

面向配额分配模拟的工业行业碳排放绩效 ——以郑州市为例

丁明磊^{1,2}, 李宇翔³, 赵荣钦², 张战平²,
侯丽朋², 刘秉涛⁴, 刘 薇⁵

(1. 华中师范大学可持续发展研究中心, 武汉 430079; 2. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046; 3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 4. 华北水利水电大学环境与市政工程学院, 郑州 450046; 5. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

摘要: 开展工业行业碳排放绩效研究, 对于落实碳减排承诺、完善碳交易体制、推动低碳产业发展具有重要意义。采用郑州市2013年181家工业企业的基础数据, 通过构建碳排放综合绩效指标体系和配额分配模型, 开展不同行业的综合绩效评价和配额分配模拟。主要结论如下: (1) 不同行业的碳排放强度分布极不均衡且与碳排放总量具有一定的关联性, 但关联类型不尽相同。电力、热力生产和供应业的碳排放强度最高(5.4115 t/万元), 烟草制品业的碳排放强度最低(0.0046 t/万元)。(2) 不同行业单位用地碳排放量、单位劳动力碳排放量差异较大。电力、热力生产和供应业的单位用地碳排放及单位劳动力碳排放明显高于其他行业。(3) 碳排放综合绩效表明, 电力、热力生产和供应业的碳排放绩效最低, 汽车制造业的碳排放绩效最高。(4) 不同行业因综合绩效的差异获得与基准年碳排放不同增减比例的配额, 其中, 电力、热力生产和供应业获得的配额最多, 化学纤维制造业获得的配额最少。通过碳配额分配模拟, 郑州市整体减排18.206万t, 减排比例为5.56%。(5) 建议完善行业配额分配方案, 并试点实施以碳排放综合绩效评价为基础的行业配额分配, 实现资源节约、环境保护和碳减排的协同。

关键词: 碳排放; 绩效; 配额分配; 行业; 郑州

工业活动是区域碳排放的主要来源之一^[1-2]。开展城市不同类型工业行业的碳排放研究, 既能揭示碳排放绩效的行业差异, 又可为企业碳核查和碳配额分配(简称“配额分配”)提供实践指导。近年来, 工业碳排放研究成为国内外学者关注的热点领域之一。主要包括: (1) 不同空间尺度的工业碳排放核算及其时空差异研究。该领域主要是采用相关碳排放因子系数的方法从国家^[3-4]、省域^[5-8]和城市^[9-10]等层面开展的。结果表明, 不同工业行业碳排放强度具有较大差异, 而能源消费和工艺过程是工业活动的主要碳排放来源^[11]。(2) 工业碳排放及其效率的影响机制。一些学者采用投入产出分析^[12-13]、DEA模型^[14]、LMDI^[15]等方法开展了工业碳排放的影响因素及其效率的研究^[16-17], 结果发现, 能源结构和效率、产业结构、劳动生产率和环境规制等是影响碳排放效率的主要因素^[15,18]。(3) 典型行业的碳排放及其效率研究。碳排放效率(也称“碳排放绩效”)是指单位碳

收稿日期: 2018-12-01; 修订日期: 2019-03-14

基金项目: 教育部人文社科项目(17YJCZH257); 国家自然科学基金项目(41301633); 河南省自然科学基金项目(182300410103); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2017GGJS078)

作者简介: 丁明磊(1976-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为低碳发展、区域与城市可持续发展。E-mail: mlding@126.com

通讯作者: 赵荣钦(1978-), 男, 河南孟津人, 博士, 教授, 研究方向为土地利用与碳排放。

E-mail: zhaorq234@163.com

排放创造的产值,一般用企业(行业)总产值与碳排放量的比值来表示。一些学者针对电力^[19]、钢铁^[20]、水泥^[21]等高耗能行业开展典型企业碳排放研究,并分析不同企业未来碳减排的限制因子及低碳发展策略;另外,企业碳排放效率评价也得到了学术界的关注,其中,碳排放指标评价^[22]、价值流^[23]和生命周期分析^[24]等是常用的方法,除碳排放强度和碳生产率的指标之外,单位碳排放的用水效率和废弃物排放强度指数^[25]、碳风险^[26]、生态效率指标^[27]等也被应用到企业碳排放效率评价中。配额分配是碳交易的基础环节,是落实国家碳减排程度、推动低碳发展的重要途径。前期主要从区域和企业两个尺度开展研究:(1)区域配额分配研究。一是基于公平原则,以区域发展综合条件^[28]、基尼系数^[29]、人均碳排放量^[30]为指标开展区域配额分配。二是基于效率原则,以碳排放强度^[31]、碳减排边际成本^[32]、R&D支出占GDP比例^[33]等为指标开展配额分配。(2)行业 and 企业的配额分配研究。从减排责任、潜力、能力^[34-35]和生产链^[36]、单位产品成本^[37]入手构建指标体系,开展行业或企业配额分配。

以上研究为开展工业企业碳排放综合绩效评价和配额分配提供了重要思路和方法借鉴。但总体来看,前期研究侧重于对区域不同行业碳排放及其效率的研究,以城市典型企业调查数据为基础的行业碳排放差异分析相对较少,另外,前期关于碳排放效率的研究多采用碳排放强度或碳生产率作为单一评价指标。实质上,应该将企业的经济、社会和环境等综合效率纳入到企业综合碳排放绩效评价中,这对于揭示企业碳排放机理,并构建科学合理的配额分配方案具有重要意义。

郑州市是工业化快速发展的城市,2000-2017年工业年均增长率16.26%。郑州市工业类型多样,既有能源型工业和传统制造业,也有新兴产业;既有纺织、农副食品加工等轻工业,也有设备制造、汽车制造等重工业,这为开展不同类型工业行业碳排放绩效评价提供了丰富的行业样本。因此,本文以郑州市181家企业为例,尝试将能源、土地、水、劳动力和废弃物等多要素纳入到企业碳排放绩效评价中,并在此基础上进行不同行业的配额分配模拟,为城市低碳工业发展和工业行业配额分配提供理论参考和实践指导。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 理论框架

碳排放强度(或碳生产率)是企业碳排放绩效的传统指标,体现的是企业环境影响与经济产出的关系,仅仅是企业能源投入和碳排放、产值等产出关系的直接反映。实际上,企业生产是一个复杂系统,企业生产效率受多要素的影响,比如:水、土地、劳动力、能源是投入要素,产值、碳排放和废弃物是产出要素。如果仅按传统碳排放强度指标开展碳核查和配额分配,则完全忽略了企业用地效率、劳动效率、废弃物排放效率和用水效率等,不利于全面评估企业的“环境—经济—社会”影响。因此,以上要素不仅关系到企业的经济产出效益,也直接或间接地影响企业的碳排放强度。而将多要素纳入到企业碳排放综合绩效评价中,能够更进一步反映企业生产过程中各种投入产出要素对企业碳排放绩效的影响,对于构建更公平合理的碳核查和配额分配方案具有积极的意义。

正是基于以上考虑,选取企业的单位用地碳排放、单位劳动力碳排放、碳排放强度、单位产值耗水量、废弃物排放强度等多指标来评估企业的碳排放综合绩效。其中,

碳排放强度用于衡量企业碳排放的经济效率;单位用地碳排放和单位劳动力碳排放指标分别体现了企业地均和人均碳排放的差异,以反映企业占地和劳动力投入对企业碳排放效率的影响;而单位产值耗水量和废弃物排放强度指标则主要用于表征企业用水效率和废弃物排放水平,反映了企业生产经营过程中耗水强度和废弃物排放强度。通过将多要素作为有机整体纳入碳排放综合绩效评价中,不仅符合企业活动的实际,更体现了企业碳减排、环境治理和节约集约用地等多目标的要求。最后,在兼顾效率、公平、可行性等原则的基础上,开展了以碳排放综合绩效为基础的配额分配模拟。其中,效率原则体现在以碳排放综合绩效为分配增减的标准,公平原则体现在以基准年碳排放为分配基准,可行性原则体现在将分配增减幅度控制在企业可承受范围之内(图1)。

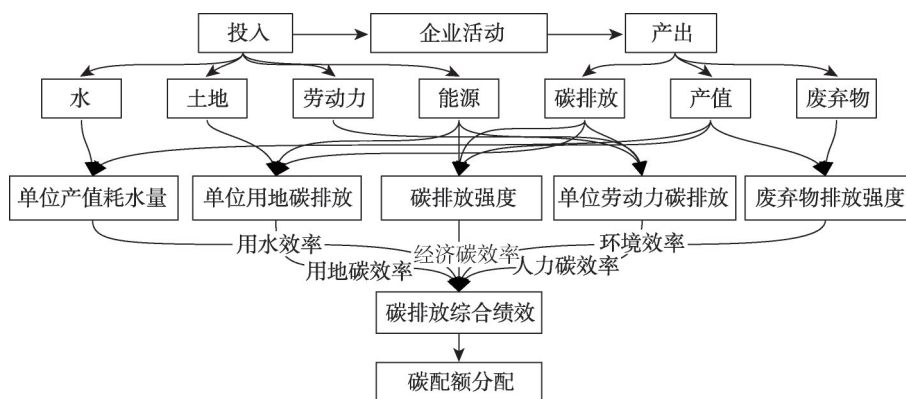


图1 企业碳排放综合绩效的理论框架

Fig. 1 The theoretical framework of comprehensive performance of carbon emission

1.2 数据来源

采用郑州市环保局的企业环境监测数据(各企业的年度统计数据),包括2013年181个企业的工业总产值、工业用水量、能源消耗量(煤炭、燃料油、焦炭、天然气、其他燃料)、用电量等。另外,为进一步探讨占地和劳动力因素对企业碳排放效率的影响,对以上181家企业的占地面积、劳动力数据进行调研,调研主要采用调查问卷和电话询问相结合的方式。本研究中主要涉及采矿业、制造业以及电力、热力、燃气及水生产和供应业(主要以制造业为主),各行业代码、编号、所含企业数量等信息见表1,其中,企业归类标准参照GB/T4754-2017。需要说明的是:由于数据收集较困难,企业数据的行业分布和空间分布不够均匀,部分行业如化学纤维制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业等行业样本数相对较少。

1.3 研究方法

1.3.1 能源消费碳排放核算方法

参照IPCC的核算方法核算碳排放量,企业各种能源消费碳排放的核算公式为^[38]:

$$C_{Ej} = Q_j \times H_j \times (C_j + M_j) \quad (1)$$

式中: C_{Ej} 是第 j 类能源消费的碳排放量; Q_j 是第 j 类能源消费量; H_j 是第 j 类能源净发热量; C_j 是第 j 类能源碳排放系数; M_j 是第 j 类能源 CH_4 排放系数。其中, $C_j = E_j \times F_j$, E_j 是缺省碳含量, F_j 是缺省氧化因子。各种能源的净发热值主要取自于《中国能源统计年

表1 研究涉及的行业名称及其代码
Table 1 The industries and their codes in this research

行业代码	行业名称	企业数量/个	行业代码	行业名称	企业数量/个
B06	煤炭开采和洗选业	2	C13	农副食品加工业	7
C14	食品制造业	11	C15	酒、饮料和精制茶制造业	7
C16	烟草制品业	1	C17	纺织业	3
C18	纺织服装、服饰业	1	C22	造纸和纸制品业	13
C23	印刷和记录媒介复制业	3	C26	化学原料和化学制品制造业	18
C27	医药制造业	10	C28	化学纤维制造业	1
C29	橡胶和塑料制品业	2	C30	非金属矿物制品业	64
C31	黑色金属冶炼和压延加工业	7	C32	有色金属冶炼和压延加工业	8
C33	金属制品业	3	C34	通用设备制造业	3
C35	专用设备制造业	5	C36	汽车制造业	5

鉴》，而CH₄排放系数、缺省碳含量及氧化碳因子等取自 IPCC。

1.3.2 基于熵权法的企业碳排放综合绩效评价方法

(1) 企业碳排放效率指标的选取

结合图1对企业碳排放综合绩效的理论分析，选取企业的单位用地碳排放、单位劳动力碳排放、碳排放强度、单位产值耗水量、废弃物排放强度等指标作为企业碳排放综合绩效的评价依据（表2）。通过该指标体系，不仅考虑了传统的碳排放强度指标，而且考虑了企业用地、劳动力、水资源消耗和废弃物排放等多要素对企业碳排放效率的影响。

表2 碳排放效率指标
Table 2 The indexes of the carbon emission efficiency

指标	公式	参数说明
单位用地碳排放	$C_L = \frac{C_E}{S}$	单位用地碳排放（ C_L ）为企业碳排放总量（ C_E ）与企业占地面积（ S ）的比值（t/m ² ），反映企业用地的碳排放效率
单位劳动力碳排放	$L_C = \frac{C_E}{L}$	单位劳动力碳排放（ L_C ）为企业碳排放总量（ C_E ）与企业员工数（ L ）的比值（t/人），反映企业员工的碳排放效率
碳排放强度	$C_Q = \frac{C_E}{G}$	碳排放强度（ C_Q ）为企业碳排放总量（ C_E ）与企业总产值（ G ）的比值（t/万元），用于衡量企业碳排放的经济效率
单位产值耗水量	$C_W = \frac{T_W}{G}$	单位产值耗水量（ C_W ）为企业总用水量（ T_W ）与企业总产值（ G ）的比值（t/万元），用来反映企业的水资源利用效率
废弃物排放强度	$W_Q = \frac{T_Q}{G}$	废弃物排放强度（ W_Q ）为废弃物排放总量（ T_Q ）与企业总产值（ G ）的比值（t/万元），即单位产值的废弃物排放量

(2) 基于熵权法的指标权重确定

针对以上评估指标，首先采用隶属度法标准化的方法对指标进行标准化处理，然后采用熵权法^[39]确定指标权重。以上指标均为负指标，标准化的方法如下：

$$Y_{ij} = \frac{\max X_j - X_{ij}}{\max X_j - \min X_j}$$

(2)

式中： Y_{ij} 为指标标准化之后的值； $\max X_j$ 和 $\min X_j$ 分别表示第 j 个指标的最大值和最小值； X_{ij} 表示第 j 个指标下第 i 类企业（即行业）的原始值。

熵权法确定权重的计算方法如下：

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (3)$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \times \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$W_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (5)$$

式中: P_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个行业的指标值的比例, 当 $P_{ij}=0$ 时, 令 $P_{ij} \ln P_{ij}=0$; e_j 是第 j 个指标的熵值; $k=1/\ln m$; m 为行业数; n 为指标数; W_j 即第 j 个指标的熵权。

(3) 碳排放综合绩效评价的方法

$$Z_i = \sum_j W_j \times Y_{ij} \quad (6)$$

式中: Z_i 表示碳排放综合绩效的评价值。

1.3.3 基于碳排放综合绩效指标的配额分配

首先以碳排放综合绩效评价作为调控因子计算出不同行业的配额分配系数, 计算方法如下:

$$A_i = \begin{cases} \min A_i + [(\max A_i - \min A_i)/2 - a] \times \frac{Z_{(i)} - \min Z_{(i)}}{\max Z_{(i)} - \min Z_{(i)}} & 1 \leq i < (m+1)/2 \\ (\min A_i + \max A_i)/2 & i = (m+1)/2 \\ (\min A_i + \max A_i)/2 + a + [(\max A_i - \min A_i)/2 - a] \times \frac{Z_{(i)} - \min Z_{(i)}}{\max Z_{(i)} - \min Z_{(i)}} & (m+1)/2 < i \leq m \end{cases} \quad (7)$$

$$A_i = \begin{cases} \min A_i + [(\max A_i - \min A_i)/2 - a] \times \frac{Z_{(i)} - \min Z_{(i)}}{\max Z_{(i)} - \min Z_{(i)}} & 1 \leq i \leq m/2 \\ (\min A_i + \max A_i)/2 + a + [(\max A_i - \min A_i)/2 - a] \times \frac{Z_{(i)} - \min Z_{(i)}}{\max Z_{(i)} - \min Z_{(i)}} & m/2 + 1 \leq i \leq m \end{cases} \quad (8)$$

式中: A_i 为配额分配系数; $Z_{(i)}$ 为先将碳排放综合绩效值 Z_i 按从小到大排列的顺序值; m 为行业个数, 式 (7) 和式 (8) 分别代表 m 为奇数和偶数时的情况, 由于本文涉及 22 个行业的碳排放综合绩效值的评价, 因此选用式 (8); a 为调整参数, 取值范围是 $0 < a < (\max A_i - \min A_i)/2$, $\max A_i$ 、 $\min A_i$ 为配额分配系数的最大值、最小值, 可根据碳排放现实需求进行设定。结合国家碳减排目标和郑州市实际情况, 本文设定的配额分配系数的最大值、最小值分别为 1.1 和 0.9, 即分配增减幅度在正负 10% 以内。

在确定配额分配系数的基础上, 以碳排放历史值为基准确定不同行业的碳配额。计算方法如下:

$$CEQ_i = C_{Ei} \times A_i \quad (9)$$

式中: CEQ_i 是第 i 个行业碳排放配额; C_{Ei} 是第 i 个行业的基准年碳排放。

2 结果分析

2.1 工业行业碳排放效率的单项指标对比

2.1.1 不同行业碳排放强度分析

经测算发现, 不同行业的碳排放强度具有以下特征: (1) 不同行业碳排放强度差异较明显 (图 2)。除电力、热力生产和供应业 (5.4115 t/万元) 外, 其余 21 个行业的碳排

放强度均低于1.5 t/万元。烟草制品业的碳排放强度最低,为0.0046 t/万元。郑州市的化学原料和化学制品制造业主要以氮磷肥及复混肥料生产和无机酸、涂料、化学试剂制造为主,生产过程中能源消耗量较大,碳排放强度较高。(2) 各行业碳排放强度与碳排放总量虽具有一定的关联性,但关联类型不尽相同。整体来说,碳排放总量越大,碳排放强度越高。但局部而言,如煤炭开采和洗选业、医药制造业,二者的碳排放强度分别为0.2322 t/万元、0.2226 t/万元,碳排放量则分别为0.2538 万t、1.8206 万t,后者是前者的7倍之多,即碳排放强度相近的行业碳排放总量可能相差较大。碳排放强度是衡量能源利用效率的一项指标,除受能源强度的影响外,还与各企业的生产过程有关。而企业的生产过程又与企业性质与类型、产品规格及效益、生产工艺、技术水平、机械设备水平等多个因素有关。

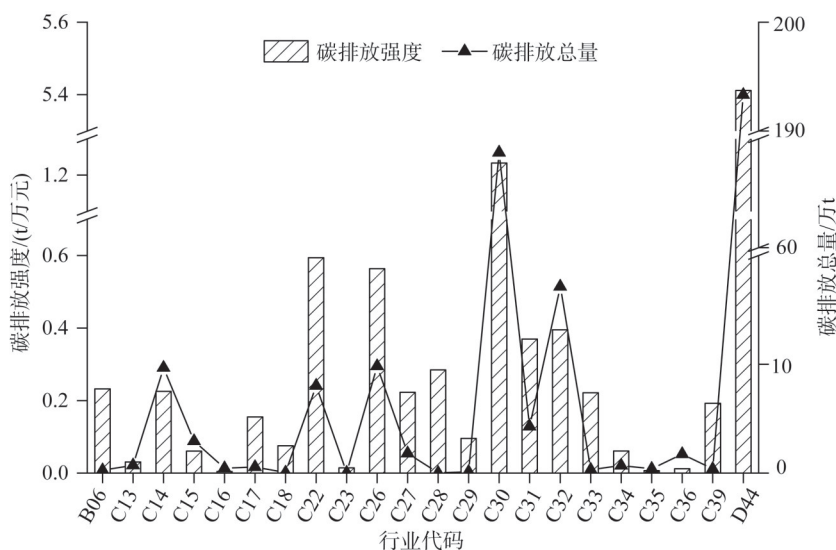


图2 郑州市不同行业的碳排放强度与碳排放总量对比

Fig. 2 The comparison of carbon emission intensity and carbon emission of different industries in Zhengzhou

2.1.2 不同行业单位用地碳排放和单位劳动力碳排放分析

不同行业的用地碳排放和单位劳动力碳排放具有以下特征:(1) 不同行业单位用地碳排放量、单位劳动力碳排放量差异均较大(图3)。电力、热力生产和供应业的单位用地碳排放量最高,汽车制造业最低,分别为1.7575 t/m²、0.0020 t/m²。此外,食品制造业(0.1069 t/m²)、造纸和纸制品业(0.1039 t/m²)、有色金属冶炼和压延加工业(0.0984 t/m²)等行业的单位用地碳排放量也较高。食品制造业的占地面积较小,因此单位用地碳排放量较高,相比而言,22个行业中,汽车制造业的占地面积最大(8.775×10⁶ m²),基于其产品规格、汽车及其主要组成部件需要大量空地来置放,进而单位用地碳排放最低。(2) 电力、热力生产和供应业(89.2314 t/人)与印刷和记录媒介复制业(0.2278 t/人)单位劳动力碳排放量差异悬殊,非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、造纸和纸制品业的单位劳动力碳排放量也相对较高。郑州市的非金属矿物制品业主要以耐火材料制品制造与水泥、石灰和石膏制造等为主,生产过程需要消耗大量能源,因而单位劳动力碳排放量较高。纺织服装、服饰业、农副食品加工业、计算机、通信和其他电子

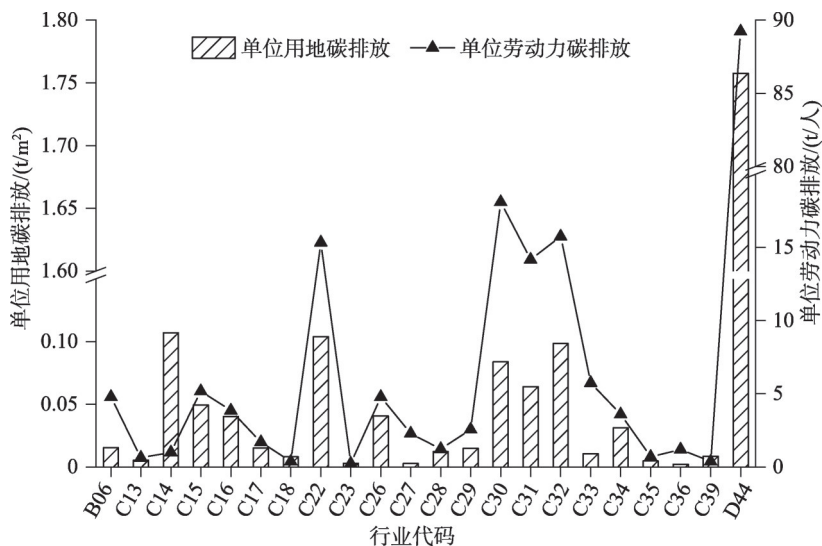


图3 郑州市不同行业的单位用地碳排放和单位劳动力碳排放对比

Fig. 3 The comparison of carbon emission of per unit land and per unit labor of different industries in Zhengzhou

设备制造业的单位劳动力碳排放量较低，其中，农副食品加工业、食品制造业属于劳动密集型企业，劳动力较多但能源消耗相对较少，因而单位劳动力碳排放较低。

2.1.3 不同行业单位产值耗水量和废弃物排放强度分析

不同行业的单位产值和废弃物强度具有以下特征：（1）不同行业的单位产值耗水量波动较大。电力、热力生产供应业的单位产值耗水量最大，为812.56 t/万元，通讯设备制造业的单位产值耗水量最低，为0.76 t/万元，行业偏移趋势明显。化学原料和化学制品制造业、煤炭开采和洗选业、造纸和纸制品业单位产值耗水量较高，分别为316.23 t/万元、145.11 t/万元、117.28 t/万元。其中，化学制品的生产及配置、洗煤、造纸业等，生产过程中均需消耗大量用水，因此单位产值耗水量较高。而专用设备制造业、烟草制品业的单位产值耗水量较低，分别为1.87 t/万元、2.31 t/万元。（2）不同行业间废弃物排放强度差异较大。电力、热力生产和供应业的废弃物排放强度最大（0.1029 t/万元），其次非金属矿物制品业、化学纤维制造业造纸和纸制品业对郑州市废弃物排放的贡献率也较高。电力、热力生产和供应业的高能耗的生产过程会产生大量的废水、废气，废弃物排放强度最高；化学纤维制造业、造纸和纸制品业会产生大量的工业废水，废弃物排放强度也较高。烟草制品业、汽车制造业的废弃物排放强度最低，均为0.0001 t/万元。烟草制造业废弃物排放强度低；专用设备制造业以精密电子产品为主，污染物排放量也较低（图4）。

另外，研究发现，碳排放量越高的行业，其水能消耗也越多，但也存在个例。比如，在煤炭开采和洗选业、化学原料和化学制品制造业、非金属矿物制品业等行业间差异较大。主要原因在于工业用水量和能源消耗量对于不同行业的限制程度不同。煤炭开采和洗选业、化学原料和化学制品制造业生产过程中耗水量较大，而能源消耗量相对较小，因此单位产值耗水量的数值更大；而非金属矿物的生产，尤其耐火材料、瓷砖等，烧焙过程需要大量的能源消耗，因此具有较高的碳排放强度。

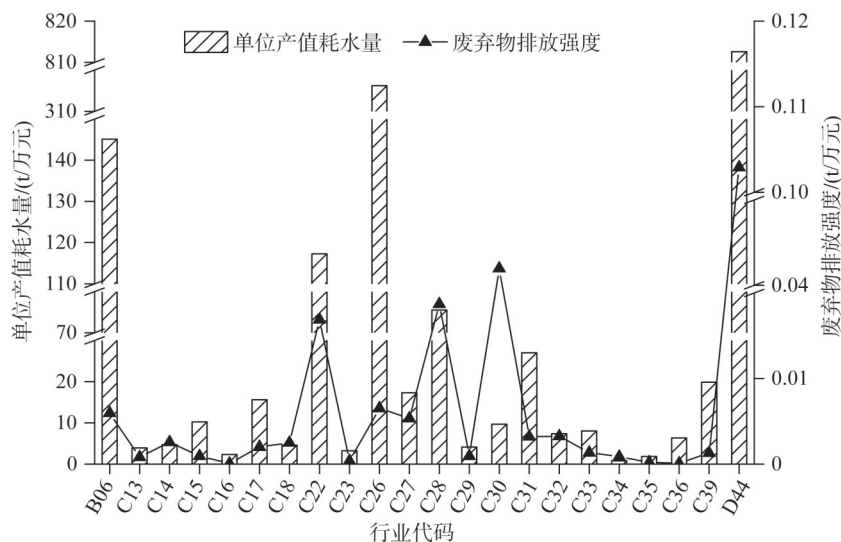


图4 郑州市不同行业的单位产值耗水量与废弃物排放强度

Fig. 4 Water consumption intensity and waste emission intensity of different industries in Zhengzhou

2.2 工业行业碳排放的综合绩效评价

以上单项指标的测算结果表明, 由于土地、劳动力、耗水量和废弃物等投入产出要素的差异, 不同行业碳排放效率及其资源消耗和废弃物排放均具有较大的差异。因此, 在单项效率指标计算的基础上, 采用熵权法对不同行业的碳排放综合绩效进行分析。

为揭示不同生产要素对碳排放绩效的影响, 首先计算投入和产出指标的评价值。结果表明, 郑州市不同行业的投入产出绩效具有较大的差异。在投入评价值中, 非金属矿物制品业、电力与热力生产和供应业、汽车制造业等行业投入评价值低, 分别为0.1137、0.1282、0.1337; 化学纤维制造业、橡胶和塑料制品业、纺织服装和服饰业等行业投入评价值高, 分别为0.2448、0.2439、0.2438。在产出评价值中, 化学纤维制造业、纺织服装和服饰业、煤炭开采和洗选业等行业产出评价值低, 分别为0.1048、0.1072、0.1091; 汽车制造业、烟草制品业等行业产出评价值高, 分别为0.7546、0.5397 (图5)。非金属矿物制品业、电力与热力生产和供应业因水能消耗高, 成为高投入行业, 其中, 电力、热力生产和供应业碳排放与废弃物排放均最多; 汽车制造业产值最高、但占地面积最大, 成为高投入、高产出的行业; 化学纤维制造业、纺织服装和服饰业水能消耗低、占地面积少、劳动力投入低, 碳排放与废弃物排放均少, 但产值低, 成为低投入、低产出的行业。其中, 化学纤维制造业是劳动力、能源、用地投入最少的行业, 纺织服装、服饰业是水消耗最少的行业。

将郑州市22个行业的碳排放绩效进行评价并按照从低到高进行排序 (图6)。结果发现, 行业综合绩效具有明显的差异, 并且绝大多数行业综合绩效值偏低。其中, 电力、热力生产和供应业最低, 绩效值是0.2862, 汽车制造业最高, 绩效值是0.8883, 两者相差3倍之多。农副食品加工业以下等16个行业的绩效值低于0.45, 其均值是0.3625, 低绩效值行业占有所有行业的比例是72.73%。电力、热力生产和供应业在水能消耗、碳排放与废弃物排放等方面是22个行业中消耗或产生最多的, 因此综合评价值最低; 汽车制造业属郑州市较为发达的行业, 工业产值远高于其他行业, 且碳排放以及废弃物排放均较

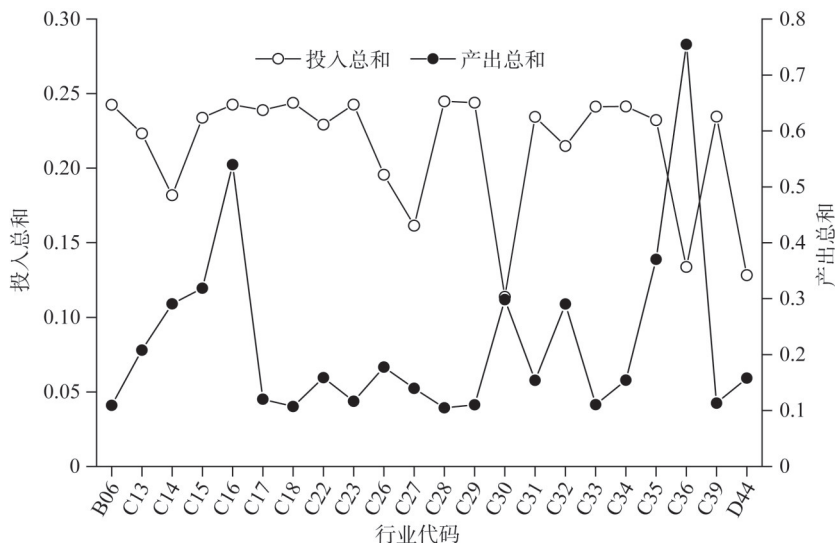


图5 郑州市不同行业投入和产出的评价价值对比

Fig. 5 The comparison of input-output evaluation of different industries in Zhengzhou

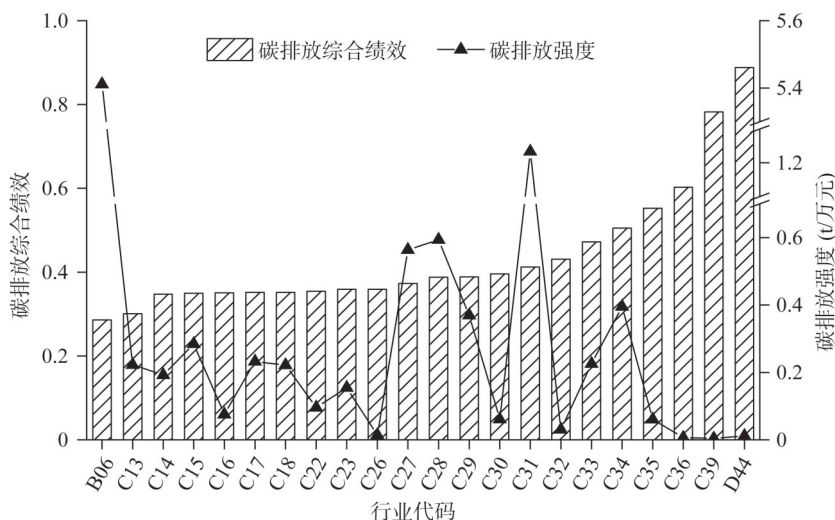


图6 郑州市不同行业碳排放绩效和碳排放强度对比

Fig. 6 The comparison of carbon emission performance and carbon emission intensity of different industries in Zhengzhou

低,生产过程中也主要以电力为主,对传统化石能源的消耗量较低,因此综合评价价值最高;此外,烟草制品业、专用设备制造业的综合评价价值也相对较高,分别为0.7825和0.6026;而医药制造业和计算机、通信、其他电子设备制造业的综合评价价值相对较低,分别为0.3009和0.3476。医药制造业虽然碳排放总量较低,但占地面积仅次于汽车制造业,加之较低产值,因此综合评价价值相对较低。

对比碳排放强度与碳排放综合绩效,主要有以下特征:(1)碳排放强度与碳排放综合绩效整体差异明显,但局部存在趋同。趋同部分主要集中在碳排放综合绩效值的高值和低值区域,如低值区域的电力、热力生产和供应业、医药制造业、计算机和通信及其

他电子设备制造业，高值区域的汽车制造业、烟草制品业、专用设备制造业。(2) 部分高耗能行业的碳排放强度与碳排放综合绩效差异明显。如有色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业的碳排放强度与碳排放综合绩效均较高，化学原料和化学制品制造业的碳排放强度高、碳排放综合绩效中等。

总体而言，综合评价指标值受企业产值及占地面积影响较大。电力、热力生产和供应业、煤炭开采和洗选业、金属制品业等高耗能、高碳排放行业及医药制造业、计算机和通信及其他电子设备制造业等产值较低的行业碳排放绩效相对较低；而汽车制造业、烟草制品业、专用设备制造业等高产值且碳排放及废弃物排放相对较小的行业的碳排放绩效相对较高。

2.3 工业行业的碳配额分配模拟

行业碳排放配额模拟结果表明(表3)：电力、热力生产和供应业、医药制造业、计算机和通信及其他电子设备制造业的配额减少比例最多，分别是-10.00%、-8.32%、-3.01%。汽车制造业、烟草制品业、专用设备制造业、酒和饮料及精制茶制造业的配额增加比例最多，分别是10.00%、7.91%、4.35%、3.36%。其他行业配额分配增减幅度较小，均在±3%以内。另外，配额增减比例与碳排放综合绩效的排序一致，这体现了配额分配中的效率原则。从不同行业获得的配额量来看，电力和热力生产及供应业、非金属矿物制品业、有色金属冶炼及压延加工业、食品制造业、化学原料和化学制品制造业、造纸和纸制品业的配额较多，分别是173.988万t、69.138万t、17.566万t、9.852万t、9.826万t、8.035万t，化学纤维制造业、印刷和记录媒介复制业、纺织服装和服饰业、橡胶和塑料制品业、煤炭开采和洗选业、金属制品业、计算机和通信及其他电子设备制造业、专用设备制造业、烟草制品业、纺织业、通用设备制造业、农副食品加工业的配额较少，均不足1万t。这说明基于碳排放综合绩效的配额分配方案充分尊重现有生产规模、工艺等行业生产条件下的碳排放需求，体现了配额分配的公平原则。总体而言，郑州市整体行业的碳配额总量为303.338万t，相比基准年碳排放减少了5.56%。

表3 郑州市不同工业行业碳配额分配方案

Table 3 Carbon emission quotas allocation scheme of different industries in Zhengzhou

行业代码	综合绩效	基准年碳排放/万t	碳配额/万t	比例/%	行业代码	综合绩效	基准年碳排放/万t	碳配额/万t	比例/%
B06	0.3517	0.254	0.247	-2.54	C28	0.3496	0.024	0.024	-2.78
C13	0.4312	0.715	0.721	0.95	C29	0.3540	0.125	0.122	-2.27
C14	0.4725	9.680	9.852	1.77	C30	0.4120	68.743	69.138	0.57
C15	0.5526	2.946	3.045	3.36	C31	0.3885	4.282	4.287	0.11
C16	0.7825	0.447	0.482	7.91	C32	0.5052	17.151	17.566	2.42
C17	0.3591	0.559	0.549	-1.70	C33	0.3519	0.316	0.308	-2.52
C18	0.3509	0.048	0.046	-2.63	C34	0.3956	0.692	0.693	0.25
C22	0.3880	8.027	8.035	0.10	C35	0.6026	0.399	0.416	4.35
C23	0.3592	0.039	0.038	-1.68	C36	0.8883	1.744	1.918	10.00
C26	0.3731	9.835	9.826	-0.10	C39	0.3476	0.378	0.367	-3.01
C27	0.3009	1.821	1.669	-8.32	D44	0.2862	193.320	173.988	-10.00

3 结论与讨论

本文基于郑州市181家工业企业的调查数据,从多要素的视角对不同工业行业的碳排放综合绩效进行了评价,开展了配额分配模拟。主要结论如下:(1)不同行业的碳排放强度分布极不均衡且与碳排放总量具有一定的关联性。烟草制品业的碳排放强度最低,为0.0046 t/万元,电力、热力生产和供应业的碳排放强度最高,为5.4115 t/万元。(2)不同行业单位用地碳排放量、单位劳动力碳排放量差异均较大。其中电力、热力生产和供应业的单位用地碳排放及单位劳动力碳排放明显高于其他行业。(3)不同行业间废弃物排放强度差异较大且与碳排放强度具有一定的关联性。烟草制品业、汽车制造业的废弃物排放强度最低,均为0.0001 t/万元;电力、热力生产和供应业的废弃物排放强度最大,为0.1029 t/万元。(4)行业碳排放综合绩效评价表明,电力、热力生产和供应业、煤炭开采和洗选业、计算机和通信及其他电子设备制造业等行业碳排放绩效相对较低;而汽车制造业、烟草制品业、专用设备制造业的碳排放绩效相对较高。(5)碳配额模拟分配结果表明,电力、热力生产和供应业获得的配额最多,为173.988万t,化学纤维制造业获得的配额最少,为0.024万t。整体减排18.206万t,减排比例为5.56%。

建议郑州市在未来低碳产业发展规划、碳核查和碳交易过程中可采用以下策略:(1)对不同高耗能行业采用差别化的低碳发展对策。比如:电力、热力生产和供应业的碳排放强度最高、碳排放综合绩效最低,应限制发展或考虑区际替代;非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业的碳排放强度高、碳排放综合绩效较高,应通过技术改造,提高产品附加值,通过企业转型升级降低碳排放强度。(2)不同工业行业的集约发展模式应有所区别和侧重。单位用地碳排放最低的汽车制造业,应提高土地集约利用,向土地集约化方向发展;而对于印刷和记录媒介复制业、服饰业、农副食品加工业等,则应提高单位劳动力的产出,向劳动力集约化方向发展,从而形成产业集群。(3)建立涵盖企业投入和产出多要素的企业碳核查大数据库,企业基础数据和碳排放信息的实时查询、监控和预警,有助于企业转变经营管理理念与方式。(4)完善行业配额分配方案,建议试点实施以碳排放综合绩效评价为基础的行业配额分配,综合考虑资源能源消耗、土地占用与污染物排放等指标,这样更能体现碳交易对于资源节约、环境保护与碳减排的协同效果。

需要说明的是,由于数据收集较为困难,本文只采用了2013年的工业行业数据,而没有考虑时间尺度上不同行业碳排放绩效的变化对未来配额分配的影响;另外,在本文的碳配额分配模拟中,未考虑不同区域之间的差异和行业内部不同企业的配额分配。因此,今后应在长时间序列和多企业样本数据收集的基础上,综合开展“区域—行业—企业”多层次配额分配的结合研究,这对于提升配额分配方案的可操作性、推动区域碳减排目标的落实具有重要意义,这也是今后应该进一步开展的研究工作。

参考文献(References):

- [1] CHUAI X W, HUANG X J, LAI L, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 50-61.
- [2] LAI L, HUANG X J, YANG H, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601063.
- [3] ZHAO R Q, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Carbon footprint of different industrial spaces based on energy consump-

- tion in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 285-300.
- [4] YI J. Study on carbon emission efficiency of China's industrial industry and analysis of its influencing factors. *Low Carbon Economy*, 2017, 8: 20-30.
- [5] LU Q L, YANG H, HUANG X J, et al. Multi-sectoral decomposition in decoupling industrial growth from carbon emissions in the developed Jiangsu province, China. *Energy*, 2015, 82: 414-425.
- [6] WANG Q W, HANG Y, ZHOU P, et al. Decoupling and attribution analysis of industrial carbon emissions in Taiwan. *Energy*, 2016, 113: 728-738.
- [7] CHENG Z H, LI L S, LIU J, et al. Total-factor carbon emission efficiency of China's provincial industrial sector and its dynamic evolution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 330-339.
- [8] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 等. 河南省不同产业碳足迹效率研究. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 92-103. [YANG W J, ZHAO R Q, ZHANG Z P, et al. Industrial carbon and water footprint efficiency of Henan province based on input-output analysis. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 92-103.]
- [9] 侯丽朋. 郑州市典型产业碳排放综合绩效评估及碳配额分配研究. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. [HOU L P. Study on carbon emissions comprehensive performance evaluation and carbon quote allocation of typical industries in Zhengzhou. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.]
- [10] 刘薇, 丁明磊, 赵荣钦, 等. 基于碳排放视角的工业行业全要素生产率研究. *资源开发与市场*, 2017, 33(3): 322-326. [LIU W, DING M L, ZHAO R Q, et al. Research on total factor productivity of industries based on carbon emission. *Resource Development & Market*, 2017, 33(3): 322-326.]
- [11] 吕可文, 苗长虹, 尚文英. 工业能源消耗碳排放行业差异研究: 以河南省为例. *经济地理*, 2012, 32(12): 15-20. [LYU K W, MIAO C H, SHANG W Y. Sectoral difference in carbon emission of industrial energy consumption: A case study of Henan province. *Economic Geography*, 2012, 32(12): 15-20.]
- [12] ZHANG M, HUANG X J. Effects of industrial restructuring on carbon reduction: An analysis of Jiangsu province, China. *Energy*, 2012, 44: 515-526.
- [13] 赵巧芝, 闫庆友. 基于投入产出的中国行业碳排放及减排效果模拟. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1528-1541. [ZHAO Q Z, YAN Q Y. Simulation of industrial carbon emissions and its reduction in China based on input-output model. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1528-1541.]
- [14] XIAN Y J, WANG K, SHI X P, et al. Carbon emissions intensity reduction target for China's power industry: An efficiency and productivity perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 1022-1034.
- [15] LIN B Q, LIU K. Using LMDI to analyze the decoupling of carbon dioxide emissions from China's heavy industry. *Sustainability*, 2017, 9(7): 1198.
- [16] FAN M T, SHAO S, YANG L L. Combining global Malmquist-luenberger index and generalized method of moments to investigate industrial total factor CO₂ emission performance: A case of Shanghai (China). *Energy Policy*, 2015, 79: 189-201.
- [17] OUYANG X L, LIN B Q. An analysis of the driving forces of energy-related carbon dioxide emissions in China's industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 838-849.
- [18] 孙艳伟, 李加林, 李伟芳, 等. 海岛城市碳排放测度及其影响因素分析: 以浙江省舟山市为例. *地理研究*, 2018, 37(5): 1023-1033. [SUN Y W, LI J L, LI W F, et al. Estimating the carbon emissions and influencing factors of island city: A case study in Zhoushan Islands, Zhejiang province. *Geographical Research*, 2018, 37(5): 1023-1033.]
- [19] HUANG W L, MA D, CHEN W Y. Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China's power sector. *Applied Energy*, 2017, 185: 1497-1505.
- [20] 王俊岭, 张新社. 中国钢铁工业经济增长、能源消耗与碳排放脱钩分析. *河北经贸大学学报*, 2017, 38(4): 77-82. [WANG J L, ZHANG X S. The decoupling analysis on economic growth, energy consumption and carbon emissions of China's iron and steel industry. *Journal of Hebei University of Economics and Trade*, 2017, 38(4): 77-82.]
- [21] GAO T M, SHEN L, SHEN M, et al. Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 522-537.
- [22] 王帆, 倪娟. 企业碳排放影响因素研究: 基于浙江企业的调研分析. *商业经济与管理*, 2016, (1): 71-80. [WANG F, NI J. Study on the influencing factors of enterprises carbon emission: An empirical analysis of Zhejiang enterprises. *Journal of Management Science*, 2016, 30(1): 71-80.]

- nal of Business Economics, 2016, (1): 71-80.]
- [23] 谭德明, 何红渠. 基于资源价值流分析视角的企业碳绩效评价模型构建. 湖南社会科学, 2016, (5): 115-119. [TAN D M, HE H Q. Establishment of enterprise carbon performance evaluation model based on resource value flow analysis. Hunan Social Science, 2016, (5): 115-119.]
- [24] 吴明, 姜国强, 贾冯睿, 等. 基于物质流和生命周期分析的石油行业碳排放. 资源科学, 2018, 40(6): 1287-1296. [WU M, JIANG G Q, JIA F R, et al. Carbon emissions from the petroleum industry based on the analysis of material flow and life cycle. Resources Science, 2018, 40(6): 1287-1296.]
- [25] 刘英, 赵荣钦, 张战平, 等. 城市开发区工业企业的碳排放效率比较: 以南京江宁经济技术开发区为例. 热带地理, 2018, 38(1): 103-111. [LIU Y, ZHAO R Q, ZHANG Z P, et al. Carbon emission efficiency of different industrial companies of urban industrial zone: A case study of Jiangning Economic and Technological Development Zone, Nanjing. Tropical Geography, 2018, 38(1): 103-111.]
- [26] SUBRAMANIAM N, WAHYUNI D, COOPER B J, et al. Integration of carbon risks and opportunities in enterprise risk management systems: Evidence from Australian firms. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 407-417.
- [27] 白世秀, 王宇, 张德刚. 生态效率对公司市场价值的影响研究: 基于世界500强企业碳排放数据. 生态经济, 2018, 34(7): 39-43. [BAI S X, WANG Y, ZHANG D G. Impact of corporate eco-efficiency on its market value: Empirical analysis from carbon emission data of global 500 companies. Ecological Economy, 2018, 34(7): 39-43.]
- [28] FANG G C, LIU M H, TIAN L X, et al. Optimization analysis of carbon emission rights allocation based on energy justice: The case of China. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 748-758.
- [29] KONG Y C, ZHAO T, YUAN R, et al. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 222-232.
- [30] 周迪, 郑楚鹏, 华诗润, 等. 公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径. 自然资源学报, 2019, 34(1): 80-91. [ZHOU D, ZHENG C P, HUA S R, et al. The potentialities and paths of China's carbon emission reduction based on the coordination of fairness and efficiency. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 80-91.]
- [31] WANG X W, CAI Y P, XU Y, et al. Optimal strategies for carbon reduction at dual levels in China based on a hybrid nonlinear grey-prediction and quota-allocation model. Journal of Cleaner Production, 2014, 83: 185-193.
- [32] YANG K J, LEI Y L, CHEN W M, et al. Carbon dioxide emission reduction quota allocation study on Chinese provinces based on two-stage Shapley information entropy model. Natural Hazards, 2017, 91(1): 321-335.
- [33] 方恺, 张琦峰, 叶瑞克, 等. 巴黎协定生效下的中国省际碳排放权分配研究. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1224-1234. [FANG K, ZHANG Q F, YE R K, et al. Allocating China's carbon emission allowance to the provincial quotas in the context of the Paris Agreement. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1224-1234.]
- [34] ZHANG Y J, HAO J F. Carbon emission quota allocation among China's industrial sectors based on the equity and efficiency principles. Annals of Operations Research, 2016, 255: 117-140.
- [35] DONG F, HAN Y, DAI Y J, et al. How carbon emission quotas can be allocated fairly and efficiently among different industrial sectors: The case of Chinese industry. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(6): 2883-2891.
- [36] WANG C, WANG Z H, KE R Y, et al. Integrated impact of the carbon quota constraints on enterprises within supply chain: Direct cost and indirect cost. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 92: 774-783.
- [37] 令狐大智, 叶飞. 基于历史排放参照的碳配额分配机制研究. 中国管理科学, 2015, 23(6): 65-72. [LINGHU D Z, YE F. Quota allocation mechanism based on historical emission of carbon. Chinses Journal of Management Science, 2015, 23(6): 65-72.]
- [38] 赵荣钦. 城市系统碳循环及土地调控研究. 南京: 南京大学出版社, 2012: 87-89. [ZHAO R Q. Carbon Cycle of Urban System and Its Regulation through Land Use Control. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 87-89.]
- [39] 杨力, 刘程程, 宋利, 等. 基于熵权法的煤矿应急救援能力评价. 中国软科学, 2013, 28(11): 185-192. [YANG L, LIU C C, SONG L, et al. Evaluation of coal mine emergency rescue capability based on entropy weight method. China Soft Science, 2013, 28(11): 185-192.]

Carbon emission performance of quota allocation simulation-oriented industry: The case study of Zhengzhou

DING Ming-lei^{1,2}, LI Yu-xiang³, ZHAO Rong-qin², ZHANG Zhan-ping²,
HOU Li-peng², LIU Bing-tao⁴, LIU Wei⁵

(1. Research Institute of Sustainable Development, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
2. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power,
Zhengzhou 450046, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming
650091, China; 4. School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water
Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 5. School of Geographical Sciences, East China
Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The research on performance of industrial carbon emission is of great significance to the implementation of carbon emission reduction commitment, the improvement of carbon trading system and the promotion of low-carbon development. Based on the basic data of 181 industrial enterprises in Zhengzhou in 2013, the comprehensive performance evaluation and quota allocation simulation of different industries were carried out by constructing the comprehensive performance index system and quota allocation model of carbon emission. The conclusions are as follows: (1) The distribution of carbon emission intensity of different industries is extremely uneven and is associated to the total carbon emission to some extent, yet the types of associations are different. The carbon emission intensity of electric power, thermal power production and supply industry was the highest (5.4115 t/10000 yuan), while the carbon emission intensity of tobacco manufacturing industry was the lowest (0.0046 t/10000 yuan). (2) Carbon emission of per unit land and per unit labor varies greatly among different industries. The carbon emission per unit land and per unit labor of the electric power and thermal power production and supply industry is obviously higher than that of other industries. (3) The comprehensive performance of carbon emission shows that the lowest carbon emission performance is for electric power, thermal production and supply industries, and the highest for the automobile manufacturing industry. (4) Due to the difference in comprehensive performance of different industries, the quota with different proportions of increase or decrease of carbon emission in the base year is obtained. Electric power, thermal power production and supply industry take the most proportion of quota, while chemical fiber manufacturing industry gets the least. Through carbon quota allocation simulation, we found that the overall emission reduction of Zhengzhou is 182.06 million t, accounting for 5.56%. (5) It is suggested to improve the scheme of industry quota allocation and implement industry quota allocation experimentally based on the comprehensive performance evaluation of carbon emission, so as to achieve the coordination of resource conservation, environmental protection and carbon emission reduction.

Keywords: carbon emission; performance; quota allocation; industry; Zhengzhou