

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放因子研究 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N₂O 的分布和海-气交换通量 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO₂ 对底泥中汞释放及活化的影响 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

轻型汽油车 CH₄和N₂O排放因子研究

何立强, 宋敬浩, 胡京南*, 解淑霞, 祖雷

(中国环境科学研究院国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室, 北京 100012)

摘要: 我国的机动车温室气体排放研究多集中于 CO₂ 排放, 而 CH₄ 和 N₂O 排放的相关研究主要是依据欧美开发的模型进行的, 缺乏 CH₄ 和 N₂O 实车测试的研究. 本研究选取 22 辆轻型汽油车, 利用底盘测功机开展了整车台架测试和采样分析, 获得了车辆在 NEDC 工况下的 CH₄ 和 N₂O 排放因子. 结果表明, 国 I ~ 国 IV 阶段轻型汽油车 CH₄ 平均排放因子分别为 0.048、0.048、0.038 和 0.028 g·km⁻¹, N₂O 则分别为 0.045、0.039、0.026 和 0.021 g·km⁻¹. 在轻型汽油车单车排放的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三类温室气体 (以 CO₂ 当量计) 中, CH₄ 和 N₂O 排放的分担率均随排放标准的加严而逐渐降低, 其中 CH₄ 排在温室气体排放中不足 0.5%, N₂O 排放分担率在 3.03% ~ 6.35% 之间. 因此, 排放标准的加严可以有效减少 CH₄ 和 N₂O 的排放, 以减缓机动车排放带来的温室效应.

关键词: 机动车; 温室气体; CH₄; N₂O; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4489-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.010

An Investigation of the CH₄ and N₂O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles

HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, XIE Shu-xia, ZU Lei

(State Environmental Protection Key Laboratory of Vehicle Emission Control and Simulation, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In China, most of the studies of vehicular greenhouse gas (GHG) emissions have been focused on CO₂ emissions. The investigation of non-CO₂ GHGs, e. g. CH₄ and N₂O, are mainly carried out based on models developed in Europe and the US, and there are few vehicle emission tests for CH₄ and N₂O. In this study, 22 light-duty gasoline vehicles (LDGVs) were selected for tailpipe CH₄ and N₂O tests using chassis dynamometer, and their emission factors were obtained based on the NEDC driving cycle. The results showed that the CH₄ emission factors of China I to China IV LDGVs were 0.048 g·km⁻¹, 0.048 g·km⁻¹, 0.038 g·km⁻¹ and 0.028 g·km⁻¹, respectively. For N₂O, the emission factors of China I to China IV were 0.045 g·km⁻¹, 0.039 g·km⁻¹, 0.026 g·km⁻¹ and 0.021 g·km⁻¹, respectively. In the GHGs emissions (in terms of CO₂ Eq.) per LDGV, the percentage of CH₄ and N₂O emissions decreased gradually with tightening of emission standards. The contribution of CH₄ emissions was lower than 0.5% in the total emissions, and N₂O share rate was between 3.03% and 6.35%. Therefore, tightening emission standards can effectively reduce the CH₄ and N₂O emissions, to mitigate the greenhouse effects caused by vehicle emissions.

Key words: motor vehicle; greenhouse gas; CH₄; N₂O; emission factor

近年来, 中国汽车工业保持高速发展, 2013 年中国汽车产销量双双超过 2 000 万辆, 连续五年蝉联全球第一. 机动车污染排放已成为城市和区域空气污染的主要来源之一, 也是温室气体排放增长最快的领域之一^[1, 2]. 国内外有关研究表明, 在某些国家或城市, 机动车已成为 CO₂ 的第二大人为排放源^[3-5]. 而对于 CH₄ 和 N₂O 等非 CO₂ 类温室气体, 机动车的排放贡献同样不容忽视. 美国环保署公布的 2010 年温室气体排放清单报告指出, 移动源是美国第三大 N₂O 排放源, 而 CH₄ 排放量则排在第十二位^[4].

目前, 国外已有学者利用模型^[6, 7]、台架测试^[8-12]、车载测试^[8]和隧道实验^[12, 13]等方法获得了机动车尾气的 CH₄ 和 N₂O 的排放特征. 与国外相比, 国内大部分机动车温室气体排放研究都集中于

CO₂ 排放^[14-19], CH₄ 和 N₂O 排放的相关研究主要是依据国外开发的模型^[20-22]进行的, 缺乏本地的实测数据的支持. 何立强等^[23]基于文献调研和实地调查获得的数据测算了 2010 年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 的排放清单, 指出轻型汽油车是削减机动车 CH₄ 和 N₂O 排放的重点车型. 因此, 本研究利用底盘测功机对轻型汽油车开展了整车台架测试, 获得了轻型汽油车在法规工况下 CH₄ 和 N₂O 的单车排放因子, 以期决策者开展轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排

收稿日期: 2014-05-06; 修订日期: 2014-07-03

基金项目: 美国能源基金会项目 (G1111-15209); 中国环境科学研究院改革专项启动经费项目 (2011KYYW04); 环境保护公益性行业科研专项 (201209002)

作者简介: 何立强 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机动车污染控制, E-mail: heliqiang4@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hujn@craes.org.cn

放控制提供数据支持和参考依据.

1 材料与方 法

1.1 测试车辆

本研究测试的轻型汽油车共 22 辆,基本属于我国目前在用轻型汽油车的主流车型,车辆的详细信

息如表 1 所示. 它们均处于正常的运行状态,发动机工作良好,品牌以大众、北京现代、上汽通用、东风等为主,包括国产车及合资车,行驶里程一般低于 20×10^4 km. 测试车辆生产年份为 2000 ~ 2011 年,排放控制水平处于国 I ~ 国 IV 阶段,使用燃料为 93 号或京 92 号汽油.

表 1 测试轻型汽油车的基本信息¹⁾

Table 1 General information of tested light-duty gasoline vehicles

编号	品牌型号	注册		车重/kg	行驶里程/km	排放阶段
		年份	地点			
L1	本田 HG7248	2003	津	1 590	138 067	国 I
L2	桑塔纳 SVW7182HFI	2002	京	1 360	84 764	国 I
L3	桑塔纳 SVW7182CFI	2000	京	1 250	207 312	国 I
L4*	捷达 FV7160CIX	2000	京	1 050	184 101	国 I
L5	荣威 CSA718MC	2006	京	1 590	92 542	国 II
L6	索纳塔 BH7200MX	2005	京	1 590	99 502	国 II
L7	别克 SGK7251G	2005	鲁	1 700	76 527	国 II
L8	东风雪铁龙 DC716316V	2006	京	1 250	85 419	国 II
L9	北京现代 BH7167MX	2007	京	1 250	76 864	国 III
L10	速腾 FV7146TAR	2007	京	1 425	76 582	国 III
L11	速腾 FV7206	2008	津	1 470	66 730	国 III
L12	东风 LZ6430BQBE	2009	京	1 360	39 179	国 IV
L13	东风 LZ6430BQBE	2009	京	1 360	44 175	国 IV
L14*	起亚 YQZ6430AE	2009	京	1 590	46 409	国 IV
L15	伊兰特 BH7167AY	2011	京	1 360	19 029	国 IV
L16	东风 LZ6430BQB	2010	京	1 360	36 461	国 IV
L17	东风 LZ6430BQB	2010	京	1 360	35 386	国 IV
L18*	雪佛兰 SGM7145ATA	2009	京	1 250	47 925	国 IV
L19	雪佛兰 SGM7149MTA	2009	京	1 360	44 263	国 IV
L20*	悦动 BH7164AY	2010	京	1 250	47 996	国 IV
L21*	标致 408	2010	京	1 390	48 708	国 IV
L22*	瑞纳 BH7141AY	2010	京	1 065	61 643	国 IV

1) * 由于在样品检测期间,CH₄ 标准气体未到位,故只对N₂O进行了检测分析

1.2 测试分析方法

车辆测试在中国环境科学研究院的汽车性能试验室进行,将轻型汽油车置于底盘测功机上按照 GB 18352. 3-2005^[24]中规定的试验方法,采用 NEDC(new european driving cycle,新欧洲驾驶循环)作为测试车辆的测试循环. 整个 NEDC 测试循环共持续 1 180 s,由市区测试循环和市郊测试循环两部分组成,平均车速为 33. 35 km·h⁻¹,理论行驶距离 10. 93 km. 所有车辆在测试过程中均为冷启动.

测试循环结束后利用 Tedlar 气体采样袋采集全流定容稀释系统(constant volume sampling, CVS)中的机动车尾气样品(CH₄ 浓度范围一般为 $1. 5 \times 10^{-6}$ ~ 5×10^{-6} , N₂O 浓度为 500×10^{-9} ~ $1 500 \times 10^{-9}$),同时收集背景气(CH₄ 浓度一般为 $0. 9 \times$

10^{-6} ~ 3×10^{-6} , N₂O 浓度为 100×10^{-9} ~ 800×10^{-9}). N₂O 虽然是相对稳定的化合物,但加州空气资源局(CARB)的研究结果表明其在 Tedlar 气体采样袋中静置 96 h 后浓度会有不超过 2% 的降幅. 因此,采集的机动车尾气样品需要在 96 h 内完成检测分析. 机动车尾气样品和背景样品均不需预处理,可直接选用 Agilent 7890A 气相色谱仪(GC)进行分析,其中 CH₄ 浓度用气相色谱/氢离子火焰检测器(GC/FID)进行测定^[8, 25, 26], N₂O 则使用气相色谱/电子捕获检测器(GC/ECD)来定量分析^[8, 12]. 在分析样品时,使用中国科学院大气物理研究所研发的 CA-5 气体样品进样仪进样,该进样仪可通过微机程序发出指令控制电磁阀开关,改变管线中压缩空气的方向,用以驱动汽缸转动进样阀,达到气相色谱仪分析气路系统自动进样、分析和清洗,从而在短时

间内完成 CH₄ 和 N₂O 的同时分析. 系统载气为氮气. 色谱配置与分析条件见表 2.

表 2 色谱配置与分析条件

Table 2 GC configuration and analytical conditions

目标化合物	CH ₄	N ₂ O
色谱柱	Col ₁ : SS-2 m × 2 mm 13XMS(60/80 目) ¹⁾	Col ₃ (前置柱): SS-1 m × 2 mm, Porapak Q(80/100 目) Col ₄ (分析柱): SS-3m × 2mm, Porapak Q(80/100 目)
载气流量/cm ³ · min ⁻¹	高纯 N ₂ /30	高纯 N ₂ /25
柱箱温度/℃	55	55
检测器及温度/℃	FID, 250	ECD, 330
空气及高纯 H ₂ 流量/cm ³ · min ⁻¹	空气, 400; H ₂ , 30	—
辅助气流速	—	2 mL · min ⁻¹

1) SS-2 m × 2 mm, 13XMS(60/80 目)表示: 柱子材料为不锈钢, 柱长 2 m, 内径 2 mm, 内填目数为 60 ~ 80 的 13X 分子筛

1.3 排放因子计算方法

测试分析得到 CH₄ 和 N₂O 的浓度数据可根据式

$$EF = \frac{\left[c_s - c_a \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \times M \times \frac{P_a \times T_0}{22.4 \times P_0 \times T_a} \times V_{\text{mix}}}{\text{Dist.}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, EF 为排放因子 g · km⁻¹; c_s 为样品气体浓度, × 10⁻⁶; c_a 为背景气浓度, × 10⁻⁶; DF 为稀释因子; Dist. 为测试过程中车辆所行驶的距离, km; M 为摩尔质量, g · mol⁻¹; P_a、T_a 为测试实验室的大气压力

(1) 进行计算, 得到 CH₄ 和 N₂O 排放因子 (以 g · km⁻¹ 计), 式(1)的各项参数见表 3.

和温度, 单位分别为 kPa 和 K; P₀、T₀ 为标准状况下的大气压力和温度, 分别为 101.325 kPa 和 273.15 K; 22.4 为标准状况下气体的摩尔体积, L · mol⁻¹; V_{mix} 为 CVS 采样体积, m³.

表 3 测算排放因子所需的参数

Table 3 Parameters for the calculation of emission factors

参数	DF ¹⁾	Dist. ²⁾	P _a ²⁾	T _a ¹⁾	V _{mix} ¹⁾
取值	13 ~ 38	11	101.325	293.15 ~ 308.15	177 ~ 258

1) DF、T_a 和 V_{mix} 的取值在不同测试实验中的变化差异较大, 计算排放因子时使用实测值; 2) Dist. 和 P_a 的取值在各实验中的差异很小, 故取定值, 以简化计算

2 结果与讨论

2.1 测试车辆 CH₄ 和 N₂O 排放因子

CH₄ 是机动车尾气排放的总碳氢化合物 (total hydrocarbons, THC) 中的主要污染物之一, 其中天然气车排放的 THC 约有 90% 以上是 CH₄^[27, 28]. 由于 CH₄ 是最稳定的烃类化合物, 比较难以发生氧化反应, 所以致使尾气催化剂对其转化效率较低^[29]. 轻型汽油车 CH₄ 排放因子如图 1 所示. 从测试结果来看, 自国 I 阶段起至国 IV 阶段轻型汽油车 CH₄ 排放因子呈现下降趋势, 平均排放因子依次为 0.048、0.048、0.038 和 0.028 g · km⁻¹. 可见尽管 CH₄ 比较难以被催化转化, 但是排放法规的加严仍然能够在一定程度上对机动车 CH₄ 排放进行有效控制. 这是因为排放法规的加严需要通过提升发动机燃烧技术和尾气后处理技术来实现, 而上述技术的提升也会同时减少 CH₄ 排放.

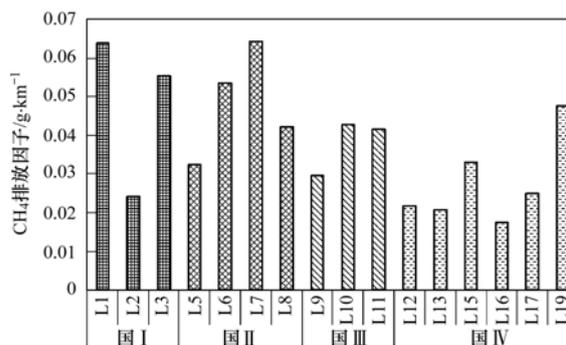


图 1 轻型汽油车 CH₄ 排放因子

Fig. 1 CH₄ emission factors of light-duty gasoline vehicles

N₂O 是机动车排放的气态污染物在特定条件下催化转化的副产品^[7, 11], 因此与无催化装置的车辆 (国 I 前) 相比, 轻型汽油车的 N₂O 排放量可能会由于三元催化 (three-way catalyst, TWC) 技术的引入而显著上升^[30, 31]. 同时, 随着选择性催化还原 (selective catalytic reduction, SCR) 技术将来在重型

柴油车上的广泛使用, N_2O 排放也可能会有所升高^[32]. 虽然尾气后处理技术的引入可能会导致 N_2O 排放升高, 但是随着技术的不断改进升级其排放仍然会逐步降低^[10, 33]. 轻型汽油车 N_2O 排放测试结果见图 2, 国 I 阶段 N_2O 平均排放因子为 $0.045 g \cdot km^{-1}$, 随着排放标准的加严 (标志着发动机技术

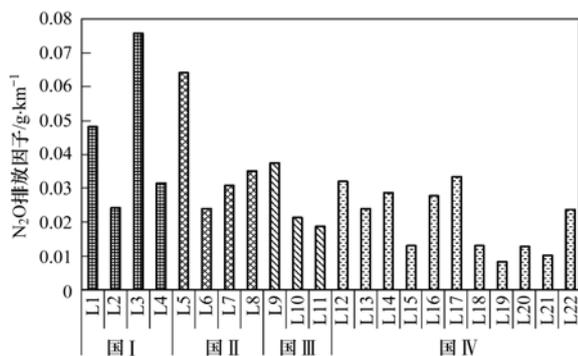


图 2 轻型汽油车 N_2O 排放因子

Fig. 2 N_2O emission factors of light-duty gasoline vehicles

和尾气后处理技术的提升), 排放因子逐渐降低. 与国 I 轻型汽油车相比, 国 II ~ 国 IV 阶段 N_2O 平均排放因子分别下降 14.16%、42.41% 和 54.00%.

2.2 与其他研究结果的比较分析

将测试结果与其他研究结果进行比较分析可知, 本研究测试得到的轻型汽油车 CH_4 排放因子与 D'Angiola 等利用 COPERT IV 模型计算得到的结果^[6] 最为相近. 而比 Nam 等^[9] 和 Heeb 等^[34] 的测试结果略高, 这可能是由于测试工况不同所导致的, 也可能是因为国内外尾气排放控制技术存在差异; 但稍低于蔡皓等^[21] 的模型计算结果. 与姚志良等^[20] 利用 IVE 模型计算的 2007 年中国在用轻型客车的排放因子相比, 本研究得出的国 I 和国 II 阶段的平均排放因子仅约为其计算结果的 1/3 ~ 1/5. 对于轻型汽油车 N_2O 排放因子而言, 本研究测试得到的排放因子与国内外模型计算、实车测试和隧道实验得出的结果均较为吻合. 各研究详细结果如表 4 所示.

表 4 轻型汽油车 CH_4 和 N_2O 排放因子的比较¹⁾

Table 4 Comparison of CH_4 and N_2O emission factors of light-duty gasoline vehicles between this study and other studies

项目	文献来源	测试方法	排放因子/ $g \cdot km^{-1}$
CH_4	本研究, 中国	NEDC	国 I : 0.048; 国 II : 0.048; 国 III : 0.038; 国 IV : 0.028
	Nam 等 ^[9] , 美国	UDDS ²⁾	Tier 1 : 0.001 ~ 0.027
	Heeb 等 ^[34] , 瑞士	FTP ³⁾	欧 0 : 0.104; 欧 I : 0.019; 欧 II : 0.015; 欧 III : 0.003
	D'Angiola 等 ^[6] , 布宜诺斯艾利斯	COPERT IV 模型	欧 II 前 : 0.038 ~ 0.184; 欧 II : 0.043
	姚志良等 ^[20] , 中国	IVE 模型	国 0 ~ 国 II : 0.240; 0.150; 0.200 ⁴⁾
	蔡皓等 ^[21] , 中国	COPERT 模型	欧 0 : 0.3; 欧 I ~ 欧 III : 0.1; 欧 IV : 0.05; 欧 V ~ 欧 VI : 0.002
	李伟等 ^[22] , 中国	MOBILE5 模型	国 0 : 0.07
N_2O	本研究, 中国	NEDC	国 I : 0.045; 国 II : 0.039; 国 III : 0.026; 国 IV : 0.021
	Karlsson 等 ^[35] , 瑞典	NEDC	欧 I ~ 欧 II : 0.024 ~ 0.087
	Huai 等 ^[10] , 美国	FTP ³⁾	无催化 : 0.004; DOC : 0.071; Tier 0 : 0.029; Tier 1 : 0.014
	Behrentz 等 ^[11] , 美国	FTP ³⁾	Tier 0 ~ Tier 1 : 0.020 ± 0.004
	Graham 等 ^[31] , 加拿大	FTP ³⁾	无催化 : 0.007; DOC : 0.034; Tier 0 : 0.087; Tier 1 : 0.020
	D'Angiola 等 ^[6] , 布宜诺斯艾利斯	COPERT IV 模型	欧 II 前 : 0.013 ~ 0.032; 欧 II : 0.017
	姚志良等 ^[20] , 中国	IVE 模型	国 0 ~ 国 II : 0.015; 0.019; 0.012 ⁵⁾
	蔡皓等 ^[21] , 中国	COPERT 模型	欧 0 : 0.02; 欧 I : 0.1; 欧 II : 0.03; 欧 III ~ 欧 VI : 0.01
李伟等 ^[22] , 中国	MOBILE5 模型	国 0 : 0.024	
Becker 等 ^[12, 13] , 德国	隧道实验	0.002 ~ 0.034	

1) 欧 0 ~ 欧 VI 排放阶段分别相当于国 0 ~ 国 VI; 无催化即无任何尾气后处理装置, 相当于国 0 阶段; DOC 即尾气后处理装置为氧化催化净化器, 介于国 0 和国 I 之间; Tier 0 美国 Tier 1 前的排放阶段, 相当于国 I 阶段; Tier 1 美国第一阶段, 相当于国 II、国 III 阶段; 2) UDSS: urban dynamometer driving schedule, 城市测功机驾驶规程; 3) FTP: federal test procedure, 美国联邦测试规程; 4) 0.240、0.150、0.200 分别为 2007 年北京、上海和深圳在用轻型客车 CH_4 平均排放因子; 5) 0.015、0.019、0.012 分别为 2007 年北京、上海和深圳在用轻型客车 N_2O 平均排放因子

2.3 轻型汽油车单车排放的温室效应分析

与 CH_4 和 N_2O 相比, 机动车尾气排放 CO_2 所产生的温室效应更为显著. 轻型汽油车在 NEDC 工况

下的 CO_2 排放测试结果如图 3 所示, CO_2 排放因子为 $163 \sim 254 g \cdot km^{-1}$, 平均排放因子为 $205 g \cdot km^{-1}$. 由于机动车 CO_2 排放状况和燃油消耗量直接相关,

而车主通常会比较关注车辆的维护保养,以使车辆的燃油消耗处于相对较低的水平^[36,37],因此 CO₂ 排放放在各阶段的变化幅度较小。

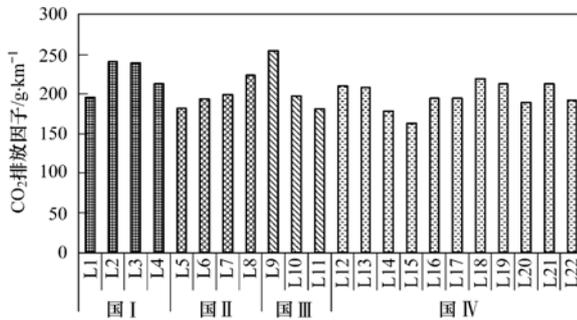


图3 轻型汽油车 CO₂ 排放因子

Fig. 3 CO₂ emission factors of light-duty gasoline vehicles

CH₄ 和 N₂O 的全球变暖潜势 (global warming potential, GWP) 分别为 21 和 310^[38]. 本研究中,从国 I ~ 国 IV 阶段,轻型汽油车 CH₄ 排放因子折算成 CO₂ 当量分别为 1.00、1.01、0.80 和 0.59 g·km⁻¹; N₂O 排放因子折算成 CO₂ 当量则依次为 13.93、11.96、8.03 和 6.41 g·km⁻¹. 由此可评估轻型汽油车尾气 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三类温室气体的排放分担率,如图 4 所示. 在各排放阶段轻型汽油车单车排放的温室气体(以 CO₂ 当量计)中,CO₂ 的排放分担

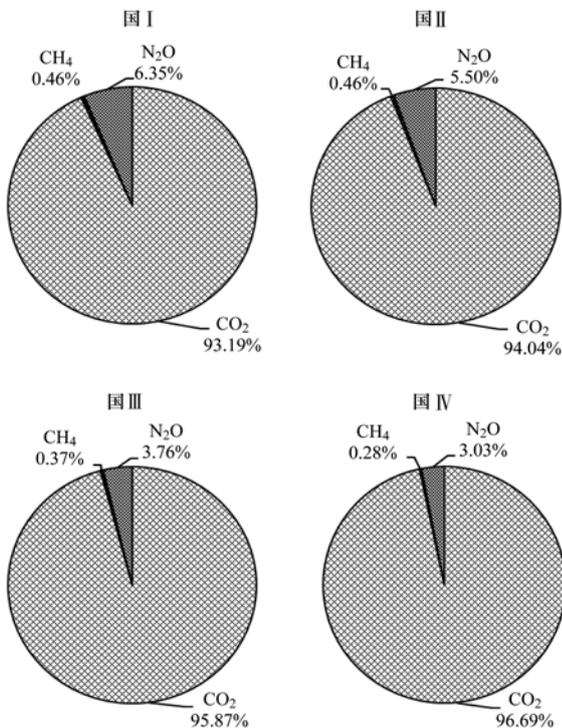


图4 不同阶段轻型汽油车的温室气体排放构成

Fig. 4 Profile of greenhouse gases from light-duty gasoline vehicles meeting different emission standards

率最高,均在 93% 以上. 而 CH₄ 和 N₂O 的排放分担率不足 7%,其中 N₂O 的排放分担率从国 I ~ 国 IV 阶段分别为 6.35%、5.50%、3.76% 和 3.03%; CH₄ 排放分担率最小,均低于 0.5%。

3 结论

(1) 利用底盘测功机对轻型汽油车开展了整车台架测试,获得了轻型汽油车在 NEDC 工况下 CH₄ 和 N₂O 的单车排放水平,二者排放因子随着排放标准的加严均呈现降低的趋势. 国 I ~ 国 IV 阶段轻型汽油车 CH₄ 平均排放因子分别为 0.048、0.048、0.038 和 0.028 g·km⁻¹; N₂O 则分别为 0.045、0.039、0.026 和 0.021 g·km⁻¹. 本研究测试所得的 CH₄ 排放因子与国内外研究结果相比略有不同,而 N₂O 排放因子基本一致。

(2) 本研究测试结果表明,国 I ~ 国 IV 阶段轻型汽油车在 NEDC 工况下 CO₂ 平均排放因子为 205 g·km⁻¹. 综合评价轻型汽油车单车排放的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三类温室气体排放水平(以 CO₂ 当量计)得出,在各排放阶段轻型汽油车中,CO₂ 的排放分担率最高,均在 93% 以上. 而 CH₄ 和 N₂O 的排放分担率均随排放标准的加严而逐渐降低,其中 N₂O 的排放分担率从国 I ~ 国 IV 阶段分别为 6.35%、5.50%、3.76% 和 3.03%; CH₄ 排放分担率最小,均低于 0.5%。

参考文献:

- [1] Montzka S A, Dlugokencky E J, Butler J H. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change [J]. *Nature*, 2011, **476** (7358): 43-50.
- [2] Kendall A, Price L. Incorporating time-corrected life cycle greenhouse gas emissions in vehicle regulations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (5): 2557-2563.
- [3] Yu W, Pagani R, Huang L. CO₂ emission inventories for Chinese cities in highly urbanized areas compared with European cities [J]. *Energy Policy*, 2012, **47**: 298-308.
- [4] US Environmental Protection Agency. Trends in Greenhouse Gas Emissions, Inventory of U. S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2010 [R]. EPA 430-R-12-001, 2012. 1-27.
- [5] European Environmental Agency. Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2005 and inventory report 2007 (Submission to the UNFCCC Secretariat) [R]. Copenhagen, European Environmental Agency, 2007. 1-464.
- [6] D'Angiola A, Dawidowski L E, Gómez D R, et al. On-road traffic emissions in a megacity [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (4): 483-493.
- [7] Beer T, Grant T, Williams D, et al. Fuel-cycle greenhouse gas

- emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(4): 753-763.
- [8] Graham L A, Rideout G, Rosenblatt D, *et al.* Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(19): 4665-4681.
- [9] Nam E K, Jensen T E, Wallington T J. Methane emissions from vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(7): 2005-2010.
- [10] Huai T, Durbin T D, Wayne Miller J, *et al.* Estimates of the emission rates of nitrous oxide from light-duty vehicles using different chassis dynamometer test cycles [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6621-6629.
- [11] Behrentz E, Ling R, Rieger P, *et al.* Measurements of nitrous oxide emissions from light-duty motor vehicles: a pilot study[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(26): 4291-4303.
- [12] Becker K H, Wiesen P, Kurtenbach R, *et al.* Nitrous oxide (N₂O) emissions from vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(22): 4134-4139.
- [13] Becker K H, Lörzer J C, Kurtenbach R, *et al.* Contribution of vehicle exhaust to the global N₂O budget [J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(3-4): 387-395.
- [14] He K B, Huo H, Zhang Q, *et al.* Oil consumption and CO₂ emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications [J]. *Energy Policy*, 2005, **33**(12): 1499-1507.
- [15] Liu Y, Wang Y, Huo H. Temporal and spatial variations in on-road energy use and CO₂ emissions in China, 1978 - 2008[J]. *Energy Policy*, 2013, **61**: 544-550.
- [16] Huo H, Wang M, Zhang X L, *et al.* Projection of energy use and greenhouse gas emissions by motor vehicles in China: Policy options and impacts[J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 37-48.
- [17] Yao Z L, Huo H, Zhang Q, *et al.* Gaseous and particulate emissions from rural vehicles in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(18): 3055-3061.
- [18] 张清宇, 魏玉梅, 田伟利. 机动车排放控制标准对污染物排放因子的影响[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(5): 606-612.
- [19] 何春玉, 王歧东. 运用 CMEM 模型计算北京市机动车排放因子[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 109-112.
- [20] 姚志良, 王歧东, 王新彤, 等. 典型城市机动车非常规污染物排放清单[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(3): 96-101.
- [21] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(3): 319-326.
- [22] 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量 [J]. *城市环境与城市生态*, 2003, **16**(2): 36-38.
- [23] 何立强, 胡京南, 解淑霞, 等. 2010 年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(1): 28-35.
- [24] GB 18352.3-2005 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国 III, IV 阶段) [S].
- [25] McGaughey G R, Desai N R, Allen D T, *et al.* Analysis of motor vehicle emissions in a Houston tunnel during the Texas Air Quality Study 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(20): 3363-3372.
- [26] Graham L. Chemical characterization of emissions from advanced technology light-duty vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(13): 2385-2398.
- [27] Motta R C, Kelly K J, Warnock W W. Compressed natural gas and liquefied petroleum gas conversions: The national renewable energy laboratory's experience [R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (United States), 1996. 1-15.
- [28] Dondero L, Goldemberg J. Environmental implications of converting light gas vehicles: the Brazilian experience [J]. *Energy Policy*, 2005, **33**(13): 1703-1708.
- [29] 解淑霞, 胡京南, 鲍晓峰, 等. 天然气-汽油双燃料车实际道路排放特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(11): 2347-2353.
- [30] Dasch J M. Nitrous oxide emissions from vehicles [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1992, **42**(1): 63-67.
- [31] Graham L A, Belisle S L, Rieger P. Nitrous oxide emissions from light duty vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(12): 2031-2044.
- [32] Watling T C, Ravenscroft M R, Avery G. Development, validation and application of a model for an SCR catalyst coated diesel particulate filter [J]. *Catalysis Today*, 2012, **188**(1): 32-41.
- [33] Jimenez J L, McManus J B, Shorter J H, *et al.* Cross road and mobile tunable infrared laser measurements of nitrous oxide emissions from motor vehicles [J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(3-4): 397-412.
- [34] Heeb N V, Forss A M, Saxer C J, *et al.* Methane, benzene and alkyl benzene cold start emission data of gasoline-driven passenger cars representing the vehicle technology of the last two decades [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(37): 5185-5195.
- [35] Karlsson H L. Ammonia, nitrous oxide and hydrogen cyanide emissions from five passenger vehicles [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **334-335**: 125-132.
- [36] 蔡朝波. 机动车燃油消耗的人为影响因素及控制措施探讨 [J]. *当代农机*, 2013, (7): 79-80.
- [37] 蔡凤田, 谢元芒. 汽车运行油耗的影响因素与汽车节能技术 [J]. *交通节能与环保*, 2006, (1): 28-33.
- [38] Houghton J T, Meiro Filho L G, Callander B A, *et al.* 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

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行