

黄河下游沿岸地市 CO₂排放的时空分异

张金萍^{1,2}, 秦耀辰¹, 张丽君¹, 路超君^{1,3}

(1. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心, 环境与规划学院, 开封 475004;

2. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059;

3. 中国环境科学研究院能源与环境研究室, 北京 100012)

摘要: 地市级尺度的碳排放结构演变与区域差异分析对通过技术学习与知识流动短期内抑制碳排放的快速增长具有重要意义。以地市级行政区作为基本空间单元, 对黄河下游沿岸区、两大子区及 21 地市化石能源与水泥工业生产过程排放的 CO₂ 进行科学核算, 发现 CO₂ 排放量变化于 2000 年的 364.12~4426.95 万 t 至 2009 年的 1238.98~10411.91 万 t, 呈现出典型的“S 型”增长特征, 但不同尺度区域排放结构的时空差异显著。2006 年以来, 工业化进程较快的区域水泥排碳比例有显著增长, 产业结构优化策略促使少数地市水泥排碳比例有所下降。CO₂ 排放强度与人均排放量的变动符合碳排放 EKC 曲线关系, 但时空分异特征并不一致。排放强度的全区总体差异较为合理, 而人均排放量的区域差异偏大, 从而为涓滴效应的加速作用创造了空间。地区内差异分别为两指标全区总体差异变动的主导因素, 整体上, 中原区内地市间差异对两指标全区差异变动的贡献更大。

关键词: 地市级 CO₂ 排放; 排放结构; Theil 系数; 区域差异; 黄河下游沿岸区

文章编号: 1000-0585(2012)12-2229-11

1 引言

我国区域经济发展的较大不均衡性^[1,2] 导致碳排放呈现出显著的区域差异^[3,4]。然而, 目前碳排放的国内研究多是从国家和省域层面对能源碳排放的核算及分析^[5~8], 地市级碳排放分析并没有得到足够重视。从决策者的角度看, 地市级区域的碳减排是国家实现 2020 年碳排放目标至关重要的一环, 而国家和省域层面的研究掩盖了地市级层面及更小尺度的碳排放时空分异特征, 不利于国家碳减排目标的最终分解和制定有针对性的减排政策。以 LMDI 为代表的指标分解分析^[9,10] 发现, 经济产出、能源强度和产业结构变化是对碳排放增长贡献较大的因素, 而能源强度下降又主要通过技术进步与产业内部的结构优化和升级来实现, 从而认为权衡减排与发展的关系^[11], 推进产业结构调整与产业内部结构升级和工艺升级是应该采取的重要举措^[12]。但是短期内, 我国不可能牺牲较快的经济发展速度和实现产业结构的大规模调整, 因此, 进行技术学习, 在区域间推广降碳技术, 通

收稿日期: 2012-05-12; 修订日期: 2012-09-08

基金项目: 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (10JJDZONGHE015); 国家重大科学研究计划 (2012CB955804); 国家自然科学基金资助项目 (41171438, 41201602); 博士后科学基金资助项目 (2012M511108)

作者简介: 张金萍 (1977-), 女, 山东招远人, 博士, 讲师, 主要研究空间分析与区域系统建模。

E-mail: maryzhjp@126.com

通讯作者: 秦耀辰 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展理论、模型与信息系统研究。

E-mail: qinyec@henu.edu.cn

过“涓滴效应”缩小地区间碳排放强度与人均碳排放量的差距,是当前实现区域碳减排的有效途径。黄河下游沿岸区是国家重要的粮食主产区,同时又是黄河三角洲高效生态经济区和中原经济区的结合区。区内 21 地市经济发展水平差异显著,快速城镇化与环境保护之间的矛盾十分突出,总体上面对着强烈的工业化与经济快速增长的诉求。科学核算 2000~2009 年黄河下游沿岸地市 CO_2 排放量,研究全区及各子区、地市等不同层面的 CO_2 排放结构、排放强度与人均排放量的时空分异,对该区转变经济增长方式,实现低碳发展具有重要意义,对制定大尺度区域间平衡和衔接的碳减排政策也具有重要借鉴价值。

2 研究区域界定

以旧孟津作为黄河中下游分界点,“黄河下游沿岸”区域采用黄河下游引黄灌区所覆盖的市域范围(图 1)来界定。这样,黄河下游沿岸区土地总面积 16.39 万 km^2 ,共涉及河南、山东、河北 3 个省份,21 个地级市。该区 2009 年总人口 11174 万,人均 GDP 2.78 万元/人(当年价),以占黄淮海平原 39.2% 的耕地面积生产出了 6347 万 t 粮食,产量占到 43.6% 之多,是黄淮海平原农业生产条件最好的区域。出于研究需要,将黄河下游沿岸区与中原经济区的交集定义为中原区,其余地市划归黄河三角洲区。“十五”、“十一五”期间黄河下游沿岸区工业增加值(均换算为 2005 年可比价)的年增长率分别为 17.9% 和 16%,远高于全国的 9.8% 和 11.4%,其中黄河三角洲区为 18.2% 和 15.4%,而中原区为 17.2% 和 17.3%,可见两区工业化进程正快速推进,将成为拉动未来中部崛起和黄河中下游地区经济增长的强力引擎。然而,黄河下游沿岸地市及各子区人均 GDP、城镇化水平和工业增加值比重等主要经济发展指标均存在较大的区域差异,使以地市为基本空间单元的区域碳排放增长及其空间分异呈现出不同于大尺度研究的特征。

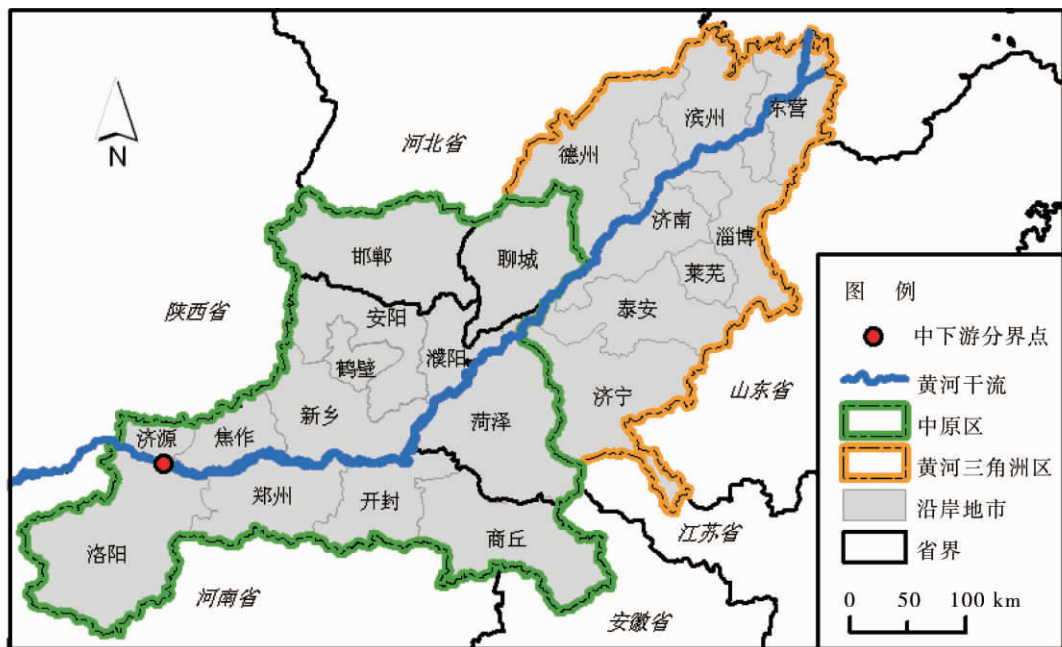


图 1 黄河下游沿岸区域的界定

Fig. 1 Definition of the region along the Lower Yellow River

3 数据来源与研究方法

本文对黄河下游沿岸区 21 地市 2000~2009 年化石能源燃烧和水泥工业生产过程的 CO₂ 排放进行核算, 其余温室气体排放由于数量较少或数据获取困难等原因而暂不考虑。能源消费、GDP、工业增加值、各工业部门产值等数据主要来源于 2001~2010 年的山东、河南、河北 3 省统计年鉴。邯郸市与隶属于河南省的 10 地市水泥产量来自河北、河南 2 省统计年鉴, 隶属于山东省的 10 地市水泥产量来自各地市统计年鉴, 缺失数据取自对应年份的各地市国民经济和社会发展统计公报。年末总人口及非农业人口数据均来自 2001~2010 年的《中国城市统计年鉴》。不同尺度区域的 GDP 与工业增加值均换算为 2005 年的可比价。

3.1 CO₂ 排放核算

3.1.1 化石能源 CO₂ 排放 隶属于山东、河南的 20 地市 2005~2009 年 CO₂ 排放量和邯郸市 2007~2009 年 CO₂ 排放量依据 3 省统计年鉴提供的各地市单位 GDP 能耗值 (t 标准煤/万元), 按公式 (1) 计算。其余年份根据省级能源消费数据进行折算。在折算方法上, Dhakal 按照中国城市人口占所属省区人口的比例折算该城市的能源消费量^[13], 但根据张金萍等的研究, 城市工业能耗所致 CO₂ 排放至少占总能源消费排放量的 70%^[14], 因此仅按人口比例进行折算是不够科学的。本文根据省区能源平衡表, 将能源消费量分解为生活、第一产业、第二产业和第三产业能源消费 4 部分, 以各地市的年末总人口及各次产业生产总值为依据折算 4 部分能源消费数据, 加总得出地市级能源消费量 (万 t 标准煤), 与标准煤折 CO₂ 排放系数相乘换算为 CO₂ 排放量。

$$C_E = E_q \times G_K \times K \quad (1)$$

式中, C_E 为化石能源 CO₂ 排放量, E_q 为单位 GDP 能耗, G_k 为地区生产总值 (GDP), K 为标准煤折 CO₂ 排放系数^[14]。

3.1.2 水泥生产过程 CO₂ 排放 水泥生产的 CO₂ 排放主要源于其原料——水泥熟料的生产。根据 IPCC 的结论, 水泥熟料的碳排放因子为 0.52 (tCO₂/t 熟料)。在无法获取水泥熟料的区域间调入调出数据时, 按照下式估算各地市水泥生产的 CO₂ 排放 C_c :

$$C_c = q \times c \times e_f \quad (2)$$

式中, q 为水泥的总产量; c 为不分型号水泥的综合熟料含量, 取值 75%; e_f 为水泥熟料的碳排放因子。

3.2 CO₂ 排放的区域差异测度

运用加权变异系数、基尼系数、Theil 系数探测黄河下游沿岸区 CO₂ 排放的全局差异, 并通过 Theil 系数 T 与 L 的分解将全局差异解释为黄河三角洲区和中原区地区间和地区内的局域差异, 其结果不但可以相互印证, 而且能够揭示两大地区对 CO₂ 排放区域总体差异贡献的大小及变动过程。

3.2.1 加权变异系数 加权变异系数 CV_g 用于测算在考虑 GDP 差异的情况下, 区域 CO₂ 排放强度或人均 CO₂ 排放量的相对差异, 计算公式为:

$$CV_g = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 (G_i/G)} \quad (3)$$

式中, x_i 为 i 地市 CO₂ 排放强度或人均 CO₂ 排放量, \bar{x} 为全部地市 CO₂ 排放强度或人均 CO₂ 排放量的平均值, G_i/G 为 i 地市 GDP 占全区的比例。 CV_g 值越大, 表示 CO₂ 排放强

度或人均 CO₂ 排放量的区域相对差异越大。

3.2.2 基尼系数 基尼 1912 年提出, 并由 kendall 和 stuart 发展的基尼相对平均差法常用来度量某一指标的区域差异及均衡程度。这一直观的系数 Gini 用公式可表示为:

$$Gini = \frac{\sum_i \sum_j |x_i - x_j|}{2n^2 \bar{x}} \quad (4)$$

式中, x_i 、 x_j 、 \bar{x} 含义同式 (3), n 为地市数目, 即 $n=21$ 。Gini 值越大, 表示 CO₂ 排放强度或人均 CO₂ 排放量的区域相对差异越大, 其随时间变动的趋势可以反映各地市 CO₂ 排放强度或人均 CO₂ 排放量的差异性, 是增大还是缩小, 并作为趋同与否的判据。

3.2.3 Theil 系数 Theil 系数用来衡量 CO₂ 排放区域差异的优势在于, 它可以揭示指标的区内差异和区间差异对全区总体差异的贡献。Theil 系数 T 指标以 GDP 比重加权计算, L 指标则以人口比重加权计算。Theil 系数越大, CO₂ 排放的区域差异就越大。本文以地市级行政单元为基本空间单元, 对 Theil 系数 T 和 L 进行分解, 从而将黄河下游沿岸区的 CO₂ 排放总体差异分解为黄河三角洲区和中原区两大地区之间的差异和两大地区内各地市之间的差异。表示全区总体差异的 Theil 系数 T_p [15]:

$$T_p = \sum_i \sum_j \left(\frac{G_{ij}}{G}\right) \ln \frac{C_{ij}/C}{G_{ij}/G} = \sum_i \sum_j \left(\frac{G_{ij}}{G}\right) \ln \frac{\bar{E}}{E_{ij}} \quad (5)$$

式中, G_{ij} 为第 i 地区第 j 地市的 GDP, G 为全区所有地市的 GDP 之和, C_{ij} 为第 i 地区第 j 地市的 CO₂ 排放量, C 为全区所有地市的 CO₂ 排放量之和, E_{ij} 为第 i 地区第 j 地市的 CO₂ 排放强度, \bar{E} 全区所有地市 CO₂ 排放强度的平均值。因此, 用于 CO₂ 排放量区域差异测度的 Theil 系数 T 实际上表示的是 CO₂ 排放强度的区域差异性。

定义第 i 地区的地市际差异为:

$$T_{pi} = \sum_j \left(\frac{G_{ij}}{G_i}\right) \ln \frac{G_{ij}/G_i}{C_{ij}/C_i}$$

则式 (5) 中的 Theil 系数 T_p 可以分解为:

$$T_p = \sum_i \left(\frac{G_i}{G}\right) T_{pi} + \sum_i \left(\frac{G_i}{G}\right) \ln \frac{G_i/G}{C_i/C} = \sum_i \left(\frac{G_i}{G}\right) T_{pi} + T_{BR} = T_{WR} + T_{BR} \quad (6)$$

式中, G_i 为第 i 地区所有地市的 GDP 之和, C_i 为第 i 地区所有地市的 CO₂ 排放量之和, T_{WR} 为地区内差异, T_{BR} 为地区间差异。

表示全区总体差异的 Theil 系数 L_p [16]:

$$L_p = \sum_i \sum_j \left(\frac{P_{ij}}{P}\right) \ln \frac{P_{ij}/P}{C_{ij}/C} = \sum_i \sum_j \left(\frac{P_{ij}}{P}\right) \ln \frac{\bar{R}}{R_{ij}} \quad (7)$$

式中, P_{ij} 为第 i 地区第 j 地市的人口, P 为全区所有地市的人口之和, R_{ij} 为第 i 地区第 j 地市的人均 CO₂ 排放量, \bar{R} 全区所有地市人均 CO₂ 排放量的平均值。因此, 用于 CO₂ 排放量区域差异测度的 Theil 系数 L 实际上表示的是人均 CO₂ 排放量的区域差异性。

类似地, 可以将 L_p 分解为地区内差异 L_{WR} 和地区间差异 L_{BR} 两个组分:

$$L_p = \sum_i \left(\frac{P_i}{P}\right) L_{pi} + \sum_i \left(\frac{P_i}{P}\right) \ln \frac{P_i/P}{C_i/C} = \sum_i \left(\frac{P_i}{P}\right) L_{pi} + L_{BR} = L_{WR} + L_{BR} \quad (8)$$

3.3 不确定性分析

计算结果的不确定性主要受化石能源与 CO₂ 排放系数的影响。邯郸市 2000~2006 年以及其余 20 地市 2000~2004 年化石能源消费数据根据省级分行业能源消费量及其人口和分行业产值折算得到, 与真实值存在误差, 因此计算出的能源消费总量受到人口、地区生

产总值规模与结构的综合影响。而水泥的 CO₂ 排放量计算结果也受到各地市水泥生产规模的影响, 且因数据获取限制, 不能反映各地市在生产技术方面的差异。受当前数据、资料限制, 未能考虑各地市能源结构差异及变化对化石能源 CO₂ 排放的影响。采用的标准煤折 CO₂ 系数及其余 CO₂ 排放因子在研究期内均设为定数, 没有考虑因技术进步带来的排放系数变化。统计数据自身的质量、不同年份统计口径的变更也是不确定性产生的因素。

4 结果分析

4.1 CO₂ 排放量及排放结构

4.1.1 CO₂ 排放量变化 2000~2009 年, 黄河下游沿岸区 CO₂ 排放量增长了 3.04 倍 (图 2)。2006 年起, 中原区工业生产总产值增速超越黄河三角洲区, 致使其 CO₂ 排放的年增长率也明显超出, 成为“十一五”期间驱动全区 CO₂ 排放的主要力量。地市级尺度上, 21 地市 CO₂ 排放量逐年递增 (图 3), 分别变化于 2000 年的 364.12 万 t~4426.95 万 t 至 2009 年的 1238.98 万 t~10411.91 万 t, 总体自 2002 年起加速增长, 2006 年后增速放缓, 呈现出明显的“S 型”增长特征, 但区域差异显著。重工业城市邯郸的 CO₂ 排放基数大, 近几年钢铁、建材等高耗能行业快速发展, CO₂ 排放大幅攀升; 济南、淄博、郑州、济宁 4 地市主要由工业拉动, CO₂ 排放基数虽略低, 但 2002~2006 年间增速加快, 之后得到有效控制, 这 5 地市位于“第一阵营”。洛阳、安阳等 10 地市 CO₂ 排放基数较低, 但 2002 年起均保持着较快的增速, 位于“第二阵营”。商丘、濮阳等 6 地市是 CO₂ 排放的“第三阵营”, 总量低, 增速慢是其主要特征。在国家投资导向型经济增长方式驱动下, 2002~2005 年各地市基础设施建设和固定资产投资明显加快, 引致 CO₂ 排放加速增长, 总体上虽然与更大尺度的研究结论相吻合, 但第二产业的快速发展与投资额度的加大在第一、二阵营中工业基础较好的地市表现更为突出, 宏观投资过热现象在各地市表现的不均衡性致使 2002 年后 CO₂ 排放总量的地市际差异显著增大。

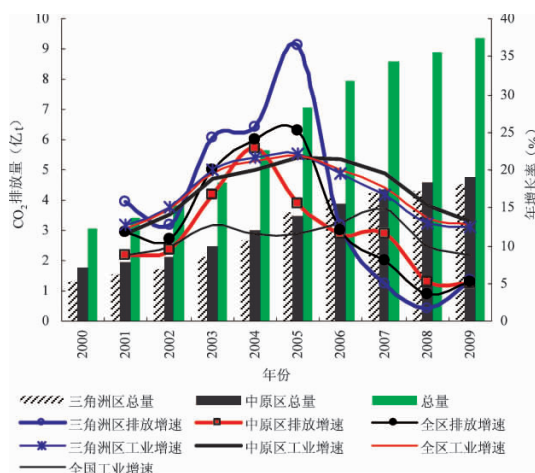


图 2 全区及各子区 CO₂ 排放量及增速变化

Fig. 2 Changes of CO₂ emissions and the growth rates in the whole region and two subregion

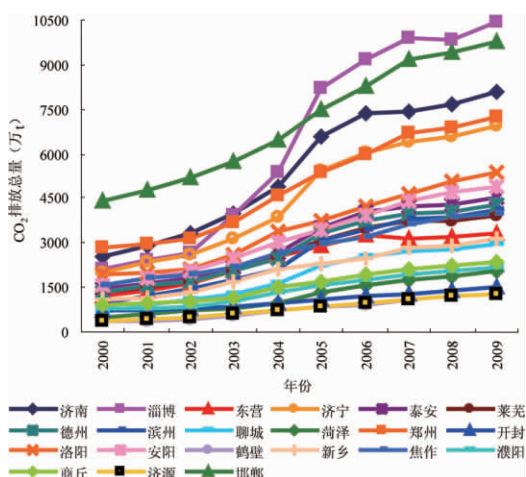


图 3 21 地市 CO₂ 排放量变化

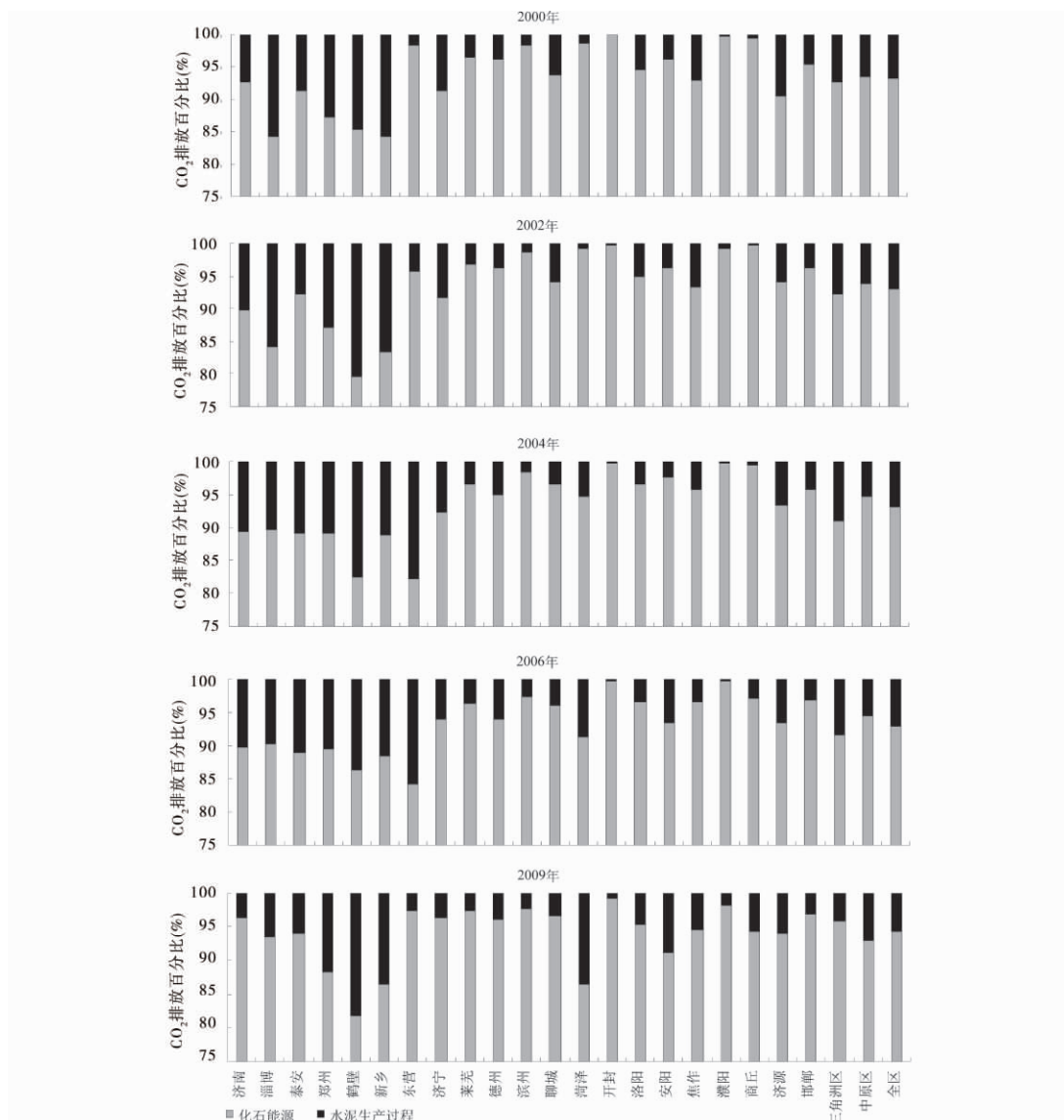
Fig. 3 Changes of CO₂ emissions in 21 cities

4.1.2 CO₂排放结构变化 根据总体变动趋势,选取2000年、2002年、2004年、2006年和2009年5个时间断面分析黄河下游沿岸区CO₂排放结构的演变过程(图4)。地市级尺度上,化石能源作为CO₂的主要排放源,其比重至少占79.6%,但水泥生产过程的CO₂排放比重存在较大的区域差异:三角洲区各地市经历了“减小—增大—减小”或“增大—减小”的过程,而中原区大部分地市则总体上经历了“减小—增大”的过程。郑州、鹤壁、新乡、淄博、济南等水泥工业基础雄厚的地市,水泥生产排放比重大部分年份接近或超过10%,但济南和淄博等通过淘汰落后产能,关停并转小水泥厂等措施,2007~2009年水泥生产排放大幅下降(济南降至不足2006年的一半,而郑州取代淄博跃居第一位)。菏泽城乡建设规模逐年加大,带动水泥工业迅速发展,水泥生产排放比重总体上不断攀升,至2009年达278.4万t(全区平均252万t),占总排放量的13.5%。

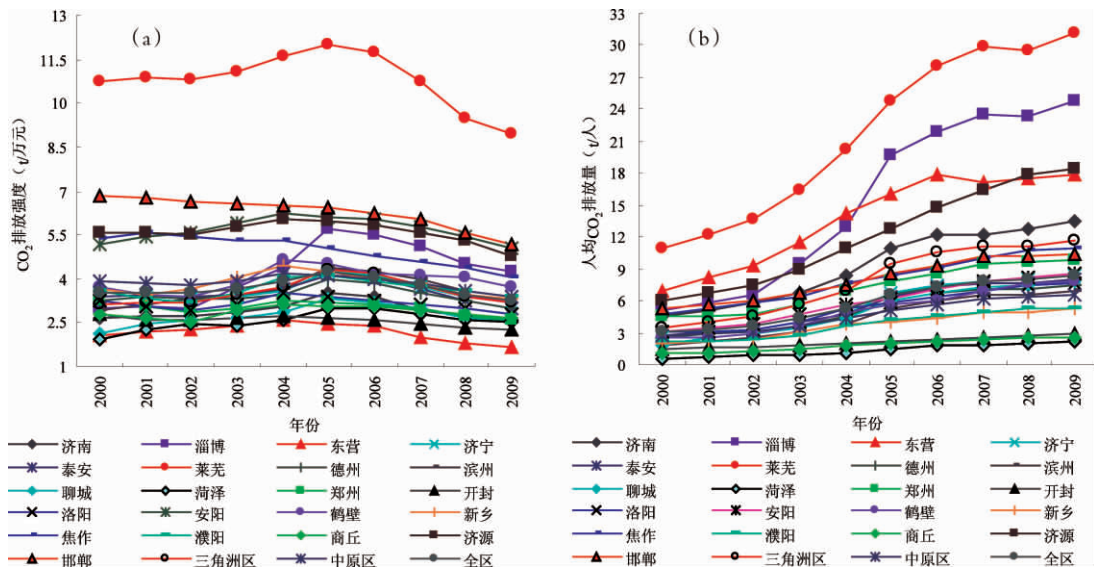
2005年后三角洲区各地市第二产业内部结构优化和工艺升级以及第三产业发展等调控策略直接导致CO₂排放结构发生明显变化。比较典型的济南市,其第二产业增加值占GDP的比重从2000年的42%增至2006年的46%,至2009年回落至43%,同期包含水泥工业的非金属矿物制品业增加值占工业增加值的比重则由6%增至8%,再回落至5%,部分说明产业结构升级对排放结构变动具有较为显著的影响。中原区多数地市重工业在GDP中的比重相对三角洲区增加更为迅速,快速推进的城乡建设也使水泥生产排放比重明显增加。因而,从地区尺度看,两大地区的CO₂排放结构变动过程截然相反:黄河三角洲区水泥工业生产排放比例先增大后减小,至2004年达最大值8.9%,2009年降至4.3%;而中原区先减小后增大,至2004年降至最小值5.3%,2009年升至7.0%。全区尺度则表现为水泥工业生产排放比例在2006年前基本不变,之后有所下降的态势。地市级CO₂排放结构分析揭示了大尺度研究所掩盖的重要时空分异特征,主要体现在水泥工业生产排放比例及排放量的地市际差异悬殊(2009年变动于开封的0.7%与鹤壁的18.2%之间),地市、地区及全区CO₂排放结构存在明显的尺度效应。

4.2 CO₂排放强度与人均CO₂排放量的区域差异

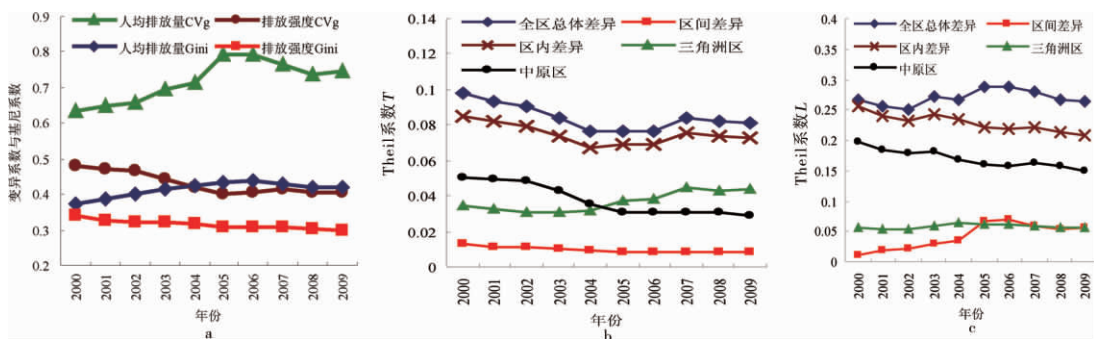
4.2.1 地市总体差异变动趋势 黄河下游沿岸区CO₂排放强度(图5a)在2005年前后达到极值,2006年后不断下降,呈现出典型的“倒U型”趋势,体现了产业结构调整和技术进步的重要作用。人均CO₂排放量(图5b)2004~2007年快速增长,2007年后增速明显放缓,呈现出明显的“S型”增长特征。CO₂排放强度和人均CO₂排放量的曲线特征符合王铮等对碳排放EKC曲线峰值出现顺序的论证^[17],但两指标的区域差异十分明显。人口较少的莱芜市GDP主要由钢铁工业驱动,能源消费量大但经济总量较低,排放强度与人均量在全区中均显得十分突兀。邯郸、安阳、济源、焦作、淄博GDP总量较高,但钢铁、水泥等高碳排放工业较为发达,是CO₂排放强度的“第二阵营”。其中邯郸、焦作自2001年起不断改进重工业生产技术和工艺,实现了排放强度的不断下降,而淄博2005年后能源消耗大幅增长,加上水泥工业排放位居全区第二,总体位于“第二阵营”。鹤壁、新乡等15地市CO₂排放强度变化于2000年的1.90t/万元~3.89t/万元,2005年增至2.48t/万元~5.73t/万元,到2009年降为1.63t/万元~4.24t/万元,归为“第三阵营”。从人均量看,淄博、东营、济源、济南4地市排放量增速远快于人口,位于“第二阵营”,其中淄博应警惕自2004以来的人均量快速增长。焦作、邯郸等16地市人均CO₂排放量变化于2000年的0.54t/万人~5.28t/人,2009年增至2.19t/万人~11.74t/人,总体处于“第三阵营”,其中聊城、菏泽、滨州等人均量虽不高,但10年间差异放大至约4倍。

图 4 黄河下游沿岸区 CO₂ 排放结构变动Fig. 4 CO₂ emission structure in the region along the Lower Yellow River

4.2.2 区域相对差异变动趋势 从两大地区看，中原区 CO₂ 排放强度 10 年间均略高于黄河三角洲区，说明中原区经济发展对化石能源和高碳排放工业有着更为强烈的依赖；人均量则相反，黄河三角洲区由 2000 年的 3.52t/人大增至 2009 年的 11.74t/人，而中原区人口基数普遍较大且增速快，人均量由 2.72t/人增至 6.57t/人。综合加权变异系数和基尼系数的计算结果（图 6a），发现 2005 年前 CO₂ 排放强度的地市间差异不断缩小，之后变动不大；人均 CO₂ 排放量不同，其地市间差异在 2006 年前不断放大，但 2007 年后呈趋同之势。与基尼系数相比，用加权变异系数表征的地市间差异变化趋势更为明显。但基尼系数有其优势，若按照国际惯例以该指标值 0.4 作为区域差异偏大或偏小的警戒线，则 CO₂

图5 CO₂排放强度与人均CO₂排放量变化趋势Fig 5 Changes of the CO₂ intensity and CO₂ emissions per capita

排放强度 Gini 的变化介于 0.30~0.34 之间,表示地市间差异比较合理,而人均 CO₂ 排放量 Gini 的变化则介于 0.37~0.44 之间,表示差异由较为合理过渡到略有偏大。比较改革开放以来中国碳排放强度的变动曲线^[18],并结合基尼系数与变异系数所表达的信息,可以认为当前决策者应主动采取措施去推动地市之间技术转移、扩散和外溢效应加速作用,利用较为适度的区域差异进一步降低 CO₂ 排放强度,抑制人均 CO₂ 排放量的过快增长,从而最大限度的释放区域碳减排潜力。

图6 CO₂排放强度与人均排放量的区域差异Fig 6 Regional differences of the CO₂ intensity and CO₂ emissions per capita

4.2.3 CO₂排放区域差异的地区分解 Theil 系数(图 6b、图 6c)与加权变异系数、基尼系数所反映的全区总体差异变动较为吻合。表征 CO₂ 排放强度差异的 Theil 系数 T_p 变化于 0.0765~0.0982 之间。两大地区内差异 T_{WR} 是主导全区差异变化的绝对因素,其贡献从 86.6% 放大到 89.7%,远大于 T_{BR} 的贡献。进一步计算 Kendall's tau τ_b 相关系数,

并以显著性水平 $\alpha=0.05$ 进行双侧检验,发现全区与地区间和地区内差异的相关均达到显著性要求,但全区与地区内差异的变动趋势更为相符 ($r=0.956$)。从地区内差异的组成来看,中原区地市间差异的变化与全区总体差异的变动较为吻合 ($r=0.511$,而黄河三角洲区差异与 T_p 的相关未能通过显著性检验),但该差异正不断缩小,黄河三角洲区则相反,“十一五”期间地市间差异有所放大。从而,10 年来全区 CO₂ 排放强度的空间差异由两大地区内的差异所主导,且两大地区内地市间差异的不均衡发展也不容忽视。2005 年前,中原区各地市间的差异对全区总体差异有着显著影响。2006 年起,黄河三角洲区各地市之间发展不平衡,经济发展水平与 CO₂ 排放量均存在较大的变异,对全区总体差异的贡献较大,而中原区地市间经济发展相对均衡,对全区总体差异的影响相对较小。

表征人均 CO₂ 排放量差异的 Theil 系数 L_p 变化于 0.2520~0.2877 之间。两大地区内差异 L_{WR} 的贡献从 95.9% 逐步降低至 78.7%,仍远大于 L_{BR} 的贡献,说明 L_{WR} 是造成黄河下游沿岸区人均 CO₂ 排放量空间差异的主要原因。通过 Kendall's tau $_b$ 相关分析 ($\alpha=0.05$),发现 L_p 与 L_{BR} 的相关较为显著 ($r=0.600$, L_p 与 L_{WR} 的相关未能通过显著性检验),表明 L_{BR} 虽然较小,但其逐渐放大的趋势值得注意。从 L_{WR} 的组成来看,中原区地市间差异与 L_{WR} 高度相关 ($r=0.911$,而黄河三角洲区差异与 T_{WR} 的相关未能通过显著性检验),其对 L_{WR} 的贡献率也表明,中原区与黄河下游沿岸区地市间差异的距离十分显著。总的来说,两大地区内地市差异的不均衡发展是 21 世纪以来全区人均 CO₂ 排放量空间差异的动因。其中,中原区各地市人口众多,但地市间差异较大,CO₂ 排放量亦存在一定的变异,综合而言对全区总体差异的贡献十分显著,而黄河三角洲区各地市人口较少,地市间差异也不大,从而对全区总体差异的影响相对较小。

5 结论与讨论

地市级尺度的 CO₂ 排放核算、结构演变与区域差异分析揭示了大尺度研究所掩盖的重要时空分异特征。合理利用 CO₂ 排放指标存在的地理“势能”,以地市间以及地区(经济区)间技术学习与知识流动等方式,短期内降低 CO₂ 排放强度,抑制人均 CO₂ 排放的快速增长,对制定有针对性的温室气体减排目标和政策具有重要意义。本文结论如下:

(1) 2000~2009 年间,黄河下游沿岸区、黄河三角洲区、中原区及 21 地市 CO₂ 排放量呈现出典型的“S 型”增长特征,但不同尺度区域 CO₂ 排放结构演变存在显著差异。2002~2005 年国家投资导向型经济增长方式使地市间 CO₂ 排放差异明显放大,从而将 21 地市分化为总量和增速不同的三大阵营。化石能源是 CO₂ 排放的主要来源,但水泥生产过程的 CO₂ 排放比重及排放量存在较大的区域差异。整体上,2005 年前黄河三角洲区各地市水泥生产排放比重有所上升,但之后逐渐降低;中原区大多数地市 2005 年后城乡建设规模不断扩大,水泥生产排放比重明显增加。“十一五”期间,济南、淄博等地市 CO₂ 排放强度及水泥工业生产排放比例迅速下降,产业结构优化和第二产业内部工艺升级的降碳效应十分显著。地市、地区及全区 CO₂ 排放结构存在明显的尺度效应,不同尺度区域排放结构的不同变动趋势体现了快速工业化和城市化推动下的 CO₂ 排放结构特征,工业化进程加速推进的中原区尤其典型,不仅水泥工业生产排放比例逐渐增加,2006 年 CO₂ 排放增速更是超越黄河三角洲区,成为全区 CO₂ 排放变动的主导力量。

(2) CO₂ 排放强度与人均 CO₂ 排放量的变动总体符合碳排放 EKC 曲线关系,但时空分异特征并不相同。各地市排放强度呈现“倒 U 型”趋势,而人均量为“S 型”增长过

程。从全区总体差异的变动看,两指标加权变异系数、基尼系数与 Theil 系数的结论十分吻合,均说明 CO₂ 排放强度的地市间差异虽然总体不断缩小,但较为合理;人均 CO₂ 排放量的地市间差异呈现出先放大后趋同的特征,但整体上超越了“差异偏大”的警戒线。Theil 系数 T 与 L 的地区分解表明,研究期内 CO₂ 排放强度与人均 CO₂ 排放量全区总体差异变动均由两大地区内的差异所主导。对 CO₂ 排放强度而言,两大地区内地市间差异存在明显的不均衡发展现象,总体上中原区地市间差异的变化与全区总体差异的变动较为吻合,但 2006 年之后黄河三角洲区地市间的差异不断放大,超越中原区成为全区总体差异的主要驱动力。对人均 CO₂ 排放量而言,中原区各地市人口与 CO₂ 排放量的不均衡增长是影响全区总体差异变动的主要原因。因此,黄河下游沿岸这一快速工业化和城市化地区短期内需要制定两大地区内各地市间平衡和衔接的经济发展政策和碳减排策略,推动涓滴效应加速作用,继续降低排放强度,促使人均量尽早达到峰值,自下而上的实现不同尺度区域的低碳化发展。

限于数据获取难度,本文仅对化石能源燃烧和水泥工业生产过程的 CO₂ 排放进行了计算,其余工业生产过程、林业及土地利用变化带来的 CO₂ 排放(吸收)未能考虑在内,这可能使部分地市 CO₂ 排放量的计算值存在偏差,实现地市尺度碳排放更为全面的核算和时空分析将是下一步要进行的重要工作。

参考文献:

- [1] Fleisher B, Li H Z, Zhao M Q. Human capital, economic growth, and regional inequality in China. *Journal of Development Economics*, 2010, 92 (2): 215~231.
- [2] 徐建华,鲁凤,苏方林,等. 中国区域经济差异的时空尺度分析. *地理研究*, 2005, 24(1): 57~68.
- [3] Tang H L, Wu Z J. Researches on the regional carbon emissions reduction and policies in China. *Energy Procedia*, 2011, 5: 1864~1868.
- [4] Yi W J, Zou L L, Guo J, *et al.* How can China reach its CO₂ intensity reduction targets by 2020? A regional allocation based on equity and development. *Energy Policy*, 2011, 39(5): 2407~2415.
- [5] Chen W Y, Wu Z X, He J K, *et al.* Carbon emission control strategies for China: A comparative study with partial and general equilibrium versions of the China MARKAL model. *Energy*, 2007, 32(1): 59~72.
- [6] Auffhammer M, Carson R T. Forecasting the path of China's CO₂ emissions using province-level information. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2008, 55(3): 229~247.
- [7] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048~1057.
- [8] 郭义强,郑景云,葛全胜. 一次能源消费导致的二氧化碳排放量变化. *地理研究*, 2010, 29(6): 1027~1036.
- [9] Wang C, Chen J N, Zou J. Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957~2000. *Energy*, 2005, 30(1): 73~83.
- [10] 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. *资源科学*, 2010, 32(2): 235~241.
- [11] 王锋,吴丽华,杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究. *经济研究*, 2010, (2): 123~136.
- [12] Shi L Y, Zhang H W. Factor analysis of CO₂ emission changes in China. *Energy Procedia*, 2011, 5: 79~84.
- [13] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy*, 2009, 37 (10): 4208~4219.
- [14] 张金萍,秦耀辰,张艳,等. 城市 CO₂ 排放结构与低碳水平测度——以京津沪渝为例. *地理科学*, 2010, 30(6): 874~879.
- [15] Duro J A, Padilla E. Inequality across countries in energy intensities: An analysis of the role of energy transformation and final energy consumption. *Energy Economics*, 2011, 33(3): 474~479.

- [16] 查冬兰,周德群. 地区能源效率与二氧化碳排放的差异性——基于 Kaya 因素分解. 系统工程, 2007, 25(11): 65~71.
- [17] 王铮,吴静,朱永斌,等. 气候保护的经济学研究. 北京:科学出版社, 2010. 13~24.
- [18] Fan Y, Liu L C, Wu G, *et al.* Changes in carbon intensity in China: Empirical findings from 1980~2003. Ecological Economics, 2007, 62(3~4): 683~691.

The spatio-temporal differentiation of CO₂ emissions in cities along the Lower Yellow River

ZHANG Jin-ping^{1,2}, QIN Yao-chen¹, ZHANG Li-jun¹, LU Chao-jun^{1,3}

(1. Center for Yellow River Civilization and Sustainable Development / College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China; 3. Department of Energy and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: It is important for the accounting, structural evolution and regional differences analysis of the municipal-scale carbon emissions for rational utilization of geographical potential in regions to inhibit the rapid growth of carbon emissions in the short term by technological learning and knowledge flows. In this study, CO₂ emissions from fossil fuel and cement industrial processes have been accounted in the region along the Lower Yellow River based on the municipal administrative units from 2000 to 2009, along with the accounting in the two sub-region and 21 cities. Study shows that, firstly, the total CO₂ emissions at different spatial scales shows a typical 'S-type' growth pattern, but there are significant spatial and temporal differences in the emission structures. Generally, emissions from the cement industrial processes have a rapid growth for the rapid industrialization in some cities. Optimization of industrial structure in a few cities has promoted a decline in the proportion of emissions from the cement industrial production. Secondly, the change of CO₂ intensity and CO₂ emissions per capita is in line with the theory of the carbon EKC. However, the degree and characteristics of spatio-temporal differentiation of the two indicators are not consistent. The weighted coefficient of variation, Gini coefficient, Moran's I and Theil index reveal that the region's total variance of CO₂ intensity are reasonable, while there is a larger variation for CO₂ emissions per capita, which will create conditions for accelerating the trickle-down effect. Thirdly, the decomposition of Theil T and L index indicates that difference in cities of the two sub-region is the dominant factors for changes of the region's total variance of the two indicators during the study period. At the same time, the unbalanced development of the Zhongyuan region is much stronger and the main contribution for changes of the region's total variance of the two indicators.

Key words: CO₂ emissions at the municipal-scale; CO₂ emission structure; Theil index; regional differences; region along the Lower Yellow River