻¹	31.37	185.89	104.1	0.48
修正后的排污系数/kg·(a·只) ⁻¹	27.79	164.69	92.23	0.43
入河系数	0.053 4	0.056 8	0.055	0.084 7

水产养殖总氮输出系数：主要考虑各种水产品排泄物的总氮含量，使用文献[37]中的各种淡水养殖品种的排污系数，本研究主要针对池塘养殖，查得研究区的池塘养殖输出系数如表 4 所示。由于香港、澳门、梧州市及贺州市的淡水水产养殖产量统计年鉴仅统计了总量，因此对该 4 个城市的水产养殖总

表4 水产养殖总氮输出系数^[37]

水产类	鱼	虾	蟹	贝
输出系数/g·(kg·a) ⁻¹	4.238	2.672	2.469	4.103

氮输出系数取 4 种水产类型的平均值，为 3.371 g·(kg·a)⁻¹。

居民生活总氮排放输出系数：主要考虑人类生活过程中产生污水的总氮含量。生活污水排放量基于人均日生活用水量和折污系数计算^[38]。根据各城市的发达程度确定城镇和农村居民总氮输出系数(表 5)。2018 年广东省城镇生活污水处理率为 94.84%，污水总氮脱氮率为 26%^[39]，考虑到城镇生活污水的净化处理因素，在此基础上对处理后的城镇生活污水总氮输出系数进行修正。

表5 居民生活总氮输出系数^[38,39]/mg·L⁻¹

城市类别	城镇、农村居民污水总氮输出系数	城镇污水处理后的总氮输出系数
较发达	22.8	16.87
一般	21.8	16.13

工业生产的总氮排放量估算：大湾区工业门类齐全，各行业排污特征差异较大，采用输出系数法估算工业各行业的污染物排放量不具有可操作性，本文利用广东和广西第二次工业污染源普查数据，基于单位工业废水总氮含量估算工业生产的总氮排放量：

$$TN_{2018} = \sum_{i=1}^n \frac{TN_{2017}}{IW_{2017}} \times IW_i \quad (3)$$

式中，n 为城市个数，TN₂₀₁₇ 为广东省或广西壮族自治区

区 2017 年第二次污染源普查结果中的工业源总氮排放量,广东为 1.31 万 t,广西为 0.47 万 t; IW_{2017} 为 2017 年工业废水排放量, IW_i 为 2018 年 i 城市工业废水排放量,假设 2018 年较 2017 年排放强度保持不变,则 TN_{2018} 为 2018 年工业源总氮排放总量。

1.2.3 岸段污染压力强度

岸段污染压力强度指每千米海岸线上承载的相对应的陆源污染排放负荷量的大小^[40],反映单位长度海岸线上承载的陆源污染排放量,本文使用岸段污染压力强度来表达流域污染排放对海洋环境的压力,计算公式如式(4):

$$P = S/C \quad (4)$$

式中, P 为岸段污染压力强度, $t \cdot (km \cdot a)^{-1}$, S 为流域内的年总氮污染排放量, C 为流域对应的岸段长度。

2 结果与分析

2.1 不同城市总氮污染排放结构与空间分布

以研究区 19 个城市为单元,对居民生活、林业种植、农田种植、畜禽养殖、水产养殖和工业生产总氮排放进行估算,得出 2018 年大湾区及周边地区总氮污染排放量为 33.25 万 t,污染源结构如表 6 所示。

表 6 2018 年各社会经济活动总氮排放量和结构

Table 6 Nitrogen pollution emissions from socio-economic activities and emission structures in 2018

项目	城镇生活	农村生活	林业种植	农田种植	工业生产	畜禽养殖	水产养殖	总计
总氮排放量/万 t	13.48	4.94	5.62	3.75	1.18	2.98	1.27	33.25
占比/%	40.54	14.86	16.9	11.28	3.55	8.96	3.82	100

居民生活污染排放是大湾区总氮污染的最主要来源,城镇居民排放量约 13.48 万 t,占总量的 40.54%,农村居民总氮污染排放量约 4.94 万 t,约占总量的 14.86%,城镇居民显著高于农村居民. 农业污染源方面,林业种植总氮污染排放量为 5.62 万 t,约占总量的 16.9%,是研究区第二大污染源. 农田种植总氮污染排放量为 3.75 万 t,约占总量的 11.28%,畜禽养殖和水产养殖的总氮污染排放量分别为 2.98 万 t 和 1.27 万 t,约占总量的 8.96% 和 3.82%. 工业生产

总氮污染贡献最低,2018 年工业生产总氮排放量为 1.18 万 t,占总量的 3.55%. 整体上看,总氮污染主要来源于居民生活和种植业,二者占总量的 80% 以上,养殖业与工业不是主要来源。

以行政区为单元统计各污染源的总氮污染排放量,得到大湾区 11 个城市及周边 8 个城市的总氮污染排放量的空间分布(图 3)及排放结构(表 7)。

总氮排放量最大的是广州,超过 4 万 t,其次为佛山,为 3.46 万 t,东莞、深圳、肇庆、江门和清远

表 7 大湾区及周边城市总氮污染排放结构/万 t

Table 7 Composition of nitrogen pollution emission in cities in and around GBA/10⁴ t

区域	城市	居民生活	工业生产	林业种植	农田种植	畜禽养殖	水产养殖	合计
大湾区城市	广州市	3.54	0.21	0.38	0.25	0.07	0.13	4.58
	佛山市	2.71	0.15	0.13	0.08	0.11	0.28	3.46
	东莞市	2.39	0.21	0.02	0.01	0	0.02	2.65
	深圳市	2.45	0.08	0.03	0.02	0.01	0	2.59
	肇庆市	0.51	0.06	0.82	0.55	0.37	0.19	2.5
	江门市	0.84	0.1	0.51	0.34	0.23	0.17	2.19
	香港	1.7	0	0.09	0.06	0.01	0	1.86
	惠州市	0.88	0.06	0.38	0.25	0.16	0.03	1.76
	中山市	0.74	0.07	0.05	0.03	0.01	0.13	1.03
	珠海市	0.25	0.04	0.03	0.02	0.03	0.08	0.45
	澳门	0.07	0	0	0	0	0	0.07
	合计	16.08	0.98	2.44	1.61	1	1.03	23.14
	占比/%	69.49	4.24	10.54	6.96	4.32	4.45	100
周边城市	清远市	0.43	0.04	0.74	0.5	0.38	0.05	2.14
	河源市	0.21	0.01	0.56	0.38	0.15	0.02	1.33
	韶关市	0.37	0.08	0.42	0.28	0.26	0.03	1.44
	阳江市	0.34	0.01	0.37	0.25	0.31	0.04	1.32
	梧州市	0.22	0.03	0.29	0.19	0.28	0.02	1.03
	贺州市	0.2	0.01	0.23	0.16	0.38	0.02	1
	云浮市	0.26	0.01	0.3	0.2	0.16	0.04	0.97
	汕尾市	0.31	0.01	0.28	0.19	0.07	0.02	0.88
	合计	2.34	0.2	3.19	2.15	1.99	0.24	10.11
	占比/%	23.15	1.98	31.55	21.27	19.68	2.37	100

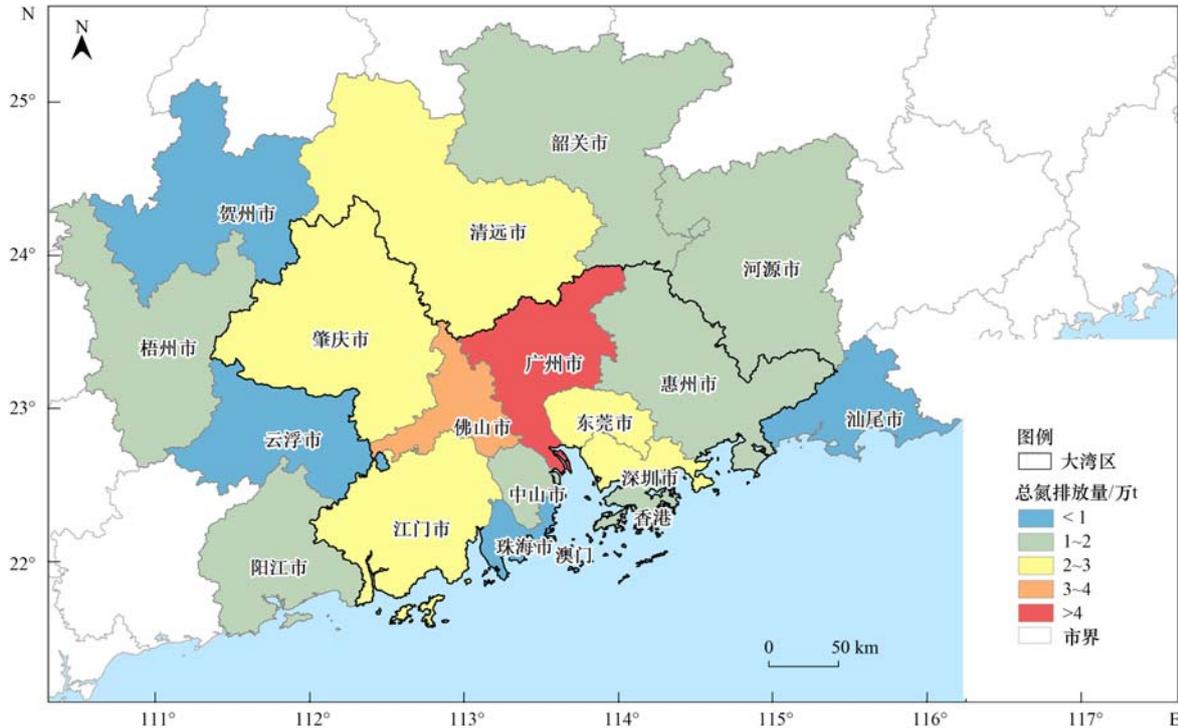


图 3 大湾区及周边城市总氮污染排放量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of nitrogen pollution emission in cities in and around GBA

均超过 2 万 t. 大湾区内, 香港、惠州和中山小于 2 万 t, 珠海和澳门小于 1 万 t. 大湾区周边 8 个城市除清远外, 其他城市总氮排放量均小于 1 万 t.

总量上看, 大湾区 11 个城市总氮排放量为 23.14 万 t, 周边 8 个城市为 10.11 万 t, 大湾区约为周边的两倍多. 从污染源看, 大湾区居民生活和工业生产的总氮排放量分别为 16.08 万 t 和 0.98 万 t, 分别约为周边城市的 8 倍和 5 倍, 而周边城市的种

植业和养殖业总氮排放更高. 区域内部结构上, 大湾区与周边城市的总氮污染来源结构存在明显差异, 大湾区内, 总氮主要来源于居民生活, 占总量 70% 左右, 而种植业在周边城市的占比更高, 为 52.84%, 畜禽养殖业也是重要污染源, 占比为 19.68%.

2.2 流域总氮排放规模与结构

将各城市总氮排放量汇总到 8 个流域单元上, 获得流域总氮排放的空间分布(图 4), 表 8 显示了

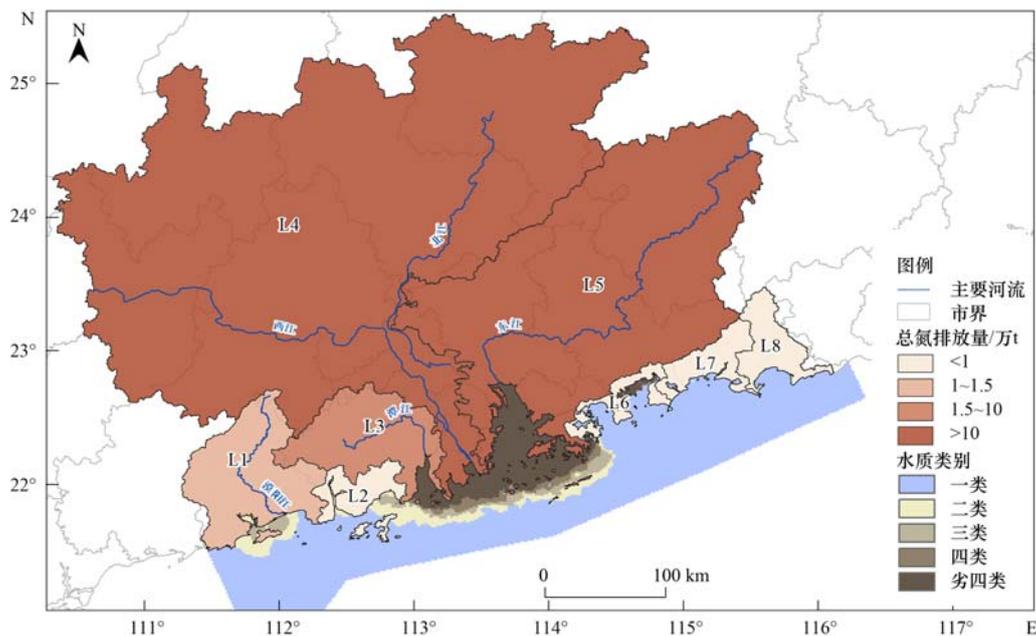


图 4 各流域总氮排放量及其对应的近岸海域无机氮污染状况

Fig. 4 Total nitrogen emissions from each watershed and marine inorganic nitrogen pollution

各流域的总氮排放规模和结构. 总氮基本来自于 L5 和 L4 两个分区, 排放量占整个区域 85% 以上, 最大为 L5 分区, 为 16.14 万 t, 占 48.79%, 其水污染物通过东江排入以珠江口海域为核心的伶仃洋, 也是大湾区近岸海域最大污染源, 对应的海域污染十分突出, 以无机氮为指标进行水质评价的结果显示伶仃洋水质为最差的劣四类.

L4 分区的总氮排放量略低于 L5, 为 12.47 万 t, 占污染总量的 37.7%, 水污染物排入珠海金湾及其附近海域, 是大湾区近岸海域第二大污染源. L3 总氮排放量为 1.58 万 t, 主要覆盖潭江流域, L1 为 1.36 万 t, 覆盖漠阳江流域, L3 和 L1 是除 L4 和 L5 以外主要的两个污染输出单元, 分别影响海陵湾和

黄茅海海域的水质环境, 水质以劣四类和三类为主. 其他 4 个分区的总氮排放量均小于 1 万 t, 其对应的海域污染状况相对要好, 除大亚湾近岸部分水质为劣四类外, 其他海域均好于二类水质.

从结构上看(表 8), 居民生活和工业生产两类污染源总氮排放量最大的是 L5, 分别为 12.36 万 t 和 0.62 万 t, 占区域总量的 67.1% 和 53.45%. 农业污染源总氮排放量最大的污染输出单元为 L4, 其畜禽养殖总氮排放为 0.68 万 t, 占全区的 53.5%, 水产养殖为 1.95 万 t, 占 65.7%, 农田种植为 2 万 t, 占 54%, 林业种植为 2.95 万 t, 占 53%. 居民生活也是其他分区总氮主要排放源, 林业种植是 L3、L1、L7 和 L8 的重要氮排放源.

表 8 各流域总氮污染排放构成/万 t

Table 8 Composition of nitrogen pollution emission in each watershed/ 10^4 t

单元	居民生活	工业生产	林业种植	农田种植	水产养殖	畜禽养殖	合计	占比/%
L5	12.36	0.62	1.46	0.95	0.4	0.35	16.14	48.79
L4	4.46	0.43	2.95	2.00	1.95	0.68	12.47	37.70
L3	0.57	0.07	0.42	0.24	0.16	0.12	1.58	4.78
L1	0.36	0.01	0.39	0.26	0.3	0.04	1.36	4.11
L8	0.18	0	0.14	0.1	0.04	0.01	0.47	1.42
L7	0.14	0	0.12	0.07	0.03	0.01	0.37	1.12
L2	0.09	0.01	0.07	0.06	0.07	0.06	0.36	1.09
L6	0.26	0.02	0.01	0.02	0.02	0	0.33	1.00

2.3 不同岸段陆源氮污染排放压力

图 5 显示了 8 个流域分区单元的岸段总氮污染排放的压力强度, 其中扇形环状表明各分区的海岸线承载的排放压力, 扇形环状堆积越高表明单位岸线承载的污染压力越大. 研究区陆源总氮污染的排

海压力主要对应集中在三大海域, 其中金湾海域的岸线压力强度最大, 其次是珠江口伶仃洋海域和黄茅海海域, 其他海域的压力相对较小.

污染压力分析结果显示, 大湾区的岸段污染压力强度分布与近岸海域污染状况在空间上具有一致

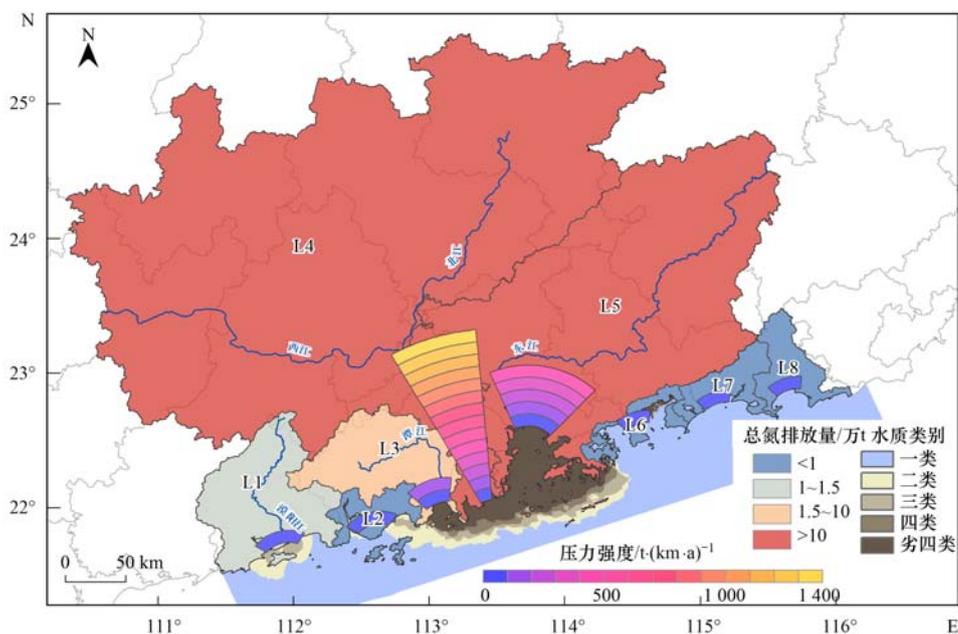


图 5 各流域对应岸线承载的陆源氮污染压力强度

Fig. 5 Nitrogen pollution emission intensity per kilometer coastline of each watershed

性,西北江三角洲流域内的 L4、东江流域内的 L5 和潭江流域内的 L3 是总氮污染排放量较大的区域,分别对应的金湾、珠江口伶仃洋和黄茅海的无机氮污染也更严重。

L4 的岸段总氮排放压力为 $1\,309.84\text{ t}\cdot(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$, L5 约 $400.31\text{ t}\cdot(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$, 以上两个分区的岸段污染压力远高于其他地区,高强度的污染排放使得这两个区域成为大湾区近海水质差的最主要污染源; L3 对应岸段的污染排放压力约 $127.94\text{ t}\cdot(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$, 该区域的陆源污染主要影响黄茅海,造成黄茅海海域污染也相对突出。其他分区的沿岸海域污染相对较轻,对应岸段污染压力也较小,在 $8\sim 65\text{ t}\cdot(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$ 之间。岸段污染压力分析结果表明,大湾区近岸海域氮污染状况与沿岸的总氮污染排放压力存在高度的空间关联性。

3 讨论

有研究表明,在全球尺度上,造成水体富营养化的氮排放超过安全阈值 2 倍以上,处于最高风险状态^[41]。广东省的情况更为严重,总氮排放量已超出安全阈值的 3 倍之多^[42]。厘清陆域总氮排放的来源结构和空间分布是总氮的排放控制和污染治理的基础和前提。

本研究表明,居民生活、农业种植和畜禽养殖是大湾区总氮排放的主要来源。这一研究结果与我国其他湾区的总氮排放结构基本一致。在已有研究中,渤海湾总氮污染源以居民生活为主,占比超过 55%,养殖业和种植业也是重要污染源^[43]。环杭州湾区的主要城市,如上海、杭州和宁波等,其陆域氮源主要来自人畜排泄物和农业种植施用的化肥^[44],这与本文对大湾区总氮排放结构的估算结果较为吻合。

大湾区陆域氮污染的高强度排放,决定了海域水环境的改善必须以陆域生活生产活动为管理调控的关键。从总氮排放的空间分布看,大湾区总氮污染主要来自两个大型流域单元,并且由于流域覆盖范围广,区域内分散的污染水系在河口或海岸汇聚后,对海域造成很大的污染排放压力。针对此特点,需要对东江流域和西北江三角洲流域内的城市、农村和农业生产实行全面的流域综合治理。

对居民生活污水排放实施源头管控和处理,是减少氮排放的重要手段。当前我国对城市污水的收集和处理效能不高,仅有 56% 的污水处理厂有脱氮设施,落后于发达国家湾区^[45]。东京、纽约和旧金山的污水管网密度分别为 15.19, 15.30 和 11.94 $\text{km}\cdot\text{km}^{-2}$, 污水收集处理率基本上达到 100%^[46]。而

当前大湾区主要城市如广州、深圳等的管网缺口仍然巨大,导致污水收集率低,大量的污水未经处理就流入河道^[47],大湾区污水处理基础设施建设还有较大的提升空间。肥料使用过度浪费、氮素利用效率低下是种植业面源污染大量氮排放的根源。旧金山湾区在二十世纪六十年代以前水环境污染严重,加利福尼亚州通过实施《灌溉土地管制计划》来限制污染物排放,湾区水环境得到显著改善^[48]。未来大湾区农业种植减排调控可根据作物的生长特性、需肥规律和土壤供肥能力等,因地制宜优化调整施肥方式和强度,调整种植结构,可有效遏制农业种植氮污染^[49,50],避免氮养分过度流失。未经处理和利用的畜禽养殖场排泄的废弃物中含有大量污染物质,氮磷污染负荷极高。广东省农业面源污染总氮和总磷的排放源均由畜禽养殖主导,且排放量与排放强度均高于全国平均值^[51]。近几年,畜禽养殖废弃物处理取得一定成效,但依然存在历史污染严重、监管不全面等问题,需要建设和完善必要的粪污处理和资源化利用设施,进行粪污无害化处理。

从国内外水污染治理经验看,立法建设是改善水质的重要保障。国际先进湾区均制定了专门化、精细化的法律法规,为水污染治理提供充分的法制保障。加利福尼亚州通过实施“清洁水法案”和“加利福尼亚波特-科隆水质控制法案”等来严格限制污水排放^[48]。纽约湾区所属的纽约州严格遵守“清洁水法案”,建立了河口保护区,还颁布“污水排放知情权法案”^[46],进一步规范了生活污水溢流现象。在东京湾,自 1970 年始,日本陆续制定了“水污染防治法”、“公用水面环境标准”和“港湾法”,水污染治理的法律体系框架基本建立起来。我国也陆续出台与保护水资源、治理水污染相关的法律法规,如“中华人民共和国水法”和“中华人民共和国水污染防治法”等,但这些法规仅对共性问题提出了建议,缺乏针对大湾区的专门化的法律法规。此外,由于大湾区涉及一个区域、两种制度和三个行政区,围绕大湾区水污染的治理需要协同立法,建设完善的法律体系。

4 结论

(1) 大湾区及周边地区共 19 个城市的 2018 年总氮污染排放量为 33.25 万 t,总氮污染主要来源于居民生活,占总量的 50% 以上,其次为种植业,约占 28.18%,养殖和工业氮排放贡献率较低。

(2) 大湾区城市的总氮排放量(23.14 万 t)显著高于其周边城市(10.11 万 t),且排放结构存在差异。大湾区内总氮污染主要来源于城镇和农村居民

生活排放,占其总量 65% 以上。而周边 8 个城市的种植业在其总氮排放占比更高,为 45.48%,其次为居民生活,占 33.73%。

(3)各流域分区对应岸段的污染排放压力与其对应海域的污染状况具有空间一致性,污染排放量最高的分别是位于东江流域内的 L5、西北江三角洲流域内的 L4 和潭江流域的 L3 等流域单元,其岸段承载的总氮污染排放压力也最大,对应的伶仃洋、珠海金湾和黄茅海污染严重。

参考文献:

- [1] Xu L, Wang T Y, Wang J H, *et al.* Occurrence, speciation and transportation of heavy metals in 9 coastal rivers from watershed of Laizhou Bay, China[J]. *Chemosphere*, 2017, **173**: 61-68.
- [2] Wang S L, Xu X R, Sun Y X, *et al.* Heavy metal pollution in coastal areas of South China; a review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76**(1-2): 7-15.
- [3] He B Y, Dai M H, Zhai W D, *et al.* Distribution, degradation and dynamics of dissolved organic carbon and its major compound classes in the Pearl River estuary, China[J]. *Marine Chemistry*, 2010, **119**(1-4): 52-64.
- [4] Bai J H, Xiao R, Cui B S, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 817-824.
- [5] 钱宇虹. 浅析我国陆海统筹的发展历程[J]. *中国土地*, 2020, (6): 29-30.
- [6] 赖翔宇, 王世存. 中国近岸海域污染严重[J]. *生态经济*, 2019, **35**(3): 9-12.
- [7] Yarbro J W. UNEP (Legal elements suggested for inclusion in the draft guidelines/principles) protection of the marine environment against pollution from land-based sources [J]. *Environmental Policy and Law*, 1983, **11**(4): 108-112.
- [8] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. *American Journal of Science*, 1982, **282**(4): 401-450.
- [9] 戴爱泉, 郝菁, 陈亚男, 等. 环胶州湾流域总氮总量控制指标体系研究[J]. *海洋科学进展*, 2019, **37**(2): 342-354.
- [10] Dai A Q, Hao J, Chen Y N, *et al.* Total load control index system of total nitrogen in Jiaozhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, **37**(2): 342-354.
- [11] 张晓丽, 姚瑞华, 严冬. 关于“十四五”海洋生态环境保护的几点思考[J]. *世界环境*, 2020, **38**(4): 16-18.
- [12] Zhang X L, Yao R H, Yan D. Some thoughts on protecting marine ecological environment during 14th Five-year Plan period [J]. *World Environment*, 2020, **38**(4): 16-18.
- [13] 吴文涛. 长江营养盐与微量元素时空变化、入海通量及其对人类活动的响应[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2020.
- [14] Ti C P, Yan X Y. Spatial and temporal variations of river nitrogen exports from major basins in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(9): 6509-6520.
- [15] 谷文艳, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 黄河下游溶解态营养盐季节变化及入海通量研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, **47**(3): 74-79, 86.
- [16] Gu W Y, Chen H T, Yao Q Z, *et al.* Seasonal Variation and Fluxes of Dissolved Nutrients in the Lower Reaches of the Huanghe[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(3): 74-79, 86.
- [17] 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠. 深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4111-4117.
- [18] Zhao C C, Zhang S Y, Mao X Z. Variations of annual load of TN and TP in the deep bay watershed, Shenzhen[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4111-4117.
- [19] 王有霄, 钟萍丽, 于格, 等. 胶州湾氮、磷非点源污染负荷估算及时空分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2019, **49**(2): 85-97.
- [20] Wang Y X, Zhong P L, Yu G, *et al.* Estimation of N, P non-point source pollution loads and analysis of spatial and temporal characteristics in the Jiaozhou Bay [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, **49**(2): 85-97.
- [21] 侯西勇, 张安定, 王传远, 等. 海岸带陆源非点源污染研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, **29**(1): 73-78.
- [22] Hou X Y, Zhang A D, Wang C Y, *et al.* Progress of studies on coastal land-based non-point source pollution [J]. *Progress in Geography*, 2010, **29**(1): 73-78.
- [23] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1150-1162.
- [24] Lou B F, Zhuo H H, Zhou Z, *et al.* Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstem during recently 18 Years [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1150-1162.
- [25] 劳齐斌, 刘国强, 申友利, 等. 北部湾入海河流营养盐的分布特征及入海通量研究[J]. *海洋学报*, 2020, **42**(12): 93-100.
- [26] Lao Q B, Liu G Q, Shen Y L, *et al.* Distribution characteristics and fluxes of nutrients in the rivers of the Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, **42**(12): 93-100.
- [27] 李大鸣, 柳瑞英, 罗珊, 等. 渤海新区海岸带陆域环境研究 I: 污染负荷估算模型[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, **34**(1): 71-78.
- [28] Li D M, Liu R Y, Luo S, *et al.* Land environment of coastal zone in Bohai New Area I: pollution load estimation model [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(1): 71-78.
- [29] 高燕. 基于 SWAT 模型的流域土壤侵蚀及 POC 入海通量研究——以我国南方地区为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [30] 杨东光. 基于 MIKE11 的长河水环境模拟与污染控制研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [31] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(4): 755-761.
- [32] Xue L H, Yang L Z. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(4): 755-761.
- [33] 麻德明, 石洪华, 丰爱平. 基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例[J]. *生态学报*, 2014, **34**(1): 173-181.
- [34] Ma D M, Shi H H, Feng A P. Estimation of agricultural non-point source pollution based on watershed unit: a case study of Laizhou Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(1): 173-181.
- [35] 朱梅, 吴敬学, 张希三. 海河流域畜禽养殖污染负荷研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(8): 1558-1565.
- [36] Zhu M, Wu J X, Zhang X S. Pollutants loads of livestock and poultry breeding in Hai Basin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(8): 1558-1565.
- [37] 赵蒙蒙, 寇杰锋, 杨静, 等. 粤港澳大湾区海岸带生态安全问题与保护建议[J]. *环境保护*, 2019, **47**(23): 29-34.

- Zhao M M, Kou J F, Yang J, *et al.* Study on the ecological security and protection measures of the coastal zone in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Environmental Protection*, 2019, **47**(23): 29-34.
- [26] 广东省生态环境厅公众网. 环境状况公报[EB/OL]. <http://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/index.html>, 2020-09-02.
- [27] 曾丹娜, 牛丽霞, 陶伟, 等. 夏季珠江口水域营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, **40**(3): 73-82.
- Zeng D N, Niu L X, Tao W, *et al.* Nutrient dynamics in Pearl River estuary and their eutrophication evaluation[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, **40**(3): 73-82.
- [28] 李飞, 张树文, 杨久春, 等. 社会经济数据空间化研究进展[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, **30**(4): 102-107.
- Li F, Zhang S W, Yang J C, *et al.* A review on research about spatialization of socioeconomic data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, **30**(4): 102-107.
- [29] 王辉. 辽宁省社会经济活动影响环境污染的压力机制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [30] 康敏捷, 栾维新, 王辉, 等. 环渤海陆源水污染输出分区研究[J]. *中国科技论文*, 2013, **8**(5): 452-457.
- Kang M J, Luan W X, Wang H, *et al.* Output partition of land-origin water pollution in Bohai Rim [J]. *China Sciencepaper*, 2013, **8**(5): 452-457.
- [31] 高晶晶, 彭超, 史清华. 中国化肥高用量与小农户的施肥行为研究——基于1995~2016年全国农村固定观察点数据的发现[J]. *管理世界*, 2019, **35**(10): 120-132.
- Gao J J, Peng C, Shi Q H. Study on the high chemical fertilizers consumption and fertilization behavior of small rural household in China: Discovery from 1995 ~ 2016 national fixed point survey data [J]. *Management World*, 2019, **35**(10): 120-132.
- [32] 尚杰, 尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究[J]. *生态经济*, 2016, **32**(5): 196-199.
- Shang J, Yin X Y. Study on the present situation and reduction of fertilizer non-point source pollution of China [J]. *Ecological Economy*, 2016, **32**(5): 196-199.
- [33] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查-农业污染源肥料流失系数手册[Z]. 2009.
- [34] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [35] 广东省农业农村厅. 广东省畜禽养殖废弃物资源化利用工作考核办法(试行)[EB/OL]. http://dara.gd.gov.cn/fqwzyhly/content/post_1579111.html, 2018-08-14.
- [36] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(1): 303-308.
- Dong H M, Zhu Z P, Huang H K, *et al.* Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(1): 303-308.
- [37] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册[Z]. 2009.
- [38] 生态环境部华南环境科学研究所. 第二次全国污染源普查生活源产排污系数手册[Z]. 2019.
- [39] 赵银慧, 李莉娜, 景立新, 等. 污水处理厂氨排放特征[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(4): 58-61.
- Zhao Y H, Li L N, Jing L X, *et al.* Study on the characteristic of the sewage plant emitting ammonia nitrogen [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(4): 58-61.
- [40] 康敏捷. 环渤海氮污染的陆海统筹管理分区研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [41] Steffen W, Richardson K, Rockström J, *et al.* Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet [J]. *Science*, 2015, **347**(6223), doi: 10.1126/science.1259855.
- [42] Yu C Q, Huang X, Chen H, *et al.* Managing nitrogen to restore water quality in China [J]. *Nature*, 2019, **567**(7749): 516-520.
- [43] 王辉, 栾维新, 康敏捷. 渤海氮污染的来源结构与污染压力空间分布[J]. *地理研究*, 2020, **39**(1): 186-199.
- Wang H, Luan W X, Kang M J. Nitrogen pollution source structure and spatial distribution of Bohai Sea [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(1): 186-199.
- [44] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1709-1716.
- Deng M H, Xie Y X, Xiong Z Q, *et al.* Nitrogen budgets of the Yangtse Delta Region and their effect on the environment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(10): 1709-1716.
- [45] 吴悦颖, 王洪臣, 孙娟, 等. 我国城镇污水处理设施脱氮除磷能力现状分析及对策建议[J]. *给水排水*, 2014, **50**(S1): 118-122.
- [46] 刘畅, 林绅辉, 焦学尧, 等. 粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(6): 1085-1096.
- Liu C, Lin S H, Jiao X Y, *et al.* Problems and treatment countermeasures of water environment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55**(6): 1085-1096.
- [47] 刘田原. 粤港澳大湾区水污染治理研究: 现实困境、域外经验及修补路径[J]. *治理现代化研究*, 2020, **36**(5): 87-96.
- Liu T Y. Research on water pollution control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: Realistic dilemma, extraterritorial experience and repair path [J]. *Governance Modernization Studies*, 2020, **36**(5): 87-96.
- [48] Briggs J C. San francisco bay: restoration progress [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, **3**: 101-106.
- [49] 赖敏, 王伟力, 郭灵辉. 长江中下游城市群农业面源污染氮排放评价及调控[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, **37**(8): 1-11.
- Lai M, Wang W L, Guo L H. Assessment and control of nitrogen emission from agricultural non-point source in the urban agglomeration in the middle-lower Yangtze River Belt [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, **37**(8): 1-11.
- [50] 丘雯文, 钟涨宝, 李兆亮, 等. 中国农业面源污染排放格局的时空特征[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, **40**(1): 26-34.
- Qiu W W, Zhong Z B, Li Z L, *et al.* Spatial-temporal variations of agricultural non-point source pollution in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, **40**(1): 26-34.
- [51] 王思如, 杨大文, 孙金华, 等. 我国农业面源污染现状与特征分析[J]. *水资源保护*, 2021, **37**(4): 140-147, 172.
- Wang S R, Yang D W, Sun J H, *et al.* Analysis on agricultural non-point source pollution loadings and its characteristics in China [J]. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(4): 140-147, 172.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)