

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

**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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM<sub>2.5</sub> 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 ..... 谢元博, 陈娟, 李巍 ( 1 )

长白山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子季节变化特征研究 ..... 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 ( 9 )

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 ..... 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 ( 15 )

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 ..... 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 ( 22 )

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 ..... 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 ( 30 )

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 ..... 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 ( 35 )

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 ..... 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 ( 41 )

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 ..... 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 ( 46 )

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 ..... 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 ( 53 )

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 ..... 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 ( 60 )

汉江上游金水河流域氮湿沉降 ..... 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 ( 66 )

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 ..... 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 ( 73 )

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 ..... 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 ( 79 )

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 ..... 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 ( 85 )

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO<sub>2</sub> 释放的影响 ..... 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 ( 93 )

黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 ..... 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 ( 100 )

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 ..... 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 ( 108 )

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 ..... 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 ( 117 )

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 ..... 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 ( 123 )

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 ..... 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede ( 131 )

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 ..... 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 ( 143 )

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 ..... 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 ( 150 )

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 ..... 宋国栋, 刘素美, 张国玲 ( 157 )

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 ..... 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 ( 163 )

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 ..... 武晓飞, 李大鹏, 汪明 ( 171 )

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 ..... 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 ( 179 )

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 ( 186 )

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 ..... 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 ( 194 )

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 ..... 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 ( 202 )

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 ..... 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 ( 208 )

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 ..... 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 ( 214 )

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 ..... 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 ( 221 )

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 ..... 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 ( 227 )

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 ..... 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 ( 233 )

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 ..... 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 ( 240 )

水稻土团聚体 Cu<sup>2+</sup> 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 ..... 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 ( 248 )

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 ..... 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 ( 254 )

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 ..... 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 ( 263 )

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 ..... 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 ( 271 )

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 ..... 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 ( 279 )

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 ..... 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 ( 286 )

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 ..... 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 ( 292 )

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 ..... 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 ( 299 )

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 ..... 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 ( 304 )

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 ( 313 )

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 ..... 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 ( 319 )

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 ..... 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 ( 327 )

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 ..... 谢薇, 陈书涛, 胡正华 ( 334 )

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 ..... 史晶晶, 耿元波 ( 341 )

南京河流夏季水-气界面 N<sub>2</sub>O 排放通量 ..... 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 ( 348 )

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 ..... 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 ( 356 )

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 ..... 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 ( 365 )

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 ..... 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 ( 371 )

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 ..... 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 ( 380 )

县域尺度的京津冀都市圈 CO<sub>2</sub> 排放时空演变特征 ..... 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 ( 385 )

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 ..... 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 ( 394 )

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

# 县域尺度的京津冀都市圈 CO<sub>2</sub> 排放时空演变特征

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:** 二氧化碳排放具有阶段性空间分布特征, 研究其区域特征和格局演变可为减排提供重要的依据和方向. 利用 1990 ~ 2009 年京津冀都市圈 128 个县级区域的二氧化碳排放量数据, 运用比较统计地图和空间自相关分析方法对都市圈的二氧化碳排放的空间格局和空间依赖性进行研究. 结果表明, 京津冀都市圈二氧化碳排放量逐年增加, 2002 年之后的平均增速是 2002 年之前的 1.8 倍. 各市二氧化碳排放增长趋势不一, 呈三类变化趋势. 都市圈二氧化碳排放格局呈现较明显的分层聚集现象, 全局 Moran 指数先由 1.44 降低至 1998 年的 0.09 后缓慢回升至 0.10, 二氧化碳排放高值区域空间分布由“双中心”发展至“四中心”, 低值区域变化较小. 局部空间自相关性则呈现了 4 种类型的变化: 大部分区域基本保持不变或减弱, 唐山等地增强, 天津部分区域和宣化县转变. 高值中心和低值区域的空间自相关演变过程并不相同, 在制定减排规划时需要因地制宜, 适当考虑周边区域的相互作用. 空间格局和空间自相关关系的探讨对于认识京津冀都市圈二氧化碳排放的空间规律和制定减排战略规划具有重要意义, 也为都市圈低碳发展研究提供了基础.

**关键词:** 县级区域; 空间格局; 比较统计地图; 空间自相关分析; 二氧化碳排放

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0385-09

## County Scale Characteristics of CO<sub>2</sub> Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region

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

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

**Abstract:** CO<sub>2</sub> emission spatial distribution is characterized by stages. The study on regional distribution characteristics and evolution can supply important evidence for CO<sub>2</sub> emission reduction. Based on CO<sub>2</sub> emission data of 128 county areas in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region (BTHMR) from 1990 to 2009, the spatial pattern and spatial dependence of CO<sub>2</sub> emission were discussed by using cartogram and spatial autocorrelation analysis methods. The results show that the total emission of CO<sub>2</sub> increased year by year. Average annual growth of CO<sub>2</sub> emission after 2002 was 3.7 times higher than before. Different cities have different emission growth trends which can be categorized into three types. The spatial pattern of CO<sub>2</sub> emission appeared to be the layered cluster. The Global Moran's I decreased from 1.44 in 1990 to 0.09 in 1998 and then increased slowly to 0.10 in 2009. The spatial distribution of high CO<sub>2</sub> emission area changed from 'Double Centers' into 'Four Centers' and the spatial distribution of low CO<sub>2</sub> emission area changed less. There were four different change types of local spatial autocorrelation; remaining unchanged or weakening in most regions, enhancing in some regions of Tangshan, transforming in some regions of Tianjin and Xuanhua county. Since the spatial pattern and autocorrelation in low/high CO<sub>2</sub> emission area bear different evolution process, the local conditions and interactions with perimeter zones should be considered when formulating emission reduction plan. The discussion of spatial pattern and autocorrelation is very important for understanding spatial evolution pattern of CO<sub>2</sub> emission and developing strategic emission reduction planning, and also provides a base for the study on low carbon development in metropolitan area.

**Key words:** county area; spatial pattern; cartogram; spatial autocorrelation analysis; CO<sub>2</sub> emission

工业革命以来, 人类活动排放了大量的温室气体, 导致最近几十年来全球变暖, 很可能引发全球范围环境灾难<sup>[1]</sup>, 成为各国政府和科学界关注的焦点. 为了避免由全球变暖造成的巨大的负面影响, 各国政府已经在联合国气候变化公约的框架下开展政府合作, 以减少人为温室气体排放. 中国已经提出了 2020 年单位 GDP 碳排放比 2005 年降低 40% ~ 45% 的目标, 这不仅需要从全局角度考虑二氧化碳排放的影响, 更应该从区域格局把握<sup>[2, 3]</sup>. 一方

面原因是区域为全球二氧化碳排放的最大组成部分, 在应对和适应气候变化中发挥着关键作用, 另一方面, 从区域的角度制定减排政策更具针对性和可

收稿日期: 2013-05-15; 修订日期: 2013-07-16

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); 北京市环科院科技基金项目(2013-A-04)

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

操作性<sup>[4, 5]</sup>。要把握区域二氧化碳排放特征,不仅需要分析其分布特点,还需要对其在区域间相互作用的依赖性和异质性进行研究<sup>[6]</sup>。

区域空间依赖性和异质性研究有助于深入理解区域空间结构特征和演变趋势<sup>[7]</sup>,是地理学和社会学研究的焦点<sup>[8, 9]</sup>,现有研究多通过空间自相关分析实现<sup>[10-12]</sup>。国内外有关温室气体空间自相关研究以挖掘空间分布及演变特征为主。例如,Zhou等<sup>[13]</sup>利用空间自相关分析对美国各产业县级尺度的二氧化碳排放分布特征进行对比分类;Antczak等<sup>[14]</sup>发现欧洲国家大气污染物中的二氧化硫和二氧化碳的空间自相关性最强,空间联系随距离增长而减弱;Huang等<sup>[15]</sup>指出中国城市的二氧化碳排放强度具有显著的空间依赖性,经济权重将加强相邻省份的空间依赖性;Chuai等<sup>[16]</sup>指出中国省域尺度的二氧化碳排放存在极化现象,H-H聚集有所扩展,L-L聚集有所缩小;龙家勇等<sup>[17]</sup>发现中国呈中东部二氧化碳排放高而西部低的空间聚集现象,且差距逐渐扩大;赵雲泰等<sup>[3]</sup>得出中国碳排放强度在东部和南部沿海地区呈现低值空间集聚,高值空间集聚区域由大西北转至黄河中游和东北地区。另一方面研究多通过空间自回归模型分析空间影响及驱动因素。综合现有研究,影响二氧化碳排放的空间分布的主要因素有:产业结构和人口增长<sup>[18]</sup>,经济增长<sup>[19]</sup>,国内生产总值和人口数量<sup>[16, 20, 21]</sup>,经济发展水平和经济结构<sup>[22, 23]</sup>。影响二氧化碳排放强度空间分布的主要因素有:外国直接投资<sup>[24]</sup>,研究与开发费用占比和出口占比<sup>[25]</sup>。从总体上看,现有研究都多在国家为整体的省、市尺度,研究尺度较大,二氧化碳排放数据较粗,不确定性较强,难以精准地反映区域格局特征,不适合区域政策的制定。而对区域的二氧化碳排放格局研究来说,细化到县域尺度才可提高针对性和出台政策的可操作性。

京津冀、长三角和珠三角组成我国三大都市圈,属于资源消耗密集型区域。三大都市圈占全国6.3%的国土面积,却消耗了全国40%的煤炭、生产了50%的钢铁<sup>[26]</sup>。另外,都市圈也是气候变化影响的脆弱敏感地区<sup>[27]</sup>。随着城市化水平的不断提高<sup>[28, 29]</sup>,都市圈将承担更大的减排压力。包括人口<sup>[30, 31]</sup>、能源消耗<sup>[32]</sup>和技术<sup>[33]</sup>等因素的物质流不仅使城市紧密联系,还会对都市圈二氧化碳排放格局产生影响。因此,选择都市圈进行区域二氧化碳排放空间自相关分析较为合理,符合政策需求。

综上所述,本研究拟绘制比较统计地图,并使用

空间自相关分析方法,以京津冀都市圈为研究对象,基于县级尺度开展从1990~2009年的二氧化碳排放的时空特征分析,从而探讨二氧化碳排放转移趋势和方向,以期为减排政策和规划提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

京津冀都市圈(Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region, BTHMR)包括北京市、天津市和河北省的石家庄、唐山、秦皇岛、保定、张家口、承德、沧州、廊坊这10个地市,行政区域面积为 $18.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,人口接近 $9\,000 \times 10^4$ 人(截止2010年底)。改革开放以来的发展,形成了以北京和天津为经济核心,以河北的石家庄、唐山、保定、秦皇岛、廊坊、沧州、承德、张家口这8市为原材料和各种矿产资源供应地以及重要交通枢纽的格局。

### 1.2 二氧化碳排放计算方法和数据来源

#### 1.2.1 二氧化碳排放计算方法

县级尺度的统计信息不健全,各类能源消耗数据难以获取。在参考已有研究的基础上<sup>[34-39]</sup>,本研究采用人口占比分配的方法,结合ArcGIS空间数据,将市级二氧化碳排放量自上而下分配至128个(部分整合)县级区域。市级二氧化碳排放量利用排放系数法计算<sup>[32]</sup>,选择原煤、石油、天然气、电力消费实物量和本地排放因子计算,提高二氧化碳排放量计算精度。为避免电煤的重复计算,剔除了原煤消费中用于发电和供热的消耗量。

#### 1.2.2 数据来源

本研究能源消费数据和人口数据源于北京、天津、石家庄、唐山等10市1990~2009年的统计年鉴、《新中国60年统计资料汇编》,唐山、保定、廊坊、沧州、张家口、秦皇岛的部分年份统计资料缺失,取其前后两年的滑动平均值代替。在排放因子选择上,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<sup>[40]</sup>;河北各市的排放因子来自国家发改委能源所编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》<sup>[41]</sup>,外调电排放系数选择2010年中国华北区域电网基准线排放系数。

### 1.3 研究方法

空间自相关性量度的指标和方法包括Moran指数<sup>[42, 43]</sup>和G系数<sup>[44]</sup>,局部Moran分析<sup>[45, 46]</sup>和局部G系数分析<sup>[11, 47]</sup>。本研究选用全局和局部Moran指数分析方法。全局Moran指数 $I$ 用以研究区域整体

自相关情况,具体表达式如公式(1).

$$I_t = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_{ii} - \bar{Y}_t) (Y_{ij} - \bar{Y}_t)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{ii} - \bar{Y}_t)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中,  $I_t$  是第  $t$  年的全局 Moran 指数, 取值范围  $[-1, 1]$ , 大于 0 表示区域观察值存在空间正相关, 呈聚集分布, 小于 0 表示区域观察值存在空间负相关, 呈离散分布, 越靠近取值范围两端其自相关关系越强烈, 等于 0 表示区域无空间自相关性, 呈随机分布;  $n$  为研究地区数;  $Y_{ii}$  是第  $t$  年  $i$  地区的观察值;  $\bar{Y}_t$  为观察值的平均值,  $\bar{Y}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ii}$ ;  $W_{ij}$  是二进制空间邻近权值, 邻近取 1, 非邻近取 0.

全局自相关分析只能了解总体空间自相关情况, 会掩盖局部状态的不稳定性<sup>[48]</sup>, 需要通过局部自相关分析对观察值的局域空间集群及其自相关程度进行分析. 通过局部 Moran 指数和 LISA 散点图进行分析. 局部 Moran 指数计算公式见(2).

$$I'_i = (Y_{ii} - \bar{Y}_t) \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_{ij} - \bar{Y}_t)}{\sum_{i=1}^n (Y_{ii} - \bar{Y}_t)^2} \quad (2)$$

LISA 散点图分为 4 个象限, 分别代表 4 种局域分布形式. 第 1 象限代表高观察值的区域单元被同是高观察值的区域所包围(高-高分布, H-H); 第 2 象限代表低观察值的区域单元被高观察值的区域所包围(低-高分布, L-H); 第 3 象限代表低观察值的区域单元被同是低观察值的区域所包围(低-低分布, L-L). 第 4 象限代表高观察值的区域单元被低观察值的区域所包围(高-低分布, H-L).

计算 Moran 指数后, 需要进行显著性分析, 以保证在一定概率下的正确性.

$$Z(I) = [I - E(I)] / \sqrt{\text{VAR}(I)} \quad (3)$$

式中,  $E(I)$  表示 Moran 指数  $I$  的数学期望,  $\text{VAR}(I)$  表示方差. 置信度达到 95% (显著水平 5%),  $Z(I)$  大于 1.96 或小于 -1.96 分别表示较强的正或负空间自相关,  $Z(I)$  在  $[-1.96, 1.96]$  区间内则表示自相关不明显. 而在 99% 的置信度 (显著水平 1%) 下,  $Z(I)$  值在  $[-2.58, 2.58]$  区间之外表现较强的正或负空间自相关.

## 2 结果与分析

### 2.1 区域二氧化碳排放特征及空间格局演变

研究结果表明, 1990 ~ 2009 年, 京津冀都市圈总的二氧化碳排放总量由 1990 年的 16 035 万 t 逐年增长到 2009 年的 71 952 万 t, 年均增长率 8.1%. 其中, 1990 ~ 2002 年的二氧化碳排放速度增长较慢, 年均增长率为 6.3%, 2002 年之后的二氧化碳排放增速加快, 年均增长率达到 11.3%, 是 2002 年之前的 1.8 倍. 京津冀都市圈中 10 市的二氧化碳排放呈现不同的变化趋势(图 1), 根据增长速度和二氧化碳排放量变化的差异可以分成三类: ①中低速增长, 初始排放量大, 后期维持高排放, 代表城市为北京(年均增长率 6.2%)、天津(年均增长率 3.3%); ②高速增长, 初期中等排放, 后期高排放, 代表城市为沧州(年均增长率 13.3%)、石家庄(年均增长率 12.7%)、唐山(年均增长率 10.3%); ③中高速增长, 初期低排放, 后期维持较低排放, 代表城市为廊坊(年均增长率 12.3%)、张家口(年均增长率 9.9%)、秦皇岛(年均增长率 9.8%)、承德(年均增长率 8.4%)、保定(年均增长率 7.2%). 其中, 增长最为显著的是唐山和石家庄, 其二氧化碳排放量分别于 2006 年和 2008 年达到与北京同等水平.

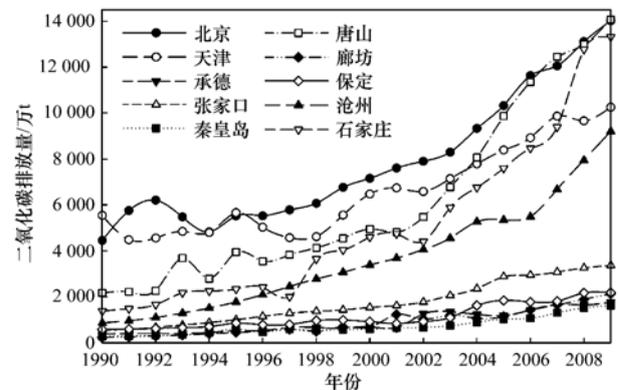


图 1 1990 ~ 2009 年京津冀都市圈 10 市二氧化碳排放  
Fig. 1 Cities' CO<sub>2</sub> emission in the BTHMR from 1990 to 2009

为展现和分析都市圈二氧化碳排放量的空间格局及其演变过程, 利用比较统计地图(Cartogram)<sup>[49]</sup>展现 1990 ~ 2009 年主要年份的县域二氧化碳排放量(图 2). 比较统计地图能在不改变地图中区域拓扑关系且整个目标区域的总面积保持不变的前提下, 利用分区域面积的扭曲变化(分区域面积的大小与属性值的大小呈正比)强烈表达观察值信息. 可以看出, 京津冀都市圈的二氧化碳排放格局呈现明显的聚集现象, 即高排放区域和低排放区域都较为集中. 高排放中心由 1990 年的北京-天津“双中心”发展成 2009 年的北京-天津-唐山-石家庄“四中心”. 低排放区域围绕中心分布. 北京和天津的表

示面积逐年萎缩,二氧化碳排放占区域总的比重不断减小. 而唐山、石家庄、沧州各区县的表示面积逐年增大,二氧化碳排放占区域总排放的比重不断增加. “双中心”1990年和2009年二氧化碳排放量占比分别约为30%和18%，“四中心”1990年和2009年二氧化碳排放量占比分别约为34%和26%. 不论是“双中心”还是“四中心”其占总排放量比例都在下降,都市圈二氧化碳排放呈现多点发散式增长.

北京第三产业为区域主导且逐渐加强. 虽然第

三产业具有低碳排放的特点,但其经济总量的提升依然会推动碳排放量的增加<sup>[50]</sup>. 同时,北京第二产业能耗依然占较大比重<sup>[51]</sup>,而且对二氧化碳排放增长贡献最大<sup>[52]</sup>. 天津的第二产业和第三产业比重都逐年增大,且第二产业能源消费碳排放持续较高增长<sup>[53]</sup>. 由此看来,北京和天津两中心的第二产业持续高能耗和第三产业经济总量的增长致使其维持区域较高二氧化碳排放.

京津冀都市圈产业趋同<sup>[54, 55]</sup>而经济趋异<sup>[56, 57]</sup>,且存在产业断链<sup>[58]</sup>,地区间的竞争大于协

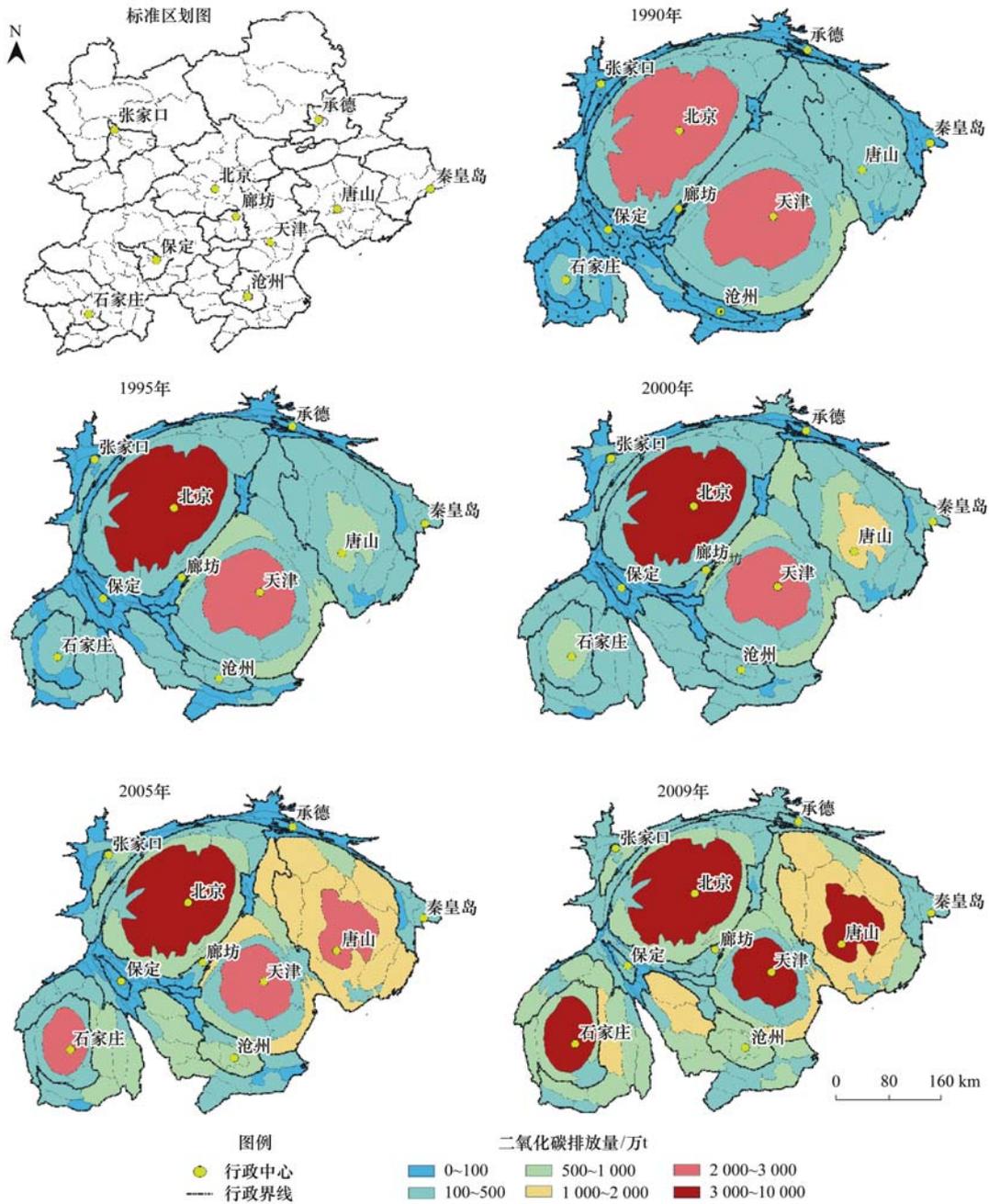


图2 1990~2009年京津冀都市圈二氧化碳排放量比较统计地图

Fig. 2 Cartograms of CO<sub>2</sub> emission in the BTHMR from 1990 to 2009

作<sup>[59]</sup>,导致高耗能、高排放产业的的重复建设,高排放区域增多.在“双中心”外围的唐山、石家庄和沧州的第二产业具有区域优势(2008年第二产业增加值位于河北8市前三位)且分别占当地生产总值的50%以上<sup>[60]</sup>,而第二产业产值与能源消费互为因果<sup>[61]</sup>,可解释三地的二氧化碳排放占区域总排放的比重逐渐增大的现象.

## 2.2 全局自相关分析

由于 $K$ 最近点权重( $K$ -nearest neighbors weight matrix)的计算结果较为稳定和可信<sup>[62]</sup>,选其作为 $W_{ij}$ 权重取值方法.分别计算 $K$ 为4~8的空间自相关,发现 $K \geq 6$ 时,Moran指数较为稳定,因此选择 $K=6$ 进行分析.

由表1可见,1990~2009年全局Moran指数处于 $[0.0909, 0.1439]$ 区间,且都通过1%的显著性检验,即具有显著的正空间相关性和潜在的空间依赖性,空间因素对二氧化碳排放的影响一致,表现出聚集效应,与比较统计地图的初步分析结果一致.从时间上看,1990~2003年, $I_t$ 值呈下降趋势,聚集效应减弱,都市圈二氧化碳排放呈现一定的空间分散趋势;2003~2009年, $I_t$ 值小幅回升,聚集效应有所增强.

表1 1990~2009年京津冀都市圈二氧化碳排放全局Moran指数

年份	$I$	$Z(I)$	伴随概率( $P$ )
1990	0.1439	4.13	0.01
1991	0.1227	3.95	0.01
1992	0.1183	4.08	0.01
1993	0.1271	4.23	0.01
1994	0.1128	3.96	0.01
1995	0.1226	4.41	0.01
1996	0.1071	4.2	0.01
1997	0.1021	5.05	0.01
1998	0.0909	3.66	0.01
1999	0.0950	3.59	0.01
2000	0.0986	3.30	0.01
2001	0.0924	4.08	0.01
2002	0.0878	3.53	0.01
2003	0.0902	2.99	0.01
2004	0.0908	4.08	0.01
2005	0.0988	3.44	0.01
2006	0.1055	3.24	0.01
2007	0.1076	3.38	0.01
2008	0.1001	3.20	0.01
2009	0.1010	2.92	0.01

## 2.3 局部自相关分析

运用LISA图和Moran散点图分析二氧化碳排放的局部空间自相关变化特征.从1990~2009年

的LISA图(图3)看出,具有显著空间自相关的区县维持在29~41个之间.门头沟区、怀柔区、延庆县、宣化县等少部分地区呈现负空间相关效应,其余显著空间自相关地区呈现正空间相关效应.其中,H-H区域分布在北京、天津、唐山的区县;L-L区域主要包括保定、沧州、张家口和承德的部分区县;H-L区域为张家口宣化县;L-H区域为北京的三区(门头沟区、怀柔区、延庆县)及天津和唐山部分地区.以北京中部6区(东城区、西城区、海淀区、朝阳区、丰台区、石景山区)为中心,可以看到较为明显的分层聚集现象,即H-H区域在中心相互作用,向外辐射至L-H区域,再向外至L-L区域.这与经济学中的“极化-扩散”效应相似:中心区域更易集中和消耗更多的资源,二氧化碳排放高;L-H区域不断向H-H区域输送资源,自身的消耗较低,二氧化碳排放也少,但在接收中心区域溢出的技术、人才等发展因素时相互之间存在竞争关系,由此相互产生负向影响;外圈的L-L区域难以接收到中心溢出的技术、资本等资源而保持较低的发展,形成极核之间的低排放腹地.董冠鹏等<sup>[63]</sup>、孙铁山等<sup>[64, 65]</sup>研究指出京津冀都市圈的经济、人口有明显的聚集现象,且在这一时间段内聚集性和依赖性有所增强,经济差异扩大,人口存在多中心集聚和腹地扩散现象,可解释H-H,L-H区域的形成.马国霞等<sup>[66]</sup>研究发现京津两市与河北之间的经济差距随时间呈逐渐扩大趋势,且存在断层现象,与二氧化碳排放L-L区域相吻合.

从时间序列上看,局部空间自相关性的变化有以下几类(通过5%的显著性检验的地区):①基本保持不变.H-H:房山区、顺义区、昌平区、大兴区;L-L:保定市市辖区、满城县、清苑县、徐水县、定兴县、唐县、涞源县、望都县、易县、蠡县、顺平县、博野县、安国市、高碑店市、承德县、围场满族蒙古族自治县、霸州市、张北县、康保县、隆化县;L-H:门头沟区、怀柔县、延庆县.②空间自相关性增强.从弱空间自相关性变为H-H区域:丰南区、滦县、丰润区、迁西县;从弱空间相关性变为L-L区域:滦平县、赤城县;从空间弱相关变为L-H区域:唐海县.③空间自相关性减弱.从H-H区域变为弱空间自相关:津南区、滨海新区、北京中6区、天津中6区;从L-L区域变为弱空间自相关:雄县、安新县、容城县、任丘市、涿源县、尚义县、张家口中部三区.④空间自相关性转变.由H-H区域转变成L-H区域再变为弱空间自相关:东丽区、西青区、

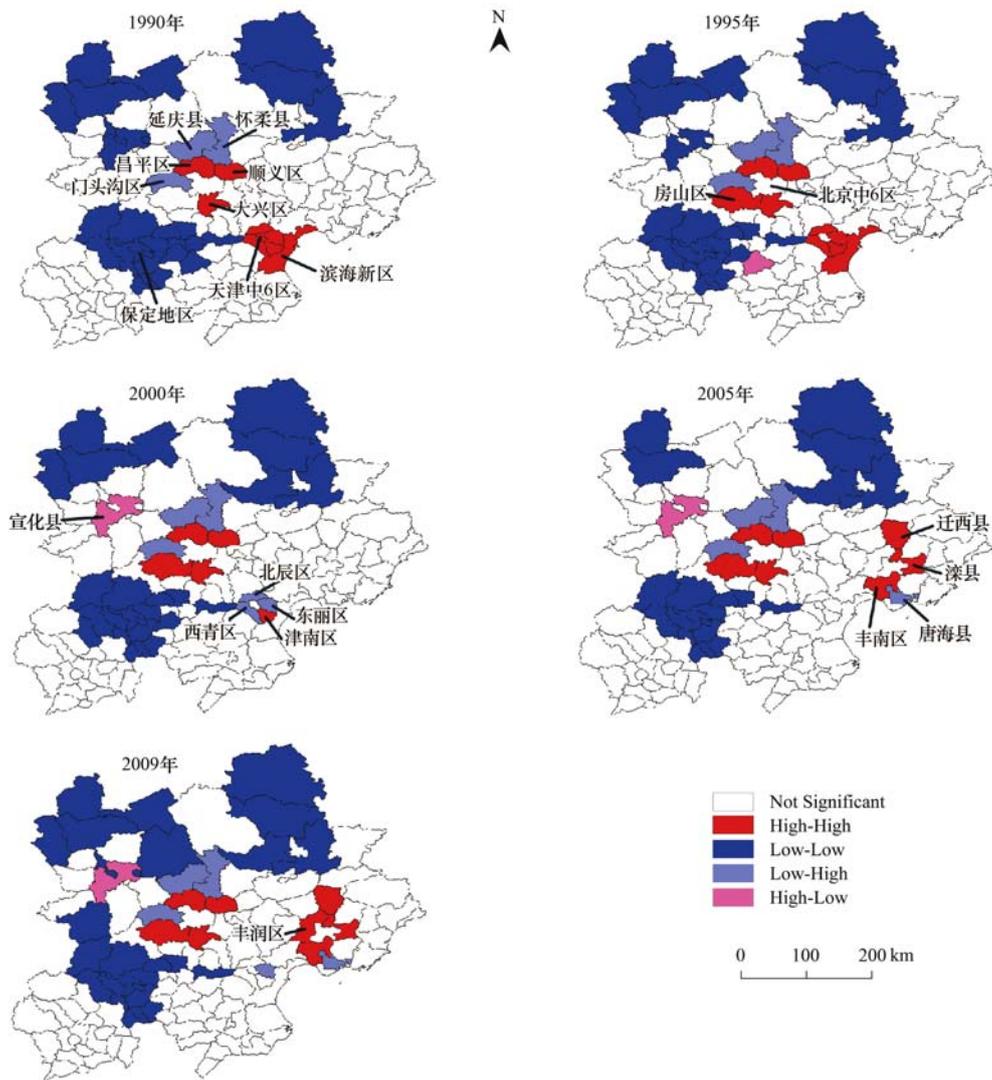


图3 1991~2009年京津冀都市圈二氧化碳排放量LISA图

Fig. 3 LISA cluster maps of CO<sub>2</sub> emission in the BTHMR from 1991 to 2009

北辰区;由L-L区域变为H-L区域;宣化县。

比对全局自相关性演变趋势,天津区县、宣化县的空间自相关性的转变以及部分地区空间自相关性减弱可以解释全局空间自相关性的减弱,唐山2005年之后增强的正空间自相关性对全局空间自相关性的回升起到一定作用。

天津和北京同属高排放地区,但两者二氧化碳排放空间格局演变迥异。天津在2000年之前存在显著的正空间相关性,但其后转变为负的空间相关性,到2005年以后空间自相关性减弱为不显著。而北京地区的空间自相关性基本不变和减弱。在比较统计地图中,除天津中部6区(和平区、河西区、南开区、河东区、河北区、红桥区)外,2009年大部分区县的二氧化碳排放量未超过1 000万t,周边区县的二氧化碳排放得到了控制,自相关性转变。这与

经济、人口的聚集现象相反,说明可能存在技术进步、产业结构升级等其他因素对天津地区的二氧化碳排放产生负影响。张家口宣化县的空间自相关性也转变较大,由低值正影响区域变成高值负影响区域,可见其二氧化碳的排放增长极快,处在极核形成的初始阶段。

石家庄和唐山两个高排放中心的空间自相关性变化不同:石家庄地区不具有显著的空间自相关性,2005年之后的LISA聚集图显示,唐山区县表现出较强的正空间自相关性。这一区别反映出两市的二氧化碳排放特征差异较大。分析两市中心以外县级行政单位,可见唐山市周边大部分区县在2005年二氧化碳排放量超过1 000万t,而石家庄市周边大部分县市二氧化碳排放量到2009年仍低于1 000万t,可见石家庄二氧化碳排放更为集中,但带动周边县

市增长的作用并不强烈. 唐山则存在一定的空间影响因素致使其辖区、县具备较强的正空间自相关性. 徐勇等<sup>[67]</sup>指出京津对唐山方向有经济拉动效应,对其它地市的带动辐射力度尚较小. 首钢、北京焦化厂等高耗能产业在 2002 年之后往唐山地区迁移,亦可解释唐山地区更易接受其扩散资源,逐渐成为 H-H 区域.

### 3 讨论

对比以全国为整体的省域尺度研究和本研究,两者差异较大. 从全局自相关看,不同研究者得出的全国二氧化碳排放 Moran 指数不同,如马军杰等<sup>[23]</sup>得出的全局 Moran 指数在[0.08, 0.33]区间(1990~2006年);郑长德等<sup>[19]</sup>得出的全局 Moran 指数在[0.16, 0.18]区间(2005~2008年);龙家勇<sup>[17]</sup>得出的全局 Moran 指数在[0.13, 0.20]区间(2000~2008年);Chuai 等<sup>[16]</sup>得出的全局 Moran 指数在 0.20 以上(1997~2009年);蔡博峰<sup>[21]</sup>得出 2008 年的全局 Moran 指数为 0.27. 总的来说,全国二氧化碳排放具有比京津冀都市圈二氧化碳排放更强的正空间自相关性,聚集效应更强. 从局部自相关看,Chuai 等<sup>[16]</sup>的研究指出,北京、天津两地不存在显著自相关性,河北属于 H-H 区域,而马军杰等<sup>[23]</sup>探测出北京、天津为 L-H 区域,河北属于 H-H 区域. 但县域尺度的京津冀都市圈研究中,北京同时存在 H-H 和 L-H 区域,天津存在 H-H 区域并有所转变,河北大部分地区属 L-L 或不显著地区. 产生差异的原因可能有两点,一是研究尺度不同、空间依赖对象不同导致自相关性不同;二是精度差异,省域尺度的研究对区域二氧化碳排放空间特征的探测情况不理想.

### 4 结论

(1)1990~2009年,京津冀都市圈的二氧化碳排放量增速逐年加快,成多点发散式增长. 都市圈中 10 市具有三类变化趋势:中低速增长,初始排放量大,后期维持高排放;高速增长,初期中等排放,后期高排放;中高速增长,初期低排放,后期维持较低排放.

(2)京津冀都市圈的二氧化碳排放格局呈现明显的聚集现象. 如以北京中 6 区为中心的二氧化碳排放,呈现较明显的“H-H 中心、L-H、L-L”分层聚集现象. 京津冀都市圈的二氧化碳排放聚集效应经历了缓慢减弱再缓慢增强的过程. 1990~2009 年的

局部空间自相关性则呈现了 4 种类型的变化:基本保持不变,空间自相关性增强或减弱和空间自相关性转变. 排放高值区域由 1990 年的北京-天津“双中心”发展为 2009 年的北京-天津-石家庄-唐山“四中心”,低值区域变化较小.

(3)北京、天津、石家庄、唐山在后期都属高值中心,但其二氧化碳排放空间自相关演变过程并不相同,可指导二氧化碳减排规划的制定. 北京、天津处于较发达地区,不仅对中心区域,还应对周边区县加强其减排力度,并加快节能减排技术的扩散,发挥其技术优势;天津的二氧化碳排放控制较好,在技术扩散等负向因素上必有北京可以借鉴的地方;石家庄、唐山地区处于快速发展阶段,在接受较多的资源、产业等的同时需要衡量自身承载力,合理规划布局,加强节能减排的技术引进,合力控制二氧化碳排放增长.

(4)将比较统计地图和空间自相关分析结合可以对二氧化碳排放的空间格局及其演变进行很好的诠释. 比较统计地图中的联接成片的高值区域或低值区域不一定都具有空间自相关性,而 LISA 聚集图可对其进行检验分析,找出具有空间依赖性的区域.

#### 参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: The physical science basis [R]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 张雷. 中国一次能源消费的碳排放区域格局变化[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 1-9.
- [3] 赵雲泰, 黄贤金, 钟大洋, 等. 1999~2007 年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3145-3152.
- [4] Fleming P D, Webber P H. Local and regional greenhouse gas management[J]. Energy Policy, 2004, 32(6): 761-771.
- [5] 张雷, 黄园渐, 李艳梅, 等. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 211-217.
- [6] Odland J. Spatial autocorrelation [M]. California: Sage Publication, 1988. 1-87.
- [7] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 393-400.
- [8] Anselin L. The future of spatial analysis in the social sciences [J]. Geographic Information Sciences, 1999, 5(2): 67-76.
- [9] Goodchild M F, Anselin L, Appelbaum R P, et al. Toward spatially integrated social science [J]. International Regional Science Review, 2000, 23(2): 139-159.
- [10] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence [J]. Ecological Monographs, 1992, 62(2): 277-314.
- [11] Longley P, Batty M. Spatial analysis: modelling in a GIS environment[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

- [12] Dormann C F, McPherson J M, Araújo M B, *et al.* Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review [J]. *Ecography*, 2007, **30** (5): 609-628.
- [13] Zhou Y Y, Gurney K R. Spatial relationships of sector-specific fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions in the United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, **25** (3): GB3002.
- [14] Antczak E, Suchecka J. Application of spatial panel autoregressive models to sustainable development [J]. *Acta Universitatis Lodzianis, Folia Oeconomica*, 2011, **252**: 21-44.
- [15] Huang B, Meng L. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in urban China: A spatio-temporal perspective [J]. *Applied Geography*, 2013, **40**: 21-29.
- [16] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, *et al.* Spatial econometric analysis of carbon emissions from energy consumption in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, **22** (4): 630-642.
- [17] 龙家勇, 吴承祯, 洪伟, 等. 中国省域二氧化碳排放量的空间自相关分析[J]. *生态经济*, 2011, (10): 49-53.
- [18] Su F L, Song B Y. Spatial econometric analysis of carbon consumption of Chinese Provinces [A]. In: *Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference [C]*. Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 1-4.
- [19] 郑长德, 刘帅. 基于空间计量经济学的碳排放与经济增长分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, **21** (5): 80-86.
- [20] Chen Z, Lao S Q, You J X, *et al.* Study on spatial panel analysis of inter-provincial carbon emissions based on STIRPAT model in China [A]. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA) [C]*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 535-538.
- [21] 蔡博峰. 基于 0.1° 网格的中国城市 CO<sub>2</sub> 排放特征分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, **22** (10): 151-157.
- [22] Ma J J, Liu X, You J X, *et al.* Spatial econometric analysis of China's provincial CO<sub>2</sub> emissions [A]. In: *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization [C]*. Sanya, Hainan: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 452-456.
- [23] 马军杰, 陈震, 尤建新. 省域一次能源 CO<sub>2</sub> 排放的空间计量经济分析 [J]. *技术经济*, 2010, **29** (12): 62-67.
- [24] 姚奕, 倪勤. 中国地区碳强度与 FDI 的空间计量分析——基于空排间面板模型的实证研究 [J]. *经济地理*, 2011, **31** (9): 1432-1438.
- [25] Cole M A, Elliott R J R, Okubo T, *et al.* The carbon dioxide emissions of firms: A spatial analysis [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2012, **65** (2): 290-309.
- [26] 周生贤. 国务院关于大气污染防治工作进展情况的报告 [R]. 中华人民共和国环境保护部, 2009. 1-3.
- [27] 董锁成, 陶澍, 杨旺舟, 等. 气候变化对我国中西部地区城市群的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, **25** (2): 72-76.
- [28] 汝信, 陆学艺, 李培林, 等. 社会蓝皮书: 2012 年中国社会形势分析与预测 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2011. 99-125.
- [29] United Nations Department of Economic and Social Affairs. World urbanization prospects. The 2009 Revision. Highlights [R]. Population Division, United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York, NY, USA, 2010. 1-47.
- [30] Dietz T, Rosa E A. Effects of population and affluence on CO<sub>2</sub> emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, **94** (1): 175-179.
- [31] Shi A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: evidence from pooled cross-country data [J]. *Ecological Economics*, 2003, **44** (1): 29-42.
- [32] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC Third assessment report [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1-1032.
- [33] Halmann M M, Steinberg M. Greenhouse gas carbon dioxide mitigation: science and technology [M]. Cleveland, Ohio: Chemical Rubber Company Press, 1999. 1-568.
- [34] Marland G, Rotty R M, Treat N L. CO<sub>2</sub> from fossil fuel burning: Global distribution of emissions [J]. *Tellus. Series B, Chemical and Physical Meteorology*, 1985, **37B** (4-5): 243-258.
- [35] Andres R J, Marland G, Fung I, *et al.* A 1° × 1° distribution of carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture, 1950-1990 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (3): 419-429.
- [36] Peylin P, Houweling S, Krol M C, *et al.* Importance of fossil fuel emission uncertainties over Europe for CO<sub>2</sub> modeling: model intercomparison [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2009, **9** (2): 7457-7503.
- [37] Van Aardenne J A, Dentener F J, Olivier J G J, *et al.* The EDGAR 3.2 fast track 2000 dataset (32FT2000) [DB/OL]. [http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/edgar/emission\\_data/edgar\\_32ft2000/index-2.html](http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/edgar/emission_data/edgar_32ft2000/index-2.html), 2010. 1-12.
- [38] Pregger T, Scholz Y, Friedrich R. Documentation of the anthropogenic GHG emission data for Europe provided in the frame of Carbo Europe GHG and CarboEurope IP [R]. Final Report. Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy, University of Stuttgart, 2007. 1-37.
- [39] Ciais P, Paris J D, Marland G, *et al.* The European carbon balance. Part 1: fossil fuel emissions [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16** (5): 1395-1408.
- [40] 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.
- [41] 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]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2011. 1-120.
- [42] Moran P A P. The interpretation of statistical maps [J]. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 1948, **10** (2): 243-2511.
- [43] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena [J].

- Biometrika, 1950, **37**(1-2): 17-23.
- [44] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping[J]. The Incorporated Statistician, 1954, **5**(3): 115-127, 129-146.
- [45] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, **27**(2): 93-115.
- [46] Anselin L. The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association [A]. In: Spatial Analytical Perspectives on GIS [M]. London: Taylor & Francis, 1996. 111-125.
- [47] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application [J]. Geographical Analysis, 1995, **27**(4): 286-306.
- [48] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 1992, **24**(3): 189-206.
- [49] Gastner M T, Newman M E J. Diffusion-based method for producing density-equalizing maps [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, **101**(20): 7499-7504.
- [50] 卢愿清, 史军. 中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2528-2532.
- [51] 樊艳云. 北京市产业结构变动对能源消费影响研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010. 1-65.
- [52] 刘春兰, 陈操操, 陈群, 等. 1997年至2007年北京市二氧化碳排放变化机理研究[J]. 资源科学, 2010, **32**(2): 235-241.
- [53] 郭彩霞, 邵超峰, 鞠美庭. 天津市工业能源消费碳排放量核算及影响因素分解[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(2): 232-239.
- [54] 张凯. 京津冀地区产业协调发展研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [55] 郭文. 三大经济区域产业结构与经济增长关系的实证研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [56] 孙久文, 邓慧慧. 京津冀区域趋同的实证分析[J]. 地理与地理信息科学, 2006, **22**(5): 60-63.
- [57] 武剑. 基于ESDA和CSDA的京津冀区域经济空间结构优化分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [58] 穆岩. 基于区域经济发展的京津唐产业结构调整研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [59] 张子麟, 武建奇. 京津冀地区产业协作存在的问题与发展方向[J]. 经济与管理, 2007, **21**(2): 8-12.
- [60] 河北省统计局. 新河北60年[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [61] 郭志军, 李飞, 覃巍. 中国产业结构变动对能源消费影响的协整分析[J]. 工业技术经济, 2007, **26**(11): 97-101.
- [62] 徐彬. 空间权重矩阵对Moran's I指数影响的模拟分析[D]. 南京: 南京师范大学, 2007. 1-36.
- [63] 董冠鹏, 郭腾云, 马静. 京津冀都市区经济增长空间分异的GIS分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, **12**(6): 797-805.
- [64] 孙铁山, 李国平, 卢明华. 基于区域密度函数的区域空间结构与增长模式研究——以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学, 2009, **29**(4): 500-507.
- [65] 孙铁山, 李国平, 卢明华. 京津冀都市圈人口集聚与扩散及其影响因素——基于区域密度函数的实证研究[J]. 地理学报, 2009, **64**(8): 956-966.
- [66] 马国霞, 田玉军, 石勇. 京津冀都市圈经济增长的空间极化及其模拟研究[J]. 经济地理, 2010, **30**(2): 177-182.
- [67] 徐勇, 马国霞, 郭腾云. 区域经济增长时空分异模拟方法——以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学, 2007, **27**(6): 749-755.

## CONTENTS

An Assessment of PM <sub>2.5</sub> Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days .....	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei ( 1 )
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> at Changbai Mountain .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> ( 9 )
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility .....	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> ( 15 )
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation .....	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> ( 22 )
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China .....	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> ( 30 )
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China .....	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> ( 35 )
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou .....	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> ( 41 )
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources .....	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> ( 46 )
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China .....	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> ( 53 )
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010 .....	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> ( 60 )
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River .....	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> ( 66 )
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> ( 73 )
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou .....	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> ( 79 )
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone .....	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 85 )
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO <sub>2</sub> Release in Arable Soil .....	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> ( 93 )
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea .....	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> ( 100 )
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China .....	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> ( 108 )
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler .....	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> ( 117 )
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater .....	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> ( 123 )
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls .....	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> ( 131 )
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin .....	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> ( 143 )
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics .....	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, <i>et al.</i> ( 150 )
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea .....	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling ( 157 )
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution <sup>31</sup> P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments .....	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> ( 163 )
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming ( 171 )
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges .....	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> ( 179 )
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu .....	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 186 )
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake .....	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> ( 194 )
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra .....	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> ( 202 )
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process .....	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> ( 208 )
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge .....	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> ( 214 )
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate .....	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen ( 221 )
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields .....	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> ( 227 )
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment .....	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> ( 233 )
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China .....	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> ( 240 )
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil .....	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> ( 248 )
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution .....	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> ( 254 )
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants .....	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang ( 263 )
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake .....	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> ( 271 )
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria .....	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> ( 279 )
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria .....	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> ( 286 )
Influence of the Coexistence of Zn <sup>2+</sup> on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> ( 292 )
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results .....	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> ( 299 )
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model .....	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> ( 304 )
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH .....	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> ( 313 )
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate .....	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> ( 319 )
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains .....	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> ( 327 )
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China .....	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua ( 334 )
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo ( 341 )
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer .....	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> ( 348 )
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water .....	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> ( 356 )
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant .....	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 365 )
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N <sub>2</sub> O Catalytic Decomposition .....	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping ( 371 )
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea .....	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 380 )
County Scale Characteristics of CO <sub>2</sub> Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region .....	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> ( 385 )
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application .....	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> ( 394 )

# 《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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