

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中砷形态变化及油菜砷吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

京津冀区域生产和消费 CO₂ 排放的时空特点分析

汪浩, 陈操操*, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉

(北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037)

摘要: 区分消费和生产二氧化碳排放是对开放的经济区域进行排放责任划分的基础, 日渐受到政策制定者的关注. 利用经济投入产出-生命周期分析模型, 对京津冀区域 1997 年、2002 年和 2007 年的消费和生产二氧化碳排放时空特征及二氧化碳排放平衡进行分析. 结果表明, 京津冀区域消费和生产二氧化碳排放呈约 4% 的年均增长; 贸易隐含二氧化碳排放比例为 30% ~ 83%, 并以国内贸易隐含二氧化碳排放为主; 河北的消费和生产二氧化碳排放占区域主导, 增速和二氧化碳排放强度高于北京和天津; 京津冀区域为二氧化碳排放净流入区域, 存在部分排放责任转移; 京津为二氧化碳排放净转入地区, 冀为二氧化碳排放净转出地区; 京津冀三地二氧化碳排放关键部门分布集中且相似度较高, 可以考虑区域联合控制. 其中, 电力、蒸汽、热水生产和供应业和金属冶炼及压延加工业对二氧化碳排放的依赖性最大, 承担较大的其他部门的二氧化碳排放责任. 投入产出分析解析了地区生产和消费二氧化碳排放情况, 有利于区域减排的精细化管理和制定相应对策, 并促进区域减排合作.

关键词: EIO-LCA 模型; 消费二氧化碳排放; 生产二氧化碳排放; 排放平衡; 关键部门

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3619-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.051

Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis

WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, LIU Chun-lan, CHEN Long, SUN Li

(National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Distinguishing product-based and consumption-based CO₂ emissions in the open economic region is the basis for differentiating the emission responsibility, which is attracting increasing attention of decision-makers' attention. The spatial and temporal characteristics of product-based and consumption-based CO₂ emissions, as well as carbon balance, in 1997, 2002 and 2007 of JING-JIN-JI region were analyzed by the Economic Input-Output-Life Cycle Assessment model. The results revealed that both the product-based and consumption-based CO₂ emissions in the region have been increased by about 4% annually. The percentage of CO₂ emissions embodied in trade was 30% -83%, to which the domestic trading added the most. The territorial and consumption-based CO₂ emissions in Hebei province were the predominant emission in JING-JIN-JI region, and the increasing speed and emission intensity were stronger than those of Beijing and Tianjin. JING-JIN-JI region was a net inflow region of CO₂ emissions, and parts of the emission responsibility were transferred. Beijing and Tianjin were the net importers of CO₂ emissions, and Hebei was a net outflow area of CO₂ emissions. The key CO₂ emission departments in the region were concentrated, and the similarity was great. The inter-regional mechanisms could be set up for joint prevention and control work. Production and distribution of electricity, gas and water and smelting and pressing of metals had the highest reliability on CO₂ emissions, and took on the responsibility of other departments. The EIO-LCA model could be used to analyze the product-based and consumption-based CO₂ emissions, which is helpful for the delicate management of regional CO₂ emissions reduction and policies making, and stimulating the reduction cooperation at regional scale.

Key words: EIO-LCA model; consumption-based CO₂ emissions; product-based CO₂ emissions; balance of emissions; key departments

全球变暖严重威胁着人类的生存和发展, 作为其主因之一的二氧化碳排放持续增长. 国际能源署和荷兰环境评估中心的数据指出, 中国的二氧化碳年排放量已经超过美国^[1,2], 并且将持续增长到 2030 年之后^[3,4]. 面对日益增强的国际压力, 中国需在全球温室气体减排中承担更重要的角色. 2009 年, 中国提出 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放要在 2005 年的基础上下降 40% ~ 45% 的目标, 并将减排

目标分解至各地. 实现这一目标需要地区间通力配合以及合理的碳排放责任分配.

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001380); 北京市自然科学基金项目(8122023); 北京市科技新星计划项目(2010B023); 中国清洁发展机制基金赠款项目(1213075); 北京市环境保护科学研究院自主创新基金项目

作者简介: 汪浩(1985 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区域温室气体和气候变化, E-mail: carokt@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ecoduron@163.com

碳排放责任存在 3 种划分原则^[5,6]:生产者负责,消费者负责,共担责任。其中,消费者负责原则更为公平,而且可避免碳泄漏,相关研究发展迅速^[7]。中国各地区经济和技术水平、产业结构等差异较大,地区间资源流动和碳排放转移较为复杂^[8]。中国的减排目标以省域为单位实现,地区间发展不平衡和存在竞争关系。而以生产碳区分责任容易造成各自为政的局面,迫切需要消费碳研究以掌握省域实际碳排放需求和碳排放平衡及其差异,才能协调地区间排放责任和制定合理的应对策略,又能促使发达地区加强与欠发达地区的合作^[9]。如果以消费者负责原则计算和划分碳排放责任,需要区分基于边界的生产碳排放中的地区间贸易隐含碳。

投入产出法是隐含碳计算前沿方法^[10],多年来得以逐步完善。一是投入产出模型的完善。Sánchez-Chóliz 等^[11]按一致性原则将进口从竞争型投入产出表中分离,拓展成新的非竞争型投入产出模型。Lin 等^[12]采用与贸易研究中 Koopman 等^[13]相似的方法,将进口再细分出生产出口(纯粹转口贸易)部分,这一做法在不修正贸易数据时更为合理。二是由单地区投入产出模型拓展至多地区投入产出模型,包括串联单地区投入产出模型和实际多地区投入产出模型,Wyckoff 等^[14]和 Lenzen 等^[15]分别对这两种模型进行介绍和应用,这一拓展提高了隐含碳准确度且后者可分析碳排放转移情况。三是考虑与其他模型和方法结合。卡耐基梅隆大学的学者们将投入产出与生命周期分析相结合产生的 EIO-LCA 模型^[16],不仅考虑了整个经济产业链而且在计算上比 LCA 方法简单。该方法相对于传统投入产出模型(EIO)的主要区别在于其直接排放矩阵采用对角阵形式而非行向量,更为合理准确。投入产出模型适用于产品、家庭到国家的任何尺度^[17,18],但研究多集中于国家尺度,能为国际谈判提供参考,但对国内减排的指导意义不大。近年来焦点开始向省域尺度转移,但省域间贸易隐含碳和碳排放平衡的时空差异研究相对薄弱。McGregor 等^[19]利用两个地区投入产出模型对比了苏格兰和其余英国地区的国内贸易碳排放平衡。石敏俊等^[20]梳理了基于修正贸易数据的省域尺度实际多地区投入产出模型,并对中国省区碳排放空间转移进行了研究^[8],但该方法在缺乏贸易数据时不适用。张旺等^[21]参考 Sánchez-Chóliz 等^[11]的一致性做法分别对北京的国内和国际贸易隐含碳排放进行了

测算。Guo 等^[22]利用投入产出方法比较了 2002 年中国 30 省的国际间和省域间贸易碳排放。现有省域尺度的研究虽然已将国内和国际隐含碳加以区分,但计算多用 EIO 方法,而相对先进的 EIO-LCA 鲜有研究。目前只检索到唐建荣等^[23]对江浙沪地区的对比研究,但其并未将本地和进口和调入来源地产业结构和排放强度,且未对转口贸易进行修正。

京津冀区域是中国面向国际的重要窗口,也是独特的关键减排区域,以其为研究区域极具价值。首先,京津冀三地数十年的合作已经发展成为中国经济三极之一,2007 年的 GDP 占全国的 11.3%,不仅具备合作减排的条件也具有相对雄厚的经济基础;其次,京津冀是资源消耗密集型区域^[24],2007 年的能源消费总量约占全国的 13.7%^[25],存在迫切的减排需求。另外,京、津、冀三地分别为低碳、中碳和高碳地区^[26],在三极中最为独特。

基于以上分析,本研究利用 EIO-LCA 模型,以分析 1997 年、2002 年和 2007 年京津冀三省间碳排放差异及变化趋势为主线,主要从消费和生产二氧化碳排放、贸易隐含二氧化碳排放、二氧化碳排放平衡、关键二氧化碳排放部门等几方面展开分析。

1 数据与方法

1.1 投入产出模型

投入产出分析方法由 Leontief^[27]提出且拓展至环境领域^[28],随后发展至碳排放研究领域^[12]。投入产出分析一般使用非竞争型投入产出表。按一致性原则假设进口项或调入项在中间投入过程和最终使用中投入比例与两者所占比例相同^[11],将进口项 M 和调入项 N 从中间投入 D 、最终使用中拆分。由于缺乏纯粹转口贸易数据^[20],但又考虑纯粹转口贸易,参考 Koopman 等^[13]方法并区分国内和国外贸易^[21,22]。在考虑整个贸易隐含碳时,采用进口来源国和调入来源地的完全碳排放方阵与进口额相乘实现^[16,29],即 EIO-LCA 方法,将进口来源国和调入来源地的产业结构更好考虑进来,计算更为准确。

假设进口和调入的拆分比例分别为 $P^m = M/(X + M + N)$ 和 $P^n = N/(X + M + N)$ 。式中, M 为进口, N 为调入, X 为总产出。本地生产、进口、调入的二氧化碳排放根据来源和最终使用可以拆分为 15 部分(图 1),与经济体有关的二氧化碳排放根据最终使用可分为本地、出口和调出需求三大类, C^d 即为本地消费二氧化碳,具体形式见表 1。具体推导过程参见文献[21,29]。

地区二氧化碳排放总平衡可表示为进出口与调入调出平衡的加和,代入 C^o 、 C^e 、 C^m 、 C^n 后整理可等于生产二氧化碳排放和消费二氧化碳排放差值.

$$\begin{aligned} C^b &= C^{bme} + C^{bno} = (C^e - C^m) + (C^o - C^n) \\ &= C^d - C^l \end{aligned} \tag{1}$$

$C^b > 0$,本地二氧化碳排放呈净流出; $C^b < 0$,本地二氧化碳排放呈净流入; $C^b = 0$,本地为进出口二氧化碳

碳排放平衡区域.

1.2 二氧化碳直接排放量和排放强度计算方法

利用排放系数法计算生产二氧化碳排放量^[30]. 选取煤炭、汽油、煤油、柴油、天然气和外调电消费实物量和本地排放因子计算. i 部门二氧化碳排放强度为 $E_i = C_i/X_i$,其中, X_i 为 i 部门总产出, C_i 为 i 部门生产二氧化碳排放量.

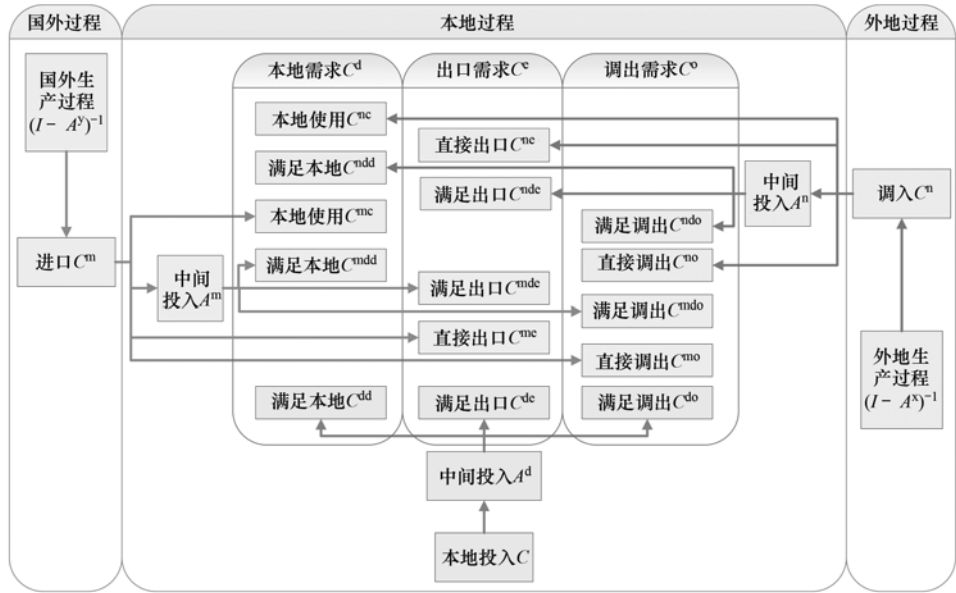


图1 碳排放过程及分解示意

Fig. 1 CO₂ emissions process and decomposition

表1 二氧化碳排放拆分¹⁾

项目	最终使用		
	本地消费	出口	调入
本地	$C^{dd} = E^d(I - DA)^{-1}D(F^C + F^I)$	$C^{de} = E^d(I - DA)^{-1}DF^E$	$C^{do} = E^d(I - DA)^{-1}DF^O$
进口	$C^{mdl} + C^{mc} = E^m P^m (I - DA)^{-1}D(F^C + F^I) + E^m P^m F^E$	$C^{mde} + C^{mce} = E^m P^m A(I - DA)^{-1}DF^E + E^m P^m F^E$	$C^{mdo} + C^{mco} = E^m P^m A(I - DA)^{-1}DF^O + E^m P^m F^O$
调入	$C^{ndl} + C^{nc} = E^n P^n A(I - DA)^{-1}D(F^C + F^I) + E^n P^n (F^C + F^I)$	$C^{nde} + C^{nce} = E^n P^n A(I - DA)^{-1}DF^E + E^n P^n F^E$	$C^{ndo} + C^{nco} = E^n P^n A(I - DA)^{-1}DF^O + E^n P^n F^O$

1)表中: $E^m = E^x(I - A^x)^{-1}$, $E^n = E^y(I - A^y)^{-1}$, E^d 、 E^x 和 E^y 分别为本地、进口来源地和调入来源地直接二氧化碳排放强度对角矩阵, A 、 A^x 和 A^y 分别为本地、进口来源地和调入来源地中间投入技术矩阵, I 为单位矩阵, F^C 为最终消费列矩阵, F^I 为资本形成列矩阵, F^E 为出口列矩阵, F^O 为调入列矩阵

1.3 数据来源

分行业能源消费数据来源于 1998、2003 和 2008 年北京市、天津市和河北省的统计年鉴和中国能源统计年鉴. 缺河北省 1997 和 2002 年分行业能源消费数据,假设能源消费结构相同,结合能源平衡表采用分能源与 2007 年等比例拆分的方法拆分. 天津市只有分行业能源终端消费量统计,利用能源平衡表和能源终端消费量比例进行修正. 北京和天

津的技术水平较高并类似,排放因子采用地方温室气体清单账户研究中的取值^[31];河北省和中国的排放因子来自文献[32],河北省外调电排放系数选择中国华北区域电网基准线排放系数,中国的电力排放系数选择中国 7 大区域电网基准线排放系数算术平均值.

选取 1997、2002 和 2007 年的北京市、天津市、河北省和中国的投入产出表(均换算成以 1990 年为

基期的可比价格). 进口和调入完全排放系数矩阵用中国的完全排放系数矩阵代替. 部门分类遵循以下原则:①数据可获取. 依据投入产出表和现有分部门的能源消费数据;②部门匹配. 需从时间序

列、地区间投入产出表部门和能源消费数据进行匹配;③关键排放部门区分,即区分地区特色关键部门. 本研究将 12 份投入产出表分别整合编制成统一的 34 部门投入产出表(表 2).

表 2 部门分类

Table 2 Department classification

部门编号	名称	部门编号	名称
1	农林牧渔业	18	电气机械及器材制造业
2	煤炭开采和洗选业	19	电子及通信设备制造业
3	石油和天然气开采业	20	仪器仪表等机械制造业
4	金属矿采选业	21	其他制造业
5	非金属矿采选业	22	废品及废料
6	食品制造及烟草加工业	23	电力、蒸汽、热水生产和供应业
7	纺织业	24	燃气生产和供应业
8	服装、皮革等纤维制品制造业	25	建筑业
9	木材加工及家具制造业	26	交通运输及仓储业
10	造纸印刷及文教用品制造业	27	邮电业
11	石油加工及炼焦业	28	批发和零售业
12	化学工业	29	住宿和餐饮业
13	非金属矿物制品业	30	金融业
14	金属冶炼及压延加工业	31	房地产业
15	金属制品业	32	其他社会服务业
16	通用、专用设备制造业	33	社会福利和保障事业
17	交通运输设备制造业	34	公共管理和社会组织

2 结果与分析

2.1 消费和生产二氧化碳排放趋势

京津冀区域总消费和生产二氧化碳排放年均增长都约为 4%. 区域总消费二氧化碳排放中,北京占比小于 30% 且呈下降趋势,天津和河北占比分别小于 20% 和大于 50% 呈小幅上升趋势. 区域总生产二氧化碳排放中,北京和天津占比分别小于 22% 和 14% 呈小幅下降趋势,河北占比大于 69% 呈上升趋势. 河北在区域消费和生产二氧化碳排放中占主导地位且贡献增大,生产排放更为显著. 2007 年,河北 2.7 万 t·万元⁻¹ 的综合二氧化碳排放强度远远高于北京的 1.4 万 t·万元⁻¹、天津的 1.0 万 t·万元⁻¹ 和全国的 1.9 万 t·万元⁻¹,说明其生产和节能等技术水平较低,具有较大的减排潜力.

京津冀消费二氧化碳排放需求 Cⁱ 主要由本地投入和调入满足,调入比重增加,本地投入比重下降,自给程度降低(图 2). 三地的本地投入 C^{ld} 年均增长率小于 2%,而调入 C^{md} 增长较快(北京、天津和河北 C^{md} 年均增长率分别为 3%、5% 和 6%),说明 Cⁱ 需求的增长主要由调入满足. 河北的 Cⁱ 中进口比重远远小于北京和天津,且呈减小趋势,说明河北对进口二氧化碳排放依赖程度小于京津两地,且

需求增长不大.

京津冀的本地生产二氧化碳排放 C^{dl} 主要满足本地和调出需求,天津和河北调出需求更大,北京则多用于满足本地需求. 三地的本地投入本地消费二氧化碳排放 C^{ldl} 年均增长率小于 3%,北京的 C^{de} 和 C^{do} 年均增速分别为 5% 和 6%,天津的 C^{de} 和 C^{do} 年均增速都为 4%,河北的 C^{de} 和 C^{do} 年均增速分别为 2% 和 6%,说明北京和天津流出隐含碳增长来自调出需求和出口需求,河北流出隐含碳增长主要来自调出需求.

消费和生产二氧化碳排放中的贸易隐含碳(包括调入和调出)为 30% ~ 83% (如天津和河北 2007 年的贸易隐含碳为 67% 以上),其中,三地的国内贸易的隐含二氧化碳排放远远大于国际贸易的隐含二氧化碳排放,表明国内的二氧化碳排放转移更为活跃.

2.2 二氧化碳排放平衡分析

1997、2002 和 2007 年京津冀区域总体二氧化碳排放平衡差额分别为 -4 918、-2 524 和 -8 146 万 t,为二氧化碳排放净流入区域,有负值方向迅速增大的趋势. 北京 1997、2002 和 2007 年的二氧化碳排平衡差额分别为 -4 897、-4 701 和 -6 910 万 t,天津 1997、2002 和 2007 年的二氧化碳排平衡差

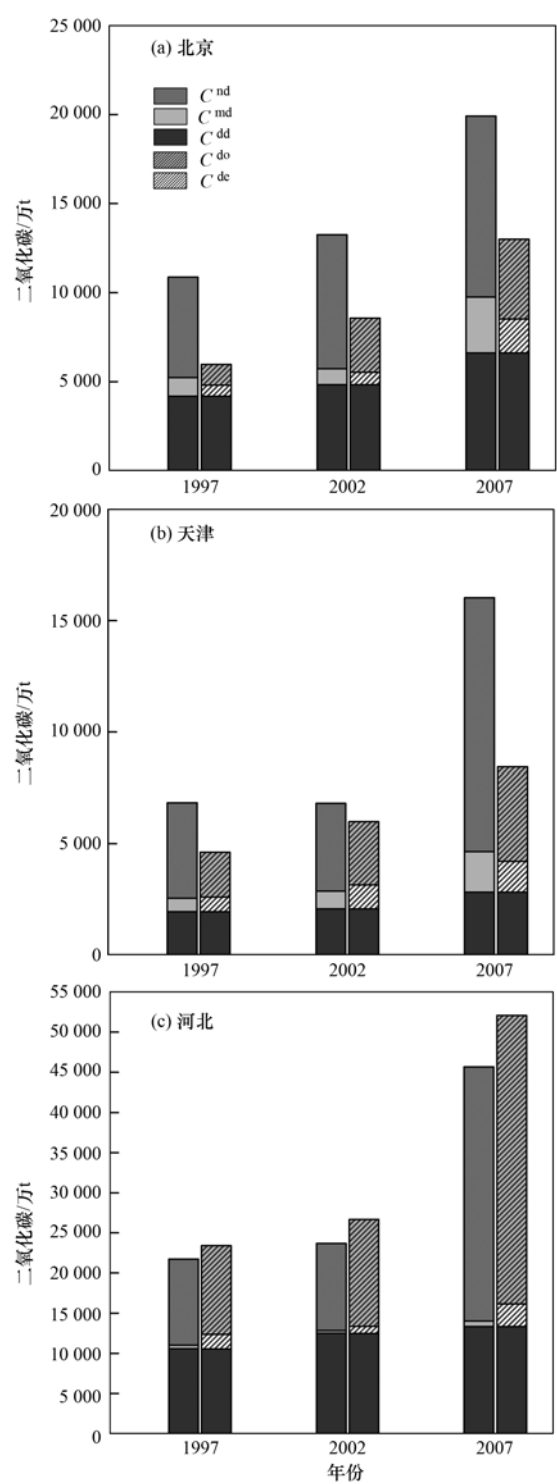


图2 1997~2007年京、津、冀消费和生产二氧化碳排放
Fig. 2 Provincial product-based and consumption-based CO₂ emissions in the JING-JIN-JI region in 1997, 2002 and 2007

额分别为-2 235、-829和-7 604万 t,说明北京和天津同为总二氧化碳排放流入区域,且平衡差额扩大趋势明显,天津波动大于北京. 河北3 a的 C^b 分别为1 698、3 006和6 368万 t,属于净流出区域且有增强趋势.

以进口-出口平衡为横轴、调出-调入平衡为纵轴做三地贸易二氧化碳排放碳平衡图(图3),第一象限表示该地为出口调出型,表示为出口二氧化碳大于进口,调出二氧化碳大于调入,其他象限以此类推;第二象限表示该地为出口调入型;第三象限表示该地为进口调入型;第四象限表示该地为进口调出型. 可以看出,1997年,三地同属出口调入型地区. 2002年,河北转变为出口调出型地区;北京和天津未转变,北京接近出口-进口平衡状态,天津则接近总平衡状态. 2007年,北京转变为进口调入型;天津变化趋势则发生较大转变,展现较强的调入依赖性,出口-进口平衡也显著增强;河北的出口-进口平衡显著增强,调出-调入平衡稍有增强. 三地变化趋势各有特点,北京调入和进口依赖性增强,天津调入和出口依赖性增强,河北调出和出口依赖性增强.

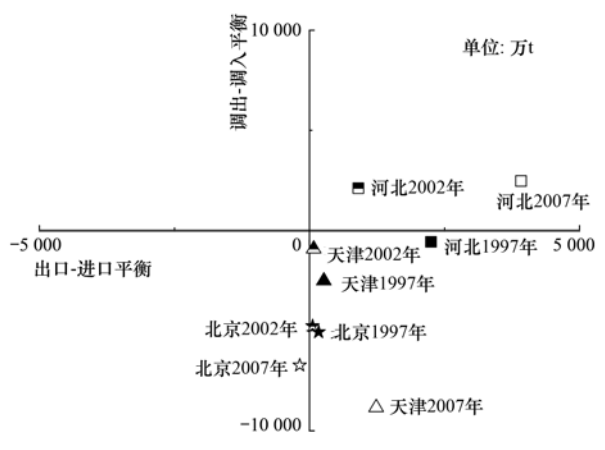


图3 京、津、冀二氧化碳排放平衡
Fig. 3 Balance of CO₂ emissions in the JING-JIN-JI region

从3次产业来看,京津冀区域第一产业二氧化碳排放平衡由1997年的-27万 t和2002年的-26万 t转为2007年的47万 t,平衡关系逐渐转正;1997、2002和2007年第二产业二氧化碳排放平衡则分别为-5 437、-3 835和-9 911万 t. 第一和第二产业的二氧化碳排放责任转入且呈加重趋势. 北京和天津第一和第二产业的总二氧化碳排放平衡为负值,且呈扩大趋势,对流入依赖性增强. 河北第一和第二产业的总二氧化碳排放平衡与北京和天津相反,虽为正值,但无法满足区域总体需求. 北京和天津第一产业占当地总产值比重低于6%,对流入需求较高. 而河北第一产业产值占比13%~19%,可满足当地和流出需求. 北京第二产业占当地总产值比重为23%~38%,天津第二产业占比为54%~57%,虽占比较高,但不能自给,且流入二氧化碳排

放较多. 河北第二产业占当地总产值比重为 49% ~ 53%, 且逐年增大, 其二氧化碳排放强度也高于流入来源地, 可解释其第二产业二氧化碳排放净流出增强趋势.

1997、2002 和 2007 年京津冀区域第三产业二氧化碳排放平衡分别为 723、1 337 和 1 719 万 t, 呈增强趋势. 北京第三产业的排放平衡为正值, 流出占优势. 河北第三产业的排放平衡为负值, 且呈现扩大趋势. 天津第三产业的排放平衡虽在 1997 和 2002 年为正值, 但 2007 年转变为负值, 发展趋势与河北相同. 而区域第三产业总二氧化碳排放平衡为正值, 说明北京第三产业排放可满足区域和流出需求, 在区域内可形成互补. 北京第三产业产值占比大于 50%, 说明其自给和对外输出水平较高. 天津第三产业产值占比低于北京 (40% ~ 47%), 其比例呈先升高后降低的特征, 可解释其二氧化碳排放平衡的变化. 河北第三产业产值占比小于 34%, 低于北京和天津, 对流入需求大, 因此其总二氧化碳排放平衡为负值.

2.3 二氧化碳排放关键部门分析

分析京津冀三地 3 年的 34 部门消费和生产二氧化碳排放量图谱 (图 4 ~ 6) 可知: ①高排放部门较为集中; ②三地高排放部门较为相似, 但各有特点.

为深入分析, 定义地区消费和生产排放关键部门分别为消费和生产二氧化碳排放量排名前 5 位部门. 经统计, 三地 3 a 的消费和生产关键排放部门分别占总消费二氧化碳排放量和总生产二氧化碳排放量的 54% ~ 82% 和 63% ~ 80%, 能很好地反映地区特点, 也说明分部门的二氧化碳排放较为集中.

北京的电力、蒸汽、热水生产和供应业、金属冶炼及压延加工业、化学工业和非金属矿物制品业 3 a 都属 C^i 关键部门, 另一关键部门在 1997 年为煤炭开采和洗选业, 2002 年为交通运输及仓储业, 2007 年为石油加工及炼焦业. 电力、蒸汽、热水生产和供应业为北京的最大 C^i 部门, 占总比为 30% ~ 39%, 其次是金属冶炼及压延加工业 (占总比的 10% ~ 16%), 其余各部门分别占总比的 4% ~ 8%. 石油加工及炼焦业消费二氧化碳排放增长相当迅速, 特别是 2002 ~ 2007 年的年均增速约为 25%, 到 2007 年成为第三关键部门.

北京的电力、蒸汽、热水生产和供应业、金属冶炼及压延加工业和其他社会服务业 3 a 都属生产碳足迹关键部门, 另外两个关键部门在 1997 年为房地产业和社会福利和保障事业, 2002 年为交通运输及仓储业和房地产业, 2007 年为交通运输及仓储业和非金属矿物制品业. 电力、蒸汽、热水生产和供

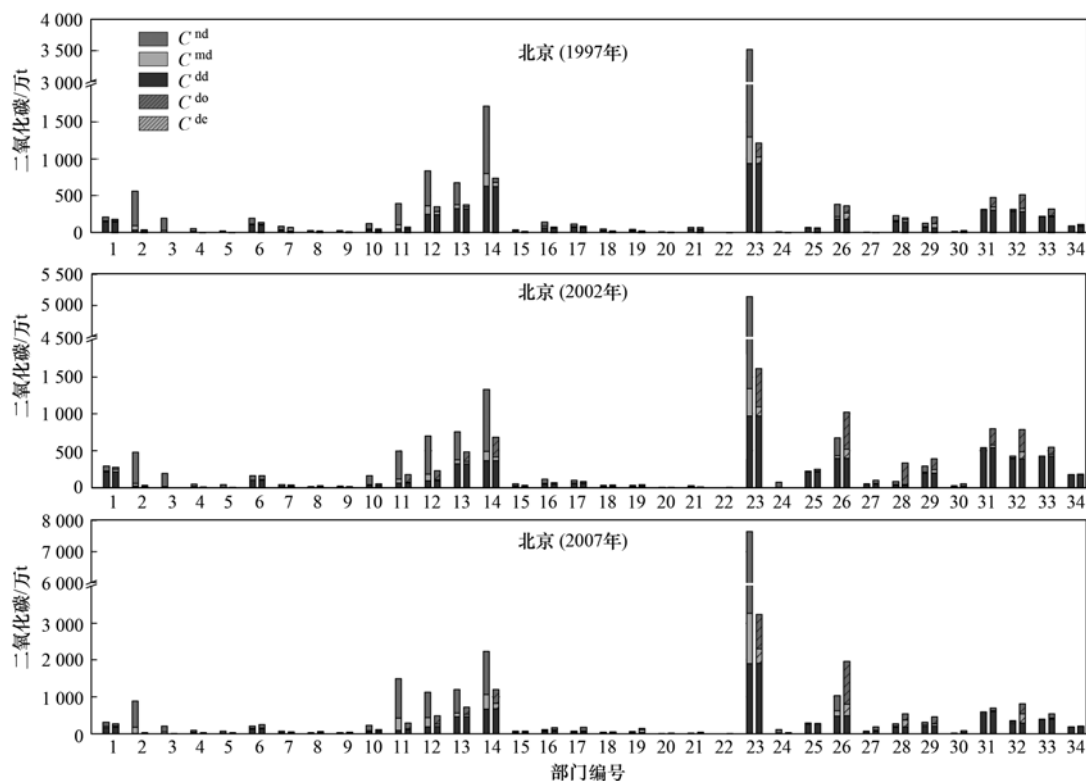


图 4 北京分部门消费和生产二氧化碳排放

Fig. 4 Product-based and consumption-based CO₂ emissions by department in Beijing

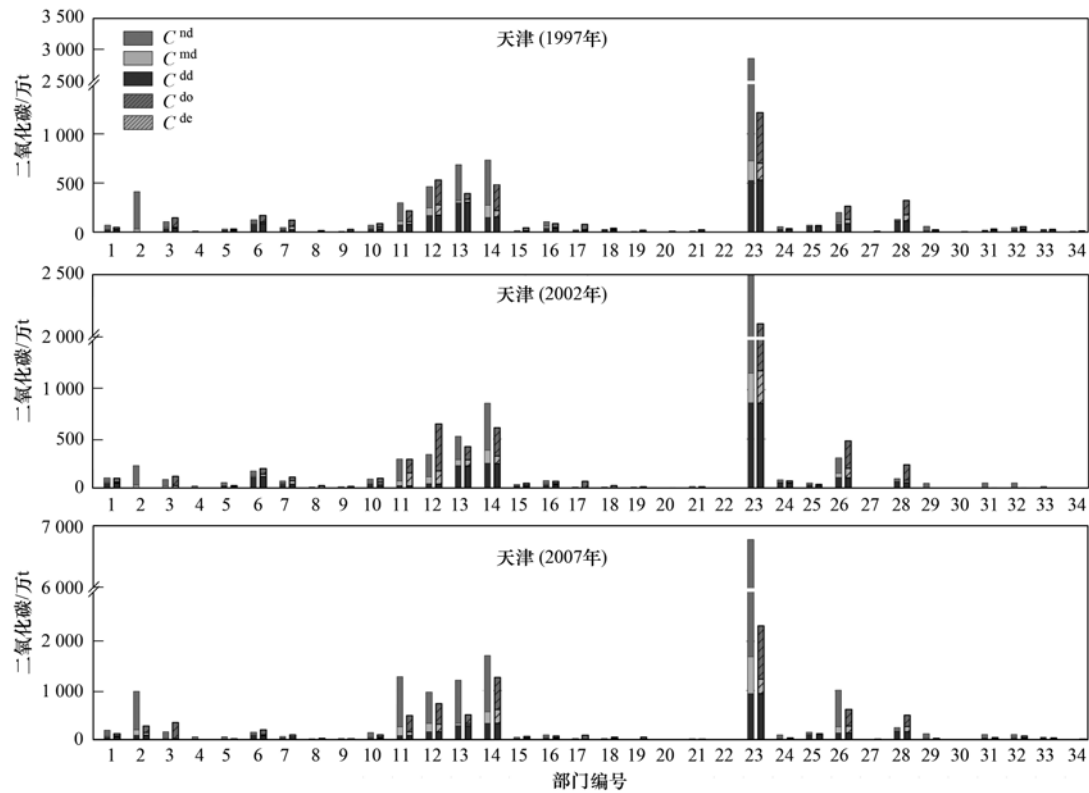


图5 天津分部门消费和生产二氧化碳排放

Fig. 5 Product-based and consumption-based CO₂ emissions by department in Tianjin

业业是北京的最大 C^d 部门, 占总计 17% ~ 25%, 其余各部门分别占总计 5% ~ 15%。其中, 房地产业排名下降并排除出关键部门。交通运输及仓储业则以 9% 的年均增速在 2002 年成为关键部门。

天津的 C^i 关键部门与北京非常相似。电力、蒸汽、热水生产和供应业、金属冶炼及压延加工业和社会福利和保障事业 3 年都属 C^i 关键部门, 另外两关键部门在 1997 年为化学工业和煤炭开采和洗选业、2002 年为化学工业和交通运输及仓储业、2007 年为石油加工及炼焦业和交通运输及仓储业。电力、蒸汽、热水生产和供应业也是天津的最大 C^i 部门, 占总计 41% ~ 44%, 其次是金属冶炼及压延加工业, 占总计 10% ~ 13%, 其余各部门分别占总计 4% ~ 10%。天津的石油加工及炼焦业与北京的类似, 其增长速度甚至高于北京, 2002 ~ 2007 年的年均增速约为 34%, 到 2007 年成为第三关键部门。

天津电力、蒸汽、热水生产和供应业、化学工业、金属冶炼及压延加工业和社会福利和保障事业 3 年都属生产碳足迹关键部门, 另一关键部门在 1997 年为批发和零售业、2002 和 2007 年都为交通运输及仓储业。电力、蒸汽、热水生产和供应业是天津的最大 C^d 部门, 占总计 26% ~ 35%, 其余各关

键部门分别占总计 6% ~ 15%。其中, 批发和零售业排名逐渐下降并排除出关键部门; 交通运输及仓储业则以 5% 的年均增速在 2002 年成为关键部门。

河北的 C^i 关键部门为金属冶炼及压延加工业、电力、蒸汽、热水生产和供应业、石油加工及炼焦业、煤炭开采和洗选业和化学工业。金属冶炼及压延加工业是河北 1997 和 2002 年的最大 C^i 部门, 占总计 27% ~ 32%, 但在 2002 ~ 2007 年出现负增长。在 1997 和 2002 年位于第二的电力、蒸汽、热水生产和供应业的 C^i 在 2002 ~ 2007 年迅速增长(年均增长率约 23%), 在 2007 年为最大 C^i 部门, 占总计 39%。其余各关键部门分别占总计 5% ~ 12%。河北的石油加工及炼焦业在 2002 ~ 2007 年的年均增速约为 25%, 到 2007 年成为第三关键部门。

河北的 C^d 关键部门为金属冶炼及压延加工业、电力、蒸汽、热水生产和供应业、化学工业、社会福利和保障事业和煤炭开采和洗选业。金属冶炼及压延加工业是河北的最大 C^d 部门, 占总计 42% ~ 43%, 其次是电力、蒸汽、热水生产和供应业, 占总计 18% ~ 20%, 其余各关键排放部门分别占总计 3% ~ 9%, 关键排放部门的年均增长保持在 3% ~ 8%。

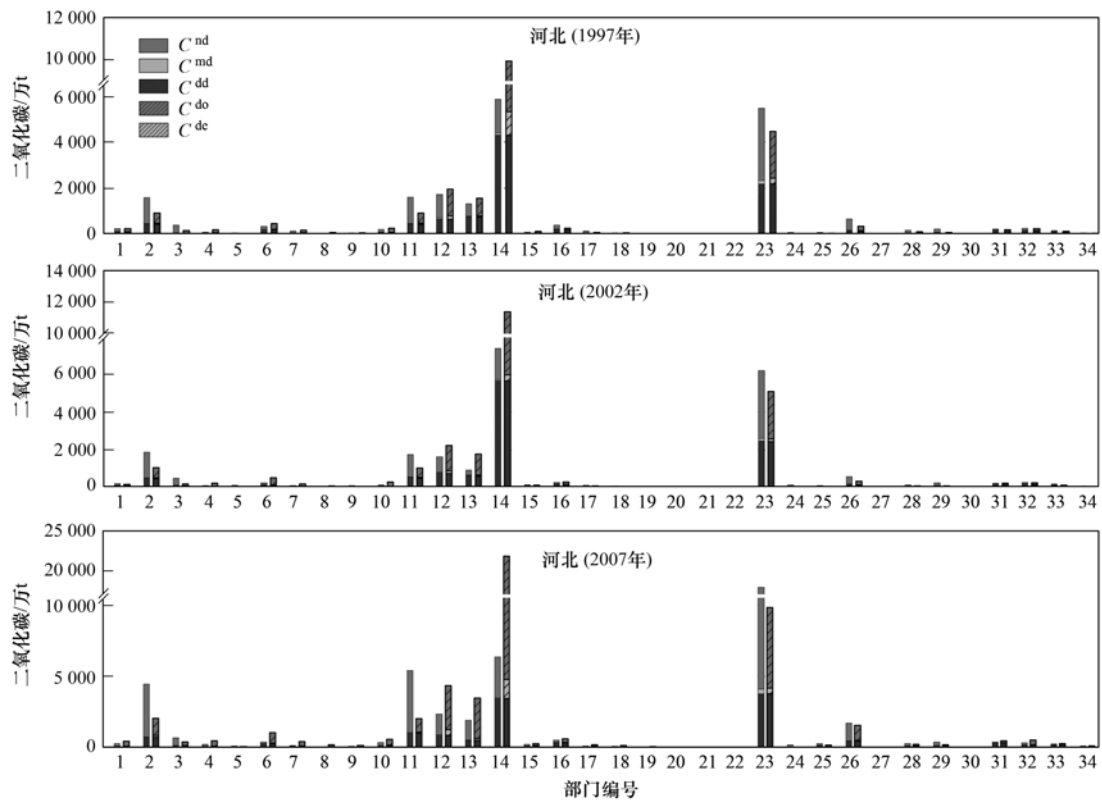


图 6 河北分部门消费和生产二氧化碳排放

Fig. 6 Product-based and consumption-based CO₂ emissions by department in Hebei

三地的 C^i 关键部门相似度非常高,而 C^d 关键部门则存在差异。北京和天津 C^i 关键部门都分布于第二产业,同为电力、蒸汽、热水生产和供应业、金属冶炼及压延加工业、化学工业、石油加工及炼焦业、煤炭开采和洗选业、社会福利和保障事业、交通运输及仓储业,包括了河北的所有关键部门(金属冶炼及压延加工业、电力、蒸汽、热水生产和供应业、石油加工及炼焦业、煤炭开采和洗选业和化学工业)。三地相同的 C^d 关键部门为电力、蒸汽、热水生产和供应业、金属冶炼及压延加工业和社会福利和保障事业,其余关键部门分布的行业存在差别。北京 C^d 关键部门较为均衡地分布于第二产业和第三产业,天津也存在属于第三产业的关键部门(交通运输及仓储业和批发和零售业),河北的则全属于第二产业。北京 C^d 中第二产业和第三产业排放的比重则分别为 45%~54% 和 42%~49%,天津 C^d 中第二产业和第三产业排放的比重则分别为 81%~85% 和 13%~16%,河北 C^d 中第二产业和第三产业排放的比重则分别为 92%~94% 和 5%~6%,与关键部门探测的情况一致,北京第二产业和第三产业的 C^d 持平,而天津和河北第二产业的

C^d 具绝对优势。

为进一步反映各部门之间的相互影响程度,引入碳排放影响力系数和感应度系数。碳排放影响力系数是反映国民经济某部门产生一个单位碳排放时,对国民经济各部门所产生的碳排放需求波及程度。碳排放感应度系数是反映国民经济各部门平均产生一个单位碳排放时,某一部门由此而受到的需求感应程度。计算公式及意义见文献[33]。

分析影响力系数的计算结果(表 3~5)发现,三地 3 a 的碳排放影响力超过平均水平($F_j > 1$)的部门集中分布于第二产业,包括了所有生产和消费碳排放关键部门。其中电力、蒸汽、热水生产和供应业的影响力系数最高,反映该产业对地区碳排放推动作用最强,对碳排放的依赖性也最大。而第一、三产业中,除北京 1997 年的房地产业和 2002 与 2007 年的交通运输及仓储业、天津 1997 年的交通运输及仓储业外,其余部门影响力系数均小于 1,说明其对地区碳排放的对推动作用较小。

从感应度系数来看(表 3~5),三地 3 a 的碳排放感应度超过平均水平($E_j > 1$)的部门集中分布于

第二产业,与生产和消费碳排放关键部门大致重合.其中,电力、蒸汽、热水生产和供应业和金属冶炼及压延加工业的感应度系数最高,2007 对整个国民经济碳排放消耗最大,说明各部门对其需求较高.北京除交通运输及仓储业、批发和零售业、房地产业和其他社会服务业外,天津除交通运输及仓储业外,三地第一和三产业部门的碳排放感应度都小于 1,且北京的批发和零售业、房地产业和其他社会服务业在 2002 和 2007 年都小于 1,说明京津冀区域第一和三产业对对整个地区碳排放拉动作用比较小,对碳排放的依赖性弱.

虽然影响力系数和感应度系数大于 1 的部门基本分布于第二产业,但影响力系数大于 1 的部门更为分散,数量多于感应度系数大于 1 的部门,但其值

普遍低于感应度系数值.感应度系数大于 1 的部门集中,且多是关键排放部门,其直接排放强度较其他部门高,说明对碳排放依赖较强的部门比较集中.影响力系数大于 1 的部门多且分散说明对碳排放需求超过平均需求的部门多,这一需求包括本部门直接产生部分,也包括通过其他部门而间接产生部分,其中一些影响力系数大于 1 的部门(如建筑业、金属制品业和木材加工业及家具制造业等)的直接排放强度并不高,对碳排放的直接依赖性不高,而是通过对其他部门的间接产生碳排放以实现自身需求.说明多数部门主要通过关键几个部门(如电力、蒸汽、热水生产和供应业和金属冶炼及压延加工业等)实现自身的碳排放需求,从而间接导致地区碳排放的增长.

表 3 北京各部门的碳足迹影响力和感应度
Table 3 Carbon footprint impact and inductivity of different departments in Beijing

部门名称		编号	碳足迹影响力系数			碳足迹感应度系数		
			1997 年	2002 年	2007 年	1997 年	2002 年	2007 年
第一产业	农林牧渔业	1	0.79	0.83	0.92	0.78	0.60	0.96
	煤炭开采和洗选业	2	1.14	0.66	0.67	1.25	0.60	0.20
	石油和天然气开采业	3	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.20
	金属矿采选业	4	1.28	3.46	1.49	0.94	3.90	2.35
	非金属矿采选业	5	0.87	1.78	2.66	0.25	1.16	2.58
	食品制造及烟草加工业	6	0.86	0.70	0.84	0.34	0.25	0.28
	纺织业	7	1.14	0.89	0.72	0.69	0.34	0.48
	服装、皮革等纤维制品制造业	8	0.82	0.55	0.58	0.13	0.10	0.17
	木材加工及家具制造业	9	1.01	0.96	1.04	0.21	0.18	0.24
	造纸印刷及文教用品制造业	10	0.66	0.70	0.83	0.37	0.32	0.42
	石油加工及炼焦业	11	0.57	0.48	0.87	0.69	0.49	1.05
	化学工业	12	1.22	0.80	0.84	2.25	0.54	1.02
第二产业	非金属矿物制品业	13	1.83	1.77	2.12	2.15	1.62	1.80
	金属冶炼及压延加工业	14	1.85	2.42	2.09	4.52	3.07	5.96
	金属制品业	15	0.99	1.41	1.52	0.14	0.22	0.25
	通用、专用设备制造业	16	0.92	0.97	0.88	0.32	0.17	0.20
	交通运输设备制造业	17	1.08	0.90	0.75	0.51	0.19	0.18
	电气机械及器材制造业	18	0.95	0.87	0.87	0.16	0.12	0.10
	电子及通信设备制造业	19	0.71	0.55	0.62	0.15	0.05	0.12
	仪器仪表等机械制造业	20	0.77	0.47	0.59	0.24	0.03	0.05
	其他制造业	21	0.96	1.10	1.46	0.59	0.29	0.22
	废品及废料	22	0.05	0.04	1.43	0.07	0.05	0.73
	电力、蒸汽、热水生产和供应业	23	4.49	3.99	3.19	9.21	14.12	9.05
	燃气生产和供应业	24	0.85	0.68	0.39	0.05	0.05	0.31
	建筑业	25	1.01	1.03	1.25	0.05	0.07	0.06
	交通运输及仓储业	26	0.93	1.00	1.05	1.58	1.98	2.95
第三产业	邮电业	27	0.16	0.36	0.40	0.02	0.09	0.04
	批发和零售业	28	0.63	0.50	0.41	1.15	0.29	0.58
	住宿和餐饮业	29	0.72	0.94	0.72	0.48	0.68	0.46
	金融业	30	0.52	0.34	0.22	0.07	0.06	0.03
	房地产业	31	2.27	0.81	0.45	2.52	0.88	0.30
	其他社会服务业	32	0.63	0.59	0.61	1.32	0.88	0.39
	社会福利和保障事业	33	0.68	0.69	0.61	0.55	0.46	0.16
	公共管理和社会组织	34	0.63	0.74	0.54	0.29	0.18	0.10

表 4 天津各部门的碳足迹影响力和感应度

Table 4 Carbon footprint impact and inductivity of different departments in Tianjin

部门名称		编号	碳足迹影响力系数			碳足迹感应度系数		
			1997 年	2002 年	2007 年	1997 年	2002 年	2007 年
第一产业	农林牧渔业	1	0.48	0.69	0.74	0.15	0.19	0.44
	煤炭开采和洗选业	2	1.26	2.12	2.59	1.28	3.44	4.42
	石油和天然气开采业	3	0.88	0.51	0.55	0.64	0.34	0.37
	金属矿采选业	4	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	非金属矿采选业	5	1.37	1.12	1.81	0.83	0.88	1.05
	食品制造及烟草加工业	6	0.78	0.85	0.83	0.19	0.50	0.50
	纺织业	7	0.91	1.16	1.43	0.33	0.43	1.06
	服装、皮革等纤维制品制造业	8	0.76	0.79	0.98	0.03	0.07	0.13
	木材加工及家具制造业	9	0.69	1.01	1.02	0.09	0.13	0.26
	造纸印刷及文教用品制造业	10	0.80	1.04	1.10	0.40	0.44	0.76
第二产业	石油加工及炼焦业	11	1.10	0.91	1.21	0.96	1.05	1.56
	化学工业	12	1.14	1.05	1.17	1.65	1.46	1.89
	非金属矿物制品业	13	2.45	2.32	2.73	3.18	2.23	3.16
	金属冶炼及压延加工业	14	1.49	1.53	1.04	2.52	2.81	2.06
	金属制品业	15	1.15	0.94	0.96	0.08	0.24	0.24
	通用、专用设备制造业	16	0.93	0.80	0.73	0.36	0.28	0.11
	交通运输设备制造业	17	0.88	0.86	0.72	0.12	0.26	0.07
	电气机械及器材制造业	18	0.82	0.80	0.75	0.13	0.05	0.06
	电子及通信设备制造业	19	0.58	0.57	0.65	0.05	0.02	0.03
	仪器仪表等机械制造业	20	0.79	0.79	0.61	0.08	0.05	0.02
	其他制造业	21	0.72	0.94	1.01	0.12	0.19	0.24
	废品及废料	22	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.01
	电力、蒸汽、热水生产和供应业	23	3.79	5.32	3.39	16.57	15.51	9.53
	燃气生产和供应业	24	1.97	2.49	2.85	1.67	1.46	2.29
	建筑业	25	1.20	0.96	1.13	0.06	0.03	0.04
	交通运输及仓储业	26	1.03	0.65	0.84	0.98	1.38	1.87
	邮电业	27	0.36	0.32	0.36	0.06	0.00	0.06
第三产业	批发和零售业	28	0.79	0.63	0.45	0.89	0.47	1.22
	住宿和餐饮业	29	1.03	0.82	0.57	0.13	0.00	0.10
	金融业	30	0.23	0.48	0.14	0.02	0.00	0.03
	房地产业	31	0.46	0.35	0.21	0.12	0.01	0.12
	其他社会服务业	32	0.55	0.42	0.46	0.22	0.04	0.17
	社会福利和保障事业	33	0.82	0.45	0.52	0.07	0.01	0.06
	公共管理和社会组织	34	0.56	0.32	0.34	0.03	0.00	0.04

3 讨论

对比以往研究,存在相近结论,也存在差异. 张旺等^[21]的研究指出,北京从 1997 ~ 2007 年一直为二氧化碳排放净调入地区,1997 ~ 2002 年为二氧化碳排放净出口地区,2007 年转变为二氧化碳净进口地区,与本研究得出的趋势相同,但贸易隐含二氧化碳排放量存在差别. Guo 等^[22]得出 2002 年北京和天津同为二氧化碳排放进口调入型地区,河北二氧化碳排放出口调出型地区,河北与本研究相同,但北京和天津的国际贸易二氧化碳排放平衡相反,贸易隐含二氧化碳排放量也存在差别. 可能原因有四点. 一是选取的能源消费数据不同. 本研究选取能源消费总量,与能源平衡表中消费总量匹配,电力排

除本地加工转换部分,而张旺等^[21]选取的是终端消费量,张旺等^[21]和 Guo 等^[22]都未对电力消费数据进行修正. 二是二氧化碳直接排放系数选择不同,排放系数和能源消费数据的选取存在不同,会造成一定差异^[34]. 三是部门划分数量差别的影响^[14]. 四是计算方法区别. Guo 等^[22]通过贸易额和完全排放矩阵相乘得出贸易隐含二氧化碳排放,没有区分进口(调入)加工贸易,也没有对这部分进行修正. 与唐建荣等^[23]的研究对比可见,京津与沪的地位相同,为碳排放责任净输出地区,冀与江浙相似,为碳排放责任净输入地区,从隐含碳占比来看,江浙沪区域更高,碳排放转移更为活跃.

由于数据的限制,本研究是在进出口、区域间调入调出在各部门和最终消费等分配数据缺乏的情

表 5 河北各部门的碳足迹影响力和感应度

Table 5 Carbon footprint impact and inductivity of different departments in Hebei

部门名称		编号	碳足迹影响力系数			碳足迹感应度系数		
			1997 年	2002 年	2007 年	1997 年	2002 年	2007 年
第一产业	农林牧渔业	1	0.38	0.40	0.45	0.08	0.08	0.13
	煤炭开采和洗选业	2	1.50	1.72	2.06	2.50	5.02	7.53
	石油和天然气开采业	3	1.14	0.71	0.86	0.83	1.06	0.64
	金属矿采选业	4	1.10	1.14	0.90	0.31	0.24	0.42
	非金属矿采选业	5	0.81	0.68	0.90	0.05	0.10	0.11
	食品制造及烟草加工业	6	0.57	0.59	0.70	0.21	0.29	0.26
	纺织业	7	0.65	0.61	0.76	0.13	0.17	0.18
	服装、皮革等纤维制品制造业	8	0.58	0.55	0.59	0.05	0.07	0.10
	木材加工及家具制造业	9	0.68	0.85	0.65	0.18	0.17	0.08
	造纸印刷及文教用品制造业	10	0.73	0.74	1.09	0.26	0.24	0.64
第二产业	石油加工及炼焦业	11	1.67	1.74	1.60	3.09	2.66	1.79
	化学工业	12	1.15	1.24	1.50	2.07	1.91	2.57
	非金属矿物制品业	13	1.23	1.24	1.48	0.83	0.65	1.04
	金属冶炼及压延加工业	14	3.36	3.20	2.06	12.74	12.44	6.48
	金属制品业	15	1.61	1.74	1.35	0.11	0.17	0.37
	通用、专用设备制造业	16	1.54	1.40	1.17	0.39	0.14	0.22
	交通运输设备制造业	17	1.26	1.15	1.19	0.17	0.14	0.13
	电气机械及器材制造业	18	1.60	1.51	1.18	0.11	0.08	0.08
	电子及通信设备制造业	19	0.58	0.81	1.16	0.28	0.07	0.17
	仪器仪表等机械制造业	20	1.03	1.37	0.95	0.05	0.10	0.13
	其他制造业	21	0.92	0.73	0.79	0.01	0.02	0.02
	废品及废料	22	0.03	0.01	0.10	0.05	0.01	0.02
	电力、蒸汽、热水生产和供应业	23	3.17	3.40	2.93	7.22	6.59	8.85
	燃气生产和供应业	24	1.08	1.12	0.98	0.14	0.11	0.10
	建筑业	25	1.07	1.14	1.04	0.01	0.02	0.02
	交通运输及仓储业	26	0.64	0.59	0.79	0.53	0.33	0.69
	邮电业	27	0.65	0.37	0.76	0.03	0.02	0.02
第三产业	批发和零售业	28	0.48	0.41	0.35	0.14	0.08	0.12
	住宿和餐饮业	29	0.36	0.43	0.76	0.12	0.14	0.32
	金融业	30	0.29	0.34	0.49	0.03	0.03	0.02
	房地产业	31	0.55	0.69	0.43	0.36	0.29	0.28
	其他社会服务业	32	0.66	0.50	0.71	0.68	0.43	0.27
	社会福利和保障事业	33	0.44	0.43	0.73	0.23	0.11	0.14
	公共管理和社会组织	34	0.48	0.45	0.54	0.02	0.02	0.03

况下进行的,在编制非竞争型投入产出表时采用的等比例假设会导致计算的不确定性加大. 在计算进出口隐含二氧化碳排放时采用替代法,与实际完全二氧化碳排放矩阵会产生差距. 以后的研究可在掌握更齐全的数据这一方向上进行以提高精度.

4 结论

(1)京津冀区域消费和生产二氧化碳排放的增长速度基本相同,但总量不相匹配,生产二氧化碳排放并不能如实反映区域应有排放责任. 京津冀区域的贸易隐含二氧化碳排放比例为 31% ~ 83%,其中以国内贸易隐含二氧化碳排放为主,贸易隐含二氧化碳不容忽视.

(2)河北二氧化碳排放为区域主导且增速最快,本身的二氧化碳排放强度较高,因此,不论是提高自身技术水平还是选取更低排放的资源都是其削减消费排放的有效途径. 北京和天津技术水平较高,二氧化碳排放强度远远低于河北和全国水平,因此,发挥其技术和人才等优势以协助周边的二氧化碳排放调入来源地提高技术水平以降低二氧化碳排放强度,才能有效削减消费排放.

(3)京津冀区域为二氧化碳排放净流入区域,存在一定的二氧化碳排放转移. 北京和天津消费导致相当一部分的国内其他地区的二氧化碳排放,河北承担部分国内其他地区的二氧化碳排放;北京消费也导致一定的国外二氧化碳排放,天津和河北则

承担了部分国外的二氧化碳排放责任。

(4) 京津冀第一产业和第二产业的二氧化碳排放责任转出, 第三产业二氧化碳排放责任转入。三地 3 个产业的排放平衡因产业结构特点和二氧化碳排放强度等差别而存在差异。北京和天津为第一产业和第二产业二氧化碳排放责任转出地区; 河北为第一产业和第二产业二氧化碳排放责任转入地区。北京第三产业输出较强, 二氧化碳排放责任转入; 天津和河北则为第三产业二氧化碳排放责任转出区域。三地可形成有效的产业互补。河北在第一产业和第二产业产值上占优势, 承担区域内较大责任; 北京在第三产业占优势, 可多承担区域排放责任; 天津和北京具有较低的排放强度, 应充分发挥其技术优势协助河北减排。

(4) 京津冀三地二氧化碳排放关键部门分布集中且相似度较高, 是对二氧化碳排放依赖性较高部门。其中, 消费二氧化碳排放关键部门基本都分布于第二产业, 而生产二氧化碳排放关键部门则根据地区产业结构差异而具不同分布。不论对消费还是生产二氧化碳排放, 京津冀区域应将控制重点放在第二产业, 如电力、蒸汽、热水生产和供应业、金属冶炼及压延加工业、化学工业、石油加工及炼焦业、煤炭开采和洗选业和社会福利和保障事业可实施区域联合控制, 而重中之重是二氧化碳排放的依赖性高的部门(如电力、蒸汽、热水生产和供应业和金属冶炼及压延加工业)。而北京和天津还应加强对第三产业关键部门(如交通运输及仓储业和批发和零售业等)的引导, 降低其对第二产业碳排放的刺激。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. CO₂ emissions from fuel combustion 2008 edition [R]. Head of Communication and Information Office, 2009. 1-528.
- [2] Netherlands Environmental Assessment Agency. China now No. 1 in CO₂ emissions; USA in second position [EB/OL]. Netherlands: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2007. <http://www.pbl.nl/en/dossiers/Climatechange/moreinfo/Chinanowno1inCO2emissionsUSAinsecondposition>.
- [3] 王铮, 朱永彬, 刘昌新, 等. 最优增长路径下的中国碳排放估计[J]. 地理学报, 2010, **65**(12): 1559-1568.
- [4] 岳超, 王少鹏, 朱江玲, 等. 2050 年中国碳排放量的情景预测-碳排放与社会发展Ⅳ[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(4): 517-524.
- [5] Munksgaard J, Pedersen K A. CO₂ accounts for open economies: producer or consumer responsibility? [J]. Energy Policy, 2001, **29**(4): 327-334.
- [6] Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories [J]. Ecological Economics, 2008, **65**(1): 13-23.
- [7] Larsen H N, Hertwich E G. The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action [J]. Environmental Science & Policy, 2009, **12**(7): 791-798.
- [8] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. 地理学报, 2012, **67**(10): 1327-1338.
- [9] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting [J]. Ecological Economics, 2009, **69**(2): 211-222.
- [10] Wiedmann T, Lenzen M, Turner K, et al. Examining the global environmental impact of regional consumption activities-Part 2: Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade [J]. Ecological Economics, 2007, **61**(1): 15-26.
- [11] Sánchez-Chóliz J, Duarte R. CO₂ emissions embodied in international trade: evidence for Spain [J]. Energy Policy, 2004, **32**(18): 1999-2005.
- [12] Lin B Q, Sun C W. Evaluating carbon dioxide emissions in international trade of China [J]. Energy Policy, 2010, **38**(1): 613-621.
- [13] Koopman R, Wang Z, Wei S. How much of Chinese exports is really made in China? Assessing foreign and domestic value-added in gross exports [EB/OL]. United States: United States International Trade Commission, 2008. http://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/ec200803b_revised.pdf.
- [14] Wyckoff A W, Roop J M. The embodiment of carbon in imports of manufactured products: Implications for international agreements on greenhouse gas emissions [J]. Energy Policy, 1994, **22**(3): 187-194.
- [15] Lenzen M, Pade L L, Munksgaard J. CO₂ multipliers in multi-region input-output models [J]. Economic Systems Research, 2004, **16**(4): 391-412.
- [16] Hendrickson C, Horvath A, Joshi S, et al. Peer reviewed: economic input-output models for environmental life-cycle assessment [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(7): 184A-191A.
- [17] Munksgaard J, Wier M, Lenzen M, et al. Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels [J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, **9**(1-2): 169-185.
- [18] Peters G P. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, **2**(4): 245-250.
- [19] McGregor P G, Swales J K, Turner K. The CO₂ 'trade balance' between Scotland and the rest of the UK: Performing a multi-region environmental input-output analysis with limited data [J]. Ecological Economics, 2008, **66**(4): 662-673.
- [20] 石敏俊, 张卓颖, 等. 中国省区间投入产出模型与区际经济联系 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] 张旺, 周跃云. 大都市区贸易隐含碳测算及其失衡度分

- 析——以北京为例[J]. 技术经济, 2013, **32**(2): 11-19.
- [22] Guo J, Zhang Z K, Meng L. China's provincial CO₂ emissions embodied in international and interprovincial trade[J]. Energy Policy, 2012, **42**: 486-497.
- [23] 唐建荣, 李焯嘯. 基于 EIO-LCA 的隐性碳排放估算及地区差异化研究-江浙沪地区隐含碳排放构成与差异[J]. 工业技术经济, 2013, (4): 125-135.
- [24] 周生贤. 国务院关于大气污染防治工作进展情况的报告[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2009. 1-3.
- [25] 张焕波, 齐晔. 中国低碳经济发展战略思考: 以京津冀经济圈为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(5): 6-11.
- [26] 中国人民大学气候变化与低碳经济研究所. 中国低碳经济年度发展报告 2011[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. 1-428.
- [27] Leontief W. Input-output economics[M]. New York: Oxford University Press, 1986. 1-440
- [28] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1970, **52**(3): 262-271.
- [29] Tan H, Sun A J, Lau H. CO₂ embodiment in China-Australia trade: The drivers and implications[J]. Energy Policy, 2013, **61**: 1212-1220.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The physical science basis[R]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 1-1009.
- [31] 蔡博峰, 刘春兰, 陈操操, 等. 北京市温室气体排放系数及排放量核算[R]. 北京: 北京市环境保护科学研究院, 2008. 1-171.
- [32] 中华人民共和国国家发展和改革委员会能源所. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2011. 1-120.
- [33] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(5): 28-34.
- [34] Wilting H C. Sensitivity and uncertainty analysis in mrio modelling; some empirical results with regard to the dutch carbon footprint[J]. Economic Systems Research, 2012, **24**(2): 141-171.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人