

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 ..... 刁海玲, 赵三平, 周文 (1645)

环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 ..... 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 ..... 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 ..... 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 ..... 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 ..... 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 ..... 于婕, 李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 ..... 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 ..... 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 ..... 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)

温州城市降雨径流中BOD<sub>5</sub>和COD污染特征及其初始冲刷效应 ..... 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 ..... 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季pCO<sub>2</sub>与浮游植物生物量的关系 ..... 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 ..... 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 ..... 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)

纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 ..... 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 ..... 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锬, 周丽华, 谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 ..... 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 ..... 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 ..... 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 ..... 王金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 ..... 张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 ..... 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)

倒置A<sup>2</sup>/O-MBR处理城市污水的中试研究 ..... 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 ..... 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N<sub>2</sub>O释放特性 ..... 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 ..... 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 ..... 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 ..... 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 ..... 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 ..... 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 ..... 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 ..... 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 ..... 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 ..... 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 ..... 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 ..... 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)

海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 ..... 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 ..... 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)

1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 ..... 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 ..... 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 ..... 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 ..... 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 ..... 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 ..... 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 ..... 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 ..... 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 ..... 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 ..... 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)

厦门秋季近郊近地面CO<sub>2</sub>浓度变化特征研究 ..... 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)

GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b ..... 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 ..... 方治国, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 ..... 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 ..... 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 ..... 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 ..... 谢元博, 李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)

# 基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究

谢元博, 李巍\*

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

**摘要:** 在改善城市空气质量的同时降低温室气体(GHG)排放, 是未来北京市能源管理和环境保护工作的共同目标和主要任务. 本研究结合北京市中长期规划发展目标及能源消费结构, 分别设置基于节能政策和环保要求的低、中、高这3种能源消费约束情景, 并使用 LEAP 模型模拟预测3种情景下北京市主要大气污染物和 GHG 在 2010~2020 年间的减排效果. 结果表明, 通过加强节能减排和污染控制政策对能源消费系统施加约束和优化, 至 2020 年北京市能源消费可降低 1 000~3 000 万 tce, SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>、VOC 和 GHG 排放量将分别降至 7.1~10.02、15.92~21.87、8.98~13.38/5.14~9.60、5.64~7.48 和 14 820~16 470 万 t, 与低约束情景相比, 中、高情景下大气污染物和 GHG 排放将分别减少 53%~67%、50%~64%、33%~55%/25%~60%、41%~55% 和 26~34%. 进一步的协同减排分析表明, 北京市应重点调控工业、交通、服务业部门的化石能源消费, 在有效缓解能源消费压力的同时实现主要大气污染物与 GHG 的协同减排.

**关键词:** 能源消费; 协同减排; 情景模拟; 大气污染物; 温室气体

中图分类号: X24; X321 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-2057-08

## Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing

XIE Yuan-bo, LI Wei

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** It is one of the common targets and important tasks for energy management and environmental control of Beijing to improve urban air quality while reducing the emissions of greenhouse gases (GHG). Here, based on the interim and long term developmental planning and energy structure of the city, three energy consumption scenarios in low, moderate and high restrictions were designed by taking the potential energy saving policies and environmental targets into account. The long-range energy alternatives planning (LEAP) model was employed to predict and evaluate reduction effects of the chief air pollutants and GHG during 2010 to 2020 under the three given scenarios. The results showed that if urban energy consumption system was optimized or adjusted by exercising energy saving and emission reduction and pollution control measures, the predicted energy uses will be reduced by 10 to 30 million tons of coal equivalents by 2020. Under the two energy scenarios with moderate and high restrictions, the anticipated emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, VOC and GHG will be respectively reduced to 71 to 100.2, 159.2 to 218.7, 89.8 to 133.8, 51.4 to 96.0, 56.4 to 74.8 and 148 200 to 164 700 thousand tons. Correspondingly, when compared with the low-restriction scenario, the reducing rate will be 53% to 67%, 50% to 64%, 33% to 55%, 25% to 60%, 41% to 55% and 26% to 34% respectively. Furthermore, based on a study of synergistic emission reduction of the air pollutants and GHG, it was proposed that the adjustment and control of energy consumptions shall be intensively developed in the three sectors of industry, transportation and services. In this way the synergistic reduction of the emissions of chief air pollutants and GHG will be achieved; meanwhile the pressures of energy demands may be deliberately relieved.

**Key words:** energy consumption; synergistic emission reduction; scenario simulation; air pollutants; greenhouse gases (GHG)

受经济发展和工业化进程加快的驱动,我国化石能源特别是煤炭消费量持续增长,使得许多地区和城市面临大气污染问题加重和温室气体(GHG)排放快速增加的双重压力<sup>[1,2]</sup>. 作为首都,北京市节能减排工作一直居于全国领先水平,“十一五”期间以年均 4.7% 的能源消费增量支撑了 11.4% 的经济增长,但同时来自工业、交通、生活等领域能源消费增加的压力也越来越突出. 特别是随着环境空气质量新标准的实施和碳排放强度削减任务的下达,

如何通过有效调控能源消费力争在改善城市空气质量的同时实现 GHG 排放的削减,是未来北京建设世界城市过程中能源管理和环境保护工作的共同目标和主要任务.

收稿日期: 2012-09-21; 修订日期: 2012-11-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(105560GK); 中国清洁发展机制基金项目(1213075)

作者简介: 谢元博(1986~)男,博士,主要研究方向为大气污染治理、战略环境评价、生态价值评估, E-mail: former\_007@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: weili@bnu.edu.cn

目前,已开展的相关研究包括北京市节能与碳减排<sup>[3]</sup>,能源规划的环境绩效评估<sup>[4]</sup>,能源利用与大气污染相关分析<sup>[5,6]</sup>,交通部门大气污染物排放<sup>[7,8]</sup>预测和削减等,并提出优化能源消费结构、改善环境空气质量等诸多方面的建议。相对而言,针对北京市能源消费、大气环境改善以及温室气体减排的综合研究则比较少。对此,本研究拟结合相关发展规划通过设置包含不同约束条件的能源消费情景,并使用比较成熟的能源-环境模型模拟不同情景下北京市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOC 等 5 种主要大气污染物和 GHG 至 2020 年的排放水平,据此分析实现大气污染物和 GHG 协同减排的对策和重点行业或部门,以期北京市中长期能源和环境综合管理与系统优化提供决策依据。

## 1 模型简介与情景设定

### 1.1 模型简介

研究采用由瑞典斯德哥尔摩环境研究院开发的 LEAP (long-range energy alternatives planning system) 模型。该模型是一种基于情景模拟的能源-环境分析工具,可以在对经济、产业或技术的重大演变提出各种假设的基础上,模拟出未来较长时期能源利用及其环境影响的各种可能情形并得出相应的预测结果。具体是依据不同行业终端用能的变化设置各种可能情景,并链接各种环境污染物排放因子对不同行业能

源消费和大气污染物排放实施预测。

LEAP 模型在国外已有广泛应用,主要包括区域中长期能源供需<sup>[9]</sup>,不同情景下部门温室气体减排的环境和经济影响<sup>[10]</sup>等。国内学者近年来应用 LEAP 模型对一些地区和城市的能源-环境问题进行研究,包括上海市能源消耗、交通模式对能源和环境的影响<sup>[11-14]</sup>,城市节能减排政策情景模拟<sup>[15,16]</sup>,经济技术开发区能源消费和 SO<sub>2</sub> 排放<sup>[17]</sup>,水泥行业 CO<sub>2</sub> 排放及减排潜力分析<sup>[18]</sup>等。特别是针对北京市的能源和环境问题,已经开展了包括天然气消费市场的预测和分析<sup>[19]</sup>,1998~2020 年北京市交通能源消费和污染物排放<sup>[20]</sup>,2000~2030 年不同情景下北京市物流能源消费与环境污染物排放<sup>[21]</sup>等在内的相关研究。上述研究均表明 LEAP 模型在我国能源-环境领域具有较好的可应用性。

### 1.2 情景设定

本研究基准年设定为 2010 年,研究时段为 2010~2020 年。采用逐层叠加各部门活动水平参数的方法进行情景设定。首先设定影响能源消费的主要驱动因素,包括人口增长、经济增长水平、产业发展、城市化水平提高等(见表 1)。其中,当年 GDP、人口规模、机动车保有量等根据文献[22,23]来设定。重点行业增长水平根据北京市 1978~2010 年统计数据建立时间序列模型并经线性拟合预测得出。

表 1 情景设定依据的主要社会经济发展指标

Table 1 Main socio-economic indicators employed for setting scenarios

项目	指标	2010 年	2015 年	2020 年
三次产业增加值占 GDP 比重	人口/万人	1 961.00	2 050.00	2 141.00
	家庭规模/万户	668.00	740.00	800.00
	城市化率/%	77.31	83.00	90.00
	当年 GDP/万亿元	1.40	2.00	2.80
	年均 GDP 增长率/%	8.00	8.00	8.00
	第一产业/%	0.90	1.00	1.00
	第二产业/%	24.10	21.00	19.00
	第三产业/%	75.00	78.00	80.00
	石油化工业/%	2.30	1.80	1.10
	化学原料制造业/%	3.00	2.90	2.70
主要行业增加值占工业增加值比重	非金属矿物制造业/%	2.40	1.70	1.30
	黑色金属冶炼及压延加工业/%	3.00	2.60	2.00
	交通运输设备制造业/%	14.00	15.00	15.80
	电子设备制造业/%	17.00	20.00	23.00
	电力、热力的生产和供应业/%	16.50	19.00	21.00
	其他/%	41.80	37.00	33.10
	机动车保有量/万辆	480.90	550.00	600.00

在此基础上,依据对能源消费有重大影响的节能和环保要求(见表 2),分别设置 3 种预测情

景:情景 1 是延续北京市 2010 年节能减排水平的低约束情景,情景 2 是基于已明确的 2015 年节能

减排目标的中约束情景, 情景 3 是参照世界先进城市水平的高约束情景. 3 种情景下, 全市能耗强度及主要大气污染物和 GHG 的削减特征如表 3 所示.

表 2 3 种情景设定依据的节能政策和环保要求

Table 2 Relevant energy saving policies and environmental targets for setting the three scenarios

设定依据	情景 1/低约束	情景 2/中约束	情景 3/高约束
节能政策	沿用国家和北京市现行的节能要求.	继续加大节能力度, 提高能效措施, 参考文献[24,25]	在情景 2 基础上进一步提高节能目标, 完善能源价格机制和激励节能的财税制度
环保要求	沿用国家和北京市现行的环保标准和规定	以大气颗粒物控制为重点, 执行更加严格的环境标准, 参考文献[26~28]	参照世界卫生组织和美国的相关环境标准, 在情景 2 基础上进一步加大环保力度, 提高环保要求, 参考文献[29, 30]
能源消费总量和结构	保持 2010 年全市能源消费结构, 即消费总量 6 940 万 tce 其中, 煤炭: 油品: 天然气: 非化石能源为 30.3:30.3:13.1:3.2	全市燃煤总量控制在 2 000 万 t 以下, 天然气在能源消费总量中的比重达到 20%; 其中, 煤炭: 油品: 天然气: 非化石能源调整为 16.8:28.3:24.4:6.1, 参考文献[31]	煤炭消费总量控制在 1 000 万 t 左右, 进一步优化能源结构. 到 2015 年, 优质能源占能源消费总量的比重超过 80%, 其中天然气比重超过 20%. 到 2020 年, 电和天然气在能源消费总量中的比重不低于 60%, 燃煤的比重控制在 10% 左右, 太阳能等新能源的比重达到 8% 以上

表 3 3 种设定情景下北京市能耗强度及主要大气污染物和 GHG 排放削减特征

Table 3 Reduction characteristics of energy intensity and emissions of air pollutants and GHG under the three given scenarios for Beijing

特征指标	2010 ~ 2020 年		
	情景 1	情景 2	情景 3
年均单位 GDP 能耗降低率/%	-3.10	-3.40	-3.50
年均 SO <sub>2</sub> 排放削减率/%	-1.91	-2.68	-3.00
年均 NO <sub>x</sub> 排放削减率/%	—	-2.46	-3.00
五年均单位 GDP CO <sub>2</sub> 排放削减率/%	—	-18.00	-20.00

## 2 主要大气污染物和 GHG 排放预测与分析

### 2.1 能源消费量预测

北京市统计的主要能源消费品种包括煤炭、焦炭、天然气、柴油、燃料油、液化石油气、汽油、电力、煤油等. 能源消费部门主要设计为 5 个, 包括家庭、农业、服务业、工业及交通部门. 电力、燃气及水的生产和供应业所消耗的能源这里被纳入工业部门计算. LEAP 中能源消费量的计算公式如下:

$$ED_k = \sum_i \sum_j AL_{k,j,i} \times EI_{k,j,i} \quad (1)$$

式中, ED 为能源消费量(tce), AL 代表活动水平, EI 是能源强度,  $i$  代表某个用能部门,  $j$  表示能源消费终端,  $k$  表示能源类型.

预测结果显示:北京市终端能源消费量至 2015 年将达到 0.87 ~ 0.92 亿 tce, 其中民用部门约占 12% ~ 14%, 服务业部门约占 28% ~ 29%, 工业部门约占 39%, 交通部门约占 17%; 到 2020 年, 民用部门用能所占比重将达到 8% ~ 10%, 服务业部门所占比重约为 30%, 工业部门所占比重约为 40%, 交通部门所占比重为 18%.

情景 1 下, 2020 年全市终端能源消费总量约为

1.3 亿 tce, 其中煤炭消耗为 3 250 万 t, 约占总量的 25%, 汽油产品消耗将占 23%, 电力与天然气等清洁能源将占 52%; 情景 2 下, 能源消费总量约为 1.2 亿 tce, 其中煤炭消费为 2 400 万 t, 约占总量的 20%, 汽油产品消耗将占 15%, 非化石能源消费占总量 10%, 电力与天然气等清洁能源将占 55%; 情景 3 下, 能源消费总量约为 1.01 亿 tce, 其中煤炭消耗为 1 190 万 t, 约占 12%, 新能源和可再生能源所占比重约 10%, 汽油产品消耗将占 10%, 电力与天然气等清洁能源将占总量的 68%.

### 2.2 大气污染物与 GHG 排放量预测

LEAP 中主要大气污染物和 GHG 排放量的预测公式如下:

$$ED_{E,L} = \sum_i \sum_j \sum_k AL_{k,j,i} \times EI_{k,j,i} \times EF_{k,j,i,L} \quad (2)$$

式中,  $ED_{E,L}$  表示气体  $L$  (大气污染物或 GHG) 的预测排放量(kg),  $EF_{k,j,i,L}$  表示部门  $i$  使用设备  $j$  消费单位能源  $k$  所排放的  $L$  量(kg).

计算过程中, 煤、油料的含硫量及燃烧时转化为 SO<sub>2</sub> 的比例依据文献[32,33]来确定; 温室气体排放因子采用联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2007 年发布的清单<sup>[34,35]</sup>. 主要用能部门的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOC 等大气污染物排放因

子参照文献[36,37]来确定,电厂脱硫效率按 98% 计算,详见表 4. 机动车排放 2015 年前按照国 V 排

放标准且此后按照欧 VI 排放标准来确定,主要排放因子取自文献[36,38].

表 4 工业(含发电)、服务业部门主要能源大气污染物排放因子

Table 4 Emission factors of main air pollutants from energy uses in industrial and service sectors including power generation

燃料	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	VOC	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	单位
火力发电						
煤炭	8.46	6.58	0.03	0.87	0.62	g·kg <sup>-1</sup>
油品	2.24	5.84	0.09	0.31	0.31	g·kg <sup>-1</sup>
天然气	0	1.47	0.29	0.24	0.17	g·m <sup>-3</sup>
工业燃料						
煤炭	10~15.38	4.00	0.03	1.61	0.74	g·kg <sup>-1</sup>
焦炭	19.00	4.80	0.03	0.29	0.14	g·kg <sup>-1</sup>
汽油	1.60	16.7	0.09	0.25	0.13	g·kg <sup>-1</sup>
柴油	2.24	9.62	0.09	0.31	0.31	g·kg <sup>-1</sup>
燃料油	2.24	5.84	0.09	0.31	0.31	g·kg <sup>-1</sup>
原油	2.75	5.09	0.09	1.6	0.06	g·kg <sup>-1</sup>
其他油品	2.24	7.46	0.09	0.31	0.31	g·kg <sup>-1</sup>
天然气	0.18	1.76	0.29	0.24	0.17	g·m <sup>-3</sup>
LPG	0.18	2.10	0.19	0.22	0.15	g·kg <sup>-1</sup>
煤气	0.08	0.80	0.24	0.24	0.17	g·m <sup>-3</sup>
服务业						
煤炭	8.62	1.88	0.03	1.62	0.77	g·kg <sup>-1</sup>
LPG	0.18	2.10	0.09	0.22	0.15	g·kg <sup>-1</sup>
天然气	0.18	1.76	0.09	0.24	0.1	g·m <sup>-3</sup>
煤气	0.08	0.80	0.09	0.24	0.17	g·m <sup>-3</sup>

根据能源消费量预测结果和确定的大气污染物和 GHG 排放因子,预测 3 种设定情景下主要大气污染物与 GHG 的排放量,结果见表 5.

预测结果显示,2010 年北京市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 和 VOC 排放量分别为 10.44、20.89、11.87/7.51 和 6.64 万 t. 情景 1 下 2015 年全市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 和 VOC 排放量将分别为 2010 年水平的 1.45、1.44、1.27/1.29 和 1.36 倍,至 2020 年将分别是 2010 年水平的 2.04、2.07、1.68/1.73 和 1.90 倍. 同时,GHG 排放呈现大幅增长,由 2010 年的 1.03 亿 t 增至 2015 年的 1.57 亿 t,至 2020 年 GHG 排放量将增至 2.23 亿 t,是 2010 年的 2.16 倍.

情景 2 下,2015~2020 期间大气污染物排放量将相比 2010~2015 年出现反弹,至 2020 年全市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 排放量将分别增至 10.02、21.87 和 13.38/9.6 万 t,VOC 排放量基本持平;同时 GHG 增速将减缓,2015 和 2020 年将分别达到 1.49 亿 t 和 1.65 亿 t.

情景 3 下,至 2020 年 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 和 VOC 排放量将分别下降到 2010 年水平的 0.68、0.76、0.76/0.69 和 0.85 倍,同时 GHG 排放增长趋势将显著减缓.

预测结果中,主要大气污染物模拟结果与正式发布的北京市 2010 年 SO<sub>2</sub> (10.4 万 t) 和 NO<sub>x</sub> (19.8 万 t) 排放量数据基本一致,排放量预测结果与曹国良等<sup>[39]</sup>、国方媛<sup>[40]</sup> 的研究结果相近,说明上述预测结果总体上是合理的.

### 3 协同减排分析

“协同减排”是指以具有协同效应的措施和方式同时减排局域大气污染物和温室气体. 主要包括:一方面在控制温室气体排放的过程中实现削减其他局域污染物排放所带来的效益;另一方面在控制局域污染物排放或开展生态建设的同时减少温室气体的排放<sup>[41]</sup>.

#### 3.1 协同减排的部门贡献分析

假定  $L$  代表研究中的某种气体(大气污染物或 GHG),以在情景 2 或 3 相对于情景 1 下的分部门减排量占总减排量的比重作为各部门的协同减排贡献率( $r_{i,L}$ ),分析和筛选能够促进大气污染物与 GHG 协同减排的重点部门,计算公式如下:

$$r_{i,L} = \Delta R_{i,L} / \Delta R_L \quad (3)$$

式中, $r_{i,L}$  为定义的部门协同减排贡献率,% ;  $\Delta R_{i,L}$  是部门  $i$  在情景 2 或 3 相对于情景 1 下的气体  $L$  的相对减排量,万 t 或亿 t;  $\Delta R_L$  是气体  $L$  在情景 2 或

3 相对于情景 1 的总减排量,万 t 或亿 t. 计算结果见表 6.

结果表明,工业部门对 GHG 和 SO<sub>2</sub> 的协同减排贡献最大,至 2020 年贡献率分别为 34% ~ 39% 和

表 5 3 种设定情景下的主要大气污染物和温室气体排放量预测结果<sup>1)</sup>

Table 5 Predicted emissions of the chief air pollutants and GHG under the three scenarios

预测因子	用能部门	情景 1			情景 2			情景 3		
		2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年
GHG/亿 t	家庭	0.15	0.19	0.24	0.15	0.17	0.20	0.15	0.16	0.19
	农业	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03
	服务业	0.15	0.35	0.52	0.15	0.32	0.33	0.15	0.24	0.33
	工业	0.30	0.44	0.68	0.30	0.42	0.48	0.30	0.36	0.39
	交通	0.42	0.57	0.76	0.42	0.56	0.61	0.42	0.47	0.54
	小计	1.03	1.57	2.23	1.03	1.49	1.65	1.03	1.25	1.48
SO <sub>2</sub> /万 t	家庭	1.76	1.66	1.57	1.76	0.94	0.72	1.76	0.60	0.46
	农业	0.27	0.38	0.53	0.27	0.38	0.53	0.27	0.25	0.35
	服务业	2.19	3.22	4.73	2.19	2.17	2.42	2.19	1.33	1.64
	工业	4.58	7.41	10.89	4.58	3.96	4.52	4.58	3.68	3.61
	交通	1.64	2.41	3.54	1.64	1.63	1.83	1.64	1.41	1.04
	小计	10.44	15.09	21.27	10.44	9.08	10.02	10.44	7.26	7.10
NO <sub>x</sub> /万 t	家庭	1.75	1.89	2.03	1.75	1.60	1.56	1.75	1.36	1.48
	农业	0.33	0.47	0.65	0.33	0.47	0.65	0.33	0.35	0.37
	服务业	1.62	2.39	3.51	1.62	2.17	2.95	1.62	1.84	2.18
	工业	5.91	8.92	13.11	5.91	6.73	8.45	5.91	6.58	5.81
	交通	11.27	16.32	24.33	11.27	8.34	8.25	11.27	7.06	6.09
	小计	20.89	29.99	43.16	20.89	19.31	21.87	20.89	17.19	15.92
VOC/万 t	家庭	1.34	1.27	1.20	1.34	1.18	0.61	1.34	1.16	0.98
	农业	0.29	0.41	0.58	0.29	0.41	0.58	0.29	0.36	0.41
	服务业	1.36	2.00	2.94	1.36	1.3	1.54	1.36	1.28	1.04
	工业	0.53	0.80	1.17	0.53	0.71	1.03	0.53	0.49	0.45
	交通	3.12	4.58	6.73	3.12	3.23	3.72	3.12	2.97	2.76
	小计	6.64	9.06	12.62	6.64	6.83	7.48	6.64	6.26	5.64
PM <sub>10</sub> /万 t	家庭	4.52	4.27	4.03	4.52	2.51	2.20	4.52	2.40	1.88
	农业	0.06	0.08	0.11	0.06	0.08	0.11	0.06	0.08	0.11
	服务业	2.16	3.18	4.67	2.16	2.50	3.03	2.16	2.5	1.77
	工业	1.67	2.50	3.67	1.67	2.61	3.65	1.67	1.50	1.62
	交通	3.46	5.08	7.46	3.46	3.52	4.37	3.46	2.98	3.60
	小计	11.87	15.11	19.95	11.87	11.20	13.38	11.87	9.47	8.98
PM <sub>2.5</sub> /万 t	家庭	2.57	2.43	2.29	2.57	1.60	1.44	2.57	1.50	1.16
	农业	0.03	0.04	0.06	0.03	0.04	0.06	0.03	0.04	0.06
	服务业	1.09	1.6	2.36	1.09	1.45	2.06	1.09	1.01	0.85
	工业	1.13	1.67	2.46	1.13	1.61	2.34	1.13	0.93	1.08
	交通	2.69	3.95	5.8	2.69	2.89	3.70	2.69	2.04	1.99
	小计	7.51	9.70	12.97	7.51	7.58	9.60	7.51	5.52	5.14

1) 这里仅分析了源于能源消耗的 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>排放量,其它来源如建筑施工、道路扬尘以及部分工业设施等排放的颗粒物未包括在内

表 6 能源消费部门协同减排贡献率分析结果/%

Table 6 Evaluations of contributions of the energy-use sectors to synergistic emission reductions of air pollutants and GHG/%

部门	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>		VOC		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		GHG	
	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
家庭	12 ~ 14	8	3 ~ 4	2	4	11 ~ 23	45 ~ 33	28 ~ 20	39 ~ 22	25 ~ 14	9 ~ 25	7
农业	0 ~ 2	0 ~ 1	0 ~ 1	0 ~ 1	0	0	0	0	0	0	0	0
服务业	17 ~ 24	21 ~ 22	2 ~ 4	3 ~ 5	31 ~ 26	27	12	25 ~ 26	7 ~ 14	9 ~ 19	34 ~ 63	25 ~ 33
工业	48 ~ 57	51 ~ 57	18 ~ 21	22 ~ 27	4 ~ 11	3 ~ 10	3 ~ 18	2 ~ 18	3 ~ 18	4 ~ 18	19	34 ~ 39
交通	13	15 ~ 18	72 ~ 75	67 ~ 77	61 ~ 58	59 ~ 57	40 ~ 37	47 ~ 35	50 ~ 46	62 ~ 49	38	26 ~ 29

51% ~ 57%; 交通部门则对  $\text{NO}_x$ 、VOC 和  $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  的协同减排贡献最大, 至 2020 年贡献率分别达到 67% ~ 77%、59% ~ 57% 和 47% ~ 35%/62% ~ 49%; 服务业部门对协同减排的贡献主要反映在  $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  与 GHG 上; 家庭部门对协同减排的贡献则主要是在 VOC 和  $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  因子上. 相比来看, 农业部门对协同减排的贡献最小.

### 3.2 协同减排的因子贡献分析

在上述分析基础上, 为进一步评价主要能源消费部门中各种大气污染物与 GHG 减排的协同效果, 提出并计算主要大气污染因子 ( $L$ ) 相对于 GHG 减排的协同系数  $k_{i,L}$ , 公式如下:

$$k_{i,L} = \frac{r_{i,L}}{r_{i,\text{GHG}}} \quad (4)$$

式中,  $r_{i,L}$  与  $r_{i,\text{GHG}}$  分别为部门  $i$  大气污染因子  $L$  和 GHG 减排贡献率, 具体可由式 (3) 计算获得. 值得说明的是, 如果  $k_{i,L} = 1$ , 表明因子  $L$  与 GHG 协同减排程度较高; 如果  $0 < k_{i,L} < 1$ , 表明因子  $L$  比 GHG 的减排水平低; 如果  $k > 1$ , 则表明因子  $L$  比 GHG 的减排程度高. 结果见表 7.

表 7 主要用能部门大气污染因子与 GHG 的协同减排系数分析

协同系数	用能部门	情景 2		情景 3	
		2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
$k_{\text{SO}_2/\text{GHG}}$	家庭	0.48	1.10	1.44	1.18
	服务业	0.47	0.63	0.70	0.86
	工业	2.30	1.64	1.91	1.33
	交通	1.04	0.59	0.41	0.60
$k_{\text{NO}_x/\text{GHG}}$	家庭	0.11	0.32	0.44	0.30
	服务业	0.05	0.08	0.13	0.19
	工业	0.82	0.63	0.73	0.69
	交通	5.98	2.92	2.32	2.28
$k_{\text{VOC}/\text{GHG}}$	家庭	0.16	1.66	0.42	0.47
	服务业	0.84	0.83	0.75	1.07
	工业	0.16	0.08	0.44	0.27
	交通	5.17	2.37	1.84	1.94
$k_{\text{PM}_{10}/\text{GHG}}$	家庭	1.80	4.04	3.54	2.94
	服务业	0.33	0.76	0.35	1.04
	工业	0.09	0.01	0.71	0.48
	交通	3.23	1.82	1.19	1.20
$k_{\text{PM}_{2.5}/\text{GHG}}$	家庭	1.57	3.66	2.37	2.16
	服务业	0.19	0.27	0.41	0.76
	工业	0.11	0.10	0.71	0.46
	交通	4.00	2.41	1.46	1.66

通过计算和分析大气污染因子减排协同系数可以看到, 工业部门作为化石能源消费的重点部门, 随着能源消费结构优化和能源利用效率提高,  $k_{\text{SO}_2/\text{GHG}}$

至 2020 年将趋向于 1,  $\text{SO}_2$  与 GHG 可达到较高度度的减排协同, 其次是在服务业与交通部门. 同样, 工业部门至 2020 年  $k_{\text{NO}_x/\text{GHG}}$  将趋向于 1, 达到减排协同; 但在交通部门中  $k_{\text{NO}_x/\text{GHG}}$  远大于 1, 说明  $\text{NO}_x$  减排大于 GHG 的减排程度. 服务业部门至 2020 年  $k_{\text{VOC}/\text{GHG}}$  将趋向于 1, 将达到减排协同; 但在交通部门  $k_{\text{VOC}/\text{GHG}}$  大于 1, 说明 VOC 减排大于 GHG 的减排水平.  $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  与 GHG 协同减排方面, 至 2020 年交通部门颗粒物减排程度远大于 GHG 减排; 随着清洁能源 (天然气) 替代, 家庭部门  $k_{\text{PM}_{10}/\text{GHG}}$  和  $k_{\text{PM}_{2.5}/\text{GHG}}$  值均大于 1, 服务业与工业部门中  $k_{\text{PM}_{10}/\text{GHG}}$  和  $k_{\text{PM}_{2.5}/\text{GHG}}$  至 2020 年将趋向于 1, 减排协同水平显著提高.

## 4 结论

(1) 通过制定和实施深化节能减排、提高能源效率、优化能源消费结构等政策和措施, 可有效降低未来北京市的能源消费总量和主要大气污染物及 GHG 的排放. 根据预测, 在能源消费高约束情景下, 北京市 2020 年终端能源消费总量可比低约束情景减少 3 000 万 tce, 相应地可削减 7 500 万 t GHG 排放, 同时将分别减少  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和 VOC 排放量 53% ~ 67%、50% ~ 64%、33% ~ 55%、25% ~ 60% 和 40% ~ 55%.

(2) 通过对单位 GDP 能耗水平进行分析得出, 北京市 2010 年能耗强度为 0.5 tce. 在情景 1 下, 2015 和 2020 年将分别降到 0.46 tce 和 0.47 tce; 在情景 2 和情景 3 下, 能耗强度到 2015 年可分别降到 0.45 tce 和 0.44 tce, 到 2020 年则可降到 0.43 tce 和 0.36 tce. 因此, 通过强化节能政策和提高环保要求, 未来 10 年北京市的能源消费强度可进一步降低.

(3) 通过分析全市单位 GDP 的  $\text{CO}_2$  排放强度 ( $\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$ ) 可以看到, 至 2015 年, 在情景 1 下仍然保持 0.79 的水平, 在情景 2 和 3 下则分别降到 0.65 和 0.59; 至 2020 年, 在情景 2 和 3 下则分别降到 0.60 和 0.47, 相比 2010 年水平分别降低了 25% 和 40%, 基本上可以实现碳排放强度下降 40% ~ 45% 的政策目标.

(4) 工业、交通运输业及服务业是北京市未来能源消费增长的主要贡献部门, 3 个部门能源消费量占总量的 80% 以上. 因此控制和优化这 3 个部门的能源消费, 将会显著促进全市大气污染物与 GHG 的协同减排. 其中, 交通部门通过发展节能型交通

运输工具和开展清洁能源替代,可实现  $\text{NO}_x$ 、VOC、 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  与 GHG 的协同减排,并且对大气污染物的减排将大于对 GHG 的减排。服务业是北京市发展的重点行业,该部门通过替代或优化能源消费品种和加强节能减排工作,不仅可提高  $\text{SO}_2$  与 GHG 的协同减排效果还可同时促进 VOC、 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  与 GHG 的减排协同。工业部门通过优化能源消费结构和提高能源利用效率,可有效实现  $\text{SO}_2$  与 GHG 的减排协同;同时考虑到该部门能源消费以化石能源为主,因此建议实施和加强工业部门的煤炭消费总量控制,进一步提高  $\text{NO}_x$ 、VOC、 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  与 GHG 的减排协同水平。

#### 参考文献:

- [ 1 ] He K, Lei Y, Pan X, *et al.* Co-benefits from energy policies in China[J]. *Energy*, 2010, **35**(11): 4265-4272.
- [ 2 ] 吕连宏, 罗宏. 中国大气环境质量概况与污染防治新思路[J]. *中国能源*, 2012, **34**(1): 18-21.
- [ 3 ] Feng Y Y, Zhang L X. Scenario analysis of urban energy saving and carbon abatement policies: A case study of Beijing city, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**(1): 632-644.
- [ 4 ] Wang L, Xu L Y, Song H M. Environmental performance evaluation of Beijing's energy use planning[J]. *Energy Policy*, 2011, **39**(6): 3483-3495.
- [ 5 ] Pan X C, Yue W, He K B, *et al.* Health benefit evaluation of the energy use scenarios in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **374**(2-3): 242-251.
- [ 6 ] 郝吉明, 王丽涛, 李林, 等. 北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2006, **35**(A01): 115-122.
- [ 7 ] 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, **41**(62): 605-614.
- [ 8 ] Zhou Y, Wu Y, Yang L, *et al.* The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(3): 285-293.
- [ 9 ] Huang Y, Bor Y J, Peng C Y. The long-term forecast of Taiwan's energy supply and demand: LEAP model application[J]. *Energy Policy*, 2011, **39**(11): 6790-6803.
- [ 10 ] Song H J, Lee S, Maken S, *et al.* Environmental and economic assessment of the chemical absorption process in Korea using the LEAP model[J]. *Energy Policy*, 2007, **35**(10): 5109-5116.
- [ 11 ] 王冰妍, 陈长虹, 黄成, 等. 低碳发展下的大气污染物和  $\text{CO}_2$  排放情景分析——上海案例研究[J]. *能源研究与信息*, 2004, **20**(3): 137-145.
- [ 12 ] 李莉, 黄成, 陈长虹, 等. 上海市机动车清洁燃料替代的节能及减排效果[J]. *能源技术*, 2005, **26**(S1): 10-15.
- [ 13 ] 陈长虹, 李莉, 黄成, 等. Leap 模型在上海市能源消耗及大气污染物减排预测中的应用[J]. *能源技术*, 2005, **26**(S1): 16-21.
- [ 14 ] 黄成, 陈长虹, 王冰妍, 等. 城市交通出行方式对能源与环境的影响[J]. *公路交通科技*, 2005, **22**(11): 163-166.
- [ 15 ] 曹斌, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析[J]. *生态学报*, 2010, **30**(12): 3358-3367.
- [ 16 ] Lin J Y, Cao B, Cui S H, *et al.* Evaluating the effectiveness of urban energy conservation and GHG mitigation measures: The case of Xiamen city, China[J]. *Energy Policy*, 2010, **38**(9): 5123-5132.
- [ 17 ] 林焯, 王庆伟. 基于 LEAP 的工业能源未来发展规划——以浙江省宁波经济技术开发区为例[J]. *经济研究导刊*, 2008, **34**(15): 109-115.
- [ 18 ] 毛紫薇, 王灿, 陈吉宁. 山东省水泥行业  $\text{CO}_2$  减排关键技术的实施分析[J]. *中国人口资源与环境*, 2010, **20**(3): 14-18.
- [ 19 ] 李平. 华北地区天然气市场研究与 LEAP 模型应用[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
- [ 20 ] 朱松丽, 姜克隽. 北京市城市交通能源需求和污染物排放: 1998~2020[J]. *中国能源*, 2002, **24**(6): 26-31.
- [ 21 ] 王晓华. 基于 LEAP 模型的北京市物流发展对节能减排影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [ 22 ] 北京市发改委. 北京市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要 [EB/OL]. [http://www.bjpc.gov.cn/fzgh\\_1/guihua/](http://www.bjpc.gov.cn/fzgh_1/guihua/).
- [ 23 ] 北京市政府. 北京城市总体规划(2004年~2020年) [EB/OL]. [http://www.bjpc.gov.cn/fzgh\\_1/cszgh/200710/t195452.htm](http://www.bjpc.gov.cn/fzgh_1/cszgh/200710/t195452.htm).
- [ 24 ] 国务院. 国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/zwgg/2011-09/07/content\\_1941731.htm](http://www.gov.cn/zwgg/2011-09/07/content_1941731.htm). 2011-09-07.
- [ 25 ] 国务院. 国务院关于印发“十二五”控制温室气体排放工作方案的通知 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/zwgg/2012-01/13/content\\_2043645.htm](http://www.gov.cn/zwgg/2012-01/13/content_2043645.htm). 2012-01-13.
- [ 26 ] 国务院. 关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见 [EB/OL]. [http://zfs.mep.gov.cn/fq/gwyw/201005/t20100514\\_189497.htm](http://zfs.mep.gov.cn/fq/gwyw/201005/t20100514_189497.htm). 2010-05-14.
- [ 27 ] 北京市环境保护局. 北京市“十二五”时期环境保护和建设规划 [EB/OL]. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/ghxx/sewgh/t1209013.htm>.
- [ 28 ] 北京市政府. 北京市清洁空气行动计划(2011-2015年大气污染控制措施) [EB/OL]. <http://zc.k8008.com/html/beijing/shizhengfu/2011/0808/30101.html>. 2011-08-07.
- [ 29 ] 北京市政府. 北京市 2012-2020 年大气污染治理措施 [EB/OL]. [http://www.bjeit.gov.cn/zwgg/tzgg/201205/t20120503\\_24113.htm](http://www.bjeit.gov.cn/zwgg/tzgg/201205/t20120503_24113.htm). 2012-05-03.
- [ 30 ] 李海楠. 北京市长两会报告定位目标 2050 年建成世界城市 [EB/OL]. <http://news.sohu.com/20100224/n270391281.shtml>. 2010-02-24.
- [ 31 ] 北京市政府. 北京市“十二五”时期能源发展建设规划 [EB/OL]. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/ghxx/sewgh/>

- t1194196. htm.
- [32] 胡军, 郑宝山, 王明仕, 等. 中国煤中硫的分布特征及成因[J]. 煤炭转化, 2006, **28**(4): 1-6.
- [33] Arndt R L, Carmichael G R, Streets D G, *et al.* Sulfur dioxide emissions and sectorial contributions to sulfur deposition in Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(10): 1553-1572.
- [34] 胡名操. 环境保护实用数据手册[Z]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [35] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, *et al.* Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability [M]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [36] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al.* A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **12**(1): 481-501.
- [37] 童抗抗, 马克明. 基于投入产出法的北京能源消耗温室气体排放清单分析[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(9): 2228-2235.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 国方媛. 北京能源需求及环境综合模型研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [41] 毛显强, 邢有凯, 胡涛, 等. 中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 748-756.

## CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies .....	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China .....	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China .....	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective .....	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China .....	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China .....	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River .....	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011 .....	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River .....	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI .....	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD <sub>5</sub> and COD in Urban Runoff of Wenzhou City .....	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters .....	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO <sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring .....	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment .....	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate .....	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products .....	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud .....	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment .....	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring .....	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors .....	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water .....	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties .....	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A <sup>2</sup> /O-MBR Process .....	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors .....	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N <sub>2</sub> O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process .....	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples .....	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i> .....	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province .....	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds .....	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province .....	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids .....	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China .....	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia .....	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province .....	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites .....	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings .....	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China .....	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage .....	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics .....	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether .....	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics .....	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011 .....	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang .....	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer .....	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou .....	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China .....	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China .....	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai .....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event .....	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China .....	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method .....	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing .....	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant .....	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port .....	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal .....	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing .....	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

# 《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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