

# 目次

|                                                                    |                                                             |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响 .....                                         | 朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 ( 617 )                                  |
| 不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析 .....                                    | 秦阳, 胡建林, 孔海江 ( 626 )                                        |
| 不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异 .....                                           | 陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祎, 胡建林 ( 635 )                 |
| 2006~2021 年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析 .....                             | 郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 ( 645 )                         |
| 基于大气成分观测网的山西省近地面 O <sub>3</sub> 体积分数分布特征 .....                     | 李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿娉, 张逢生, 高兴艾 ( 655 )                    |
| 伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 .....                                           | 王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 ( 668 )                |
| 运城市四季 VOCs 特征、来源及臭氧形成敏感物种 .....                                    | 阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 ( 678 )                  |
| 郑州市秋冬季污染过程中大气 VOCs 污染特征、来源解析及活性分析 .....                            | 赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 ( 689 )                          |
| 郑州市 PM <sub>2.5</sub> 中有机的污染特征、来源解析及二次生成 .....                     | 李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 ( 700 )                          |
| 中国三大城市群 PM <sub>2.5</sub> 浓度非线性变化分析 .....                          | 吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 ( 709 )                                  |
| 基于 LEAP 模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析 .....                              | 吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 ( 721 )                           |
| 碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化 .....                                          | 郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 ( 732 )                                    |
| 考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析 .....                               | 马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 ( 744 )                           |
| 我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析 .....                                        | 韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 ( 755 )                                       |
| 不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响 .....                                   | 谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 ( 768 )                           |
| 深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应 .....                           | 韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 ( 780 )                                  |
| 河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析 .....                                     | 王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 ( 792 )                           |
| 北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析 .....                                           | 郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 ( 802 )                      |
| 店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析 .....                                      | 郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 ( 813 )                                        |
| 张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析 .....                                     | 金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 ( 826 )                        |
| 黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布 .....                                         | 闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 ( 837 )                              |
| 制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法 .....                                    | 彭安萍, 高虎, 张新波 ( 844 )                                        |
| 水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响 .....                                         | 汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 ( 854 )                    |
| 富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除 .....                                            | 刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 ( 862 )                               |
| 壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中 Cd <sup>2+</sup> 的吸附机制 .....                    | 姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 ( 873 )                   |
| 硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制 .....                                            | 邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 ( 885 )                                |
| 磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性 .....                                      | 韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 ( 898 )                    |
| 广东省高分辨率温室气体排放清单及特征 .....                                           | 卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 ( 909 )  |
| 辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO <sub>2</sub> 交换及其环境调控 .....                    | 刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 ( 920 )                          |
| 生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N <sub>2</sub> O 和 CH <sub>4</sub> 排放的影响 ..... | 胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 ( 929 )                    |
| 生物炭改良盐碱地研究与应用进展 .....                                              | 魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 ( 940 )                       |
| 免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析 .....                                     | 徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 ( 952 )           |
| 黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例 .....                           | 李月, 罗红芬 ( 961 )                                             |
| 不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响 .....                                        | 李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 ( 974 )                    |
| Ca 改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制 .....                                     | 张超, 翟付杰, 单保庆 ( 983 )                                        |
| 秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素 .....                                  | 闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 ( 992 )                              |
| 我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险 .....                                    | 杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 ( 1004 )              |
| 广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估 .....                                           | 邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 ( 1015 ) |
| 基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析 .....                                       | 潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 ( 1026 )                                       |
| 基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析 .....            | 罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 ( 1038 )        |
| 基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估 .....                                    | 袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 ( 1049 )                           |
| 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析 .....                      | 沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 ( 1058 )               |
| PE-Cd 复合污染土壤中 Cd 释放迁移特征及机制 .....                                   | 王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 ( 1069 )                                   |
| 氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性 .....                                             | 李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 ( 1080 )                |
| 昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析 .....                                      | 张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 ( 1090 )                |
| 钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果 .....                                          | 王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 ( 1098 )                             |
| 氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复 .....                                     | 袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 ( 1107 )                       |
| 关键生育期施加外源锌灌溉水对水稻镉吸收转运的影响 .....                                     | 周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 ( 1118 )                 |
| 外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响 .....                                     | 张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 ( 1128 )            |
| 稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应 .....                                        | 张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 ( 1141 )      |
| 根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用 .....                                       | 郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 ( 1150 )             |
| 高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应 .....                            | 胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 ( 1161 )           |
| 微塑料的人体富集及毒性机制研究进展 .....                                            | 包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 ( 1173 )                             |
| 机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展 .....                                    | 白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 ( 1185 )                    |
| 微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展 .....                                      | 侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 ( 1196 )                    |
| 水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展 .....                                         | 郑伟康, 刘振中, 项晓方 ( 1210 )                                      |
| 基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素 .....                                   | 郭晨浩, 李林霏, 夏显力 ( 1222 )                                      |

# 广东省高分辨率温室气体排放清单及特征

卢清<sup>1</sup>, 唐明双<sup>1</sup>, 廖彤<sup>2</sup>, 黄志炯<sup>3</sup>, 钟庄敏<sup>2</sup>, 宋佩珊<sup>4</sup>, 沈劲<sup>2</sup>, 张智胜<sup>1</sup>, 梁小明<sup>1</sup>, 孙家仁<sup>1</sup>, 陈来国<sup>1\*</sup>

(1. 生态环境部华南环境科学研究所广东省水与大气污染防治重点实验室, 广州 510655; 2. 广东省生态环境监测中心国家环境保护区域空气质量监测重点实验室, 广州 510308; 3. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 4. 东莞市生态环保研究院有限公司, 东莞 523000)

**摘要:** 根据典型城市调查与统计数据收集得到的广东省活动水平数据, 采用自上而下和自下而上相结合的排放因子法和GIS技术, 建立了广东省2018年3 km × 3 km高分辨率温室气体排放清单。估算范围包括能源活动、工业生产过程、农业活动、土地利用变化和林业、废弃物处理以及电力调入(出)间接排放等6大类CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O这3种温室气体。结果表明, 广东省2018年CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量分别为8.5 × 10<sup>8</sup>、1.9 × 10<sup>6</sup>和1.1 × 10<sup>5</sup> t, 以CO<sub>2</sub>当量计分别为8.5 × 10<sup>8</sup>、4.0 × 10<sup>7</sup>和3.4 × 10<sup>7</sup> t, 合计9.2 × 10<sup>8</sup> t。CO<sub>2</sub>是广东省主要的温室气体排放种类, 占全省温室气体总排放量的92.0%, 能源活动和电力调入(出)间接排放是广东省温室气体排放的主要部门, 排放占比分别为77.9%和7.6%, 合计占比为85.5%。从温室气体排放的空间分布情况来看, 全省大部分地区温室气体表现为排放源, 部分区域表现为汇; 温室气体排放主要集中在珠三角地区, 并呈现一定的沿路网和航道分布的特征; 温室气体高排放网格主要为大型电厂、钢铁厂和水泥厂等高耗能企业所在地。

**关键词:** 高分辨率; 温室气体; 排放清单; 广东省; 排放特征

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0909-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303229

## High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China

LU Qing<sup>1</sup>, TANG Ming-shuang<sup>1</sup>, LIAO Tong<sup>2</sup>, HUANG Zhi-jiong<sup>3</sup>, ZHONG Zhuang-min<sup>2</sup>, SONG Pei-shan<sup>4</sup>, SHEN Jin<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-sheng<sup>1</sup>, LIANG Xiao-ming<sup>1</sup>, SUN Jia-ren<sup>1</sup>, CHEN Lai-guo<sup>1\*</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 2. State Environmental Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring, Guangdong Ecological Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China; 3. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 4. Dongguan Ecological and Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

**Abstract:** Based on the typical city survey data and statistics of Guangdong Province, a 2018-based 3 km × 3 km gridded greenhouse gas emissions inventory was developed for Guangdong Province using the combination of top-down and bottom-up emission factor methods. The inventory covered the CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions from energy, industrial processes, agriculture, land use change and forest, waste management, and indirect sources. The results showed that estimates for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in Guangdong Province for the year 2018 were 8.5 × 10<sup>8</sup>, 1.9 × 10<sup>6</sup>, and 1.1 × 10<sup>5</sup> t, respectively, and 8.5 × 10<sup>8</sup>, 4.0 × 10<sup>7</sup>, and 3.4 × 10<sup>7</sup> t by equivalent carbon dioxide, totaling 9.2 × 10<sup>8</sup> t. CO<sub>2</sub> was the main greenhouse gas in Guangdong Province, accounting for 92.0% of the total emissions. Energy and indirect sources were the main emission sources, accounting for 77.9% and 7.6%, respectively, totaling 85.5%. Spatial distributions illustrated that most grids were greenhouse gas emissions, whereas some others were greenhouse gas sinks; the greenhouse gas emissions were distributed mainly in the Pearl River Delta region and had certain characteristics of distribution along the road network and channels. The greenhouse gas grids of high emission were mainly the locations of high energy-consuming enterprises such as large power plants, steel mills, and cement plants.

**Key words:** high resolution; greenhouse gas; emission inventory; Guangdong Province; emission characteristics

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组报告《气候变化2021:自然科学基础》指出:如果不在全球范围内进行二氧化碳和其他温室气体的大幅减排,全球升温将在本世纪内超过1.5℃甚至2℃,人类的行动有可能决定未来的气候走向<sup>[1]</sup>。作为全球最大的能源消费国<sup>[2]</sup>,我国积极应对全球气候变化。习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论上明确提出,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和<sup>[3]</sup>,这标志着我国正式进入以降碳为重点战略方向和推动减污降碳协

同增效的新阶段<sup>[4]</sup>。

人类活动产生的温室气体是导致全球变暖的主要原因之一<sup>[1]</sup>,其排放主要来自能源、工业生产、农业、林业和废弃物处理等部门<sup>[5,6]</sup>,合理的温室气体排放清单可为我国减碳工作的推进和双碳目标的实

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-05-16

基金项目: 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室开放基金项目(2022年度); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202002-060)

作者简介: 卢清(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为大气污染物和温室气体排放来源与影响, E-mail: luqing@scies.org

\* 通信作者, E-mail: chenlaiguo@scies.org



现提供基础支撑. 对于省级尺度的温室气体排放清单来说, 在达到  $3\text{ km} \times 3\text{ km}$  分辨率时便可界定为高分辨率<sup>[7]</sup>. 而温室气体排放空间分布特征的研究有助于精细化管控措施的制定, 对温室气体排放管控和政策的实际应用具有重要的意义<sup>[8]</sup>. 国外开展了国家和城市层面的温室气体清单研究工作<sup>[6,9-15]</sup>, 并定期更新形成高分辨率排放清单<sup>[13-15]</sup>. 我国学者开展了全国<sup>[16-22]</sup>、区域<sup>[23,24]</sup>、省级<sup>[25,26]</sup>和城市级<sup>[27-33]</sup>的温室气体清单研究工作, 但更多的研究主要关注能源消费<sup>[21,29,34-36]</sup>、机动车<sup>[37,38]</sup>、船舶<sup>[39]</sup>、废弃物处理<sup>[40-45]</sup>和农业<sup>[46,47]</sup>等单个部门的温室气体排放, 高分辨率排放清单的研究主要针对全国<sup>[22]</sup>、城市<sup>[8,31]</sup>或单一源(如机动车)<sup>[38]</sup>, 涉及省级多种源类的高分辨率温室气体排放清单的研究则鲜见报道. 广东省作为全国的经济和人口大省<sup>[48]</sup>, 在经济快速发展和能源消费量快速增加的同时, 一系列节能减排措施持续稳步推进, 产业和能源结构逐步升级, 其温室气体排放及变化特征具有较强的代表性, 值得广泛关注. 因此, 开展该区域多类别和高分辨率温室气体排放清单及其特征研究, 无论在科学研究上还是在环境管理上都具有重要的意义.

本文以广东省为研究区域, 开展能源活动、工业生产活动、农业活动、土地利用变化和林业、废弃物处理以及电力调入(出)间接排放等6个部门二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )这3种温室气体排放清单研究工作, 并结合关键社会因子及 ArcGIS 技术对广东省温室气体排放清单进行  $3\text{ km} \times 3\text{ km}$  的空间分配, 建立广东省高分辨率温室气体排放清单, 以期广东省制定温室气体精细化减排以及实现碳达峰和碳中和目标提供数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象和范围

以广东省为研究对象, 以2018年为基准年. 广东省2018年国内生产总值(GDP)为9.7万亿元<sup>[49]</sup>, 年末常住人口为1.1亿人<sup>[49]</sup>. 根据IPCC、国家及广东省相关编制指南<sup>[6,50-52]</sup>的技术框架要求, 本研究温室气体排放估算涵盖能源活动、工业生产活动、农业活动、土地利用变化和林业(land use change and forest, LUCF)、废弃物处理以及电力调入(出)间接排放等6大类  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  这3种温室气体的排放. 其中, 因缺少相关统计数据, 氢氟碳化物、全氟化碳和六氟化硫等含氟温室气体不在本研究考虑范围. 排放源的分类详见表1.

### 1.2 估算方法

本研究广东省温室气体排放量的核算主要参考

《省级温室气体清单编制指南(试行)》<sup>[51]</sup>(简称《国家指南》)和《广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)》<sup>[52]</sup>(简称《广东省指南》)的核算方法与核算边界, 核算的排放源、温室气体种类、活动水平数据类型及来源详见表1, 具体核算方法如下.

#### 1.2.1 能源活动

能源活动泛指所有与能源生产、运输、加工转化和燃烧使用相关的过程, 包括化石燃料燃烧、生物质燃烧和油气系统逃逸等3类源, 产生的温室气体种类包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ . 其中, 化石燃料燃烧的排放采用式(1)计算:

$$E_{\text{能源}} = \sum_{i,j} AC_{i,j} \times NCV_j \times EF_j \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中,  $E$  为温室气体排放量(t);  $i$  为不同部门;  $j$  为燃料类型;  $AC$  为燃料 $j$ 消费量( $10^4\text{ t}$  或  $10^8\text{ m}^3$ );  $NCV_j$  为燃料 $j$ 低位发热量 [ $\text{TJ} \cdot (10^4\text{ t})^{-1}$  或  $\text{TJ} \cdot (10^8\text{ m}^3)^{-1}$ ];  $EF$  为温室气体排放因子( $\text{kg} \cdot \text{TJ}^{-1}$ );  $10^{-3}$  为单位转换系数.

生物质燃烧活动的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放和油气系统的  $\text{CH}_4$  逃逸排放采用式(2)计算:

$$E = \sum_i AD_i \times EF_i \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中,  $E$  为温室气体排放量(t);  $i$  为不同部门/排放类别;  $AD$  为活动水平数据, 对于生物质燃烧活动来说为生物质燃烧量, 对于油气系统逃来说为天然气输送企业增压站个数、计量站个数和管线(逆止阀)个数等;  $EF$  为温室气体排放因子( $\text{kg} \cdot \text{单位活动水平}^{-1}$ );  $10^{-3}$  为单位转换系数.

本文能源活动中涉及的化石燃料包括无烟煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、煤矸石、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石油焦、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品、天然气和液化天然气等22类在中国能源统计年鉴统计范围内的燃料种类. 化石燃料的消费量主要来自《中国能源统计年鉴2019》<sup>[53]</sup>, 低位发热量来自《广东省指南》<sup>[52]</sup>、《国家指南》<sup>[51]</sup>以及2006年IPCC国家温室气体清单指南<sup>[6]</sup>. 生物质燃烧的活动水平数据主要通过调研获取, 油气系统逃逸的活动水平数据主要来自《中国能源统计年鉴2019》<sup>[53]</sup>和典型城市调研. 排放因子主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>.

#### 1.2.2 工业生产活动

工业生产过程的温室气体排放主要有水泥、石灰、钢铁和电石等生产过程的  $\text{CO}_2$  排放, 己二酸和硝酸生产过程的  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 以及一氯二氟甲烷、铝、镁、电力设备、半导体和氢氟烃等生产过程的含氟温室气体的排放. 考虑到活动水平数据的可获取性及各类工业产品生产过程温室气体的排放类型, 本文主

表 1 排放源分类体系及活动水平数据类型  
Table 1 Emission source categorization and its activity data

| 一级分类        | 二级分类            | 三级分类                                     | 温室气体种类                                                                 | 活动水平数据类型                                             |
|-------------|-----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 能源活动        | 化石燃料燃烧          | 能源工业                                     | CO <sub>2</sub> 和 N <sub>2</sub> O                                     | 各类型能源消费量                                             |
|             |                 | 农业                                       | CO <sub>2</sub>                                                        |                                                      |
|             |                 | 工业                                       | CO <sub>2</sub>                                                        |                                                      |
|             |                 | 建筑业                                      | CO <sub>2</sub>                                                        |                                                      |
|             |                 | 交通运输                                     | CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O                    |                                                      |
|             |                 | 服务业                                      | CO <sub>2</sub>                                                        |                                                      |
|             |                 | 居民生活                                     | CO <sub>2</sub>                                                        |                                                      |
|             | 生物质燃烧           |                                          | CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O                                     | 秸秆薪柴消费量                                              |
|             | 油气系统逃逸          |                                          | CH <sub>4</sub>                                                        | 天然气输送企业增压站个数、计量站个数和管线(逆止阀)个数                         |
|             |                 |                                          |                                                                        | 天然气消费量、原油储运量和原油炼制量                                   |
| 工业生产过程      | 水泥生产过程          |                                          | CO <sub>2</sub>                                                        | 熟料产量                                                 |
|             | 石灰生产过程          |                                          | CO <sub>2</sub>                                                        | 石灰产量                                                 |
|             | 钢铁生产过程          |                                          | CO <sub>2</sub>                                                        | 石灰石和白云石消耗量、炼钢用生铁量和钢材产量                               |
| 农业          | 稻田              |                                          | CH <sub>4</sub>                                                        | 稻田播种面积                                               |
|             | 农用地             |                                          | N <sub>2</sub> O                                                       | 乡村人口数<br>氮肥和复合肥折纯用量;奶牛、非奶牛、羊、猪和家禽等年末存栏数              |
|             | 动物肠道发酵          |                                          | CH <sub>4</sub>                                                        | 奶牛、非奶牛、山羊和猪等年末存栏数                                    |
|             | 动物粪便管理系统        |                                          | CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O                                     | 奶牛、非奶牛、山羊、猪和家禽等年末存栏数                                 |
| 土地利用变化与林业总计 | 森林和其他木质生物质碳储量变化 | 乔木林<br>竹林、经济林和灌木林<br>疏林、散生木和四旁树<br>活立木消耗 | CO <sub>2</sub>                                                        | 活立木、乔木林和散四疏(散生木、四旁树和疏林)蓄积量;竹林、经济林和灌木林面积变化;乔木林和散四疏生长率 |
|             | 森林转化            | 燃烧排放<br>分解排放                             | CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O<br>CO <sub>2</sub> | 乔木林蓄积量变化                                             |
|             | 固体废弃物           |                                          | CO <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub>                                      | 垃圾填埋量和焚烧量                                            |
| 废弃物处理       | 废水              |                                          | CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O                                     | BOD 排放量、废水处理率、年末常住人口和污水处理厂 BOD 去除率                   |
| 电力调入(出)间接排放 |                 |                                          | CO <sub>2</sub>                                                        | 广东省电力净调入(出)量                                         |

要考虑水泥、石灰和钢铁生产过程的温室气体排放。

工业生产过程的温室气体排放主要采用式(2)进行估算,其中,水泥、石灰和钢铁生产的活动水平数据分别为水泥行业熟料产量、石灰行业石灰产量以及钢铁行业石灰石和白云石消耗量,炼钢用生铁量以及钢材产量等,主要通过全省规模以上生产企业调研获取。排放因子主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>。

1.2.3 农业活动

农业活动温室气体排放包括稻田 CH<sub>4</sub> 排放、农用地 N<sub>2</sub>O 排放、动物肠道发酵 CH<sub>4</sub> 排放以及动物粪便管理 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放 4 类。各类活动温室气体排放主要采用式(2)进行估算,其中,稻田 CH<sub>4</sub> 排放的活动水平数据为稻田播种面积;农用地 N<sub>2</sub>O 排放的活动水平数据为农用地 N<sub>2</sub>O 的直接排放和间接排放,主要基于乡村人口数、氮肥和复合肥折纯用量以及畜禽年末

存栏数(包括奶牛、非奶牛、羊、猪和家禽等),并参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>、《国家指南》<sup>[51]</sup>以及 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南<sup>[6]</sup>推荐的估算方法及参数估算得到;动物肠道发酵和动物粪便管理的活动水平数据为奶牛、非奶牛、山羊、猪和家禽等年末存栏数。上述活动水平数据,除乡村人口数来自《广东统计年鉴 2019》<sup>[49]</sup>外,其余数据均来自《广东农村统计年鉴 2019》<sup>[54]</sup>。排放因子主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>。

1.2.4 土地利用变化与林业

与其他源类不同,LUCF 既包括温室气体的排放(如森林采伐或毁林排放的 CO<sub>2</sub>),也包括温室气体的吸收(如森林生长时吸收的 CO<sub>2</sub>)。若森林采伐或毁林的生物量损失超过森林生长的生物量增加,则表现为碳排放源,反之则表现为碳吸收汇。LUCF 包括森林和其他木质生物质碳储量变化以及森林转化两部



分. 其中, 森林和其他木质生物质碳储量变化  $\text{CO}_2$  排放采用式(3)计算:

$$E = \frac{44}{12} \Delta C_{\text{生物量}} = \frac{44}{12} (\Delta C_{\text{乔木林}} + \Delta C_{\text{散四疏}} + \Delta C_{\text{竹/经/灌}} - \Delta C_{\text{消耗}}) \quad (3)$$

式中,  $E$  为温室气体排放量(t);  $\Delta C_{\text{生物量}}$  为森林和其他木质生物质生物量碳储量变化, 其中, 负值(-)表示碳储量的净增加量, 正值(+)表示碳储量的净减少量;  $\Delta C_{\text{乔木林}}$ 、 $\Delta C_{\text{散四疏}}$  和  $\Delta C_{\text{竹/经/灌}}$  分别为乔木林(林分)生物量生长碳吸收, 散生木、四旁树和疏林生物量生长碳吸收, 竹林(或经济林和灌木林)生物量碳储量变化(以碳计, t), 根据式(4)和式(5)计算得到;  $\Delta C_{\text{消耗}}$  为活立木消耗生物量碳排放(以碳计, t), 通过式(4)进行计算:

$$\Delta C_{\text{乔木林}} \text{ 或 } \Delta C_{\text{散四疏}} \text{ 或 } \Delta C_{\text{消耗}} = V \times \text{GR} \times \text{SVD} \times \text{BEF} \times 0.5 \quad (4)$$

式中,  $V$  为乔木林/散四疏/活立木总蓄积量( $\text{m}^3$ );  $\text{GR}$  为活立木蓄积量年生长率(当计算消耗量时为消耗率, %);  $\text{SVD}$  为基本木材密度( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\text{BEF}$  为森林生物量转换系数, 无量纲. 其中, 蓄积量数据来自广东省第四次森林资源二类调查<sup>[55]</sup>;  $\text{GR}$  通过典型城市调研获取;  $\text{SVD}$  和  $\text{BEF}$  主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>,  $\text{SVD}$  为 0.474,  $\text{BEF}$  全林为 1.915.

$$\Delta C_{\text{竹/经/灌}} = \Delta A_{\text{竹/经/灌}} \times B_{\text{竹/经/灌}} \times 0.5 \quad (5)$$

式中,  $\Delta A_{\text{竹/经/灌}}$  为竹林(或经济林和灌木林)面积年变化( $\text{hm}^2$ );  $B_{\text{竹/经/灌}}$  为竹林(或经济林和灌木林)平均单位面积生物量(以干物质计,  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). 其中, 竹林(或经济林和灌木林)面积年变化数据来自广东省第四次森林资源二类调查<sup>[55]</sup>; 竹林、经济林和灌木林平均单位面积生物量主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>, 取值分别为 68.48、35.21 和  $17.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ .

森林转化包括燃烧排放和分解排放. 其中, 燃烧除会产生直接的  $\text{CO}_2$  排放外, 还会排放  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体; 分解排放主要产生  $\text{CO}_2$  排放. 燃烧产生的  $\text{CO}_2$  排放主要采用式(6)进行计算:

$$E = \frac{44}{12} A \times \Delta \text{ABC}_{\text{生物量}} \times r \times C \times R \quad (6)$$

式中,  $E$  为燃烧  $\text{CO}_2$  排放量(t);  $A$  为年转化面积( $\text{hm}^2$ );  $\Delta \text{ABC}_{\text{生物量}}$  转化前后单位面积生物变化量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $r$  为燃烧生物量比例/分解生物量比例; 当计算燃烧排放时,  $C$  为燃烧生物量氧化系数, 取 0.9, 当计算分解排放时,  $C$  取 1;  $R$  为地上生物碳含量, 取 0.5.

其中, 转化面积主要参考广东省第四次森林资源二类调查<sup>[55]</sup>; 燃烧和分解生物量比例主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>, 分别取 50% 和 10%; 转化前后单位面积生物变化量根据式(7)进行计算:

$$\Delta \text{ABC}_{\text{生物量}} = \frac{V}{A} \times \text{SVD} \times \text{BEF} \quad (7)$$

式中,  $\Delta \text{ABC}_{\text{生物量}}$  转化前后单位面积生物变化量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $V$  为森林蓄积量( $\text{m}^3$ );  $A$  为森林面积( $\text{hm}^2$ );  $\text{SVD}$  为基本木材密度( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 取 0.474;  $\text{BEF}$  为森林生物量转换系数, 地上为 1.513. 其中, 蓄积量和面积数据来自广东省第四次森林资源二类调查<sup>[55]</sup>.

### 1.2.5 废弃物处理

废弃物处理温室气体排放包括固废焚烧处理  $\text{CO}_2$  排放、固废填埋处理  $\text{CH}_4$  排放以及废水处理  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放. 其中, 固废焚烧处理  $\text{CO}_2$  排放根据式(8)进行计算:

$$E = \frac{44}{12} \sum_i (IW_i \times \text{FCF}_i \times \text{EF}_i) \quad (8)$$

式中,  $E$  为废弃物焚烧处理的  $\text{CO}_2$  排放量(t);  $i$  为固体废弃物类型;  $IW$  为废弃物的焚烧量(t);  $\text{FCF}$  为废弃物中矿物碳含量比例(%);  $\text{EF}$  为废弃物焚烧炉的焚烧效率(%). 其中, 废弃物焚烧量数据来自《中国统计年鉴 2019》<sup>[56]</sup>; 废弃物中矿物碳含量比例和焚烧效率参考《广东省指南》<sup>[52]</sup> 推荐的比例, 分别为 18% 和 95%.

固废填埋处理  $\text{CH}_4$  排放根据式(9)进行计算:

$$E = (\text{MSW} \times \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times F \times 16/12 - R) \times (1 - \text{OX}) \quad (9)$$

式中,  $E$  为废弃物填埋处理的  $\text{CH}_4$  排放量(t);  $\text{MSW}$  为城市固体废弃物处理量(t);  $\text{MCF}$  为垃圾填埋场的  $\text{CH}_4$  修正因子, 取 1;  $\text{DOC}$  为可降解有机碳(以碳计,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 取 18.3%;  $\text{DOC}_f$  为可分解的  $\text{DOC}$  的比例, 取 0.5;  $F$  为垃圾填埋气体中  $\text{CH}_4$  的比例, 取 0.5;  $R$  为甲烷回收量;  $\text{OX}$  为氧化因子, 取 0.1. 其中, 废弃物填埋量数据来自《中国统计年鉴 2019》<sup>[56]</sup>; 可降解有机碳通过典型城市垃圾成分调研数据计算得到;  $\text{CH}_4$  回收率主要根据典型垃圾填埋的调查获取  $\text{CH}_4$  的回收率并结合  $\text{CH}_4$  产生量计算得到; 其余数据均参考《广东省指南》<sup>[52]</sup> 的推荐值.

废水处理  $\text{CH}_4$  排放通过式(10)进行计算:

$$E = \sum_i (\text{TOW}_i \times \text{EF}_i - R) \quad (10)$$

式中,  $E$  为废水处理的  $\text{CH}_4$  排放量(t);  $i$  为废水的类型, 分为已处理和未处理;  $\text{TOW}$  为废水中有机物总量(以  $\text{BOD}$  计, t);  $\text{EF}$  为排放因子( $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$ );  $R$  为  $\text{CH}_4$  回收率, 取 0. 其中, 废水中有机物总量, 即  $\text{BOD}$  总量, 主要通过典型城市调查获取废水排放量与  $\text{BOD}$  已处理和未处理量的关系, 结合《广东省统计年鉴 2019》<sup>[49]</sup> 的广东省废水排放量估算得到全省已处理和未处理的  $\text{BOD}$  的量; 排放因子通过典型城市调研获取废水处理系统的技术类型, 并选取《广东省指南》<sup>[52]</sup> 推荐的相应排放因子.

废水处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通过式(2)进行计算, 其中, 活

动水平数据为常住人口数(万人),主要来自《广东省统计年鉴 2019》<sup>[49]</sup>;排放因子主要参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>.

1.2.6 电力调入(出)间接排放

根据相关统计数据显示<sup>[53]</sup>,2018年广东省为电力净调入省,调入电量占全省电力消费总量的25%.尽管火力发电企业燃烧化石燃料直接产生的CO<sub>2</sub>与电力产品调入调出隐含的CO<sub>2</sub>(也称间接排放)有着本质的区别,但考虑到电力产品的特殊性以及科学评估非化石燃料电力对减缓CO<sub>2</sub>排放的贡献,本文将电力调入(出)所带来的CO<sub>2</sub>间接排放纳入考虑范围.电力调入(出)CO<sub>2</sub>排放主要采用式(2)进行计算.其中,活动水平数据为电力净调入(出)量,主要来自《中国能源统计年鉴 2019》<sup>[53]</sup>,排放因子参考《广东省指南》<sup>[52]</sup>中2018年广东省电网CO<sub>2</sub>平均排放因子.

1.3 空间分配方法

根据排放源的地理位置或采用与排放源有相同空间变化特征的空间地理信息数据将排放源的排放量分配到一定精度的规则网格中,以研究排放源的排放空间特征,从而实现对排放清单的空间分配<sup>[7]</sup>.由于电力调入(出)间接排放为电网根据各地用电量情况进行综合调配,难以以一个系数进行分配,因此,本文空间分配主要考虑除电力调入(出)间接排放外的所有其他排放源.

基于排放源的排放特征、空间分布特征及可获取的排放源空间地理信息,本文将排放源分为点源、面源和线源,并结合 ArcGIS 的空间分析技术,将各源类的温室气体排放分配至覆盖广东省全域的3 km × 3 km 的网格图层中<sup>[7,8,31,38,57,58]</sup>.其中,点源主要分配方法为化石燃料燃烧中的能源工业和工业根据规模以上企业经纬度及综合能耗情况进行分配,化石燃料燃烧中的交通运输业航空部分根据广东省机场经纬度及各机场的起降架次进行分配,工业生产过程和废弃物处理根据各企业的经纬度进行分配;线源主要分配方法为化石燃料燃烧中交通运输公路和水运

分别根据路网<sup>[59]</sup>和航道<sup>[60]</sup>进行分配;面源的主要分配方法为化石燃料燃烧中的农业以及农业活动中的稻田CH<sub>4</sub>和农用地N<sub>2</sub>O根据耕地进行分配,生物质燃烧根据农村居民点进行分配,土地利用变化与林业根据林地进行分配,农业活动中的动物粪便管理和动物肠道发酵根据畜禽养殖业的分布情况进行分配,其余排放源根据人口进行分配.

2 结果与讨论

基于上述估算方法及排放因子,估算了广东省2018年各部门的温室气体排放量.通过全球增温潜势(GWP)转化,将各类温室气体排放量统一以CO<sub>2</sub>排放当量表示.根据IPCC第二次评估报告<sup>[61]</sup>,以100年影响尺度计,以CO<sub>2</sub>为基准,CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>当量系数分别取为21、310和1.实际温室气体排放量经过全球增温潜势(GWP)转化后的CO<sub>2</sub>排放量见表2.

2.1 广东省温室气体排放清单

由表2可知,2018年广东省温室气体总排放量(以CO<sub>2</sub>计)为9.2 × 10<sup>8</sup>t.其中,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量分别为8.5 × 10<sup>8</sup>、1.9 × 10<sup>6</sup>和1.1 × 10<sup>5</sup>t,以CO<sub>2</sub>计分别为8.5 × 10<sup>8</sup>、4.0 × 10<sup>7</sup>和3.4 × 10<sup>7</sup>t.CO<sub>2</sub>是广东省主要的温室气体,占全省温室气体总排放量的92.0%,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的占比分别为4.3%和3.7%.从温室气体的排放来源看,土地利用变化与林业表现为碳汇,年吸收量为1.6 × 10<sup>7</sup>t,其余部门均表现为碳排放.除LUCF外,能源活动是广东省温室气体排放最大的部门,排放占比达77.9%;电力调入(出)间接排放是第二大排放源,占7.6%;两者排放之和占总排放量的85.5%(图1).这表明广东省温室气体排放主要来自能源消费造成的排放,尽管在“十三五”期间,广东省单位GDP碳排放强度呈现稳步下降的态势,但由于经济的高速发展带来工业和交通领域能源消费量增加的同时,随着居民生活水平的提高,人均电耗处于上升阶段,并在未来很长一段时间将依旧处于上升阶段.此外,工业生产过程、农业活动和废弃物

表2 2018年广东省温室气体排放清单<sup>1)</sup>/t

Table 2 GHG emission inventory of Guangdong Province in 2018/t

| 部门                     | 排放量                               |                                   |                                    | 合计 × 10 <sup>6</sup> |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------|
|                        | CO <sub>2</sub> × 10 <sup>6</sup> | CH <sub>4</sub> × 10 <sup>3</sup> | N <sub>2</sub> O × 10 <sup>3</sup> |                      |
| 能源活动                   | 728.1                             | 53.5                              | 9.6                                | 732.2                |
| 工业生产过程                 | 63.2                              | —                                 | —                                  | 63.2                 |
| 农业活动                   | —                                 | 683.7                             | 93.4                               | 43.3                 |
| 土地利用变化与林业              | -16.0                             | 2.3                               | 0.014                              | -15.9                |
| 废弃物处理                  | 3.4                               | 1 173.8                           | 6.8                                | 30.1                 |
| 电力调入(出)间接排放            | 71.5                              | —                                 | —                                  | 71.5                 |
| 总计 1                   | 850.1                             | 1 913.3                           | 109.8                              | —                    |
| 总计 2 × 10 <sup>6</sup> | 850.1                             | 40.2                              | 34.0                               | 924.4                |

1) 合计和总计2为以CO<sub>2</sub>计;“—”表示该源类无该类温室气体排放



处理的排放贡献分别为 6.7%、4.6% 和 3.2%。

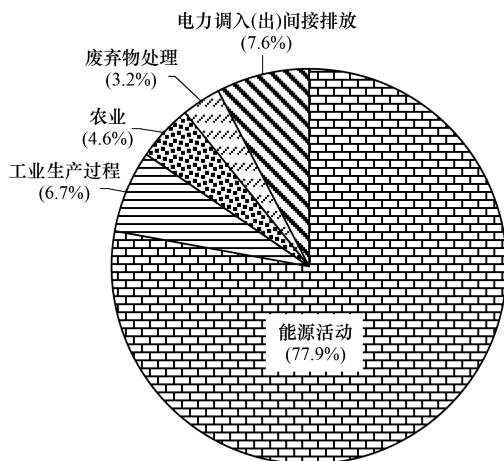


图1 温室气体排放占比

Fig. 1 Proportion of GHG emission by sectors

## 2.2 不同类别温室气体排放特征

### 2.2.1 能源活动

能源活动温室气体排放包括化石燃料燃烧、生物质燃烧和油气系统逃逸,2018年广东省能源活动温室气体合计排放量为  $7.3 \times 10^8$  t,其中化石燃料燃烧排放占比达 99.9%。对于化石燃料燃烧来说,温室气体排放主要来自能源工业、交通运输业和工业,排放占比分别为 66.6%、15.0% 和 14.2%(图2);从排放的燃料类型来看,主要来自无烟煤、原油、柴油、汽油和天然气等燃料,排放占比分别为 34.3%、24.8%、7.3%、6.6% 和 4.5%(图3)。这说明广东省化石燃料燃烧温室气体排放主要来自能源工业中的电力与热力部门的煤炭消耗,能源工业中石油天然气开采与加工业的原油消费,工业领域的煤炭、天然气消费以及交通运输行业的汽油和柴油消费。

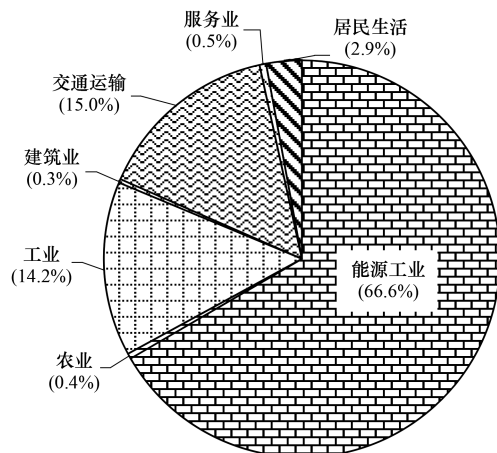


图2 各部门化石燃料燃烧温室气体排放占比

Fig. 2 Proportion of GHG emission by sectors

### 2.2.2 工业生产过程

广东省工业生产过程的温室气体主要为  $\text{CO}_2$ ,排放量为  $6.3 \times 10^7$  t,其中水泥生产过程是工业

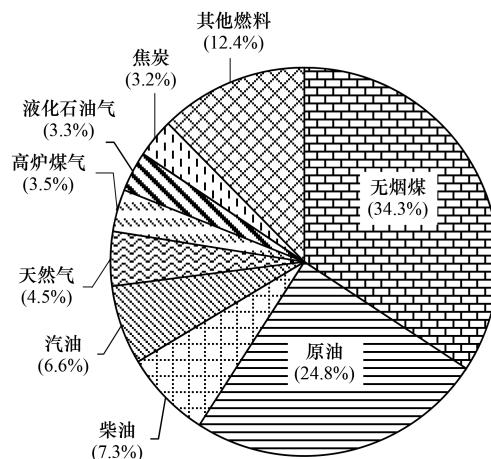


图3 各类型燃料化石燃料燃烧温室气体排放占比

Fig. 3 Proportion of GHG emission by fuel types

过程的主要温室气体排放来源,排放量为  $5.8 \times 10^7$  t,占工业生产总排放量的 92.3%。这主要由于广东省水泥产量大,2018年年产量为  $1.6 \times 10^8$  t,居全国首位,占全国水泥总产量的 7.3%<sup>[56]</sup>。需要注意的是:本文仅考虑水泥、石灰和钢铁的规模以上企业的排放量,广东省2018年实际工业生产过程的温室气体排放可能高于现有的估算结果。

### 2.2.3 农业活动

2018年农业活动主要包括  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  两种温室气体的排放,排放量分别为  $1.4 \times 10^7$  t 和  $2.9 \times 10^7$  t,合计排放量为  $4.3 \times 10^7$  t。其中,农用地  $\text{N}_2\text{O}$  排放量为  $2.7 \times 10^7$  t,为农业活动第一大源,占比为 61.9%;其次为稻田的  $\text{CH}_4$  排放,排放量为  $9.6 \times 10^6$  t,占比为 22.2%(图4)。动物肠道发酵和动物粪便管理合计  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量分别为  $4.8 \times 10^6$  t 和  $2.2 \times 10^6$  t,主要来自猪、非奶牛和家禽(图5),这主要是由于动物肠道发酵和粪便管理与动物类别、年龄、体重、采食饲料数量及质量等因素相关,也与广东地区居民饮食结构相关,广东地区居民食用肉类以猪肉和鸡肉为主,而猪和家禽排放量主要是由于年末存栏数高;对于非奶牛来说,尽管存栏数较少,但其单位个体温室气体排放量大。

### 2.2.4 土地利用变化与林业

与其他源类不同的是,土地利用变化与林业既是温室气体的源,又是温室气体的汇。其中, $\text{CO}_2$  的碳吸收主要来自乔木林生长碳吸收,其  $\text{CO}_2$  吸收量为  $4.4 \times 10^7$  t,占总碳汇的 98%;碳排放量主要来自活立木消耗, $\text{CO}_2$  排放量为  $2.8 \times 10^7$  t(图6)。总的来说,土地利用变化与林业部门表现为温室气体汇,温室气体吸收量为  $1.6 \times 10^7$  t。

### 2.2.5 废弃物处理

废弃物处理主要包括固体废弃物处理和废水处理

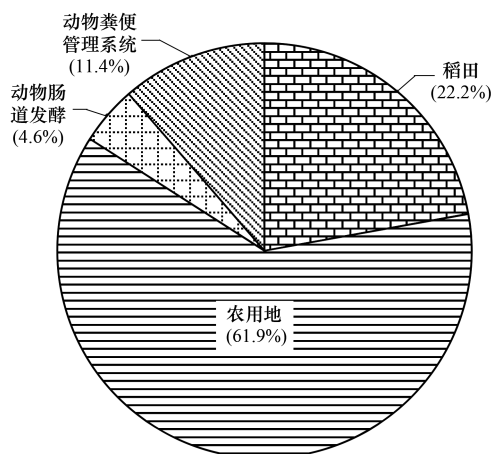


图4 农业部门温室气体排放占比

Fig. 4 Proportion of GHG emission of agricultural sector

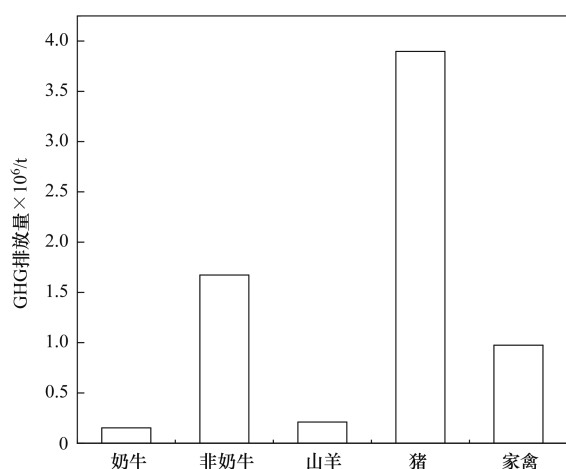


图5 不同畜禽动物肠道和动物粪便管理温室气体排放

Fig. 5 GHG emission of manure management and enteric fermentation from different animals

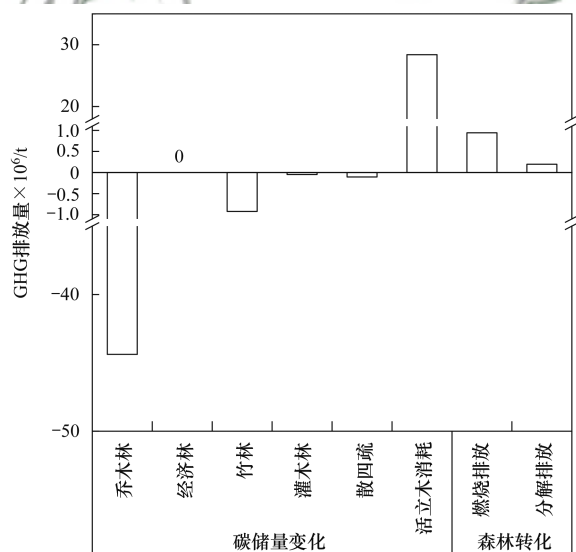


图6 土地利用变化和林业温室气体排放

Fig. 6 GHG emission of LUCF sector

处理是废弃物处理的主要温室气体排放来源,垃圾填埋和垃圾焚烧的排放占比分别为58.1%和11.2% (图7),与两种处理方式固体废弃物处理量相比,处理单位质量固体废弃物填埋的温室气体排放量是焚烧的3.7倍.随着固体废弃物焚烧比例的提升,固体废弃物处理的温室气体排放将逐步下降.

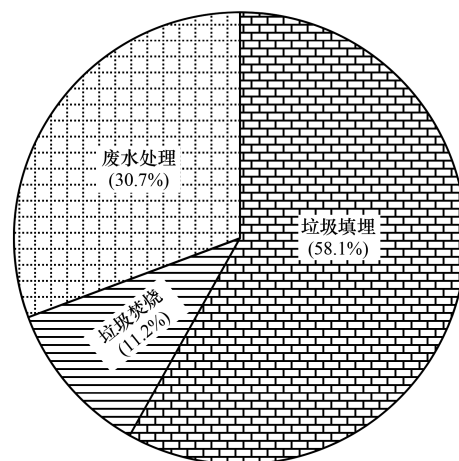


图7 废弃物处理温室气体排放占比

Fig. 7 Proportion of GHG emission of waste disposal sector

## 2.2.6 电力调入(出)间接排放

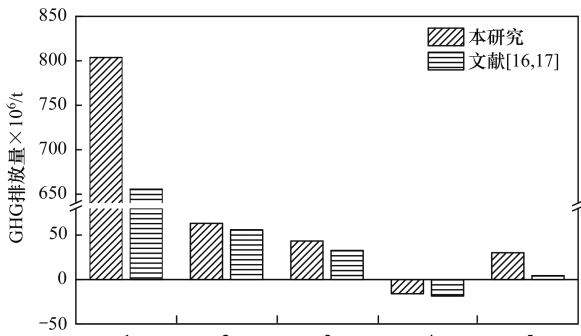
2018年,广东省电力净调入量为 $1.6 \times 10^{11}$  kW·h<sup>[53]</sup>,结合广东省电网2018年的平均排放水平<sup>[52]</sup>,计算得到CO<sub>2</sub>的间接排放量为 $7.2 \times 10^7$  t.因该排放量是根据广东省电网的平均排放水平计算得到,可能与实际存在一定差异.

## 2.3 清单结果比较

对比分析不同学者温室气体清单的研究结果,从估算结果来看,由于获取的活动水平数据详细程度和来源不同、选取的排放因子以及估算方法的差异,均使得研究成果存在一定的不确定性,此外,不同学者估算的排放源类别及核算边界的差异也会造成研究成果存在较大差异<sup>[57]</sup>.基于此,本文主要选取与本研究基准年和区域一致或相近的研究成果进行对比分析.图8为本研究与文献[16,17]中广东省2015年的研究结果的对比情况.从温室气体的排放来源贡献看,本研究结果与文献[16,17]具有高度的一致性,能源活动(为了与文献[16,17]进行对比,此处“能源活动”包括“调入/出电力间接排放”)的贡献率分别为87%和90%,单位GDP温室气体排放(以CO<sub>2</sub>计)分别为9 502和9 882 t·亿元<sup>-1</sup>.从各类排放源的排放量来看,相比文献[16,17],本研究能源活动、工业生产过程和农业活动的温室气体排放分别增加了23%、13%和32%,最主要的原因是研究基准年的差异,根据公开的统计数据显示<sup>[49,54]</sup>,相比2015年,2018年广东省的GDP、人口、能源消费总量和农林

理.2018年,广东省废弃物处理CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量分别为 $3.4 \times 10^6$ 、 $2.5 \times 10^7$ 和 $2.1 \times 10^6$  t,合计 $3.0 \times 10^7$  t.从温室气体的排放来源来看,固体废弃物





1. 能源活动[包括电力调入(出)间接排放];2. 工业生产过程;3. 农业活动;4. 土地利用变化与林业;5. 废弃物处理

图8 广东省温室气体排放清单结果对比  
Fig. 8 Comparison of Guangdong GHG emission inventory with other studies

牧渔业产值分别增加了32%、5%、11%和19%;另一方面与估算范围不同有关,本研究估算考虑了油气系统逃逸和化石燃料燃烧的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放以及生物质燃烧的N<sub>2</sub>O排放,而文献[16,17]未考虑该部分的排放.相比文献[16,17],本研究土地利用变化与林业部分的碳汇量较2015年低14%,主要是由于本研究将森林转化碳排放纳入考虑,扣除该部分的影响,两者相差8%,差异在合理范围.本研究与文献[16,17]的废弃物处理估算结果存在较大差异,主要来自CH<sub>4</sub>排放估算的差异.为更好地对废弃物处理的估算结果进行对比分析,表3详细列出了本研究及其他广东省范围内的垃圾填埋和废水处理的CH<sub>4</sub>排放研究结果.从垃圾填埋来看,本研究的估算结果是文献[16,17]的4倍,是谢鹏程等<sup>[44]</sup>(研究区域为广州市)的2.8倍,从单位垃圾填埋量的CH<sub>4</sub>排放量(以甲烷/垃圾计)来看,本研究、文献[16,17]和谢鹏程等<sup>[44]</sup>分别是479、147和644 t·10<sup>4</sup>t<sup>-1</sup>,本研究的估算结果与

谢鹏程等<sup>[44]</sup>的结果较为接近;而废水处理,本研究的估算结果与伍鹏程等<sup>[45]</sup>的研究结果较为接近.造成废弃物处理本研究与文献[16,17]存在差异的原因可能是活动水平数据的获取途径以及涵盖范围的差异所致,其中,本研究废水处理CH<sub>4</sub>的排放包括生活污水和工业废水处理和未处理部分的CH<sub>4</sub>排放,相比文献[16,17](根据全国6 000家企业的数据计算得到),本研究的核算可能范围更广.总体而言,本研究的估算结果能较好地反映广东省温室气体的排放水平.

表3 废弃物处理室气体排放清单结果对比

Table 3 Comparison of waste disposal emission inventory with other studies

| 源类   | 年份   | 估算区域 | CH <sub>4</sub> 排放量<br>× 10 <sup>3</sup> t | 文献      |
|------|------|------|--------------------------------------------|---------|
| 垃圾填埋 | 2018 | 广东省  | 833.6                                      | 本研究     |
|      | 2015 | 广东省  | 204.4                                      | [16,17] |
|      | 2018 | 广州市  | 294.3                                      | [44]    |
| 废水   | 2018 | 广东省  | 340.2                                      | 本研究     |
|      | 2015 | 广东省  | 4.8                                        | [16,17] |
|      | 2018 | 广东省  | 187.1                                      | [45]    |

2.4 温室气体排放空间分布特征

由图9可知,广东省温室气体排放与广东省各地区的开发程度以及森林和耕地等覆盖情况相关.广东省温室气体排放主要集中在经济发达、开发程度较高、人口密集和交通流量大的广州、东莞、佛山和深圳等珠三角核心地区,这与文献[16,17]的研究成果一致;同时,在潮州、汕头和揭阳这3地也呈现小范围高排放区域,在城市间呈现沿道路分布的特征.另一方面,在湛江和茂名等粤西地区则呈现大范围低强度的温室气体排放,这与两地耕地面积大以及

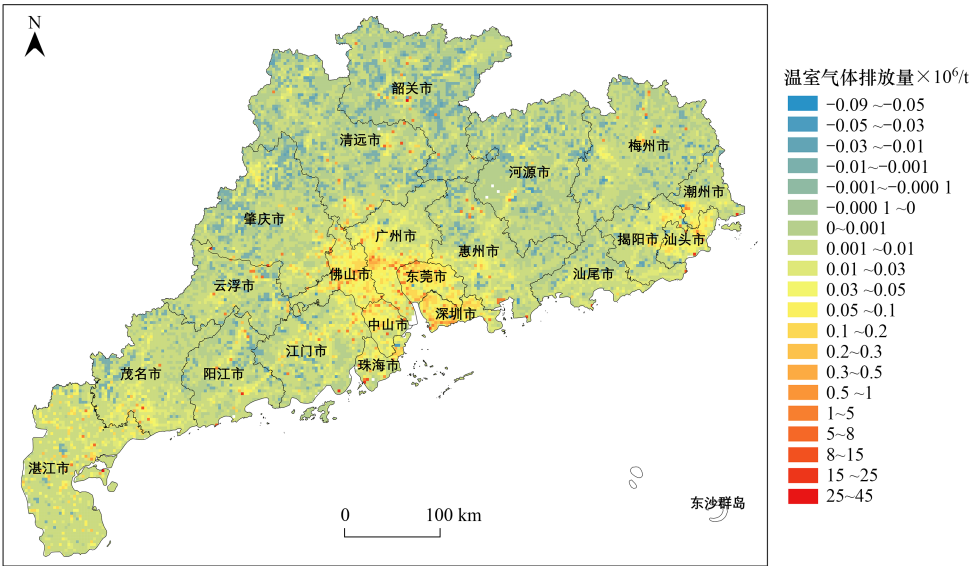


图9 2018年广东省温室气体排放空间分布

Fig. 9 Spatial allocation of GHG emission in Guangdong Province in 2018

粮食等作物产量高有较大关系,据统计,两地的粮食产量占全省总量的近 1/4<sup>[49]</sup>。此外,部分高排放网格主要为大型电厂、钢铁厂和水泥厂等高耗能企业所在地。而部分显示为蓝色的网格主要表现为温室气体的汇,分布在粤北、粤东和粤西等地区,与广东省卫星图显示的森林分布特征较为一致。

### 2.5 不确定性分析

在温室气体清单编制过程中,由于活动水平数据、关键参数及排放因子等关键数据缺失或代表性不足以及估算方法的局限性等原因,不可避免地造成估算结果的不确定性<sup>[7]</sup>。本清单估算过程涉及源类和参数众多,不确定性主要来自两个方面:①活动水平数据的获取。本研究活动水平数据主要来自中国能源统计年鉴、广东统计年鉴、广东农村统计年鉴、中国统计年鉴和政府公开发布的数据,数据来源相对可靠。其中,对于生物质燃烧、油气系统逃逸和废水处理而言,因活动水平数据无法直接从公开统计数据获取,主要基于典型城市调研并结合一定的指标估算得到广东省的数据,工业生产过程的水平数据为基于全省规模以上企业调研获取,土地利用变化与林业的活动水平数据为参考广东省第四次森林资源二类调查结果,以上数据可能与实际情况有一定的出入,存在一定的不确定性;②排放因子及相关参数选取。由于缺乏本地化的排放因子,本研究清单估算主要参考广东省及国家温室气体编制指南(两个指南的排放因子主要来自 IPCC 指南)成为重要的不确定性来源;此外,由于缺乏本地化的估算参数,部分参数选取指南推荐的缺省值,这为另一个重要的不确定性来源。能源活动温室气体排放估算主要参考指南,如化石燃料燃烧估算过程的单位热值含碳量和碳氧化率等;农业活动、土地利用变化和林业以及废弃物处理估算过程涉及众多参数,除乔木林和散四疏的生长率、垃圾填埋场 CH<sub>4</sub>回收率和污水处理厂 BOD 去除率等通过典型城市调研获取,其余参数均参考缺省值,这些都给清单估算结果带来了较大的不确定性。

### 3 结论

(1)2018 年广东省 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的排放量分别为  $8.5 \times 10^8$ 、 $1.9 \times 10^6$ 和  $1.1 \times 10^5$  t,以 CO<sub>2</sub>当量计分别为  $8.5 \times 10^8$ 、 $4.0 \times 10^7$ 和  $3.4 \times 10^7$  t,合计  $9.2 \times 10^8$  t。CO<sub>2</sub>是广东省主要的温室气体,占全省温室气体总排放量的 92.0%。

(2)从温室气体的排放来源看,LUCF 表现为碳汇,其余部门均表现为碳排放。除 LUCF 外,广东省温室气体排放主要来自能源活动和电力调入(出)间接

排放,占比分别为 77.9%和 7.6%。

(3)能源活动的温室气体排放主要来自能源工业、交通运输和工业等部门煤炭、原油以及汽柴油的消费;工业生产过程的温室气体排放主要来自水泥行业;农业活动的温室气体排放主要来自农用地 N<sub>2</sub>O 和稻田 CH<sub>4</sub>的排放;LUCF 的碳汇主要来自乔木林的碳吸收;废弃物处理中垃圾填埋 CH<sub>4</sub>排放是主要的温室气体来源。

(4)广东省温室气体排放主要集中在珠三角地区,并呈现一定的沿路网和航道分布的特征;温室气体高排放网格主要为大型电厂、钢铁厂和水泥厂等高耗能企业所在地。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] BP. Statistical review of world energy 2022, 71st edition [EB/OL]. [https://www. bp. com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report. pdf](https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf), 2023-03-27.
- [3] 中国人民政治协商会议全国委员会. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文) [EB/OL]. [http://www. cppcc. gov. cn/zxww/2020/09/23/ART1600819264410115. shtml](http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2020/09/23/ART1600819264410115.shtml), 2020-09-23.
- [4] 王涵, 马军, 陈民, 等. 减污降碳协同多元共治体系需求及构建探析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 936-944. Wang H, Ma J, Chen M, et al. Analysis of needs and construction of coordinated multi-governance system for pollution reduction and carbon reduction [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(4): 936-944.
- [5] D'Avignon A, Carloni F A, Rovere E L L, et al. Emission inventory: an urban public policy instrument and benchmark [J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 4838-4847.
- [6] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. [https://www. ipcc. ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/](https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/), 2013-03-27.
- [7] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] Zhang G Q, Ge R B, Lin T, et al. Spatial apportionment of urban greenhouse gas emission inventory and its implications for urban planning: a case study of Xiamen, China [J]. Ecological Indicators, 2018, 85, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.10.058.
- [9] Abushammala M F M, Basri N E A, Basri H, et al. Estimation of methane emission from landfills in Malaysia using the IPCC 2006 FOD model [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(15): 1603-1609.
- [10] Chung W S, Tohno S, Shim S Y. An estimation of energy and GHG emission intensity caused by energy consumption in Korea: an energy IO approach [J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 1902-1914.
- [11] Gupta P K, Jha A K, Koul S, et al. Methane and nitrous oxide emission from bovine manure management practices in India [J]. Environmental Pollution, 2007, 146(1): 219-224.
- [12] Majumdar D, Gajghate D G. Sectoral CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and SO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel consumption in Nagpur city of central

- India[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(25): 4170-4179.
- [13] Crippa M, Guizzardi D, Banja M, *et al.* CO<sub>2</sub> emissions of all world countries: JRC/IEA/PBL 2022 Report [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.
- [14] Olivier J G J, Guizzardi D, Schaaf E, *et al.* GHG emissions of all world: 2021 Report [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.
- [15] U. S. Environmental Protection Agency. Inventory of U. S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2021 [EB/OL]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2021>, 2023-04-29.
- [16] Cai B F, Cui C, Zhang D, *et al.* China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis [J]. *Applied Energy*, 2019, **253**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113579.
- [17] 中国城市温室气体工作组. 中国城市温室气体排放数据集 (2015) [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [18] 蔡博峰, 杨朝飞, 陆军, 等. 中国城市二氧化碳排放数据集 (2012) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [19] 中国城市温室气体工作组. 中国城市二氧化碳排放数据集 (2010) [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2020.
- [20] 中国城市温室气体工作组. 中国城市二氧化碳排放数据集 (2005) [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [21] Wang M S, Cai B F. A two-level comparison of CO<sub>2</sub> emission data in China: evidence from three gridded data sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **148**, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.003.
- [22] Cai B F, Liang S, Zhou J, *et al.* China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **129**: 232-239.
- [23] 韦良焕, 于坤, 莫治新, 等. 西北五省温室气体排放核算及动态研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2017, **31**(1): 32-37.
- Wei L H, Yu K, Mo Z X, *et al.* Accounting and dynamics of greenhouse gases emissions in five northwestern provinces [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(1): 32-37.
- [24] 韦彦汀, 李思佳, 张华. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4807-4816.
- Wei Y D, Li S J, Zhang H. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4807-4816.
- [25] 张冬梅, 杨玲, 李博, 等. 安徽省温室气体排放趋势及减排路径研究 [J]. *生态科学*, 2015, **34**(4): 149-157.
- Zhang D M, Yang L, Li B, *et al.* A preliminary study on the tendency of greenhouse gas emissions and reduction approach in Anhui Province [J]. *Ecological Science*, 2015, **34**(4): 149-157.
- [26] 马彩虹, 赵晶, 谭晨晨. 基于 IPCC 方法的湖南省温室气体排放核算及动态分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(10): 1786-1792.
- Ma C H, Zhao J, Tan C C. Accounting and dynamic analysis of greenhouse gas emission in hunan province based on the IPCC method [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(10): 1786-1792.
- [27] 覃小玲, 卢清, 郑君瑜, 等. 深圳市温室气体排放清单研究 [J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1378-1386.
- Qin X L, Lu Q, Zheng J Y, *et al.* Study on greenhouse gases emissions inventory in Shenzhen City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(12): 1378-1386.
- [28] 朱淑艳, 徐振宇, 史会贤, 等. 宁波市温室气体排放清单研究 [J]. *宁波工程学院学报*, 2022, **34**(3): 47-53, 64.
- Zhu S Y, Xu Z Y, Shi H X, *et al.* Greenhouse gas emission inventory of Ningbo [J]. *Journal of Ningbo University of Technology*, 2022, **34**(3): 47-53, 64.
- [29] 朱世龙. 北京市温室气体排放现状及减排对策研究 [J]. *中国软科学*, 2009, (9): 93-98, 106.
- Zhu S L. Present situation of greenhouse gas emission in Beijing and the approach to its reduction [J]. *China Soft Science*, 2009, (9): 93-98, 106.
- [30] 邓娜, 陈广武, 崔文谦, 等. 城市温室气体清单编制与分析——以天津为例 [J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2013, **46**(7): 635-640.
- Deng N, Chen G W, Cui W Q, *et al.* Municipal greenhouse gases inventory and analysis: a case of Tianjin [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013, **46**(7): 635-640.
- [31] Zhang B L, Yin S S, Lu X, *et al.* Development of city-scale air pollutants and greenhouse gases emission inventory and mitigation strategies assessment: a case in Zhengzhou, central China [J]. *Urban Climate*, 2023, **48**, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101419.
- [32] 周健, 邓一荣. 城市温室气体排放清单体系研究——以广州为例 [J]. *环境*, 2013, (S2): 30-32, 36.
- [33] Li Y, Du W, Huisingh D. Challenges in developing an inventory of greenhouse gas emissions of Chinese cities: a case study of Beijing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **161**: 1051-1063.
- [34] 黄芳, 江可申. 中国能源消费和碳排放特征研究 [J]. *环境保护科学*, 2013, **39**(4): 89-92.
- Huang F, Jiang K S. Research on the characteristics of energy consumption and carbon dioxide emissions in China [J]. *Environmental Protection Science*, 2013, **39**(4): 89-92.
- [35] 解瑞丽. 1995-2013 年山西省能源消费碳排放核算与特征分析 [J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2016, **26**(4): 49-52, 84.
- Xie R L. Accounting and characteristic analysis on carbon emissions from energy consumption of Shanxi Province during 1995-2013 [J]. *Journal of EMCC*, 2016, **26**(4): 49-52, 84.
- [36] 吕雪峰. 辽宁省能源消费与二氧化碳排放特征研究 [J]. *科技创新导报*, 2014, (3): 71-72.
- [37] 唐伟, 何平, 杨强, 等. 基于 IVE 模型和大数据分析的杭州市道路移动源主要温室气体排放清单研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1368-1376.
- Tang W, He P, Yang Q, *et al.* Study on greenhouse gas emission inventory of road source in Hangzhou based on IVE model and large data analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1368-1376.
- [38] 李光华, 高健, 邓顺熙, 等. 渭南市道路移动源高分辨温室气体排放清单及特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(12): 332-340.
- Li G H, Gao J, Deng S X, *et al.* A study on high temporal-spatial resolution emission inventory and its characteristics of greenhouse gas for on-road mobile source in Weinan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(12): 332-340.
- [39] 林楚彬, 赵黛青, 蔡国田, 等. 广东货船水运的温室气体排放和低碳发展对策 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(12): 1340-1348.
- Lin C B, Zhao D Q, Cai G T, *et al.* Greenhouse gas emissions from cargo vessels and low-carbon shipping strategies in Guangdong Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(12): 1340-1348.
- [40] 甘晖, 杨燕燕, 刘佳, 等. 福建省 2000-2020 年间废弃物处理温室气体排放估算及趋势预测 [J]. *福建师范大学学报 (自然*



- 科学版), 2018, **34**(5): 93-100.
- Gan H, Yang Y Y, Liu J, *et al.* Waste disposal greenhouse gas emissions estimation and trend forecast in Fujian Province during 2000—2020 [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **34**(5): 93-100.
- [41] 吕任生, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 新疆城市废弃物处置温室气体排放研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(10): 147-151.
- Lv R S, Jia E H A, Zhao C X, *et al.* Study on greenhouse gas emissions from Xinjiang urban waste disposal system [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(10): 147-151.
- [42] Yang D W, Xu L X, Gao X L, *et al.* Inventories and reduction scenarios of urban waste-related greenhouse gas emissions for management potential [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 727-736.
- [43] 王安, 赵天忠. 北京市废弃物处理温室气体排放特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(2): 68-75.
- Wang A, Zhao T Z. Greenhouse gas emission characteristics of municipal waste management in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(2): 68-75.
- [44] 谢鹏程, 王文军, 王文秀, 等. 广州市生活垃圾处理的温室气体排放现状与预测[J]. *科技管理研究*, 2020, **40**(14): 247-252.
- Xie P C, Wang Wen J, Wang W X, *et al.* Current status and forecasts of greenhouse gas emissions from urban domestic waste treatment of Guangzhou [J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, **40**(14): 247-252.
- [45] 伍鹏程, 廖程浩. 广东省污水处理过程中温室气体排放研究[J]. *绿色科技*, 2022, **24**(8): 94-99.
- Wu P C, Liao C H. Research on greenhouse gas emissions during sewage treatment in Guangdong Province [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, **24**(8): 94-99.
- [46] 李蓐. 安徽省农业温室气体排放核算与特征分析[J]. *河南农业科学*, 2014, **43**(12): 77-82.
- Li R. Estimate and characteristics of agricultural greenhouse gas emissions in Anhui Province [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, **43**(12): 77-82.
- [47] 窦应瑛. 大连市农业活动领域温室气体排放清单估算及评价[J]. *绿色科技*, 2022, **24**(10): 163-166, 173.
- Dou Y Y. Estimation and evaluation of greenhouse gas emission inventory in the field of rural activities of Dalian City [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, **24**(10): 163-166, 173.
- [48] 国家统计局. 中国统计年鉴 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [49] 广东省统计局. 广东统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [50] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>, 2023-03-27.
- [51] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
- [52] 广东省生态环境厅. 广东省市县(区)级温室气体清单编制指南(试行) [R]. 广州: 广东省生态环境厅, 2020.
- [53] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [54] 广东农村统计年鉴编辑委员会. 广东农村统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [55] 王湘龙. 广东省第四次森林资源二类调查主要结果分析[J]. *林业与环境科学*, 2020, **36**(1): 73-77.
- Wang X L. Analysis of the fourth forest resources survey in Guangdong [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2020, **36**(1): 73-77.
- [56] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [57] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [58] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [59] Zheng J Y, Che W W, Wang X M, *et al.* Road-network-based spatial allocation of on-road mobile source emissions in the Pearl River Delta region, China, and comparisons with population-based approach [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, **59**(12): 1405-1416.
- [60] 叶斯琪, 郑君瑜, 潘月云, 等. 广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 537-547.
- Ye S Q, Zheng J Y, Pan Y Y, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 537-547.
- [61] IPCC. Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown .....                                                                | ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> ( 617 )          |
| Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations .....                                                                    | QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang ( 626 )                          |
| Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing .....                                                                                                        | CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> ( 635 )                     |
| Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021 .....                             | ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> ( 645 )        |
| Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network .....                                      | LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> ( 655 )             |
| Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City .....                                                                         | WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> ( 668 )              |
| Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng .....                                                                                       | YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> ( 678 )           |
| Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou .....                                           | LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> ( 689 )            |
| Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....                                                                 | LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> ( 700 )                |
| Nonlinear Variations in PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China .....                                                                        | WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> ( 709 )         |
| Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model .....                                  | WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> ( 721 )                   |
| Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy .....                                                    | ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> ( 732 )         |
| Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences .....                        | MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> ( 744 )                 |
| Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China .....                                                                    | WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang ( 755 )                    |
| Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek .....                                                     | TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> ( 768 )               |
| Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall .....                                                    | WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 780 )         |
| Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources .....                       | WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> ( 792 )                    |
| Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area .....                                                                                   | GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> ( 802 )            |
| Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin .....                                                                             | ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong ( 813 )                         |
| Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area .....                                                                    | JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> ( 826 )         |
| Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River .....                                             | MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> ( 837 )          |
| Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater .....                                                     | PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo ( 844 )                             |
| Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics .....                                                                                        | TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> ( 854 ) |
| Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate .....                                                                                                  | LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> ( 862 )                 |
| Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> in Aqueous Solution .....                                                                  | JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> ( 873 )         |
| Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon .....                                                                                              | ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> ( 885 )                       |
| Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water .....                                                                     | HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> ( 898 )            |
| High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China .....                                                                                | LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> ( 909 )            |
| Ecosystem CO <sub>2</sub> Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary .....                                                           | LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> ( 920 )             |
| Effects of Biochar Application Two Years Later on N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub> Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China .....                     | HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> ( 929 )             |
| Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil .....                                                                                              | WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> ( 940 )                   |
| Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis .....                                                                                                            | XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> ( 952 )               |
| Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example .....                      | LI Yue, LUO Hong-fen ( 961 )                                           |
| Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil .....                                                                                           | LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> ( 974 )                   |
| Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism .....                                                                     | ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing ( 983 )                         |
| Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains .....                                        | YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> ( 992 )            |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China .....                                             | YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> ( 1004 )   |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou .....                                                                         | ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> ( 1015 )         |
| Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources .....                                                                                         | PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong ( 1026 )                      |
| Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation ..... | LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 1038 )            |
| Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization .....                                                             | YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> ( 1049 )                 |
| Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models .....                                                        | SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> ( 1058 )           |
| Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd .....                                                                                       | WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> ( 1069 )            |
| Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium .....                                                                                   | LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> ( 1080 )                  |
| Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City .....                                                                   | ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> ( 1090 )         |
| Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland .....                                                                                         | WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> ( 1098 )      |
| Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide .....                                                                      | YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> ( 1107 )                  |
| Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice .....                                                 | ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> ( 1118 )                 |
| Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress .....                                                                | ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> ( 1128 )         |
| Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings .....                                                    | ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> ( 1141 )  |
| Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat .....                                                                 | GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> ( 1150 )     |
| Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community .....                               | HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> ( 1161 )         |
| Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review .....                                                                                                        | BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> ( 1173 )      |
| Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics .....                                                           | BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> ( 1185 )                |
| Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils .....                                                                        | HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> ( 1196 )             |
| Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water .....                                                                                      | ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang ( 1210 )               |
| Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory .....                                     | GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li ( 1222 )                         |