

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

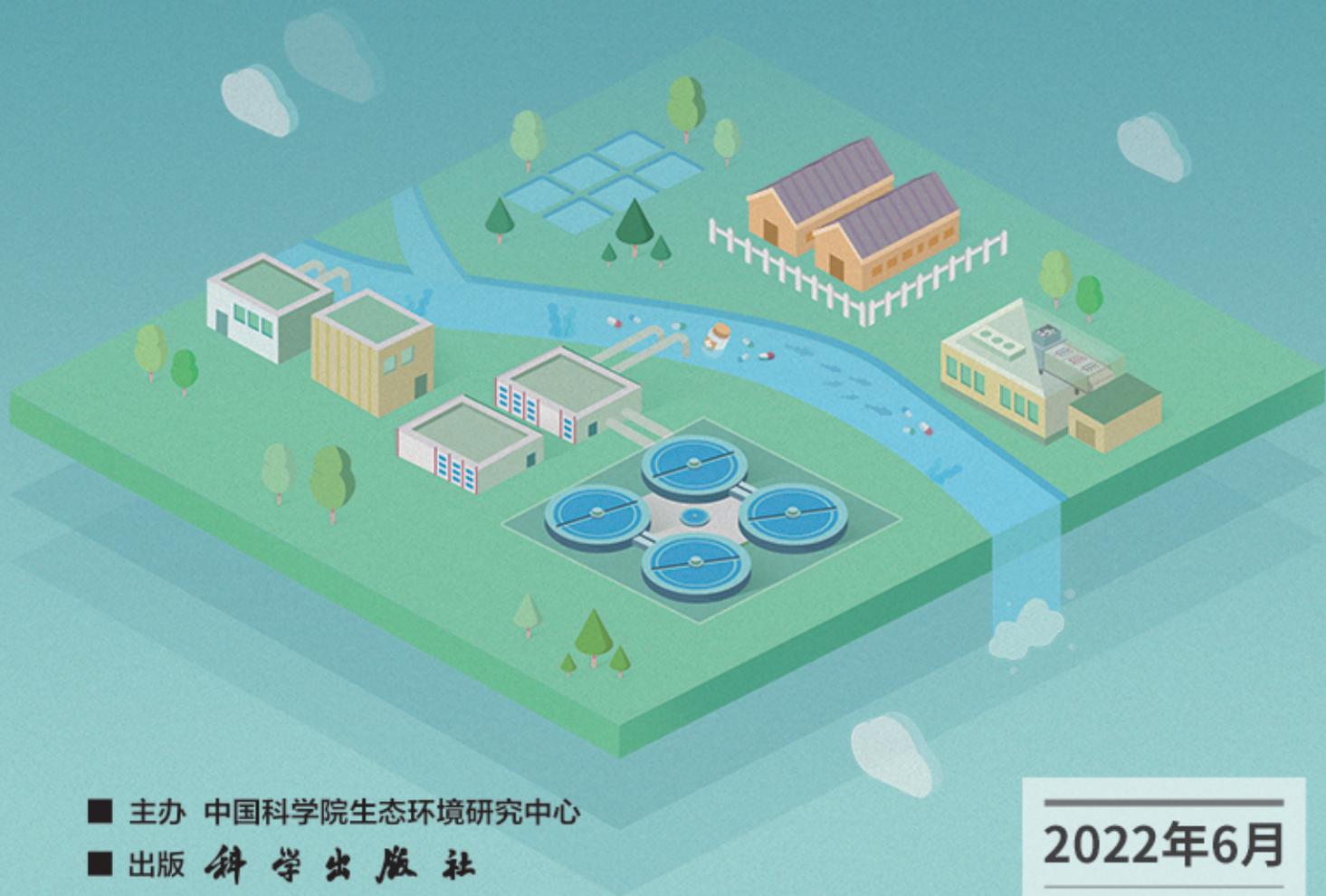
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM_{2.5} 浓度影响 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM_{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM_{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015~2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM_{2.5} 来源 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM_{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM_{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素:以京津冀地区为例 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象影响分析 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016~2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下水-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水:氮素时空分布及驱动因素 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015~2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000~2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析

葛小君^{1,2,3}, 黄斌^{2,3}, 袁再健^{2,3*}, 王栋栋^{2,3}, 王泉泉^{2,3}, 陈佳村^{2,3}, 谢真越^{2,3}

(1. 华南师范大学环境学院, 广州 510631; 2. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东省面源污染防治工程技术研究中心, 广州 510650; 3. 梅州市国际水土保持研究院, 梅州 514000)

摘要: 广东省农业面源污染负荷产生量大, 对区域生态环境造成严重影响. 采用清单分析法分析了近 20 年 (1999 ~ 2019 年) 广东省农业面源污染负荷时空变化特征, 探讨了农业面源污染的来源情况, 并分析了农业生产投入强度、农业面源污染负荷和农业面源污染指标的关系. 结果表明, 近 20 年广东省农业面源污染总负荷下降 6.08%, 其中化学需氧量 (COD)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的污染负荷增幅分别为 -11.88%、4.99% 和 26.17%, 耕地化肥和农药投入强度分别上升 112.19% 和 60.38%. 珠三角地区是广东省农业面源污染负荷最高的地区, 其次分别是粤北、粤西和粤东地区. 畜禽养殖是 COD 的主要来源, 化肥和畜禽养殖是 TN 的主要来源, 畜禽养殖和水产养殖是 TP 的主要来源, 且水产养殖污染物排放占比呈现出明显上升趋势. 不同区域的污染物来源存在一定差异, 粤西、粤北和粤东地区 COD 和 TP 主要来源是畜禽养殖, TN 的主要来源是化肥; 珠三角地区水产养殖业成为 TN 和 TP 污染负荷的主要来源. 广东省面源污染负荷总量下降主要源于城镇化水平的提高和农村人口比例减少. 总体而言, 广东省面源污染存在时间阶段性变化与空间差异, 应当采取全面治理与针对性污染治理相结合的治理措施, 全面加强化肥减量措施和养殖业污染治理, 重点加强珠三角地区水产养殖污染治理和粤北地区农村生活污染治理.

关键词: 面源污染; 污染负荷; 清单分析法; 时空变化; 污染来源分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3118-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108071

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years

GE Xiao-jun^{1,2,3}, HUANG Bin^{2,3}, YUAN Zai-jian^{2,3*}, WANG Dong-dong^{2,3}, WANG Quan-quan^{2,3}, CHEN Jia-cun^{2,3}, XIE Zhen-yue^{2,3}

(1. School of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Engineering Research Center for Non-point Source Pollution Control, Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. International Institute of Soil and Water Conservation, Meizhou 514000, China)

Abstract: The agricultural non-point source pollution (ANPSP) load in Guangdong province is very large and has a serious impact on the regional ecological environment. Inventory analysis was used to assess and analyze the temporal and spatial variation characteristics of the ANPSP load of Guangdong province during 1999-2019, and the sources of ANPSP were discussed, as well as the relationship between them. The results showed that, during the past 20 years, the total ANPSP pollution loads of Guangdong province decreased by 6.08%, and the pollution loads of chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) increased by -11.88%, 4.99%, and 26.17%, respectively. The input intensity of chemical fertilizers and pesticides increased by 112.19% and 60.38%, respectively. The Pearl River Delta had the highest ANPSP loads in Guangdong province, followed by those in northern, western, and eastern Guangdong. Livestock and poultry breeding were the main sources of COD, the total percent fertilizers and livestock and poultry breeding were the main sources of TN, and livestock and poultry breeding and aquaculture were the main sources of TP. In addition, the contribution of pollutants discharged from aquaculture showed an obvious increasing trend. There were certain differences in the pollution sources in different regions. In western Guangdong, northern Guangdong, and eastern Guangdong, livestock and poultry breeding were the main sources of COD and TP, and fertilizer was the main source of TN; by contrast in the Pearl River Delta, aquaculture had become the main source of TN and TP pollution loads. The correlation results showed that the decline in the total ANPSP in Guangdong province was mainly due to the increase in high urbanization rate and the decrease in the proportion of rural population. In general, there were stage changes in the time and differences in spatial characteristics and sources of ANPSP in Guangdong province. A combination of comprehensive treatment and targeted pollution treatment should be adopted, and fertilizer reduction measures and pollution treatment in the aquaculture should be strengthened in an all-around way, focusing on strengthening the treatment of pollution from aquaculture in the Pearl River Delta region and the treatment of rural life pollution in northern Guangdong.

Key words: non-point source pollution; pollution load; inventory analysis; temporal and spatial variation; source analysis of pollution

农业面源污染指农业活动过程中畜禽和水产养殖废水排放、化肥与农药流失和农村人类活动等因素导致污染物进入环境造成的污染^[1,2], 具有排放随机、过程复杂和不易被监测与控制等特征^[3]. 中国是世界最大的集约化农业发展中国家之一^[4], 从 1978 ~ 2017 年, 我国化肥年施用量从 884 万 t 增加

收稿日期: 2021-08-08; 修订日期: 2021-11-08

基金项目: 广东省重点研发计划项目 (2020B1111530001); 广州市科技计划项目 (202002020026); 广东省科技计划项目 (2018B030324001, 2017B030314092); 广东省科学院专项 (2019GDASYL-0401003, 2019GDASYL-0301002); 梅州市科技计划项目 (2020B0204001)

作者简介: 葛小君 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业面源污染, E-mail: gexiaojunjun@163.com

* 通信作者, E-mail: zjyuan@soil.gd.cn

到 5 859 万 t, 农药年施用量由 0.73 万 t 增加到 166 万 t, 但化肥和农药利用率不足 1/3, 畜禽养殖粪污有效处理率不足 1/2^[5]. 农用化肥和农药的大量投入造成了严重的农业面源污染^[6,7], 我国农业的化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)排放量分别占全部污染物排放总量的 49.77%、51.97% 和 67.22%^[8].

广东省是我国农业生产较发达的省份, 同时也是农业面源污染问题突出的地区之一^[5,9], 全省农业污染排放和农村生活排污占水体 COD、TN 和 TP 排放量的 60.47%、56.74% 和 77.21%^[10]. 近年来, 广东省城市化进程加快, 城市化率从 1999 年的 31.18% 上升到 2019 年的 71.40%, 农业产业结构发生较大改变^[4], 土地利用格局的改变会使得农业面源污染排放量与排放特征发生变化^[11]. 但以往广东省农业面源污染研究集中在种植业、畜禽养殖业和农村人口这些方面^[12,13], 对水产养殖、农田固废和农村生活所产生的污染负荷有所忽视^[4,14], 且大多数农业面源污染负荷估算的研究集中在某个流域或者某个典型区域, 因此, 有必要对广东省的农业面源污染负荷的时空变化与来源进行全面分析与评估, 以期广东省农业生态环境保护及治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究方法与数据来源

本研究采用清单分析法估算广东省农业面源污染负荷, 该方法不用考虑复杂的污染过程, 能够在较长的时间和较大的空间尺度上对面源污染负荷进行较准确的评估^[13]. 空间上将广东省划分为粤东(汕头市、汕尾市、潮州市和揭阳市)、粤西(湛江市、茂名市和阳江市)、粤北(韶关市、河源市、梅州市、清远市和云浮市)和珠三角(广州市、佛山市、肇庆市、深圳市、东莞市、惠州市、珠海市、中山市和江门市)这 4 个区域进行对比研究. 将农业面源污染源分为 3 类: 第一类是耕作过程中施用的化肥、农药和塑料等化学品以及农作物产品收获后产生的作物废物; 第二类是畜禽养殖和水产养殖产生的养殖业污染物; 第三类是农村地区居民的生活废弃物^[5]. 农田固废很少被纳入评价面源污染的指标中, 但是由于在还田过程中微生物分解养分和径流冲刷联合作用^[14], 农田固废仍具有潜在污染量^[15,16], 因此本研究将农田固废作为评价农业面源污染负荷指标之一.

为了在统一尺度上比较各类污染物, 根据文献^[17]确定化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)为主要的污染负荷指标, 并以化肥、畜禽养殖、

水产养殖、农田固废和农村生活作为农业面源污染的污染源. 化肥、农药和地膜的过度使用会增加温室气体排放和加剧耕地退化^[16], 但是由于其排污系数难以获得^[5], 因此引入排放强度来判断农业耕地投入要素污染现状.

本研究数据来源于文献^[18,19]. 农作物、化肥、农村生活和畜禽养殖的产污和排污系数参考文献^[20~24]; 水产养殖产污和排污系数则依据文献中广东渔业各养殖类型占比, 选取池塘养殖作为主要养殖方式^[22], 并根据文献^[25,26]进行系数修正, 其中是否引入沉积物对污染物吸附对水产养殖污染负荷排污系数的取值范围影响较大, 有研究表明, 鱼塘清淤和内源性养分释放同样会产生环境污染^[27,28], 因此为了避免高估或低估污染负荷本文中取化学分析法和物料平衡法所给出的两种排污系数的平均值以确定本文水产养殖产污排污系数. 由于化肥施用后并不产生 COD 污染, 在计算 COD 负荷时, 化肥不作为计算指标. 具体的计算指标、排污系数及其来源见表 1 和表 2, 其中给出主要的污染负荷贡献单位的排污系数.

表 1 农业面源污染基本计算单位和数据来源

Table 1 List of the elementary unit and data sources of agricultural non-point source pollution

污染源	类别	单元	计算单位	文献
化肥	氮肥	施用量	折纯量	[18]
	磷肥	施用量	折纯量	
	复合肥	施用量	折纯量	
畜禽养殖	牲畜	牛	存栏数	[18]
		羊	存栏数	
		猪	出栏数	
		兔	出栏数	
	禽类	家禽	出栏数	
水产养殖	淡水养殖	鱼	产量	[18,22]
		虾	产量	
		蟹	产量	
海水养殖	贝类	产量		
	藻类	产量		
农田固废	粮食作物	水稻	产量	[18]
		小麦	产量	
		早粮	产量	
		薯类	产量	
		大豆	产量	
经济作物	甘蔗	产量		
	花生	产量		
农村生活	其他(水果和蔬菜)	人均	产量	[18,19]
		人均	农村人口	
农村生活	粪便	人均	农村人口	[18,19]
	生活垃圾	人均	农村人口	

1.1.1 污染负荷计算

$$\begin{aligned}
 TPL_i &= \sum EU_{activity} = \sum \sum EU_{class} \\
 &= \sum \sum \sum EU_{unit} \times EUA \quad (1)
 \end{aligned}$$

表 2 农业面源排污系数和数据来源

Table 2 Discharge coefficient and data source of agricultural non-point source pollution

污染源类型	排污系数计算公式	相关系数取值
化肥	排污系数 = 产污率 × 流失率	由于能够获得化肥的折纯量,因此复合肥中氮的产污率为1/3,磷的产污率为0.15;氮肥产污率为1,磷肥产污率为0.44 ^[20] ;氮的流失率为0.4、磷的流失率为0.07 ^[20]
畜禽养殖	排污系数 = 产污率 × 流失率	牛、猪、羊和家禽每头的 COD 产污率为:401.5、47.88、4.4 和 1.165 kg ^[20] ; 每头 TN 产污率为:61.1、4.51、2.28 和 0.275 kg ^[20] ; 每头的 TP 产污率为:10.07、1.7、0.45 和 0.115 kg ^[20] ; COD、TN 和 TP 流失率分别为 0.276、0.244 和 0.212 ^[20]
水产养殖	排污系数 = $\sum_{i=1}^n$ 渔业养殖种类占比 _i × 排污系数 _i	通过文献[26~28]计算得出淡水鱼、虾和蟹 COD 排污系数分别为:47.909、34.655 和 56.715 g·kg ⁻¹ ; TN 排污系数分别为:6.79、1.313 和 2.679 g·kg ⁻¹ ; TP 排污系数分别为:0.931、0.106 和 0.472 g·kg ⁻¹
农田固废	排污系数 = 秸秆产生系数 × (秸秆利用结构占比 × 产污率) × 流失率	其中稻谷、玉米、薯类、大豆、甘蔗、花生和果蔬的秸秆系数分别为:1、1.04、0.57、1.6、0.43、1.14 和 0.51 ^[21] ; 秸秆利用结构占比、产污系数和流失率取自文献[20]; 果蔬固废含水率较高故流失率取 0.5
农村生活		农村人口每人每年 COD、TN 和 TP 的排污系数分别为 7.82、0.89 和 0.2 kg ^[20]

$$TPL = TPL_{COD} + TPL_{TN} + TPL_{TP} \quad (2)$$

式中, TPL_i 为农业面源污染指标 i 的污染负荷量, i 包括化学需氧量 (COD)、总氮 (TN) 和总磷 (TP); TPL (Total Pollution Loads) 为农业面源污染总污染负荷; $EU_{activity}$ 为农业活动的污染源的污染负荷; EU_{class} 为各类农业活动污染源中各类别的污染负荷; EU_{unit} 为各类农业活动污染源中各类别基本单元的污染负荷; EUA 为 EU_{unit} 的排污量, EUA 由以下公式计算出。

$$EUA = \sum_{i=1}^n EU_i \rho_i (1 - \eta_i) C_i(EU_i, S) \quad (3)$$

$$EUA = \sum_{i=1}^n PE_i Q_i \quad (4)$$

式中, EU_i 为基本单位; ρ_i 为污染物产生系数; η_i 为相关资源利用效率 (%); PE_i 为农业面源污染物的产量; C_i 为污染物排放系数, 由 (EU_i, S) 所决定的; (EU_i, S) 为基本单位在不同的区域环境特点、水文条件、降雨、土壤、植被覆盖和各种社会政策的综合作用。该公式可以简化为式(4), Q_i 为 i 的排污系数, 即农业面源污染物的产量乘以排污系数。

1.1.2 投入强度计算

$$EI_i = E_i / AL \quad (5)$$

式中, EI_i 为 i 的单位投入强度 ($kg \cdot hm^{-2}$), E_i 为投入要素 i 的施用量, AL 为 i 单位的作用面积 (hm^2)。根据文献[12,29]和本文数据计算结果, 确定化肥和农药面源污染程度分级。针对化肥污染, 将污染等级分为 4 个等级, 分别是化肥年投入强度小于 $225 kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为无污染区, $225 \sim 500 kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为轻度污染区, $500 \sim 1000 kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为中度污染区, 大于 $1000 kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为重度污染区; 对于农药投入强度, 将污染等级分为 3 个等级, 施用量小于 $10 kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为轻度污染区, $10 \sim 30 kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为中度污染区, 大于 30

$kg \cdot hm^{-2}$ 的区域为重度污染区。

1.2 分析方法

农业生产要素投入量和农业污染负荷指标间的相关性采用 Pearson 相关分析计算, 显著性和极显著性水平分布设定为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。采用 GraphPad Prism 9.0 进行数据处理和作图。使用 ArcGIS10.7 进行空间分布计算。

2 结果与分析

2.1 农业面源污染负荷年际变化特征

从图 1 可以看出, 广东省农业面源污染总负荷由 1999 年的 $236.63 \times 10^4 t$ 下降到 2019 年的 $222.40 \times 10^4 t$, 降幅为 6.08%。COD 污染负荷由 $169.05 \times 10^4 t$ 下降到 $148.96 \times 10^4 t$, 降幅为 11.88%; TN 污染负荷从 $59.92 \times 10^4 t$ 增加到 $62.91 \times 10^4 t$, 增幅为 4.99%, TP 污染负荷从 $7.65 \times 10^4 t$ 增加到 $9.66 \times 10^4 t$, 增幅为 26.17%。

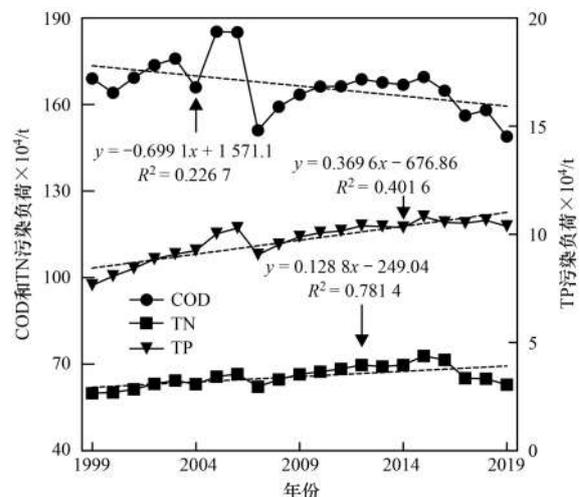


图 1 1999~2019 年广东省农业面源污染物总污染负荷、COD、TN 和 TP 负荷

Fig. 1 Total non-point source pollutant, COD, TN, and TP loads of Guangdong province from 1999 to 2019

2.2 农业面源污染负荷空间变化特征

从广东省不同区域的污染负荷贡献率情况可以看出(图 2), 2019 年总污染负荷贡献率表现为: 珠三角 > 粤西 > 粤北 > 粤东. 2019 年珠三角 COD、TN 和 TP 污染负荷贡献率相较于 1999 年分别下降了 1.82%、4.19% 和 5.23%, 但仍为 4 个区域中最高; 粤东污染负荷贡献率为 4 个区域中最低, COD、TN 和 TP 污染负荷贡献率下降了 3.06%、3.68%、3.22%; 2016 年之前粤西和粤北地区污染负荷贡献率基本保持不变, 2016 年后污染负荷贡献率上升趋势较为明显, 相比于 1999 年, 2019 年污染负荷贡献

率分别增加了 4.48% 和 1.31%.

2.3 农业面源污染无来源特征分析

2.3.1 广东省农业面源污染负荷来源

1999 ~ 2019 年广东省 COD 的主要来源是畜禽养殖, TN 的主要来源是化肥和畜禽养殖, TP 的主要来源是畜禽养殖和水产养殖, 而农作物废弃物排污占比相对较低(图 3). 值得注意的是水产养殖对不同污染物负荷的贡献均呈现出逐年上升的趋势, COD 污染负荷贡献率由 7.25% 上升至 15.15%, TN 污染负荷贡献率从 10.07% 上升至 16.60%, TP 污染负荷贡献率从 16.89% 上升至 23.79%.

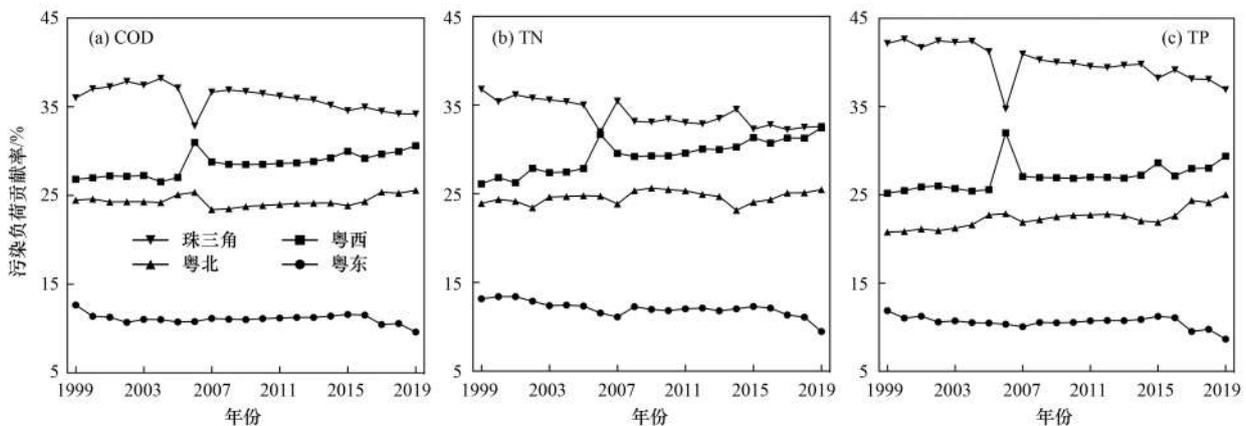


图 2 1999 ~ 2019 年珠三角、粤西、粤北和粤东地区的 COD、TN 和 TP 污染负荷贡献率

Fig. 2 Percent contributions of COD, TN, and TP loads of the Pearl River Delta, western Guangdong, northern Guangdong, and eastern Guangdong from 1999 to 2019

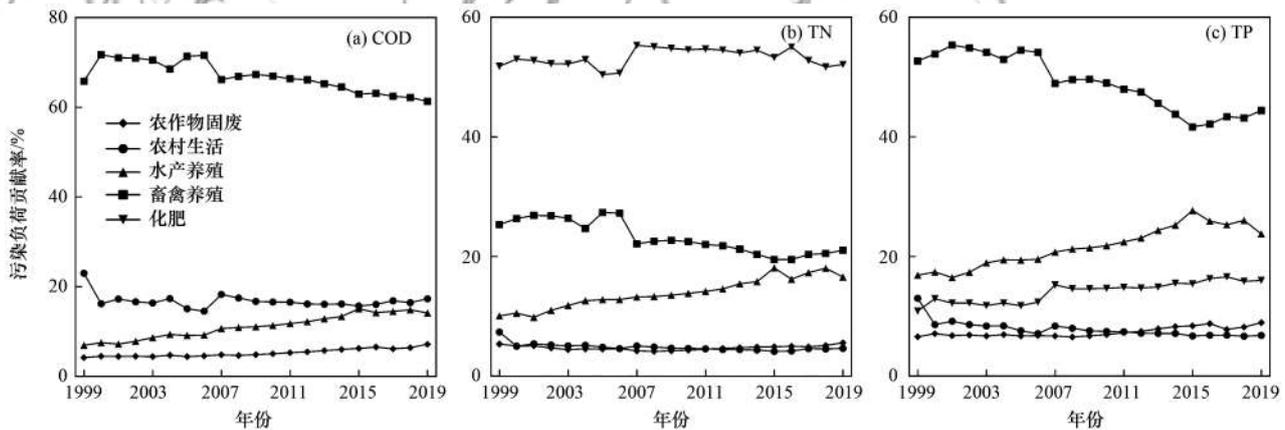


图 3 1999 ~ 2019 年广东省不同污染源污染负荷贡献率

Fig. 3 Percent contributions of different pollution sources to the total pollutant load of COD, TN, and TP of Guangdong province from 1999 to 2019

2.3.2 区域农业面源污染负荷来源

粤西和粤北 COD 和 TN 污染负荷贡献率结构较为类似, 且 20 年间各污染物污染负荷贡献率变化幅度不明显, 畜禽养殖是 COD 和 TP 的主要来源, 化肥是 TN 的主要来源(图 4). 珠三角地区畜禽养殖 COD、TN 和 TP 的污染负荷贡献率明显下降, 水产养殖占污染负荷贡献率明显上升, 相比于 1999 年, 2019 年水产养殖 COD 污染负荷贡献率上升

11.71%, TN 污染负荷贡献率达到 25.04%, 并且成为了 TP 污染负荷的主要来源. 粤东地区污染负荷结构变化不大, 畜禽养殖是 COD 和 TP 的主要来源, 化肥是 TN 主要来源.

2.4 农业生产投入强度与面源污染负荷关系

2.4.1 农业生产要素投入时空变化特征

近 20 年广东省耕地面积减少 38.44% (表 3), 化肥和地膜的施用量分别增加 30.63% 和 96.90%;

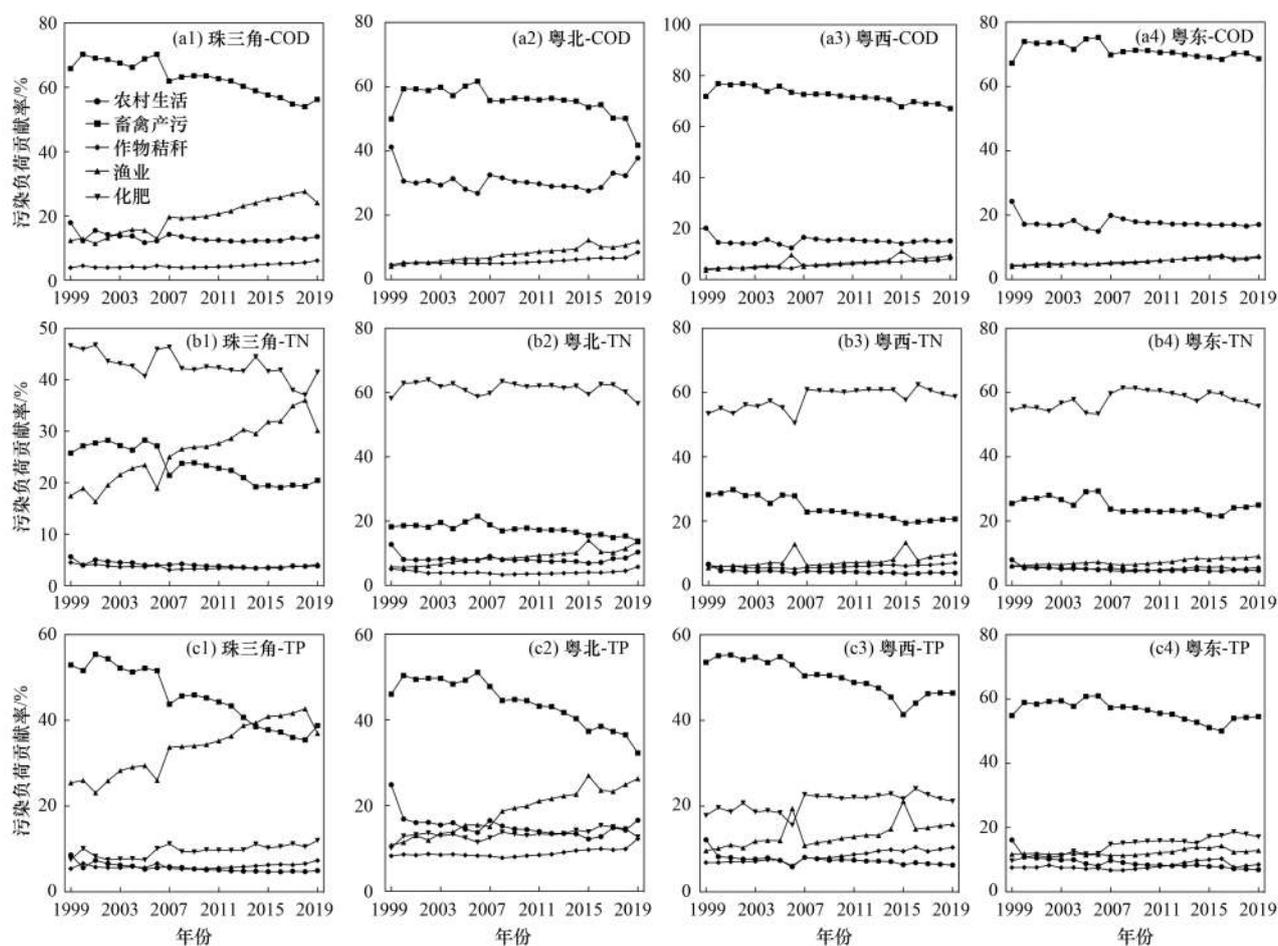


图4 1999~2019年不同地区COD、TN和TP不同污染源负荷贡献率

Fig. 4 Percent contributions of different pollution sources to the total pollutant load of COD, TN, and TP in different regions from 1999 to 2019

表3 1999~2019年广东省种植业生产要素投入情况

Table 3 Input of agricultural production factors of Guangdong province from 1999 to 2019

年份	耕地 $\times 10^3/\text{hm}^2$	化肥施用量 $\times 10^3/\text{t}$	地膜施用量 $\times 10^3/\text{t}$	农药施用量 $\times 10^3/\text{t}$
1999	6 574.45	1 728.44	12.31	88.62
2000	6 443.68	1 839.97	12.12	84.72
2001	6 415.48	1 950.93	15.46	85.87
2002	6 324.08	1 964.38	16.82	84.69
2003	6 117.16	1 996.09	17.30	86.04
2004	5 484.33	2 012.98	19.10	85.04
2005	6 325.35	2 046.17	18.62	87.03
2006	6 182.78	2 121.27	18.53	93.09
2007	5 458.50	2 196.36	18.44	99.16
2008	5 541.41	2 265.97	19.57	100.51
2009	4 406.73	2 333.55	20.54	103.72
2010	4 337.75	2 372.87	20.58	104.38
2011	4 447.44	2 413.00	22.61	114.08
2012	4 430.59	2 453.76	23.24	113.88
2013	4 524.79	2 439.06	23.96	110.09
2014	4 509.00	2 495.83	25.00	112.66
2015	4 512.20	2 562.42	26.05	113.78
2016	4 544.07	2 610.16	26.17	113.65
2017	3 958.13	2 379.35	26.71	94.62
2018	3 982.72	2 313.20	25.05	93.68
2019	4 047.39	2 257.89	24.25	87.49

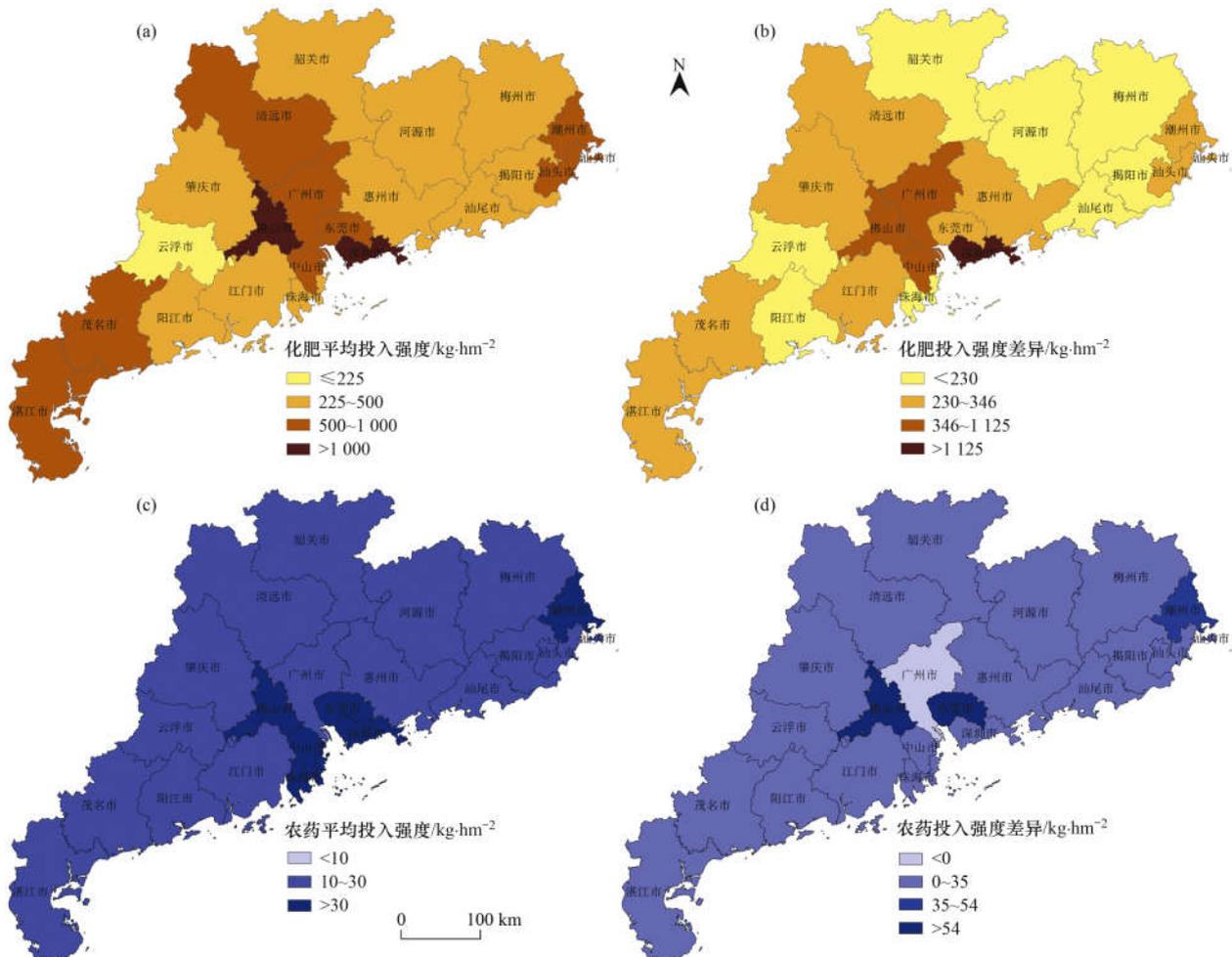
农药施用量在 2012 年达到最高值(113.88×10^3 t), 2016 年后开始下降, 2019 年农药施用量相较于 2016 年减少了 28.24%。

广东省近 20 年化肥平均投入强度属轻度污染状态($333.44 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 投入强度较高的城市主要有佛山市、深圳市、中山市、广州市、东莞市、茂名市、湛江市、潮州市和汕头市(图 5), 所有城市化肥投入强度均有提高, 全省总体提高了 67.61%, 达到了中度污染水平($558.87 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。广东省近 20 年农药平均投入强度属于中度污染($14.81 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 投入强度涨幅较高的城市主要有佛山

市、东莞市、中山市、珠海市、深圳市和潮州市。相比于 1999~2008 年, 2009~2019 年农药投入强度提高了 64.23%, 农药投入涨幅较高的城市有佛山市、东莞市和潮州市, 广州市农药投入强度有所下降。

2.4.2 农业生产投入强度与农业面源污染负荷关系

相关性分析结果表明(表 4), COD 污染负荷与 TN 和 TP 污染负荷之间存在极显著相关性($P < 0.01$); COD、TN 和 TP 污染负荷与化肥、农膜和农药投入强度之间均呈负相关, 其中 COD 与化肥投入强度呈显著负相关($P < 0.05$)。



(a) 和 (c) 为广东省各市近 20 年化肥和农药的平均投入强度; (b) 和 (d) 为广东省各市近 10 年(2009~2019 年)和前 10 年(1999~2009 年)化肥和农药投入强度的差值

图 5 1999~2019 年广东省化肥和农药投入强度和差异

Fig. 5 Input intensity and difference of fertilizers and pesticides in Guangdong Province from 1999 to 2019

表 4 农业生产要素投入强度与农业面源污染负荷相关性分析结果¹⁾

Table 4 Correlation analysis results between agricultural production factors input intensity and total pollution load

	COD 负荷	TN 负荷	TP 负荷	化肥投入强度	农膜投入强度	农药投入强度
COD 负荷	1					
TN 负荷	0.960 **	1				
TP 负荷	0.966 **	0.934 **	1			
化肥投入强度	-0.112 *	-0.073	-0.033	1		
农膜投入强度	-0.187 **	-0.170 **	-0.120 *	0.680 **	1	
农药投入强度	-0.308 **	-0.290 **	-0.246 **	0.395 **	0.549 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 下同

为了进一步揭示污染负荷和投入强度之间的关系,将农业面源污染负荷、投入强度和污染负荷计算单位以及城镇化率进行相关性分析(表5),其中农业面源污染负荷与面源污染负荷计算单位呈极显著相关($P < 0.01$),与城镇化率呈极显著负相关($P < 0.01$);投入强度与城镇化率呈极显著正相关(P

< 0.01),与农村人口数和耕地面积呈极显著负相关($P < 0.01$),投入强度与投入总量并不存在显著相关关系,并且投入强度与畜禽养殖产量和粮食作物产量呈负相关关系,其中农药和农膜投入强度与畜禽养殖产量和粮食作物产量呈极显著负相关($P < 0.01$).

表5 农业面源污染计算指标与农业面源污染负荷指标相关性分析结果

Table 5 Correlation analysis results of indicators affecting agricultural non-point source pollution and agricultural non-point source pollution load indicators

	COD 负荷	TN 负荷	TP 负荷	化肥投入强度	农药投入强度	农膜投入强度
城镇化率	-0.507**	-0.529**	-0.367**	0.316**	0.321**	0.420**
化肥总施用量	0.861**	0.952**	0.816**	-0.042	-0.158**	-0.277**
地膜施用量	0.201**	0.229**	0.227**	-0.041	0.079	-0.075
农药总施用量	0.562**	0.610**	0.542**	-0.055	0.087	-0.169**
农作物耕地面积	0.833**	0.833**	0.701**	-0.314**	-0.337**	-0.385**
农村人口总数	0.804**	0.831**	0.700**	-0.232**	-0.256**	-0.387**
农作物产量	0.743**	0.849**	0.719**	-0.055	-0.138**	-0.238**
畜禽养殖产量	0.799**	0.693**	0.861**	-0.079	-0.126**	-0.253**
水产养殖产量	0.557**	0.580**	0.645**	0.104*	0.038	-0.004

3 讨论

近20年来,广东省面源污染负荷变化呈现一定的时间阶段性特征,国内经济体制改革和国际经济形势的变化以及环境保护政策的改变对农业生产和农产品市场的影响是导致污染负荷变化的主要原因^[30]. 1999~2006年经历了市场调节增长的阶段,在自由市场机制下,农产品的商品属性得到充分地展现^[5],从而刺激了农业产品的生产,污染负荷随之增加.而在2007年污染负荷出现大幅度地降低,这是由于金融危机出现所导致畜禽养殖数量的急剧减少造成的^[31]. 2007~2015年期间,随着经济的复苏以及一系列有利的农业政策出台,使得污染负荷缓慢增长. 2015~2019年期间,环境保护政策的完善与实施力度的加大,又使得污染负荷逐年降低.化肥、农药和地膜的使用量受经济形势影响较小,这可能与耕地逐渐转变为建设用地或者撂荒导致的耕地面积减小有关^[32,33],为保证农作物产量投入了更多的化肥和农药.相关行动方案的颁布使得化肥与农药的使用量近几年有所下降^[34,35],但是地膜投入量并未出现降低的趋势,说明种植业生产要素的投入很大程度上受到农业政策的影响.

珠三角地区污染负荷贡献率最高,说明珠三角地区存在着较大的农业面源污染问题^[36]. 珠三角地区作为华南地区经济中心和人口最稠密地区,高速发展导致农业用地极大地被压缩^[4],而珠三角地区人均肉类产品消费远高于全国平均水平^[37],为了保证供应,化肥的施用量大幅增加并且畜禽养殖的规模不断扩大;其次,考虑到食物的运输距离成本,珠

三角周边地区农业生产的积极性较高^[4];此外,居民饮食结构的改变也会对蔬菜这类施肥量远高于其他农作物的农产品需求量增加^[12,13].

从污染来源方面看,化肥是广东省TN污染负荷最主要的来源^[5],畜禽养殖业是COD和TP污染负荷的主要来源,渔业养殖对于污染负荷的占比呈现明显上升趋势.广东是全国主要的水产养殖区域^[38,39],并且目前水产养殖业规模仍在持续扩大^[40~42],2019年珠三角地区水产养殖占广东省41.15%,相比于1999年,水产养殖总产量上升112.98%,然而水产养殖过程中饲料的利用效率普遍较低^[43],导致大量的养分扩散至水域或者滞留在养殖区域内,水产养殖的污染物排放逐渐成为珠三角地区TN和TP污染负荷的主要来源^[42,44].粤北和粤西地区农业生产方式主要以畜禽养殖和种植业为主,所以污染来源主要是畜禽粪污以及化肥施用.粤东地区由于农村人口比重较高,使得农村生活的污染排在COD污染负荷来源中的占比逐渐上升,此外粤东地区位于沿海地带,水产养殖规模的扩大使得水产养殖排放的总磷占比也逐年上升.

城镇化的提高会导致耕地面积的缩减和耕地使用率的降低以及农村劳动力的转移^[45~47],为了增加粮食产量,耕地投入要素强度相应增加,因此城镇化率与耕地投入要素强度呈正相关;但是高城镇化率会导致当地农业生产活动减弱^[47],降低当地的农业面源污染负荷(表5).因此城镇化率的增加在减少当地的农业面源污染负荷的同时增加了耕地投入要素强度.目前广东省化肥利用率较低^[6],较高的化

肥投入强度会增加 N_2O 等温室气体的排放^[16]. 较高强度的化肥和地膜施用, 会导致农田持久性有机污染物和微塑料的大量富集^[48,49]. 因此在处理高城镇化率的城市农业面源污染问题时, 化肥、农药和地膜是重点关注对象^[50], 并且需要考虑提高耕地生产投入要素利用效率的问题^[51].

基于广东省面源污染负荷时空特征及变化趋势, 对于广东省面源污染问题, 需针对不同的污染物类型来采取相应地措施. 在 COD 污染的管控方面, 应着重于畜禽养殖以及农村生活污水处理上, 而对于总氮和总磷污染负荷的管控, 要从化肥的施用管理入手, 其次应减少散户畜禽养殖并逐步完善规模化畜禽养殖业粪污处理系统. 最后, 需要增加水产养殖业面源污染排放的监管和治理力度^[52,53], 完善水产养殖业中污染物扩散机制, 加强水产养殖污染控制技术的研究, 制定有效的预警防治措施. 此外, 农业生产过程中产生的新型污染物(例如抗生素、微塑料和持久性有机污染物等)也需要引起重视^[54,55].

4 结论

(1) 近 20 年来, 广东省农业面源污染总污染负荷和 COD 负荷有所下降, TN 和 TP 的污染负荷上升. 农业面源污染负荷排放存在阶段性变化特征, 经济和农业政策对农业面源污染负荷影响较大, 尤其是对种植业生产要素的影响较为明显.

(2) 从空间上来看, 珠三角地区是广东省农业面源污染负荷最高的地区. 城镇化率与农村人口和农业面源污染指标呈现极显著关系.

(3) 畜禽养殖是 COD 的主要来源, 化肥和畜禽养殖是 TN 的主要来源, 畜禽养殖和水产养殖是 TP 的主要来源, 水产养殖污染物排放占比呈现出明显上升趋势, 且不同区域的农业生产模式造成的污染物来源存在差异.

(4) 广东省面源污染负荷总量虽有下降, 但农业生产投入强度仍然呈上升趋势, 面源污染问题依旧严峻.

致谢: 感谢中国科学院亚热带农业生态研究所李裕元教授在本文选题及写作过程中所提的宝贵意见.

参考文献:

[1] 肖宇婷, 姚婧, 谌书, 等. 沱江流域总氮面源污染负荷时空演变[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3773-3784.
Xiao Y T, Yao J, Chen S, et al. Temporal and spatial evolution of non-point source pollution load of total nitrogen in Tuojiang River basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3773-3784.

[2] 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 status and characteristics of agricultural non point source pollution in China [J]. Water Resources Protection, 2021, **37**(4): 140-147, 172.

[3] Jin G, Li Z H, Deng X Z, et al. An analysis of spatiotemporal patterns in Chinese agricultural productivity between 2004 and 2014[J]. Ecological Indicators, 2019, **105**: 591-600.

[4] Mao Y P, Zhang H, Tang W Z, et al. Net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs in Pearl River Delta region (2008-2016) [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.111952.

[5] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978-2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.

[6] Sun C, Chen L, Zhai L M, et al. National assessment of nitrogen fertilizers fate and related environmental impacts of multiple pathways in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **277**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123519.

[7] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1159-1168.

[8] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 关于发布《第二次全国污染源普查公报》的公告 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020-06-08.

[9] 董斯齐, 黄翀. 粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5384-5393.
Dong S Q, Huang C. Land-based nitrogen pollution source structure and spatial distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5384-5393.

[10] 广东省生态环境厅, 广东省农业农村厅, 广东省统计局. 广东省第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. http://gdee.gd.gov.cn/wrygzdt/content/post_3100417.html, 2020-10-14.

[11] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5348-5357.
Fang N, Liu L L, You Q H, et al. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5348-5357.

[12] 叶延琼, 章家恩, 李逸勉, 等. 基于 GIS 的广东省农业面源污染的时空分异研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(2): 369-377.
Ye Y Q, Zhang J E, Li Y M, et al. Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution based on GIS technology in Guangdong Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(2): 369-377.

[13] 林兰稳, 朱立安, 曾清苹. 广东省农业面源污染时空变化及其防控对策[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(6): 1245-1250.
Lin L W, Zhu L A, Zeng Q P. Spatial and temporal changes of agricultural non-point source pollution in Guangdong Province and its prevention and control measures [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(6): 1245-1250.

[14] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2020 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2020 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.

- [15] Zhang Y N, Long H L, Li Y R, *et al.* Non-point source pollution in response to rural transformation development; a comprehensive analysis of China's traditional farming area[J]. *Journal of Rural Studies*, 2021, **83**: 165-176.
- [16] Ye S J, Song C Q, Shen S, *et al.* Spatial pattern of arable land-use intensity in China [J]. *Land Use Policy*, 2020, **99**, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104845.
- [17] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 关于发布《第二次全国污染源普查公报》的公告 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020-06-09.
- [18] 《广东农村统计年鉴》编纂委员会. 广东农村统计年鉴 2000-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2020.
- [19] 广东省统计局. 广东统计年鉴 2000-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2020.
- [20] 赖斯芸. 非点源污染调查评估方法及其应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004. 38-45.
- [21] Wang X L, Yang Z L, Liu X, *et al.* The composition characteristics of different crop straw types and their multivariate analysis and comparison [J]. *Waste Management*, 2020, **110**: 87-97.
- [22] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [23] Tao Y, Liu J, Guan X Y, *et al.* Estimation of potential agricultural non-point source pollution for Baiyangdian Basin, China, under different environment protection policies[J]. *PLoS One*, 2020, **15**(9), doi: 10.1371/journal.pone.0239006.
- [24] 陶园, 徐静, 任贺靖, 等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(4): 257-264.
Tao Y, Xu J, Ren H J, *et al.* Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(4): 257-264.
- [25] 武淑霞, 刘宏斌, 刘申, 等. 农业面源污染现状及防控技术 [J]. *中国工程科学*, 2018, **20**(5): 23-30.
Wu S X, Liu H B, Liu S, *et al.* Review of current situation of agricultural non-point source pollution and its prevention and control technologies [J]. *Engineering Science*, 2018, **20**(5): 23-30.
- [26] 李丽芬, 徐云强, 苏保林, 等. 池塘养殖污染负荷核算方法研究及比较分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(9): 2174-2183.
Li L F, Xu Y Q, Su B L, *et al.* Accounting methods and comparative analysis of pollution load from an aquaculture pond [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(9): 2174-2183.
- [27] 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 等. 洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 734-742.
Liu S R, Zhao J D, Xiao S B, *et al.* Spatio-temporal variation of release flux of sediment nitrogen and phosphorus in high-risk period of algal bloom in Lake Erhai [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 734-742.
- [28] Chen M, Chen J, Du P. An inventory analysis of rural pollution loads in China [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **54**(11-12): 65-74.
- [29] 邓春梅, 李玉萍, 李茂芬, 等. 基于 GIS 的海南省农业面源污染时空分异研究 [J]. *南方农业学报*, 2020, **51**(10): 2580-2587.
Deng C M, Li Y P, Li M F, *et al.* Spatio-temporal variation of agriculture non-point source pollution based on GIS technology in Hainan Province [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, **51**(10): 2580-2587.
- [30] Fan L C, Yuan Y M, Ying Z C, *et al.* Decreasing farm number benefits the mitigation of agricultural non-point source pollution in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(1): 464-472.
- [31] Zhang T, Ni J P, Xie D T. Assessment of the relationship between rural non-point source pollution and economic development in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(8): 8125-8132.
- [32] Yang R, Zhang J, Xu Q, *et al.* Urban-rural spatial transformation process and influences from the perspective of land use: a case study of the Pearl River Delta Region [J]. *Habitat International*, 2020, **104**, doi: 10.1016/j.habitatint.2020.102234.
- [33] Yang C, Liu H Z, Li Q Q, *et al.* Rapid urbanization induced extensive forest loss to urban land in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, **31**(1): 93-108.
- [34] 中华人民共和国农业农村部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案 [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm, 2015-02-17.
- [35] 中华人民共和国农业农村部. 到 2020 年农药使用量零增长行动方案 [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm, 2015-02-17.
- [36] Wan S Z, Chen F S, Hu X F, *et al.* Urbanization aggravates imbalances in the active C, N and P pools of terrestrial ecosystems [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, **21**, doi: 10.1016/j.gecco.2019.e00831.
- [37] Chen C, Wen Z G, Wang Y H. Nitrogen flow patterns in the food system among cities within urban agglomeration: a case study of the Pearl River Delta region [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135506.
- [38] Wang Q D, Li Z J, Gui J F, *et al.* Paradigm changes in freshwater aquaculture practices in China: moving towards achieving environmental integrity and sustainability [J]. *Ambio*, 2018, **47**(4): 410-426.
- [39] Wang Q D, Cheng L, Liu J S, *et al.* Freshwater aquaculture in PR China: trends and prospects [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2015, **7**(4): 283-302.
- [40] Cai C F, Gu X H, Ye Y T, *et al.* Assessment of pollutant loads discharged from aquaculture ponds around Taihu Lake, China [J]. *Aquaculture Research*, 2013, **44**(5): 795-806.
- [41] Meng W Q, Feagin R A. Mariculture is a double-edged sword in China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, **222**: 147-150.
- [42] Ren C Y, Wang Z M, Zhang Y Z, *et al.* Rapid expansion of coastal aquaculture ponds in China from Landsat observations during 1984-2016 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, **82**, doi: 10.1016/j.jag.2019.101902.
- [43] Zhang Y, Bleeker A, Liu J G. Nutrient discharge from China's aquaculture industry and associated environmental impacts [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(4), doi: 10.1088/1748-9326/10/4/045002.
- [44] 何媛婷, 王石英, 袁再健, 等. 珠江三角洲土地利用变化及其对城市化发展的响应 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(2): 303-310.

- He Y T, Wang S Y, Yuan Z J, *et al.* Land use change and its response to urbanization in the Pearl River Delta [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(2): 303-310.
- [45] 王文锦, 王卿, 朱安生, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3442-3450.
- Wang W J, Wang Q, Zhu A S, *et al.* Role of land use changes on ammonia emissions from agricultural ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3442-3450.
- [46] Shao S, Li B L, Fan M T, *et al.* How does labor transfer affect environmental pollution in rural China? Evidence from a survey [J]. *Energy Economics*, 2021, **102**, doi: 10.1016/j.eneco.2021.105515.
- [47] Lu H, Xie H L. Impact of changes in labor resources and transfers of land use rights on agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **207**: 134-140.
- [48] Dereumeaux C, Fillol C, Quenel P, *et al.* Pesticide exposures for residents living close to agricultural lands: a review [J]. *Environment International*, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105210.
- [49] Kumar M, Xiong X N, He M J, *et al.* Microplastics as pollutants in agricultural soils [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114980.
- [50] Zhang J T, Tian H Q, Shi H, *et al.* Increased greenhouse gas emissions intensity of major croplands in China: implications for food security and climate change mitigation [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(11): 6116-6133.
- [51] Zhang Y J, Yu Q. Identification of current research intensity and influence factors of agricultural nitrogen loss from cropping systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **276**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123308.
- [52] Qiu J. China vows to clean up rural environment [EB/OL]. <https://doi.org/10.1038/news.2011.200>, 2011-04-01.
- [53] Li X, Li Y Y, Lv D Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136235.
- [54] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, *et al.* Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114096.
- [55] Oberoi A S, Jia Y Y, Zhang H Q, *et al.* Insights into the fate and removal of antibiotics in engineered biological treatment systems: a critical review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(13): 7234-7264.



CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)