

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期

Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流气-水界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

2010 ~ 2017 年四川省机动车污染物排放趋势分析

李媛^{1,2}, 石嘉诚^{1,2}, 陈军辉^{1,2*}, 潘玉瑾^{1,2}, 周虹辉^{1,2}, 范武波^{1,2}, 叶宏¹, 钱骏¹, 刘政¹

(1. 四川省生态环境科学研究院, 成都 610041; 2. 四川省环境保护移动源污染与控制重点实验室, 成都 610041)

摘要: 四川省机动车保有量日益增加, 本研究基于特定的清单计算方法及多口径的活动水平数据, 得到四川省 2010 ~ 2017 年机动车尾气污染物排放量。结果表明, 四川省小型载客汽车的保有量增长最快, 不管是机动车还是小型载客车保有量的增速, 均高于全国平均增速; 2017 年四川省机动车共排放 CO、NO_x、SO₂、NH₃、HC、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 分别为 706.9、275.3、0.3、5.7、164.8、8.1、8.9、4.1 和 1.4 kt, 除 NH₃ 以外, 四川省所排放的其他污染物呈现波动中下降的趋势, 在 2014 ~ 2016 年前后达到高值。柴油车的保有量变化与 NO_x 的变化显示出较强的相关性; 新车排放标准加严是最具有减排潜力的措施之一, 同时随着实施年份的增长, 显示的减排潜力越大, 燃油品质的提升对于污染物的减排每年也会有 6% 以上的减排效力。未来应将 HC 和 NO_x 减排作为四川省机动车管控的重要内容。

关键词: 机动车; 排放清单; 四川省; 排放趋势

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0643-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003156

Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017

LI Yuan^{1,2}, SHI Jia-cheng^{1,2}, CHEN Jun-hui^{1,2*}, PAN Yu-jin^{1,2}, ZHOU Hong-hui^{1,2}, FAN Wu-bo^{1,2}, YE Hong¹, QIAN Jun¹, LIU Zheng¹

(1. Sichuan Academy of Environmental Science, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Environmental Protection Research Laboratory of Moving Source Pollution Control, Chengdu 610041, China)

Abstract: Vehicle pollution in Sichuan Province is becoming increasingly serious. Here, based on specific inventory calculation methods and multi-caliber activity level data, this study calculated vehicle exhaust emissions from 2010 to 2017 in Sichuan Province. The results show that the average growth rate of vehicle ownership in Sichuan is higher than the national trend. In 2017, vehicle emissions of CO, NO_x, SO₂, NH₃, HC, PM_{2.5}, PM₁₀, BC, and OC were 706.9, 275.3, 0.3, 5.7, 164.8, 8.1, 8.9, 4.1, and 1.4 kt, respectively. Except for NH₃, showed a downward trend, peaking in 2014-2016. Diesel vehicle ownership showed a strong correlation with the emission of NO_x. Based on these observations, stricter vehicle emission standards offer the greatest potential for emissions reductions, with early implementation offering the greatest reduction potential. The improvement of fuel quality will also have more than a 6% emission reduction effect on pollutant emission each year. HC and NO_x emissions reductions will be an important control on vehicle pollution in Sichuan Province in the future.

Key words: vehicles; emission inventory; Sichuan Province; emissions trends

随着中国城市化进程快速推进, 机动车保有量持续迅速增长。车辆所排放的 HC、CO、NO_x 和 CO₂ 等污染物在空气中积累, 尤其是在城市区域^[1], 给环境空气质量、人类健康^[2] 和气候变化带来了一系列的影响。机动车尾气与蒸发排放是城市 and 区域近地面臭氧和二次粒子前体物的重要排放源^[3,4]。基于近几年一系列 PM_{2.5} 来源解析结果显示^[5-7], 包括成都^[8] 在内, 机动车污染已经逐步成为我国许多城市灰霾污染的主要来源。研究机动车污染物排放特征及管控措施对改善城市 and 区域环境空气质量具有重要意义^[9]。

当前我国机动车正处于高速增长期, 把握机动车排放的总体变化趋势对于政策的管控制定显得尤为重要^[10]。近年国内一些学者开始建立长时间序列的机动车排放清单, 时间跨度从 1980 ~ 2030 年。Cai 等^[11] 采用 COPERT III 模型建立了中国 1980 ~ 2005 年的机动车清单, 结果显示从 1980 ~ 2005 年

中国机动车保有量的增长使得中国 CO₂、CO、NMVOC、NO_x、PM₁₀ 和 SO₂ 的排放量分别以年均 15%、15%、15%、14%、16% 和 15% 的速度增长, 同时对机动车排放量与 GDP 统计分析发现排放量与 GDP 有很好的相关性。Lang 等^[12] 建立了中国 1999 ~ 2011 年机动车排放清单, 并指出减少 NO_x 和 BC 的排放挑战较为严峻。Wu^[13] 通过分析 1998 ~ 2030 年的机动车排放, 指出中国的机动车排放已经达到排放峰值, 加严排放标准、降低使用以及推进电动车对于减少 HC 的排放至关重要。在机动车长时间序列大气污染物排放清单领域, 国内外学者开展了一系列国家层级^[14-17]、省级^[18-20] 和城市级^[21-24] 的相

收稿日期: 2020-03-13; 修订日期: 2020-08-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212101, 2018YFC0214006); 四川省重大科技专项 (2019YFS0495); 四川省财政专项

作者简介: 李媛 (1988 ~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机动车污染防治, E-mail: yoileeshine@outlook.com

* 通信作者, E-mail: 9503062@qq.com

关研究,以表征机动车的排放变化趋势,探索机动车排放变化的经济政策成因以及分析管控措施的效果。

四川省是我国内陆省份,紧靠青藏高原,特殊盆地地形以及静稳高湿的气候特征更是制约着空气质量的改善。截止 2018 年,四川省的省会成都市机动车保有量达到了 530 万辆,仅次于北京市,机动车保有量的迅速增加给四川省的空气质量管控也带来了巨大的挑战。自 2012 年四川省开展排放清单的研究,建立了包括天然源^[25]、工业源^[26,27]、人为源挥发性有机物^[28]、农业源^[29]和非道路移动源^[30]等排放清单,但是对四川省机动车长时间序列的机动车排放清单构建鲜有研究。本研究在分析四川省 2010~2017 年机动车保有量变化的基础上,采用文献^[31]中的指导方法,计算四川省机动车污染物排放,分析排放特征并探索四川省机动车排放变化的趋势,以期对四川省机动车管控政策的制定进一步提升其精准性。

1 材料与与方法

本研究以四川省 21 个地市(州)作为研究区域,研究时段为 2010~2017 年,涉及到的污染物类型包括:SO₂、CO、NO_x、HC、NH₃、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC。

1.1 清单计算方法

本项目清单计算方法参考文献^[31],根据不同排放阶段的机动车保有量、排放因子、活动水平计算得到。计算所使用的核心计算公式如式(1)所示。

$$E = \sum_i \sum_k P_{i,k} \times EF_{i,k} \times VKT_i \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, E 为机动车尾气年排放量($t \cdot a^{-1}$); i 为机动车类型,参照文献^[31]的定义,本研究将机动车类型划分为:微型载客车、小型载客车、出租车、公交车、中型载客车、大型载客车、微型载货车、小型载货车、中型载货车、重型载货车、三轮汽车、低速货车、轻便摩托车和普通摩托车共 14 类; k 为机动车排放阶段,包括国 1 前至国 5 共 6 个阶段; P_i 为*i*类机动车保有量($辆 \cdot a^{-1}$); $EF_{i,k}$ 为*i*类机动车*k*阶段基于年均行驶里程的排放因子($g \cdot km^{-1}$); VKT_i 为*i*类机动车年均行驶里程($km \cdot a^{-1}$)。

机动车 SO₂ 排放主要来自于燃油中硫的燃烧生成。根据硫的质量平衡,SO₂ 排放量按式(2)计算。

$$EF(SO_2) = 2.0 \times 10^{-6} \times (F_g \times \alpha_g + F_d \times \alpha_d) \quad (2)$$

式中, $EF(SO_2)$ 为某地区机动车的年排放量,单位 t; F_g 和 F_d 分别为该地区道路机动车汽油和柴油的消耗量,单位为 t; α_g 和 α_d 分别为该地区道路机动车

汽油和柴油的年均含硫量($\times 10^{-6}$)。

1.2 清单数据来源

1.2.1 机动车保有量

本部分所分析的四川省机动车保有量数据来源于 3 个途径,分别是第一次污染源普查更新数据(2010 年)、历年四川省环境统计数据中机动车保有量变化数据和四川省大气污染源排放清单数字化平台(登记号 2017SR201035)。2010 年根据第一次污染源普查更新数据机动车注册登记时间进行排放标准归类;2011~2015 年机动车保有量是通过上一年度保有量加上当年新增以及转入量扣除当年转出和注销的量获得,2016 年和 2017 年保有量数据来自于四川省大气污染源清单平台填报数据。

1.2.2 机动车排放因子

机动车的排放因子由于受到车辆行驶工况以及环境温湿度等因素的影响,由基准排放因子结合四川省各城市的实际情况进行修正。修正公式详见式(3)和式(4)。

$$EF_{i,k,j} = BEF_{i,k} \times \varphi_j \times \gamma_j \times \lambda_i \times \theta_i \quad (3)$$

式中, $EF_{i,k,j}$ 为*i*类车*k*阶段在*j*地区基于行驶里程的排放系数, $BEF_{i,k}$ 为基准排放系数; φ_j 为*j*地区的环境修正因子, γ_j 为*j*地区的平均速度修正因子, λ_i 为*i*类车辆的劣化修正因子, θ_i 为*i*类车辆的其他使用条件(如负载系数和油品含硫量等)修正因子。环境修正因子指为反映环境因素(温度、湿度和海拔)对车辆排放状况影响引入的修正系数,由温度修正因子、湿度修正因子和海拔修正因子计算得到。

$$\varphi_j = \varphi_{Temp} \times \varphi_{RH} \times \varphi_{Height} \quad (4)$$

式中, φ_{Temp} 为温度修正因子, φ_{RH} 为湿度修正因子, φ_{Height} 为海拔修正因子。

蒸发排放对机动车 HC 有较大贡献,机动车 HC 排放考虑蒸发排放的影响,蒸发排放计算公式以及排放因子均来自于文献^[31],本地化参数详见表 1。

1.2.3 机动车年均行驶里程

机动车年均行驶里程采用文献^[31]的参考值。

2 结果与讨论

2.1 机动车保有量变化

2.1.1 四川省机动车保有量变化趋势

2010~2017 年四川省机动车保有量逐年增加,如图 1(a)所示,2010 年四川省内机动车保有总量为 928 万辆,2017 年增至 1 706 万辆。7 年间机动车保有量净增加 778 余万辆,年均增长率 9.1%,高于全国平均增长率^[32]。从车型分布来看,小型载客汽车和普通摩托车在机动车保有总量的占比最高,2010~2017 年平均占比分别为 39.9% 和 49.8%。

表 1 本研究中所采用的本地化参数

Table 1 Localization parameters of the vehicle emission inventory in this study

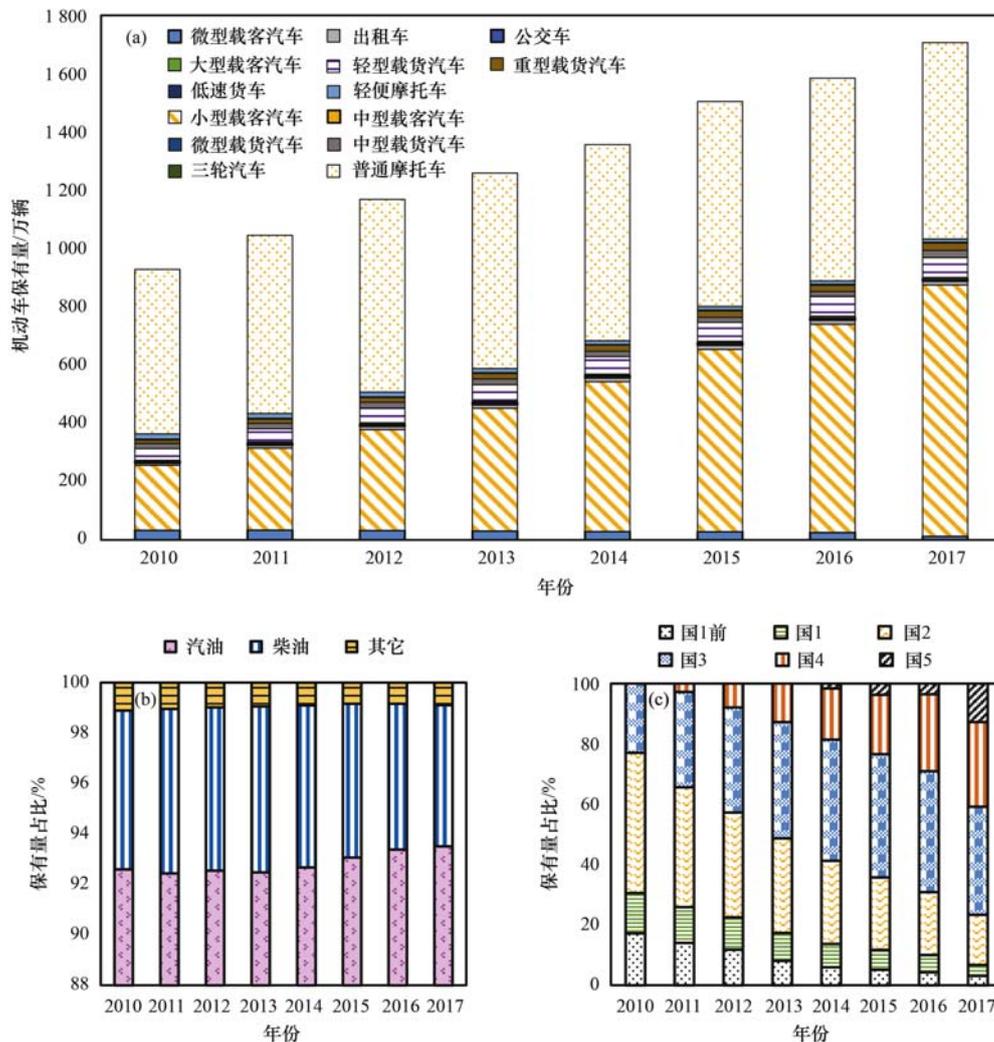
项目	本地化参数 ¹⁾											
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
温度修正/℃	-1.18	3.52	11.61	19.15	21.73	26.25	27.74	26.68	23.62	16.82	8.60	3.74
湿度修正/%	47	46	38	56	53	53	64	74	68	52	82	58
平均车速/km·h ⁻¹	31.2											
汽油硫含量 × 10 ⁻⁶	150 ^a 、50 ^b 和 10 ^c											
柴油硫含量 × 10 ⁻⁶	350 ^d 、50 ^e 和 10 ^e											
海拔高度/m	556.7 ^f 、2 560 ^g 、2 180 ^h 、1 156 ⁱ 和 1 510 ^j											
柴油车平均载荷/%	60											

1) a 为 2010 年, b 为 2014 年, c 为 2017 年, d 为 2011 年, e 为 2015 年, f 为四川省除阿坝州、甘孜州、凉山州和攀枝花市以外的城市, g 为甘孜州, h 为阿坝州, i 为攀枝花市, j 为凉山州

不同车型保有量增长差异较大, 小型载客车年均增长率为 19.1%, 高于全国平均增长率^[32]; 出租车年均增长率为 6.7%, 公交车年均增长率为 8.0%, 这与四川省近年来城市公共交通运输力不断增强有关。相比于重型载货车年均增长率为 11.1%, 大型载客车年均增长率仅为 4.9%, 这与近年来四川省客运交通

结构调整有关, 城市间轨道交通的增加对于传统客运有较大的冲击。

从燃料类型来看, 如图 1(b) 所示, 2010 ~ 2017 年四川省内汽油车占比稳定在 92.0% ~ 94.0% 之间, 柴油车平均占比为 6.3%, 而其它燃料的机动车保有量逐年增加, 但保有量平均占比仅为 0.9%。从



(a) 分车型; (b) 分燃料类型; (c) 分排放标准

图 1 2010 ~ 2017 年四川省机动车保有量

Fig. 1 Vehicle ownership in Sichuan Province from 2010 to 2017

排放标准看,如图 1(c)所示,不同排放标准的机动车保有量在 2010~2017 年之间发生了较大变化,国 1 前、国 1 及国 2 排放标准的机动车保有量基本呈现出逐年减少的状态,三者占机动车总保有量的占比由 2010 年的 17.2%、13.4% 和 46.5% 分别降至 2017 年的 3.8%、4.8% 和 18.0%; 2015 年国 3 排放标准的机动车占比由 2010 年的 23.0% 增至 40.9%,之后小幅下降,2017 年占比为 39.8%; 国 4 和国 5 机动车自上市后平均增速分别为 $562 \text{ 千辆} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $242 \text{ 千辆} \cdot \text{a}^{-1}$,到 2017 年占比分别达到 23.5% 和 10.1%.

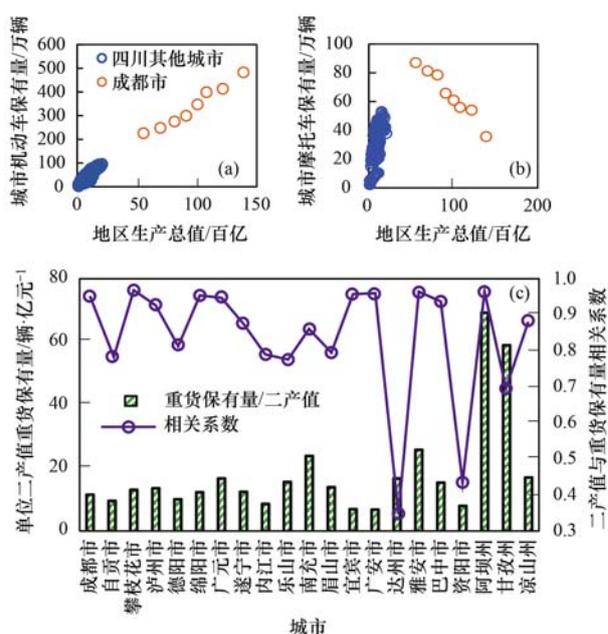
2.1.2 四川省机动车保有量与社会经济相关性分析

四川省由于各城市经济水平发展的差异,城市机动车保有量呈现较大的差异,尤其是成都市.如图 2(a)和图 2(b)所示,成都市机动车保有量远高于其他城市,同时,成都市的摩托车保有量逐年下降,与四川省其他城市呈现相反的趋势.对重型车而言,考虑到重型柴油车主要服务于涉及大型物资的企业,因此对重型柴油车保有量与城市第二产业生产总值进行相关性分析以及比值分析,结果见图 2(c).从中可以看出,不同城市的相关系数有一定差异,攀枝花(0.968)、雅安(0.962)、广安(0.958)、宜宾(0.954)、绵阳(0.952)、成都(0.950)、广元(0.946)和巴中市(0.936)相关系数较高,均高于 0.9,说明本地的工业经济发展与重型货运相对契合度较高,无严重的对外输出,城市运输整体达到了相对平衡的状态.达州和资阳两个城市的相关系数偏低,分别为 0.347 和 0.437.达州市重型载货车保有量与第二产业产值的比值为 $16 \text{ 辆} \cdot \text{亿元}^{-1}$,高于除三州以外的 $13 \text{ 辆} \cdot \text{亿元}^{-1}$ 的均值,结合达州市作为重要的出川通道之一,综合判定达州市呈现出重型货运车辆高于地区工业产值需求,存在车辆输出转运等情况.资阳市重型载货车保有量与第二产业产值的比值为 $8 \text{ 辆} \cdot \text{亿元}^{-1}$,综合判定资阳市的大型物资输出有一部分依赖于外地车辆转运.

2.2 机动车尾气污染物排放量及排放强度分析

2.2.1 机动车污染物排放量变化趋势

四川省 2010~2017 年机动车尾气中污染物排放量如表 2 所示,2010 年四川省机动车共排放 CO 、 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、 HC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 BC 和 OC 分别为 852.2、218.5、3.2、2.2、148.7、10.5、11.5、5.4 和 1.9 kt; 2017 年四川省机动车共排放 CO 、 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、 HC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 BC 和 OC 分别为 706.9、275.3、0.3、5.7、164.8、8.1、8.9、4.1 和 1.4 kt; 相比于 2010 年, NO_x 、 NH_3 、 HC 增加 26%、159% 和 11%; 其余污染物均有不同程度的下



(a)分城市机动车保有量与地区生产总值;(b)分城市摩托车保有量与地区生产总值;(c)重型货车保有量与第二产业产值及相关系数

图 2 重型货车保有量与第二产业相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between heavy truck ownership and secondary industry

降, SO_2 下降最多,降幅为 91%, CO 降幅为 17%, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 BC 和 OC 降幅为 23%~26%.

2010~2017 年四川省机动车污染物除 SO_2 和 NH_3 外,其余污染物排放总量变化幅度较小,其中 HC 的相对标准偏差最低,仅为 4.2%; SO_2 和 NH_3 的相对标准偏差分别达到了 62.3% 和 31.5%; 四川省机动车保有量的年平均增幅为 9.1%,相对标准偏差为 20.5%,总体而言,2010~2017 年机动车各类污染物的排放量并没有随着保有量的增长而增加,保有量与排放量未呈现出明显的正相关关系,这与机动车整体排放标准的提升、尾气后处理装置效率的提升和油品质量的改善有关.

SO_2 排放量最高的车型为中重型载货车和小型载客车,贡献占比分别为 52.3% 和 24.2%. 由于 2014 年汽油和柴油国 4 标准的实施,燃油硫含量下降至 50×10^{-6} , SO_2 排放量在 2014 年突降.小型载客车、摩托车以及出租车对 CO 排放总量的贡献比最大,平均贡献比分别为 20.9%、20.9% 和 17.3%; 普通摩托车、小型载客车是机动车中 HC 排放贡献比最高的两类车型,平均贡献比分别为 32.4% 和 27.1%,较高的保有量会导致两类车型的 HC 排放量较高; 轻型载货汽车和出租车的 HC 平均排放贡献比也有 11.1% 和 13.1%. 随着机动车保有量的增加, CO 和 HC 从 2016 年前后污染物排放量呈现波动下降,摩托车保有量的下降

以及小型载客车排放标准的不断加严是导致 CO 和 HC 排放总量下降的最主要原因。2010~2017 年小型载客车排放标准从国 3 到国 5 的提升,单车排放的下降“抵消”了保有量突增带来的影响,但 HC 排放量与 2010 年相比仍旧有一定上涨,折合年均增长率为 1.5%,远低于小型载客车保有量的年均增长率。

NO_x 和 PM_{2.5} 的排放量从 2014 年开始缓慢下降,尤其是 NO_x 的排放量下降更为缓慢。四川省中重型载货汽车、轻型载货汽车以及大型载客车对机动车 PM_{2.5} 排放总量的贡献比最大,平均贡献比分别达到了 58.1%、14.9% 和 11.2%,PM_{2.5} 排放量的削减主要得益于重型柴油载货车排放标准的加严,柴油品质提高和黄标车的淘汰。对于 NO_x 的排放,柴

油载货车的 NO_x 排放贡献介于 66%~71%,重型柴油载货车在 NO_x 中的贡献由 2010 年的 30.5% 上升到 41.6%,低于 2017 年全国 49.5% 的贡献占比^[32],四川省重型柴油载货车的保有量与全省机动车 NO_x 排放量的相关系数为 0.77,显示出较强的相关性。同时,保有量相对较少的出租车和公交车 NO_x 排放占比分别为 6.4% 和 7.3%,且这两类车主要在城市中心建成区行驶,排放贡献不可忽视。NH₃ 的排放来自于小型载客车,小型载客车的 NH₃ 排放占比为 61.1%,摩托车也贡献了 10.4% 的排放。总体而言,除 NH₃ 以外,其他的污染物呈现波动中下降的趋势,四川省机动车污染物排放基本上从 2014~2016 年前后达到高值,与国家层面机动车排放清单的研究结果^[2] 基本一致。

表 2 四川省机动车污染物排放量/kt

Table 2 Vehicle pollutant emissions in Sichuan Province/kt

年份	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	HC	PM _{2.5}	PM ₁₀	BC	OC
2010	852.2	218.5	3.2	2.2	148.7	10.5	11.5	5.4	1.9
2011	898.7	248.8	3.9	2.6	158.2	11.3	12.4	5.8	2.1
2012	922.5	269.5	4.4	3.1	165.7	11.7	12.9	6.1	2.1
2013	880.2	287.0	4.9	3.5	164.2	11.7	12.9	6.1	2.1
2014	786.5	292.5	4.5	4.0	156.4	11.5	12.6	6.0	2.0
2015	804.0	287.3	1.1	4.6	166.4	9.6	10.6	4.9	1.7
2016	809.9	278.8	1.1	5.0	169.7	9.0	9.9	4.6	1.6
2017	706.9	275.3	0.3	5.7	164.8	8.1	8.9	4.1	1.4

2.2.2 四川省各城市机动车排放特征

四川省各市州机动车保有量及排放量如图 3 所示。四川省各市州的机动车保有量在 2010~2017 年间均呈现出不同幅度的增长,甘孜州和乐山市是机动车保有量增幅最高和最低的市州,与 2010 年相比,全省各市州机动车保有量的平均增幅为 85.8%。四川省不同城市和区域的机动车保有量差异较大,成都市机动车保有量在全省总量中占比最高,平均占比可达 28.2%,其次为绵阳市、德阳市和南充市,平均占比分别为 6.1%、5.9% 和 5.9%。成都平原城市群(包含成都市、德阳市、绵阳市、遂宁市、乐山市、眉山市、雅安市及资阳市)的机动车总量在全省范围内的平均占比高达 55.9%,川东北城市群(包括广元市、南充市、广安市、达州市和巴中市)及川南城市群(包括自贡市、泸州市、内江市和宜宾市)的机动车保有量平均占比为 18.4% 和 14.7%,攀枝花市的保有量平均占比仅为 1.7%,而阿坝州、甘孜州和凉山州的机动车保有量平均占比分别为 1.3%、0.8% 和 4.6%。

图 3 中显示了四川省不同市州的机动车对各类尾气污染物的排放贡献。成都市由于较高的机动车保有量占比,导致其在全省 CO、NO_x、HC 和 PM_{2.5}

排放总量中的平均贡献比均列首位,分别为 22.3%、22.9%、20.5% 和 16.5%,但未达到成都市机动车 26.9% 的保有量占比,这是由于成都市机动车整体车队结构排放标准较省内其他市州更高。阿坝州和甘孜州机动车保有量占比分别为 1.3% 和 0.8%,但在全省 CO、NO_x、HC 和 PM_{2.5} 排放总量中的平均贡献比分别在 3.1%~5.4% 和 3.0%~6.5%,这主要是由于这两个州海拔均超过 2000 m,机动车在海拔地区排放因子更高引起的污染物排放量增加。

2.2.3 四川省各城市机动车排放强度

排放强度较排放量更能显示出污染物对当地环境质量和人体健康的影响。以 NO_x 和 HC 为主要污染物表征 2010~2017 年各市州的平均排放强度,结果见图 4。成都市机动车 NO_x 和 HC 排放强度均是省内市州的第一位,分别为 5.32 t·km⁻² 和 3.35 t·km⁻²;德阳市、自贡市、内江市和南充市 NO_x 排放强度较高,分别为 2.06、1.62、1.56 和 1.53 t·km⁻²;德阳市和内江市 HC 排放强度分居全省第二、三位,分别为 1.33 t·km⁻² 和 1.15 t·km⁻²。通过对排放强度的分析,可以看出德阳市、内江市、自贡市和南充市机动车污染也较为严重,同样应加强市内机动车管控。

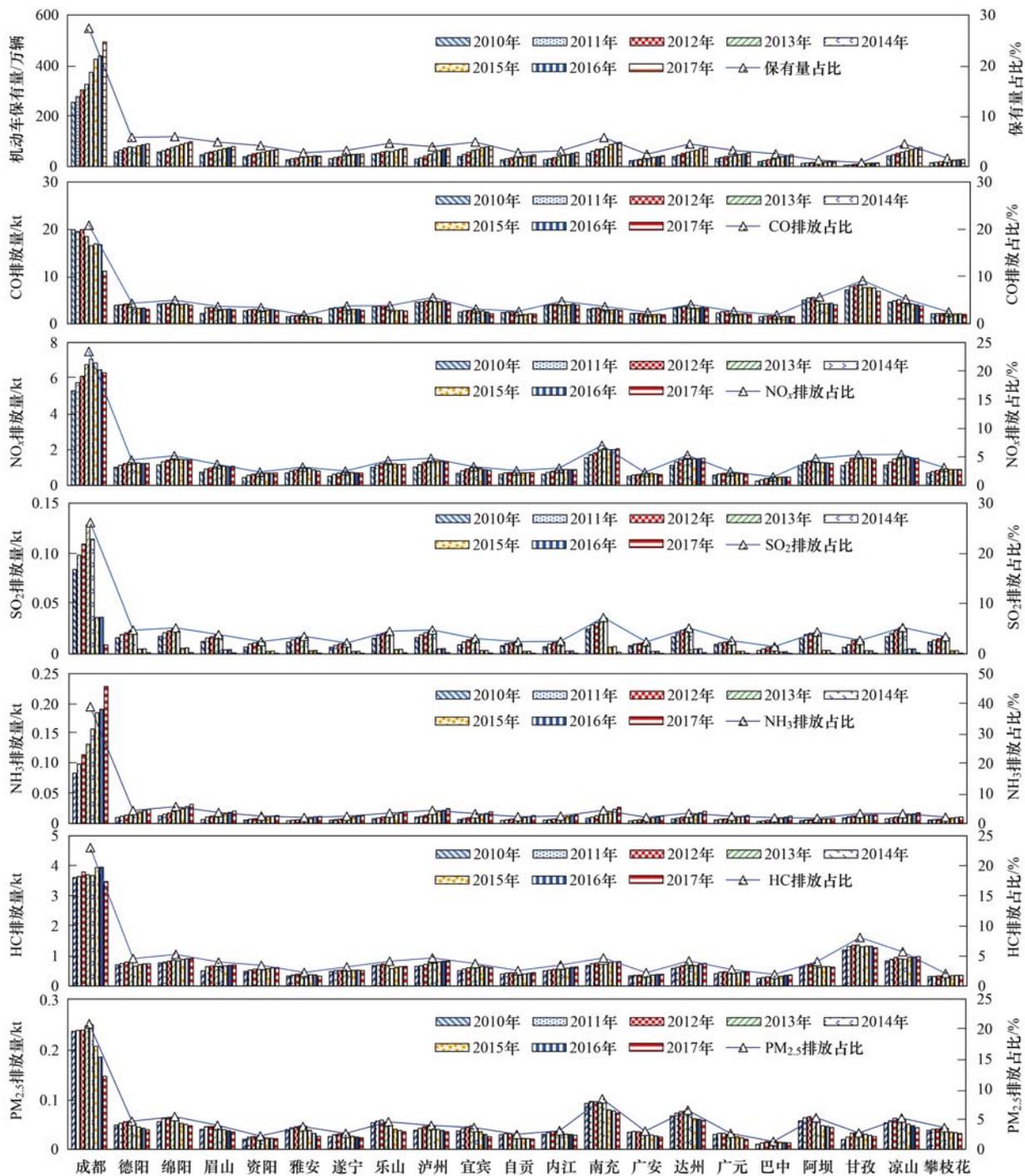


图3 四川省各市州2010~2017年机动车保有量及污染物排放趋势

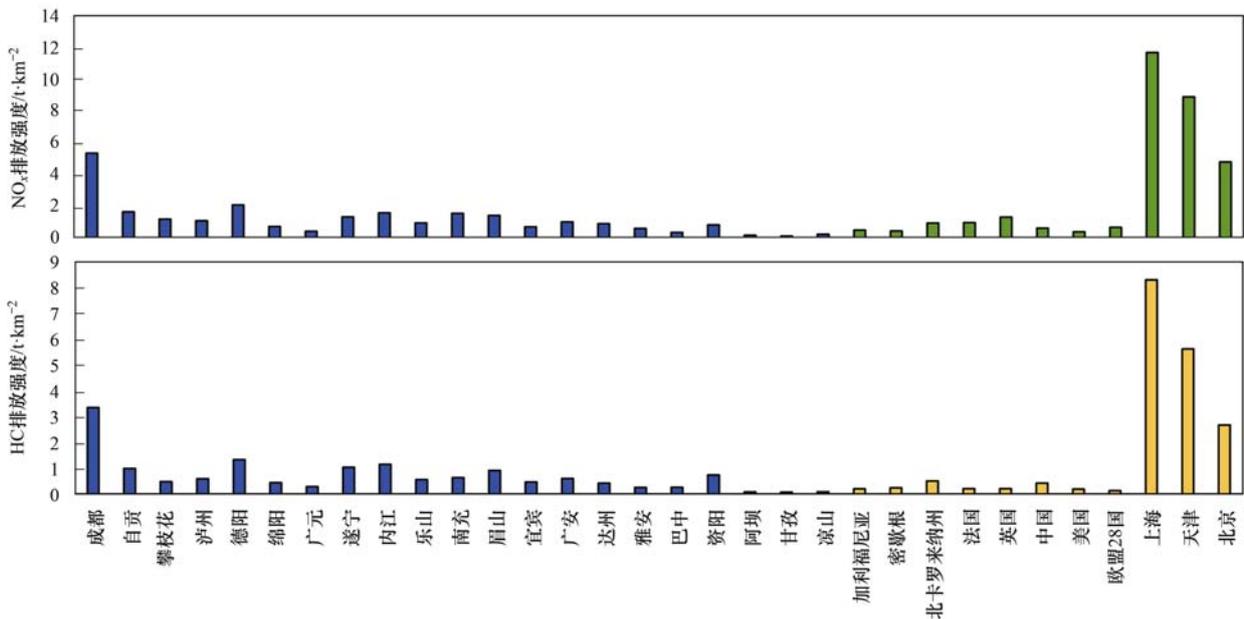
Fig. 3 Trends in vehicles ownership and emissions by city in Sichuan Province for the period 2010-2017

四川省 HC 排放强度均值为 $0.34 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 高于美国和欧盟 28 国的排放强度; 与其他研究结果对比, 成都市机动车 HC 和 NO_x 排放强度略高于北京; 大部分城市包括成都、自贡、攀枝花、泸州、德阳、遂宁、内江、南充、眉山和广安的 NO_x 排放强度高于中国 2017 年的平均排放强度, 高于美国的加利福尼亚、密歇根、北卡罗来纳州和欧盟 28 国的平均水平, 但是低于上海和天津机动车的排放强度。四川省 NO_x 排放强度均值为 $0.55 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 略低于欧盟 28 国以及中国的

NO_x 排放强度; 成都市机动车 NO_x 排放强度高于北京市, 低于上海和天津, 四川省大部分城市包括成都、自贡、攀枝花、泸州、德阳、遂宁、内江、南充、眉山和广安的 NO_x 排放强度高于中国 2017 年的平均排放强度, 高于美国的加利福尼亚、密歇根和北卡罗来纳州等地的平均水平。

2.3 机动车管控政策的影响

为了更好地量化机动车管控政策对不同污染物排放的影响, 分别设置保有量增加、燃油品质改善和



四川省及各城市排放强度来自于本研究 2010 ~ 2017 年的均值强度; 上海、天津和北京数据引用自文献[14]; 中国数据引用自文献[32]; 欧洲各国家数据来自于文献[14]; 欧盟 28 国数据来自于文献[33]; 美国以及美国地区的数据来自于文献[34]

图 4 各州市机动车尾气污染物排放强度

Fig. 4 Vehicle exhaust emissions by city

排放标准加严这 3 种情景. 保有量增加这一情景是基于 2010 年排放标准不变, 保有量按照实际增加数量进行核算; 燃油品质的改善情景是实际情况减去基于 2010 年燃油品质不改变的情况进行核算; 排放标准加严的采用实际情况扣除基于 2010 年排放标准不调整的情况进行排放核算; 每一年的变化量与当年的实际排放量比例作为变化比. 从图 5 中可

以看出, 基于四川省近几年经济水平的发展, 机动车保有量的增加每年对于上述 4 种污染物的实际排放贡献在 4.2% ~ 8.0% 之间, 其中对于 CO、HC 以及 PM_{2.5} 影响较高, 平均每年增加 7.5%、8.0% 以及 8.0% 的排放, NO_x 的影响最低, 每年增加 4.2% 的排放. 燃油品质的改善这一措施在 2014 年开始对各污染物的减排有明显的效果, 这是由于 2014 年四

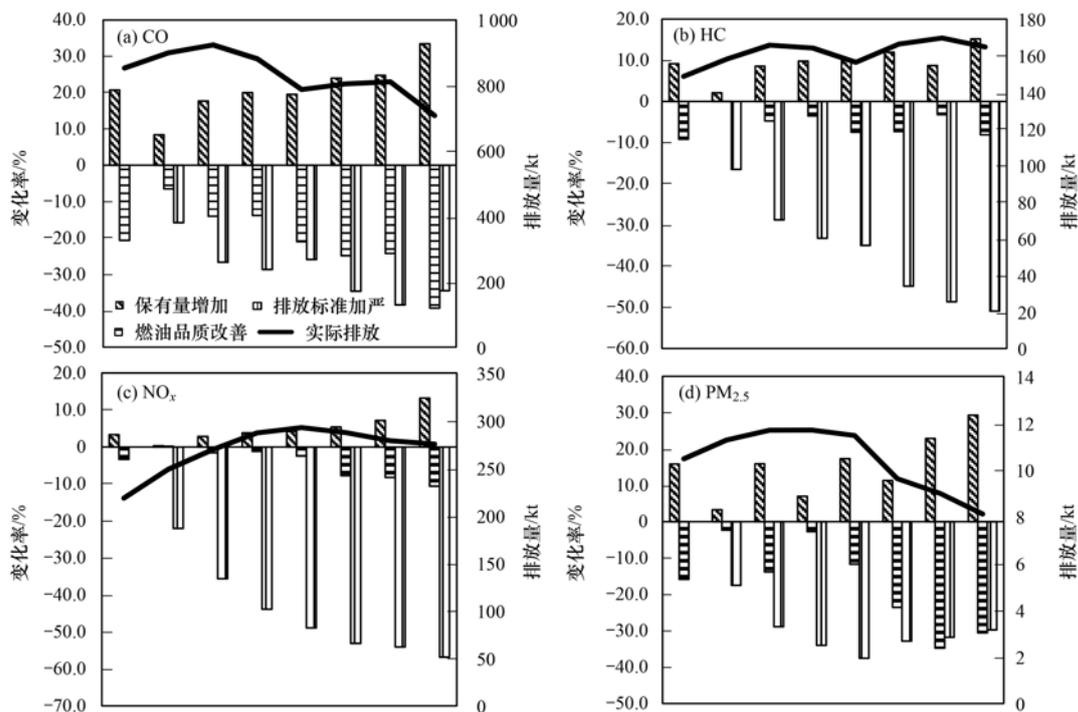


图 5 四川省机动车排放量与管控政策变化比

Fig. 5 Vehicle emissions and the proportion of control policies with emissions reduction in Sichuan Province

川省开始实施国四标准的燃油,同时在2017年国五燃油标准的实施,进一步强化了减排效果,燃油品质的改善有效地降低了 $PM_{2.5}$ 和CO的排放,自2014年开始平均每年降低了四川省机动车12.3%和16.9%的排放;对于 NO_x 和VOC的减排也能达到平均每年6%的减排比例.如果不提升排放标准,在2011~2017年期间,上述4种污染物每年会比实际排放增加20%以上.以2017年为例,在实施新车排放标准升级后,CO、 NO_x 、HC和 $PM_{2.5}$ 污染物的排放量分别比从2011年开始停止新车排放标准的更新情景下减少246、155、75以及1.8 kt污染物的排放,占2017年实际排放的比例分别为30.6%、56%、45.9%以及21.9%.

2.4 与其他研究对比

将本研究的结果与其它研究的结论进行对比,

表3 与其他研究对比结果

Table 3 Comparison of the study results with previous studies

基准年	地区	排放量/kt							
		CO	HC	NO_x	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	BC	OC
2015	江苏省 ^[35]	491	166	/	17	/	4	7	/
2015	本研究	804.0	166.4	287.3	9.6	10.6	1.1	4.9	1.4
2013	河南省 ^[36]	1 081	205	694	38	43	16	/	/
2013	山西省 ^[37]	/	176	/	/	/	/	/	/
2013	本研究	880.2	166.4	287.0	11.7	12.9	4.9	6.1	2.1
2015	四川省 ^[38]	/	/	213.2	/	/	/	/	/
2002	四川省 ^[39]	1 158	179	115	/	44	/	/	/
2001	四川省 ^[40]	1 768	/	/	/	/	/	/	/

2.5 不确定性分析

清单建立的不确定性主要来自于3个方面:计算方法的适用程度、排放因子的选取以及活动水平的准确.本研究使用的清单计算方法和机动车排放因子均来自于生态环境部推荐的编制指南^[31],同时根据年份对排放因子进行了劣化修正,机动车年均行驶里程同样来自于编制指南,不确定性较小;历年机动车保有量数据是在全国第一次污染源普查工作的基础上,根据环境统计年鉴及各市州填报数据进行更新得到的,更新到2017年的机动车保有量数据与第二次污染源普查结果有一定出入;同时温度、湿度等气象影响因子选取逐月均值,并未考虑逐日等变化,存在一定不确定性;不同机动车行驶速度、负载情况等影响因子也不尽相同,但本研究对于四川省所有城市的同一车型取同一调查均值,这也增大了机动车排放清单的不确定性.

3 结论

(1)2017年四川省机动车保有量为1 706万辆,2010~2017年四川省机动车保有量逐年增加,机动

如表3所示.2015年四川省机动车尾气中的污染物除CO以外, $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和BC排放量均低于江苏省,2015年江苏省汽车保有量为1 620万辆,高于四川省的1 403万辆;2015年本研究 NO_x 的数据高于文献[38]计算的,高出74.1 kt,这可能是由于排放因子来源不同以及本地化因子修正过程中产生的差异;2013年四川省机动车排放的CO、HC、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 低于河南省,这可能是由于河南省机动车保有量高于四川省导致的,2017年河南省汽车保有量为1 645万辆,居全国第3位,高于四川的1 167万辆,与2001年及2002年相比,四川省机动车CO、 PM_{10} 等污染物的排放量均显著下降,但HC与2002年基本持平略有下降, NO_x 排放量不降反升,之后应一直将HC和 NO_x 的减排作为机动车管控的重要内容.

车年均增长率为9.1%,小型载客车年均增长率为19.1%,不管是机动车还是小型载客车保有量的增速,均高于全国平均增速.

(2)2017年四川省机动车排放CO、 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、HC、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、BC和OC分别为706.9、275.3、0.3、5.7、164.8、8.1、8.9、4.1和1.4 kt;相比于2010年, NO_x 、 NH_3 、HC增加26%、159%和11%; SO_2 降幅为91%,CO降幅为17%, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、BC和OC降幅为23%~26%之间.除 NH_3 以外,四川省所排放的其他污染物呈现波动中下降的趋势,在2014~2016年前后达到高值.

(3)成都市由于较高的机动车保有量占比,导致其在全省CO、 NO_x 、HC和 $PM_{2.5}$ 排放总量中的平均贡献比均列首位,但污染物贡献比未达到成都市26.9%机动车保有量占比.阿坝州和甘孜州机动车保有量占比分别为1.3%和0.8%,但在全省污染物排放总量中的平均贡献比分别在3%~7%,这主要是由于这两个州海拔均超过2 000 m,机动车在高海拔地区排放因子更高引起的污染物排放量增加.

(4)从排放强度看,成都市机动车HC和 NO_x

的排放强度略高于北京,远高于欧盟和美国的均值,四川省超过一半城市机动车排放的 HC 和 NO_x 排放强度高于加利福尼亚、密歇根和北卡罗来纳州等地的平均水平,但是低于上海和天津机动车的排放强度。

(5) 新车排放标准加严是最具有减排潜力的措施,同时随着实施年份的增长,显示的减排潜力越大,同时燃油品质的提升对于污染物的减排每年也会有 6% 以上的减排效力。应综合考虑控制四川省典型城市的机动车保有量,提升机动车整体排放标准,总体而言,四川省的 HC 以及 NO_x 较年际看并未降低,应一直将 HC 和 NO_x 的减排作为机动车管控的重要内容。

参考文献:

- [1] Zhang Q Y, Sun G J, Fang S M, *et al.* Air pollutant emissions from vehicles in China under various energy scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **450-451**: 250-258.
- [2] Wu X M, Wu Y, Zhang S J, *et al.* Assessment of vehicle emission programs in China during 1998-2013: Achievement, challenges and implications [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 556-567.
- [3] Zhang S J, Wu Y, Liu H, *et al.* Historical evaluation of vehicle emission control in Guangzhou based on a multi-year emission inventory [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 32-42.
- [4] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单 [J]. *科学通报*, 2011, **56**(3): 261-268.
Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, *et al.* Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(8): 781-788.
- [5] Zhou J B, Xiong Y, Xing Z Y, *et al.* Characterizing and sourcing ambient PM_{2.5} over key emission regions in China II: organic molecular markers and CMB modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **163**: 57-64.
- [6] Zhang W H, Liu B S, Zhang Y F, *et al.* A refined source apportionment study of atmospheric PM_{2.5} during winter heating period in Shijiazhuang, China, using a receptor model coupled with a source-oriented model [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117157.
- [7] Liu B S, Li Y F, Wang L, *et al.* Source directional apportionment of ambient PM_{2.5} in urban and industrial sites at a megacity in China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **235**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104764.
- [8] Li L L, Tan Q W, Zhang Y H, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during persistent extreme haze events in Chengdu, southwest China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 718-729.
- [9] He K B, Huo H, Zhang Q. Urban air pollution in China: Current status, characteristics, and progress [J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2002, **27**(1): 397-431.
- [10] Lang J L, Cheng S Y, Wei W, *et al.* A study on the trends of vehicular emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 605-614.
- [11] Cai H, Xie S D. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(39): 8963-8979.
- [12] Lang J L, Cheng S Y, Zhou Y, *et al.* Air pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2011 [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **496**: 1-10.
- [13] Wu Y, Zhang S J, Hao J M, *et al.* On-road vehicle emissions and their control in China: a review and outlook [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 332-349.
- [14] Song W W, He K B, Lei Y. Black carbon emissions from on-road vehicles in China, 1990-2030 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 320-328.
- [15] Tang G Q, Chao N, Wang Y S, *et al.* Vehicular emissions in China in 2006 and 2010 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 179-192.
- [16] Li S Y, Lang J L, Zhou Y, *et al.* Trends in ammonia emissions from light-duty gasoline vehicles in China, 1999-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134359.
- [17] 王人洁, 王堃, 张帆, 等. 中国国道和省道机动车尾气排放特征 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3553-3560.
Wang R J, Wang K, Zhang F, *et al.* Emission characteristics of vehicles from national roads and provincial roads in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3553-3560.
- [18] Liu Y H, Liao W Y, Li L, *et al.* Vehicle emission trends in China's Guangdong Province from 1994 to 2014 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 512-521.
- [19] Lv W D, Hu Y L, Li E P, *et al.* Evaluation of vehicle emission in Yunnan province from 2003 to 2015 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **207**: 814-825.
- [20] Sun S D, Zhao G, Wang T, *et al.* Past and future trends of vehicle emissions in Tianjin, China, from 2000 to 2030 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **209**: 182-191.
- [21] 孙世达, 姜巍, 高卫东. 青岛市机动车排放清单与空间分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 49-59.
Sun S D, Jiang W, Gao W D. Vehicle emission inventory and spatial distribution in Qingdao [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 49-59.
- [22] Wang H K, Fu L X, Lin X, *et al.* A bottom-up methodology to estimate vehicle emissions for the Beijing urban area [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(6): 1947-1953.
- [23] 王慧慧, 曾维华, 吴开亚. 上海市机动车尾气排放协同控制效应研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1345-1352.
Wang H H, Zeng W H, Wu K Y. Co-control effects of motor vehicle pollutant emission in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1345-1352.
- [24] Jia T, Li Q, Shi W Z. Estimation and analysis of emissions from on-road vehicles in Mainland China for the period 2011-2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 500-512.
- [25] 韩丽, 陈军辉, 吕晓彤, 等. 四川地区天然源挥发性有机物排放清单研究 [J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(2): 203-209.
Han L, Chen J H, Lv X T, *et al.* Biogenic volatile organic compounds emission inventory in Sichuan region [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, **40**(2): 203-209.
- [26] 何敏, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省2008-2014年水泥行业大气污染物排放清单及时空分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 34-43.
He M, Chen J H, Han L, *et al.* Cement industrial emission inventories development and their temporal and spatial distribution for Sichuan Province from 2008 to 2014 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 34-43.
- [27] 何敏, 王幸锐, 韩丽. 四川省大气固定污染源排放清单及特征 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3127-3137.

- He M, Wang X R, Han L. Air pollutant emission inventory and characteristics from stationary sources in Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 3127-3137.
- [28] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- [29] 冯小琼, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省 2012 年人为源氨排放清单及分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 394-401.
- Feng X Q, Wang X R, He M, *et al.* A 2012-based anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 394-401.
- [30] 范武波, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4460-4468.
- Fan W B, Chen J H, Li Y, *et al.* Study on the non-road mobile source emission inventory for Sichuan province [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4460-4468.
- [31] 生态环境部. 关于发布《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 4 项技术指南的公告[EB/OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_a5b932c90102v2bv.html, 2014-08-20.
- [32] 生态环境部. 中国机动车环境管理年报(2018)[EB/OL]. <https://www.vecc.org.cn/dbfile.svl?n=/u/cms/jdchbw/202001/07164543gv63.pdf>, 2018-06-01.
- [33] European Environment Agency. European Union Emission Inventory Report 1990-2018 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)[EB/OL]. <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emission-inventory-report-1990-2018>, 2020-08-01.
- [34] USEPA. 2017 National Emissions Inventory (NEI) Data[EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2017-national-emissions-inventory-nei-data#tab-3>, 2020-08-01.
- [35] 李荔, 张洁, 赵秋月, 等. 基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 3976-3986.
- Li L, Zhang J, Zhao Q Y, *et al.* Vehicle exhaust emission characteristics and their contributions in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 3976-3986.
- [36] 宫密秘. 河南省典型城市高时空分辨率机动车污染物排放清单及特征识别[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- Gong M M. Study on the highly resolved temporal and spatial emission inventory of vehicles and its characteristics for the typical cities of Henan Province, China [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [37] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4086-4093.
- Yan Y L, Peng L. Emission inventory of anthropogenic VOCs and its contribution to ozone formation in Shanxi Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4086-4093.
- [38] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [39] 宋翔宇, 谢绍东. 中国机动车排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- Song X Y, Xie S D. Development of vehicular emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- [40] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(12): 1580-1585.
- Wang L T, Zhang Q, Hao J M, *et al.* Anthropogenic CO emission inventory of mainland China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(12): 1580-1585.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshui Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshui	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)