

浙江省区域碳排放权配额分配与补偿研究

冯晨鹏^{1,2}, 尹绍婧¹, 肖相泽³, 丁晶晶^{1,2}, 梁 樑¹

(1. 合肥工业大学管理学院, 安徽 合肥 230009;

2. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009;

3. 浙江省经济信息中心, 浙江 杭州 310006)

摘要: 基于数据包络分析与破产分配方法, 选择“集中分配-局部补偿”的两阶段模型, 对浙江省区域碳配额分配展开研究. 结果表明, 集中分配方案中3市承担了浙江全省的减排任务, 局部补偿方案中由4个获益市向3个受损市提供补偿. 该方案在追求整体社会福利最大化同时兼顾局部利益, 能够减少实施阻力. 研究结果有助于优化区域间碳分配效率, 对推动中国区域碳交易市场构建提供了一定的参考价值.

关键词: 数据包络分析; 碳排放权; 配额分配; 补偿机制; 效率与公平

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)05-0577-11

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.05.001

Study of allocation and compensation of regional carbon emission right in Zhejiang Province

Feng Chenpeng^{1,2}, Yin Shaojing¹, Xiao Xiangze³, Ding Jingjing^{1,2}, Liang Liang¹

(1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making, Ministry of Education, Hefei, 230009;

3. Zhejiang Economic Information Center, Hangzhou 310006)

Abstract: Based on data envelopment analysis(DEA) and bankruptcy allocation methodologies, this study applied a two-stage model (centralized allocation-partial compensation) to investigate regional carbon-quota allocation in Zhejiang Province. The results show that three cities in the centralized allocation plan undertake all the reduction tasks, while four benefited cities provide compensation to three harmed cities in the partial compensation plan. This two-stage model is helpful to reach the target of both overall benefit maximization and regional benefit equality so as to minimize the resistances in practice. This research provides meaningful references for enhancing Chinese regional carbon-quota allocation efficiency, as well as promoting carbon-trading market construction.

Key words: data envelopment analysis; carbon emission rights; quota allocation; compensation scheme; efficiency and equality

1 引言

碳排放权(carbon emission rights)意指向大气排放一定数量的温室气体的权利. 温室气体主要成分为

收稿日期: 2018-02-04; 修订日期: 2018-07-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71971072; 71601062; 71771074; 71601067; 71828101); 中国博士后科学基金资助项目(2017M620257); 教育部人文社会科学资助项目(JS2016JYRW0076); 安徽省自然科学基金资助项目(1708085QG-165); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0803203).

二氧化碳,其导致的全球暖化引起了政策制定者及学者的广泛关注^[1,2].首个碳排放协议《京都议定书》于1997年签署,提出了碳排放交易机制(carbon emission trading schemes, ETS).2009年签署的《哥本哈根协议》,2015年签署的《巴黎协定》,均以ETS为基础^[3].作为世界第二大经济体和最大的碳排放国家,中国同样采取ETS模式来建立碳排放权交易体系¹.

ETS尝试引入市场机制来达成碳减排目标,将碳排放权视为一种特殊商品,可在特定市场上交易^[3].大量研究表明,ETS是一种解决温室效应问题的有效方式^[4],同时,碳排放权,或碳减排权(carbon emission abatement, CEA)配额分配在ETS的实施中扮演着重要角色,是启动碳交易的基础和先决条件.鉴于其重要意义,碳配额分配的研究主题引起了学界的广泛关注.总体而言,可以根据效率准则与公平准则将当前的碳配额分配研究划分为两大类.有关公平准则的研究方面,指数方法最为常见^[5-7].有关效率准则的研究方面,学者采用了许多优化方法来找寻更优的碳配额分配方案^[8,9].而在两种准则的研究方面,数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法均被学术界广泛接受与应用.

DEA是一种经典的评价一组同质决策单元(decision making units, DMUs)相对效率的线性规划方法,兼具绩效评价与资源分配功能^[10,11].碳排放属于生产过程中的非期望产出^[12],在分析中不可与普通产品等同处置,而DEA方法可同时处置期望与非期望产出^[10].当前,已有诸多学者使用该方法研究不同国家或地区的碳配额相关问题,主要基于以下三种准则:效率准则、公平准则和兼顾效率与公平准则.

基于效率准则和DEA方法的碳配额分配研究方面,Lozano等^[13]通过同时使用三个独立的目标集中分配碳配额.Sun等^[14]对比研究了分散式和集中式两种情形下的碳配额分配方式,结果表明集中式表现更佳.上述研究所得到的分配方案主要关注整体利益的最大化,而不考虑个体利益.换言之,基于效率准则的碳配额分配方案可能会损害某些DMUs的个体利益而招致抵制,这将导致方案实施上的困难.

基于公平准则和DEA方法的碳配额分配研究方面,Gomes等^[15]提出统一前沿面的概念,在《京都议定书》的签约国之间进行碳配额分摊.在此基础上,国内外的学者进行了一系列后续理论与应用研究^[16-19].区别于效率准则,基于公平准则的碳配额分配研究主要关注于个体利益.因此,上述研究所得到的分配方案更易被参与者所接受,但是,由于放弃了整体利益的约束,分配方案最终可能会导致社会福利的损失.

在现有的文献中,亦有少数基于DEA方法的碳配额分配研究对效率与公平准则进行了综合考虑.戴前智等^[20]提出一种碳配额分摊模型,确保所有DMUs达到帕累托有效,同时使整体满意度最大化.Feng等^[21]在国际碳配额的分配研究中,提出“集中分配-补偿机制”的两阶段方法,在确保整体利益的前提下,对个体利益重新分配,从而兼顾效率与公平,以利于方案的实施.上述研究在一定程度上弥补了单纯考虑效率准则或者公平准则的缺陷,从而可获得更为科学的碳配额分配方案.

近年来,浙江省在绿色低碳发展上取得了显著成绩,至2020年全省将建立比较成熟的碳交易市场体系².如前所述,碳配额分配是碳交易市场构建的基础和先决条件.因此,区域碳配额分配成为当前浙江省实施碳交易亟待解决的问题.本文以浙江省市级数据为研究样本,借助于Feng等^[21]提出的“集中分配-补偿机制”两阶段方法,致力于获得高效、可行的浙江省11个地级市的碳配额分配方案,助力浙江省碳交易市场的建设.具体而言,第一阶段使用集中式DEA模型对浙江省各地级市进行碳配额分配;第二阶段根据破产模型对各地级市进行利益再分配,补偿集中分配利益受损的地级市.

虽然在理论与实践上学者基于DEA方法进行了诸多碳配额分配研究.然而,已有研究大部分是在省级或者国家级层次进行配额分配^[15-18,22-24],而对地区间或更微观的企业间的分配研究则较为少见^[14].由于某些省情或者国情存在巨大差异,会导致DMUs同质性程度下降.本文所做研究基于浙江省市级数据和DEA方法进行碳配额分配,城市间同质性较高,所得结果更具有现实指导性,在一定程度上弥补了当前研究的不足.与此同时,借助于两阶段方法,本文所得到的分配方案不仅能够满足社会整体利益的最大化,同时能够兼顾个体利益,进而减少方案实施的阻力.研究结论有助于优化浙江省市域间的碳配额分配效率,对推动浙江省乃至中国的区域碳交易市场构建提供了一定的参考价值.

¹中华人民共和国国家发展和改革委员会.《全国碳排放权交易市场建设方案》(发电行业).2017-12-18.

²浙江省人民政府办公厅.《浙江省碳排放权交易市场建设实施方案》.2016-07-04.

2 碳排放环境绩效评价模型

如前所述, 本文主要利用 DEA 技术进行环境绩效评价与碳配额分配. 在 DEA 框架下, 假设参考集中存在 n 个 DMUs, 每个 DMU_j 拥有 m 种投入, s 种产出以及 t 种非期望产出, 分别表示为 $\mathbf{X}_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$, $\mathbf{Y}_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$, $\mathbf{U}_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{tj})^T$, $j = 1, 2, \dots, n$. 大部分的环境绩效研究文献将国内生产总值(gross domestic product, GDP) 和碳排放量分别作为期望产出与非期望产出^[15,25,26]. 本文沿用这一传统做法. 为简单起见, 令 DMU_o 代表当前被评价的 DMU, $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U})$ 表示一个 DMU 的投入、期望产出与非期望产出数据.

本文所采用的 DEA 模型均基于如下假设:

1) 规模收益可变(variable returns-to-scale, VRS). 相较于规模收益不变(constant returns-to-scale, CRS)假设, VRS 假设更符合生产实际情形, 因此本研究基于 VRS 假设构建 DEA 模型. 由于 VRS 假设对权重增加了约束, 所以将导致最后获得的环境绩效值不低于 CRS 假设下的该值.

2) 空结合性(null joint-ness)与弱可自由处置性(weak disposability). Chung 等^[27] 和 Färe 等^[28] 在研究非期望产出建模时提出了空结合性和弱可自由处置性假设. 空结合性表示期望产出与非期望产出的生产关系是空结合的, 即消除非期望产出的唯一方式是停止生产. 弱可自由处置是指在当前的生产技术下, 仅减少非期望产出而不减少期望产出是不可能的. 这两项假设符合非期望产出的特征, 如果去掉则会放大 DEA 模型解集的范围, 将导致最终的结果偏离真实情形.

由于 VRS 假设与空结合性和弱可自由处置性假设相悖^[26], 因此不能像传统 DEA 方法一样通过直接对权重添加凸约束, 将 CRS 假设下的环境生产可能集直接转变为 VRS 的情形. 为此, Zhou 等^[26] 提出了新的环境生产可能集, 对空结合性和弱可自由处置性假设做了微小修正(即期望产出与非期望产出均不可等于 0), 所对应的产出导向环境 DEA 模型(经线性化后)如式(1)所示.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \theta_o \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \sigma_o x_{io}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq \theta_o y_o \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j u_j = u_o \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = \sigma_o \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \varepsilon \leq \sigma_o \leq 1, \end{array} \right. \quad (1)$$

其中 σ_o 可视为调整变量, 为不大于 1 的正数. 在模型线性化前, $\beta_o = 1/\sigma_o$, $\beta_o \geq 1$ 同时乘以 y_o 和 b_o , 表示对于空结合性和弱可自由处置性的修正(这也是模型(1)与传统 DEA 模型的唯一区别之处).

由于本文中期望产出与非期望产出均只有一项(GDP 和碳排放量), 故在模型(1)中对二者未添加表示维度的下标. 对于模型(1)中的其他变量与约束的含义解释, 以及模型(1)的原始模型和线性化过程, 可参见 Zhou 等^[26], 这里不再赘述. 模型最优目标函数 θ_o^* 被定义为 DMU_o 的径向技术效率, 相关定义参见文献^[29,30].

在给定投入水平 $\mathbf{X}_o$ 和碳排放水平 $\mathbf{U}_o$ 的条件下, $\theta_o^* \mathbf{Y}_o$ 表示 DMU_o 的最大 GDP 潜能. 本文选用 GDP

潜能替代当前 GDP 作为 DMU 的最终收益, 因为潜能值更能反映出 DMU 的合理产出. 根据 DEA 理论, 如果完全消除生产中的无效率, 产出潜能就能达到. 效率值越低, 意味着 DMU 达到有效状态所需要付出的努力也就越多. 由于本文选用 GDP 潜能作为 DMU 的最终收益指标, 即希望通过相对效率的评价进一步发掘出 DMU 的产出潜能, 所以将投入水平和碳排放水平固定而最大化 DMU 的产出值, 这也就是模型(1)采用产出导向形式的原因.

3 集中式 CEA 分配模型

本节主要介绍在 DMUs 间进行 CEA 集中分配的方法, 即 Feng 等^[21]所提出两阶段方法的第一阶段. 首先, 在 3.1 节介绍了包含可变 CEA 水平的环境绩效评价模型. 以此为基础, 3.2 节介绍了对 CEA 进行集中式分配的模型, 旨在最大化所有 DMUs 的整体 GDP 潜能.

3.1 包含可变 CEA 水平的环境绩效评价模型

尽管模型(1)已经考虑了碳排放量, 但是无法分析碳减排对 GDP 潜能的影响(即 CEA 水平对于 DMUs 效率的影响). 有鉴于此, 提出包含 CEA 水平的环境绩效模型(2)如下.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \theta_o \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \sigma_o x_{io}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq \theta_o y_o \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j u_j = u_o - b_o \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = \sigma_o \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \varepsilon \leq \sigma_o \leq 1 \\ u_o - b_o \geq 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

与模型(1)相比, 模型(2)中多了一个新的决策变量 b_o , 表示 DMU_o 的 CEA 水平. 相应地, $u_o - b_o$ 表示 DMU_o 的预期碳排放水平. 通过引入这一辅助变量, 模型(2)可以在考虑 DMU_o 的 CEA 目标的情形下测量其环境效率. 注意到, b_o 的上下界可以通过模型(2)的第 3 条约束限定, 这意味着 CEA 的目标需要在一定取值范围内而不能随意设定.

另外, 模型有助于调查 CEA 水平与环境效率之间的关系. Feng 等^[21]的研究成果表明, 模型(2)的最优解是关于 CEA 水平的凹函数. 为方便起见, 该凹函数可表示为 $\theta_o = f_o(b_o)$. 这意味着, 存在一个最优的 CEA 水平 b_o^M 使得 DMU_o 能够在当前的生产技术条件下达到最大的 GDP 潜能. 如果某个 DMU 当前的 CEA 水平与最优水平不一致, 那么该 DMU 就有动力进行调整: 1) 若其 CEA 值低于最优水平, 则该 DMU 有动力主动减少其碳排放量. 换言之, 该 DMU 可以通过出售部分碳配额获得“双重收益”; 2) 若其 CEA 值高于最优水平, 则该 DMU 有动力购买碳配额改善现有状况, 前提是购买价格低于 GDP 的潜在增长量.

3.2 集中式 CEA 分配模型

由模型(2)可知, CEA 水平 b_j 影响效率 θ_j , 进而影响 DMU_j 的 GDP 潜能. 如果所有 DMUs 的 CEA 值均为最优水平, 则相应的 GDP 潜能总额可以达到最大值. 然而, 这意味着各 DMU 可以任意选择其减排水平,

显然与事实相悖. 在当前严峻的减排形势下, 个体及总体往往只会承担相应的最低减排任务.

以模型(2)为基础, 可以构建 VRS 假设下集中式分配模型(3)如下.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \quad \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \lambda_{kj} y_j \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} x_{ij} \leq \sigma_k x_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} u_j = u_k - b_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n b_k \geq B \\ \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} = \sigma_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ \lambda_{kj} \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \varepsilon \leq \sigma_k \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ u_k - b_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \end{array} \right. \quad (3)$$

其中下标 k 代表第 k 个 DMU, λ_{kj} 代表投影 DMU_k 的权重变量. 模型(3)的目标是最大化总的期望产出值, 即 GDP 潜能总额. 模型(3)的前 2 条约束与模型(2)中对应的约束类似, 第3条约束指碳减排总额不得低于 B 值, 该值需要事先给出. 令 $(\lambda^*, \sigma^*, b^*)$ 表示模型(3)的最优解. 对应的 CEA 向量 $b^* = (b_1^*, b_2^*, \dots, b_n^*)^T$ 表示 VRS 假设下一组有效的 CEA 分配(基于效率准则). 这是 Feng 等^[21]所提两阶段方法的第一阶段.

可以预料到的是, 集中式分配方案在实施中可能存在一定的困难. 模型(3)致力于最大化整体利益, 但是优化过程中却忽略了个体利益. 换言之, 由模型(3)求得的个体 GDP 潜能可能与模型(2)的最优值存在一定差距, 因此实施方案会受到那些利益受损的 DMU 的抵制.

4 集中式 CEA 分配的补偿机制

集中式分配方案在实际实施上会遇到困难. 为解决这一问题, Feng 等^[21]根据破产模型设计了补偿机制, 这是两阶段方法的第二阶段. 补偿机制安排分配中获益单元向利益受损单元提供合理补偿, 从而缓解实施过程中的矛盾. 这一阶段将个体利益纳入考虑, 提升了方案实施的可行性.

在 3.2 节, 通过集中式模型得到了一组基于效率准则的 CEA 分配方案 $b_k^*, k = 1, 2, \dots, n$. 如果要实施补偿, 则还需要计算一组基于公平准则的 CEA 分配方案 $b_k^\#, k = 1, 2, \dots, n$. 很明显, $\sum_{k=1}^n b_k^* = \sum_{k=1}^n b_k^\# = B$. Zhou 等^[31]研究结果显示, 对于中国的碳排放交易而言, 根据碳排放量与人口来进行配额分配相对公平. 本文采用人口准则(也被称为平等准则, egalitarian criterion)来计算公平的 CEA 分配方案, 即以各 DMU 的人口比例来分配相应的 CEA 配额^[6].

补偿机制的设计原理主要依靠破产模型. O'Neill^[32]首先研究在破产清算中如何根据各债权人的索求额公平地分配企业剩余财产. 破产模型的核心是分配准则, 该准则需要满足两个条件: 1)合理性: 每个债权人的分配所得不应高于其索求额; 2)有效性: 企业剩余财产需要全部被分配.

破产模型在数学上可被表示为 (E, c) , 其中 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ 表示各债权人的索求额向量, $E < \sum_{k=1}^n c_k$ 代表企业剩余财产总额, 即待分配财产. 破产模型的解可被表示为 $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$, 其

中 $\sum_{k=1}^n e_k = E, 0 < e_k < c_k, k = 1, 2, \dots, n.$

本文应用破产模型中常用的塔木德准则(Talmud Rule)^[33]作为分配方程. Moreno-Ternero^[34]已证明该准则可得到唯一的分配方案, 且该方案属于合作博弈的核心.

基于破产模型的补偿算法步骤如下:

步骤 1 计算 DMU_k 的 GDP 潜能改变值 $\Delta G_k = y_k(f_k(b_k) - f_k(b_k^\#)).$

步骤 2 将所有的 DMUs 分为两类: S_G (如果 $\Delta G_k > 0$)和 S_L (如果 $\Delta G_k < 0$).

步骤 3 计算待分配总额 $E = \sum_{k \in S_G} \Delta G_k.$

步骤 4 计算 DMU_k 的索求额

$$c_k = \begin{cases} y_k(f_k(b_k^M) - f_k(b_k^*)), & \text{若 } \Delta G_k \in S_L \\ y_k(f_k(b_k^M) - f_k(b_k^\#)), & \text{若 } \Delta G_k \in S_G. \end{cases}$$

步骤 5 根据塔木德准则, 计算 DMU_k 的分配额

$$e_k = \begin{cases} \min\{c_k/2, \gamma\}, & \text{若 } E \leq \sum_{k=1}^n c_k/2 \\ \max\{c_k/2, c_k - \delta\}, & \text{若 } E \geq \sum_{k=1}^n c_k/2. \end{cases}$$

步骤 6 计算 DMU_k 的补偿额

$$d_k = \begin{cases} e_k, & \text{若 } \Delta G_k \in S_L \\ e_k + y_k[f_k(b_k^\#) - f_k(b_k^*)], & \text{若 } \Delta G_k \in S_G. \end{cases}$$

步骤 1 中, DMU_k 的 GDP 潜能改变(ΔG_k)为有效与公平 CEA 配额分别对应的 GDP 潜能值之差. 然后, 根据 ΔG_k 值是否为正, 将所有的 DMUs 分为两类: S_G 和 S_L . 在步骤 3 中, 所有属于 S_G 的 DMUs 的整体 GDP 潜能增加量之和为待分配总额 E . 步骤 4 与步骤 5 确定分配量 e_k . 在步骤 4 中, 每个 DMU 均以各自的最大利益作为计算索求额的依据, 通过模型(2)得到最优的 GDP 潜能 $y_k f_k(b_k^M)$. 在步骤 5 中, 根据塔木德准则计算 e_k , 其中 γ 和 δ 属于内生变量. 步骤 6 计算补偿额. S_L 中的 DMU_k 可以获得 e_k 的补偿, 而 S_G 中的 DMU_k 可以获得的补偿额为 e_k 与 GDP 潜能增加值之间的差值.

5 浙江省碳排放权配额分配与补偿

近年来, 浙江省大力实施低碳发展战略. 2014 年, 浙江省分步推进碳排放报告的报送和核查复查工作, 在电力、钢铁、化工等 10 个行业中选取重点企业开展碳报告工作. 至 2016 年, 全省碳排放数据核查已实现重点企业全覆盖³. 《浙江省碳排放权交易市场建设实施方案》明确提出 2017 年浙江省将完成碳排放权交易的基础准备工作, 到 2020 年完善体制机制, 建立比较成熟的碳交易市场体系.

碳交易市场建立的基础是一种交易参与者均接受的碳配额分配方案. 在此背景下, 本节应用“集中分配-局部补偿”的两阶段方法对 2015 年度浙江省 11 个地级市的 CEA 配额进行测算, 同时计算对应的补偿金额. 由于 2015 年度浙江省各地级市的碳排放情况已为既定事实, 本节实际上属于对该省碳排放量的事后再分配优化. 其中 GDP 和碳排放量分别作为期望产出与非期望产出, 全社会从业人数、固定资产投资与能源消耗为投入. 数据大部分来源于《2016 年浙江省统计年鉴》⁴和各地级市的 2016 年统计年鉴. 能源消耗由单位地区生产总值能耗(来源于“浙江统计数据库”⁵)乘以该地区 GDP 推算得到. 碳排放量基于消费端, 通过统

³刘乐平, 胡晓娟.《明年全国统一启动碳排放权交易市场浙江准备就绪》. 杭州: 浙江日报, 2016-08-18.

⁴义乌市隶属于金华市, 因此在数据收集中将所有的义乌市数据并入金华市.

⁵<http://tjjdata.zj.gov.cn/index.do>

计数据和浙江省省级能源平衡表得出, 浙江省能源平衡表来源于《中国能源统计年鉴 2016》⁶. 所有的指标与描述性统计参见表 1.

表 1 浙江省相关指标及描述性统计(2015 年)

Table 1 Research indices definition and description of Zhejiang Province(2015)

类别	指标	单位	均值	标准差
投入	从业人数(X_1)	万人	345.43	194.98
投入	固定资产投资(X_2)	亿元	2 466.49	1 526.33
投入	能源消耗(X_3)	10^4 tce	1 922.61	1 260.77
产出	国内生产总值(Y_1)	亿元	4 007.59	2 872.65
非期望产出	碳排放量(U_1)	10^4 t	3 578.45	2 397.61

在进行 CEA 分配之前, 首先需要确定待分配的 CEA 总额, 即模型(3) 中的 B 值. 根据国家《“十二五”控制温室气体排放工作方案》, 2015 年浙江省单位 GDP 碳排放(即碳强度)要比 2010 年下降 19%⁷. 实际情况显示, “十二五”期间浙江省碳强度累计降幅约 20.7%, 超额完成了国家任务⁸. 换言之, 按照国家设定的减排目标, 浙江省 2015 年的待分配 CEA 总额应为 0. 然而, 根据模型(2) 的计算结果(参见表 2 中最优 CEA 分配总值为正), 浙江省的碳强度仍有下降的空间, 并且进一步的减排不但不会带来经济利益的损失, 反而会导致 GDP 潜能的进一步上升. 为此, 本文利用模型(3) 测算了不同碳减排比例下所对应的浙江省 GDP 潜能, 两者的关系如图 1 所示.

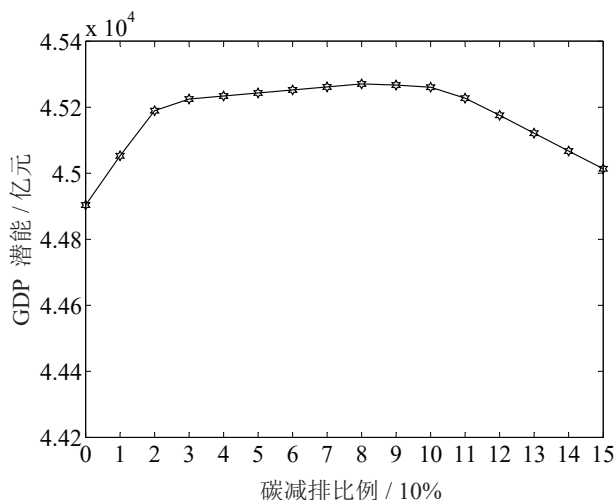


图 1 浙江省 GDP 潜能与碳减排比例关系示意图

Fig. 1 The relations between GDP potential and carbon emission reduction of Zhejiang Province

根据图 1 可知, GDP 潜能是碳减排比例(等价于 CEA 总值)的凹函数. 其中, 当碳减排比例为 8.115% 时, 全省 GDP 潜能达到最大值(为 2015 年度实际 GDP 的 102.70%). 随后, 随着碳减排比例继续上升, GDP 潜能开始缓慢下降. 然而, 本文认为 8.115% 的减排比例并非最佳选择, 概因如此大比例的减排不可一蹴而就, 且需要整个社会付出极大努力. 另外, 图 1 显示当减排比例不高于 2% 时, GDP 潜能呈现较显著递增, 之后的增长则趋于平缓. 最终, 本文将 2015 年度浙江省碳减排比例设定为 2%, 即总的 CEA 水平 $B = 787.26 \times 10^4$ t.

在总减排目标确定后, 即可执行两阶段方法的第一阶段: 集中分配. 根据模型(2)和模型(3)可分别计算出 2015 年度浙江省最优 CEA 分配、有效 CEA 分配, 而平等 CEA 分配则根据公平准则获得. 三种分配方案均展示在表 2 中.

⁶ 计算过程简述如下: 只计算全社会电力消费碳排放量, 不计算发电所消耗能源产生的碳排放量. 各地市碳排放量=第一产业碳排放量+规模以上工业碳排放量+规模以下工业碳排放量+建筑业碳排放量+服务业碳排放量+居民生活碳排放量+全社会电力消费碳排放量.

⁷ 中华人民共和国国务院.《“十二五”控制温室气体排放工作方案》. 2011-12-01.

⁸ 浙江省发展和改革委员会.《浙江省低碳发展“十三五”规划》. 2016-05-12.

表 2 VRS 假设下浙江省各地区 CEA 分配方案

Table 2 Regional CEA allocation quotas of Zhejiang Province under VRS assumption

城市	最优 CEA 分配 / 10^4 t	有效 CEA 分配 / 10^4 t	公平 CEA 分配 / 10^4 t
杭州	0.00	0.00	1 907.23
宁波	0.00	0.00	3 284.98
嘉兴	868.77	868.77	1 498.50
湖州	538.25	42.05	330.85
绍兴	459.92	128.41	1 092.49
舟山	0.00	0.00	-120.92
温州	-251.97	-251.97	-3 286.28
金华	0.00	0.00	-753.68
衢州	1 592.23	0.00	433.80
台州	0.00	0.00	-2 317.39
丽水	0.00	0.00	-1 282.32
总值	3 207.20	787.26	787.26

表 2 中, 如果 CEA 分配额为正值代表需要减少碳排放量, 为负值则代表可以增加碳排放. 值得注意的是, 有效 CEA 分配与公平 CEA 分配的总值均等于设定的减排目标值 B , 而最优 CEA 分配则无此总额限制, 这在表 2 中最后一行的数据得到了印证. 最优 CEA 分配总值为正, 这意味着理论上适度的碳减排水平对浙江省经济并无负面影响, 这一结论突破了学界以往将碳减排与 GDP 增长对立起来的通常认知. 在最优 CEA 分配中, 嘉兴、湖州、绍兴和衢州 4 个地级市为正值(需要通过减排才能达到最优的 GDP 潜能), 温州为负值(只有通过增排才能够达到最优的 GDP 潜能), 其余城市该项分配则为 0. 在有效 CEA 分配中, 3 个地级市(嘉兴, 湖州, 绍兴)承担了全部的减排任务, 其中尤以嘉兴的负担最重, 而温州则得到了更多的碳配额. 在公平 CEA 分配中, 舟山、温州、金华、台州和丽水 5 个地级市为负值, 即按照公平准则, 这些城市可分得的碳配额高于当下实际的碳排放量, 换言之, 这 5 个城市的人均碳排放量水平低于浙江省全省的平均水平.

两阶段方法的第一阶段得到了集中式碳配额分配方案(即有效 CEA 分配), 但是该方案对于部分地区是不公平的, 因此可能在实施中受到阻碍或抵制. 为了分配方案的顺利实施, 需要执行两阶段方法的第二阶段: 局部补偿, 即由分配方案中的获益地市向受损地市提供一定的金额补偿来缓解矛盾. 表 3 报告了 VRS 假设下利用补偿机制计算出的补偿方案结果(包括计算过程中的关键数据: 索求额与分配额).

表 3 VRS 假设下浙江省各地区补偿方案

Table 3 Regional compensations of Zhejiang Province under VRS assumption

城市	索求额 c_k / 亿元	分配额 e_k / 亿元	补偿额 d_k / 亿元
杭州	2 302.48	2 289.71	-12.78
宁波	1 609.15	1 596.38	-12.78
嘉兴	422.02	409.25	-12.78
湖州	11.46	5.73	5.73
绍兴	34.17	21.40	21.40
舟山	0.00	0.00	0.00
温州	0.00	0.00	0.00
金华	286.01	273.23	-12.78
衢州	36.76	23.98	23.98
台州	0.00	0.00	0.00
丽水	0.00	0.00	0.00
总值	4 702.06	4 619.67	0.00

注意到由于 $E \geq \sum_{k=1}^n c_k / 2$, 故根据塔木德中的损失优先法则(constrained equal loss rule, CEL)计算各地区的补偿额, 内生变量 $\delta = 12.78$ 亿元. 表 3 中各地区的补偿额总值为 0, 意味着补偿行为本质上是省内各地区间利益的再分配. 最终结果显示, 湖州、绍兴和衢州 3 个地级市获得正的补偿额(其中衢州获得的补偿额最高); 而杭州、宁波、嘉兴和金华 4 个地级市获得负的补偿额, 即被要求向其他地区提供补偿, 且这 4 个地

级市提供的补偿费用均等于 δ 值. 其余地级市(舟山, 温州, 台州和丽水)补偿额为 0, 即既不获得也不需提供补偿费用, 这是由于其在补偿机制中的诉求额均为 0.

概括来讲, 最终的碳配额分配方案由表 2 中的“有效 CEA 分配”(第一阶段: 集中分配)与表 3 中的“补偿额”(第二阶段: 局部补偿)共同构成, 在确保整体利益最大化的同时能够增加分配方案的公平性与可接受度. 下图将本研究利用两阶段方法计算出的浙江省 2015 年度碳配额分配方案直观地进行了展示.

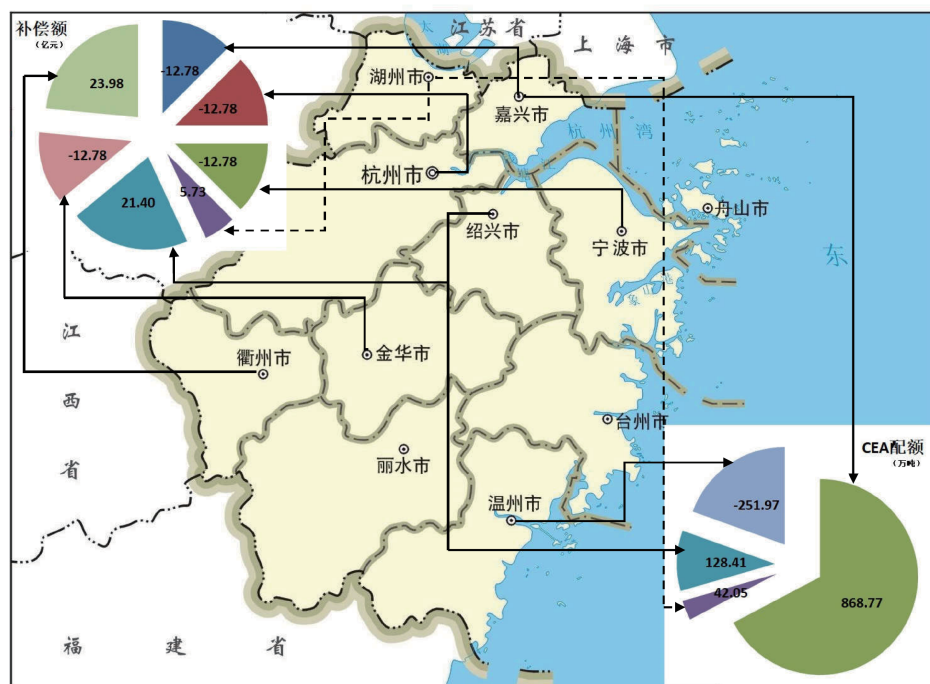


图2 浙江省区域碳配额两阶段分配方案示意图

Fig. 2 The sketch of regional “Two-step” allocation plan of Zhejiang Province

由图 2 可知, 一共有 3 座城市(舟山, 丽水和台州)的补偿额与 CEA 配额均为 0, 即未参与到两阶段分配方案中, 概因这些地区的碳排放绩效在浙江省内相对“平均”. 由于具备独特特征, 嘉兴和衢州两个地级市的分配方案值得进一步关注和讨论. 嘉兴在集中分配中承担了最重的碳减排任务, 但在局部补偿中却仍被要求提供一定的补偿额来弥补其他地市的受损利益. 相反, 衢州在集中分配中未承担碳减排任务, 但却在局部补偿中获得了最多的补偿金额. 导致这一反常结果的原因在于嘉兴和衢州两个地级市的最优 CEA 分配额均为正值(参见表 2), 即这两个地区倾向于选择减排以达到 GDP 潜能的最大值. 然而, 受限于减排总量, 在有效 CEA 分配中, 只有嘉兴取得了与最优分配量相当的 CEA 配额, 湖州、绍兴和衢州则均未获得足够的 CEA 配额(特别是衢州 CEA 配额为 0). 主要的原因可能在于, 和湖州、绍兴与衢州相比, 嘉兴具有相对更为高效的生产系统和低碳的产业结构, 在同等减排量情况下可带来更多的 GDP 潜能. 衢州则具有较为偏重的工业体系和全省最高的碳排放强度, 经济仍处于重化工业时期, 同样的碳减排量对 GDP 潜能增长有限. 因此, 嘉兴在有效 CEA 分配当中属于获益地区, 而衢州则属于利益受损地区.

基于实证研究结果, 本文提出如下政策建议: 1) 建议政府加快从碳强度下降目标分配考核过渡至碳配额目标分配考核的转变. 当前, 政府依然采取碳强度下降目标分配考核的形式, 这不仅不利于经济更深度向绿色发展转型, 而且不利于实现中国 2030 年左右碳排放达到峰值的国际承诺. 2) 建议政府采用更为宏观和长远, 既考虑现状, 更考虑最优情形的地区碳配额目标分配方法. 当前对于地区碳排放强度下降目标的分解方法多基于体现现状的指标值集成而得, 不利于激发地方的控碳减碳潜力. 3) 建议政府加强对于区域完成降碳目标的分类指导和实质性支持. 政府可通盘考虑管辖区域范围内的经济利益最大化和碳排放量最小化, 强化因地制宜, 并通过转移支付(补贴)的形式, 实现更具灵活性和主动性的减排目标.

6 结束语

基于效率准则与基于公平准则是当前碳配额分配中的两种常见方式. 然而, 由于利益出发点不同, 导致两者均存在一定的片面性. 本文基于 DEA 方法, 借助“集中分配-局部补偿”的两阶段模式对 2015 年度浙江省展开区域碳配额分配与利益补偿研究. 在第一阶段, 使用集中式 DEA 模型对浙江省 11 个地级市进行 CEA 配额分配, 以最大化全省 GDP 的潜能; 在第二阶段, 使用破产模型对利益再分配, 计算各地级市的补偿额. 这一两阶段分配方案可在确保整体利益最大化的同时, 增加方案的公平性, 从而显著降低方案的实施难度.

研究结果显示, 在集中分配中, 总的减排任务(约为实际碳排放量的 2%)仅由三个地级市(嘉兴, 湖州和绍兴)承担, 其中尤以嘉兴承担任务最重. 在局部补偿中, 则由四个地级市(杭州, 宁波, 嘉兴和金华)提供补偿, 三个地级市(衢州, 绍兴和湖州)获得补偿.

未来的研究中, 在基于效率的 DEA 分配模型中引入更多的公平准则仍值得关注. 此外, 在 CEA 的初始分配中, 除了平等主义准则, 更多的公平准则应该被考虑和比较. 与此同时, 研究更多的算法来完善补偿机制也很有必要. 此外, 也可将其他研究的成果融合到两阶段框架中, 如供应链中的利益共享、委托代理中的激励理论和利益分配中的合作博弈等.

参考文献:

- [1] 夏梓耀. 碳排放权研究. 北京: 中国法制出版社, 2016.
Xia Z Y. The Study of Carbon Emission Right. Beijing: China Legal Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [2] Zhou P, Ang B W, Poh K L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(1): 1–18.
- [3] 孟早明, 葛兴安. 中国碳排放权交易实务. 北京: 化学工业出版社, 2017.
Meng Z M, Ge X A. The Practice of China's Carbon Emission Trading. Beijing: Chemical Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [4] Stern N. A Blueprint for a Safer Planet: How to Manage Climate Change and Create a New Era of Progress and Prosperity. London: The Bodley Head, 2009.
- [5] Knight C. What is grandfathering. *Environmental Politics*, 2013, 22(3): 410–427.
- [6] Grubb M. The greenhouse effect: Negotiating targets. *International Affairs*, 1990, 66(4): 67–89.
- [7] Yu S M, Gao X, Ma C M, et al. Study on the concept of per capita cumulative emissions and allocation options. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 2(2): 79–85.
- [8] Wu H Q, Du S F, Liang L, et al. A DEA based method for fair reduction and reallocation of emission permits. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(5/6): 1095–1101.
- [9] Liao Z L, Zhu X L, Shi J R. Case study on initial allocation of Shanghai carbon emission trading based on Shapley value. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 338–344.
- [10] Cook W D, Seiford L M. Data envelopment analysis(DEA): Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 2009, 192(1): 1–17.
- [11] 杨国梁, 刘文斌, 郑海军. 数据包络分析方法(DEA)综述. *系统工程学报*, 2013, 28(6): 840–860.
Yang G L, Liu W B, Zheng H J. Review of data envelopment analysis. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(6): 840–860. (in Chinese)
- [12] Baumgärtner S, Dyckhoff H, Faber M, et al. The concept of joint production and ecological economics. *Ecological Economics*, 2001, 36(3): 365–372.
- [13] Lozano S, Villa G, Brännlund R. Centralised reallocation of emission permits using DEA. *European Journal of Operational Research*, 2009, 193(3): 752–760.
- [14] Sun J S, Wu J, Liang L, et al. Allocation of emission permits using DEA: Centralised and individual points of view. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(2): 419–435.
- [15] Gomes E G, Lins M P E. Modeling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(5): 616–623.

- [16] 林 坦, 宁俊飞. 基于零和 DEA 模型的欧盟国家碳排放权分配效率研究. 数量经济技术经济研究, 2011, 1(3): 36–50.
Lin T, Ning J F. Study on allocation efficiency of carbon emission permit in EUETS based on ZSG-DEA model. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2011, 1(3): 36–50. (in Chinese)
- [17] 苗 壮, 周 鹏, 李向民. 我国“十二五”时期省级碳强度约束指标的效率分配: 基于 ZSG 环境生产技术的研究. 经济管理, 2012, 34(9): 25–36.
Miao Z, Zhou P, Li X M. China's carbon intensity constraint efficiency allocation research during “12–5” period: Based on ZSG environmental production technology. Economic Management Journal, 2012, 34(9): 25–36. (in Chinese)
- [18] Chiu Y H, Lin J C, Su W N, et al. An efficiency evaluation of the EU's allocation of carbon emission allowances. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2015, 10(2): 192–200.
- [19] 郭 际, 刘 慧, 吴先华, 等. 基于 ZSG-DEA 模型的大气污染物排放权分配效率研究. 中国软科学, 2015, (11): 176–185.
Guo J, Liu H, Wu X H, et al. Allocation of air pollutants emission rights based on zero-sum gains data envelopment analysis. China Soft Science, 2015, (11): 176–185. (in Chinese)
- [20] 戴前智, 雷西洋, 李勇军, 等. 基于 DEA 与整体满意度最大化的排放量分摊. 系统工程理论与实践, 2014, 34(4): 917–924.
Dai Q Z, Lei X Y, Li Y J, et al. Allocating emissions based on DEA and maximizing the whole satisfaction degree. Systems Engineering: Theory & Practice, 2014, 34(4): 917–924. (in Chinese)
- [21] Feng C P, Chu F, Ding J J, et al. Carbon emissions abatement(CEA) allocation and compensation schemes based on DEA. OMEGA, 2015, 53(6): 78–89.
- [22] 陈 磊, 王应明. 基于环境绩效视角的交叉效率评价方法. 系统工程学报, 2016, 31(5): 700–709.
Chen L, Wang Y M. Cross efficiency evaluation method based on environmental performance. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(5): 700–709. (in Chinese)
- [23] 杨 俊, 陆宇嘉. 基于三阶段DEA的中国环境治理投入效率. 系统工程学报, 2012, 27(5): 699–711.
Yang J, Lu Y J. Environmental investment efficiency in China based on three-stage DEA model. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(5): 699–711. (in Chinese)
- [24] 杜慧滨, 王洋洋. 中国区域全要素二氧化碳排放绩效及收敛性分析. 系统工程学报, 2013, 28(2): 256–264.
Du H B, Wang Y Y. Total-factor CO₂ emission performance and the convergence hypothesis in China. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(2): 256–264. (in Chinese)
- [25] Zofio J L, Prieto A M. Environmental efficiency and regulatory standards: The case of CO₂ emissions from OECD industries. Resource and Energy Economics, 2001, 23(1): 63–83.
- [26] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. Energy Economics, 2008, 30(1): 1–14.
- [27] Chung Y H, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function method. Journal of Environmental Management, 1997, 51(3): 229–240.
- [28] Färe R, Grosskopf S, Hernandez-Sancho F. Environmental performance: An index number method. Resource and Energy Economics, 2004, 26(4): 343–352.
- [29] Debreu G. The coefficient of resource utilization. Econometrica, 1951, 19(3): 273–292.
- [30] Farrell M J. The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society, Series A, 1957, 120(3): 253–281.
- [31] Zhou P, Zhang L, Zhou D Q, et al. Modeling economic performance of interprovincial CO₂ emission reduction quota trading in China. Applied Energy, 2013, 112(16): 1518–1528.
- [32] O'Neill B. A problem of rights arbitration from the Talmud. Mathematical Social Sciences, 1982, 2(4): 345–371.
- [33] Aumann R J, Maschler M. Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud. Journal of Economic Theory, 1985, 36(2): 195–213.
- [34] Moreno-Ternero J D. A new analysis of a simple model of fair allocation. Economics Letters, 2013, 118(2): 393–395.

作者简介:

冯晨鹏(1987—), 男, 山西平遥人, 博士, 副教授, 研究方向: 绩效评价与资源分配, Email: cpfeng@hfut.edu.cn;
尹绍婧(1996—), 女, 云南楚雄人, 本科生, 研究方向: 碳排放权分配, Email: shaojing160101@163.com;
肖相泽(1988—), 男, 江西泰和人, 博士, 助理研究员, 研究方向: 应对气候变化, Email: xxze@mail.ustc.edu.cn;
丁晶晶(1984—), 男, 安徽肥西人, 博士, 副教授, 研究方向: 统计与决策分析, Email: jingding@hfut.edu.cn;
梁 樑(1962—), 男, 安徽肥东人, 博士, 教授, 研究方向: 决策科学和供应链管理, Email: lliang@hfut.edu.cn.