

从碳排放 到环境效率评价

——测度方法与实证检验

宋马林 等/著



科学出版社

安徽财经大学学术著作出版基金资助

从碳排放 到环境效率评价

——测度方法与实证检验

宋马林 等/著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

在碳排放效率测算方法上,现有的成果大多使用基于 DEA 的 Malmquist 指数分析法考察不同国家和地区碳排放效率的动态变化。针对我国转型期碳排放效率的独特性,又不失全面性,本书在使用上述方法分析分省碳排放效率的动态变化之后,又分析了工业分行业二氧化碳排放效率的动态变化。本书还通过案例分析,以安徽为例详尽地介绍了如何进行碳排放的驱动力分析和未来发展规划。本书在生产效率公理化理论的基础上,为环境效率评价系统提出更为稳健、精确的 DEA 方法,并构建完备的统计检验模型,最后将其应用到备受国内外关注并急需解决的环境效率评价问题中。同时,我们创新地给出了转型期中国环境效率评价的完整方案,弥补了过去绝大多数研究成果都忽略了对效率评价结果统计属性进行研究的缺欠。

本书既可供从事环境经济与管理教学、科研工作的高校教师、干部和管理人员以及研究生阅读,也可供相关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

从碳排放到环境效率评价:测度方法与实证检验 / 宋马林等著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-041390-1

I. ①从… II. ①宋… III. ①二氧化碳—排气—环境生态评价—中国 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 156442 号

责任编辑:李 莉 / 责任校对:王 双
责任印制:李 利 / 封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

※

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:15

字数:302 000

定价:62.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

一

当前，环境问题已成为阻碍世界各国社会经济可持续发展的重大难题之一。如何有效解决环境问题、遏制环境进一步恶化，也已在全球范围内引起了众多专家学者的高度关注。因此，研究和完善环境效率评价的相关技术问题，将在推动学科前沿发展的同时，为我国新时期节能减排约束性指标的实现提供支撑。由于数据包络分析（data envelopment analysis, DEA）方法具有简单实用以及无须事先确定输入和输出指标权重系数的优点，自 1978 年被提出以来，深受国际学界重视，理论模型不断地得到发展和丰富，被越来越广泛地应用于各类系统的效率评价，逐渐形成了一个数学、经济学、管理科学交叉研究的新领域，并取得了很大的发展。所以，当基于 DEA 的碳排放与环境效率评价方法被提出后，国内外许多学者就将其作为一个重要的研究方向。

碳排放是温室气体排放的一个总称，其中最主要的气体就是二氧化碳，因而一般用二氧化碳排放量来衡量碳排放量。我们所追求的较高的碳排放效率，就是希望用较小的碳排放量来换取较快的社会经济发展速度和较小的能源消费量。对碳排放效率的测度，是近年来国际学界高度关注的一个问题。在国际上，早期的研究者往往通过对二氧化碳排放的场景模拟，计算出碳排放效率，借以分析未来能源政策。所以，本书从碳排放效率的相关概念入手，系统地给出了区域和行业碳排放效率的测度方法和实证分析方案，得出碳排放效率影响因素分析的程序和结论。

在碳排放效率测算方法上，现有的成果大多使用基于 DEA 的 Malmquist 指数分析法考察不同国家和地区碳排放效率的动态变化。针对我国转型期碳排放效率的独特性，又不失全面性，本书在使用上述方法分析分省碳排放效率的动态变化之后，又分析了工业分行业二氧化碳排放效率的动态变化。另外，固有的研究一般是通过煤炭、石油、天然气三种能源的消耗量来推算碳的排放量，这并不精确。本书根据《能源统计年鉴》中“终端消费量”和“加工转化投入产出量”，提出用细分种类的能源消耗量来推算碳排放量的方法，较传统的计算方法更加准

确。还有,传统研究往往使用《能源统计年鉴》中提供的“固定资产净值年平均余额”来替代“工业分行业资本存量”,但是这二者是不能等同的,本书则采用更完备的分省资本存量等方法测算了工业分行业的资本存量。本书还通过案例分析,以安徽为例详尽地介绍了如何进行碳排放的驱动力分析和未来发展规划。本书进行了对外开放视阈下碳排放与环境效率的测算与检验,对促进我国更好地实施对外开放战略、转变经济发展方式等方面具有重要意义。

二

在对环境造成危害的诸多因素中,包括二氧化碳排放在内的温室气体排放仅仅是其中重要的一个类别。其他的影响因素包括废水、废渣、二氧化硫、氮氧化物和粒子状污染物等。国际上将这些统称为非期望产出(undesirable outputs)。如何测度非期望产出,则是环境效率评价工作中一个至关重要的环节。因此,我们在本书中详尽地介绍了如何进行更精确的环境效率评价。当考虑非期望产出时,传统的DEA效率模型关于产出最大化的假定并不适用。已有的成果在求解方法和变量相互关系的处理上,依然存在一些不足之处。对已有的非期望产出DEA模型进行修正和改进,可以提高环境效率评价结果的精度,拓宽模型的应用范围,从而更好地服务于实践。另外,现有的DEA效率评价公理体系也未能充分考虑参数结构特点。现有的体系仅仅依据一些最为适用的性质(如凸性和单调性等),以致其在效率评价过程中的作用相对单薄,一定程度上制约了DEA方法的发展和应用。

本书在生产效率公理化理论的基础上,为环境效率评价系统提出更为稳健、精确的DEA方法,并构建完备的检验模型,最后将其应用到备受国内外关注并急需解决的环境效率评价问题中。本书在全面综述环境效率评价研究新进展的基础上,认为国际上基于考虑非期望产出DEA方法的环境效率评价的研究,大多侧重于对非参数DEA技术的拓展和完善,而对与之相关的环境效率评价模型统计学特征的研究仍然涉足不多。同时,现有的研究方法主要是被应用于发达国家和地区的环境效率评价,尚缺乏针对包括中国在内的新兴国家和地区系统化的实证分析。在国内,虽然不少学者将考虑非期望产出的DEA效率模型作为环境效率评价的一个重要前沿方向,但是对于传统的考虑非期望产出的DEA方法本身存在的不足之处很少问津,针对中国各区域的环境效率评价工作也需要进一步地开展。

针对以上问题,本书开展了一系列相关研究。我们设计了一种新的网络CCR-SBM环境效率评价模型,用以提高考虑非期望产出的环境效率评价的精度,并给出解决产出“拥挤”问题的方法。针对在实际生产过程中,人们总是追求实现期望产出最大且非期望产出最小的目标,我们还为之设计了非径向-双目标环境效率评价DEA模型。我们运用了环境效率评价的最小二乘估计,认为针

对环境效率评价方法的统计学特征分析,将为环境效率 DEA 评价模型提供新的思路和拓展空间,推进统计学与运筹学的交叉研究与发展。通过分析外商直接投资对环境效率的影响,我们还进行了国际垂直专业化环境效率的动态分析。

在对上述问题展开的研究中,我们创新地给出了转型期中国环境效率评价的完整方案。第一,在较全面地分析环境效率评价实际问题特征的基础上,构建一系列全新的环境效率 DEA 评价模型,主要包括将决策单元(decision making unit, DMU)的生产过程分为生产和污染处理两个环节进行评价的网络 CCR-SBM 环境效率评价模型,考虑 DEA 有效性与 Pareto 最优的非径向-双目标 DEA 模型,以及考虑非期望产出的 Super-efficiency 模型。第二,从本质上来讲,非径向-双目标 DEA 模型是一种确定性技术,其效率评价结果容易受到一些异常值及极端值的影响。基于这种考虑,我们通过采用生产模型构建、凸非参数最小二乘分析(concave nonparametric least squares, CNLS),构建了考虑非期望产出的非径向-双目标 DEA 模型的非参数最小二乘估计,开展了环境效率评价的系统聚类分析和环境效率影响因素的 Tobit 检验,从而弥补了过去绝大多数研究成果都忽略了对效率评价结果统计学特征进行研究的欠缺。

三

尽管本书较全面地介绍和研究了碳排放和环境效率评价方法,并收集和整理数据进行了验证,还以案例分析的形式开展了安徽省碳排放驱动力分析和发展规划的设计,以及中国转型期环境效率的综合评价,但是仍然存在以下一些不足或欠缺。

一是实证数据的收集、整理和分析。本书将研究的重点放于基于 DEA 的碳排放测度方法,以及环境效率评价模型的求解和统计属性分析等技术环节的改进上,并对改进模型的应用进行了研究,但是限于数据的可得性,未能给出更具体的统计调查和统计整理的实施方案。例如,未来需要分别选定哪些企业作为样本进行调查,是采用抽样调查、重点调查还是其他调研方法,以及对于调研数据的采集、整理和分析等,这些是我们需要关注和努力的工作方向之一。

二是非常规数据条件下的碳排放与环境效率评价方法及应用。在当前与环境相关的数据公开程度不够的情形下,碳排放效率评价以及环境效率评价系统的特性正是非常规数据建模方法与考虑非期望产出的 DEA 效率模型相结合所具有的特点。这需要将二者很好地结合起来,用以研究基于非常规数据与优化的新的综合评价方法,建立评价模型和评价系统,开展应用研究,并指导未来一段时期碳排放与环境效率评价工作。

三是考虑整数约束的非期望产出 DEA 模型研究。对于环境效率评价,本书未能考虑在实施过程中,还会涉及具有整数特性的指标,但这至今在国际上也尚无非常有效的解决方法。一方面,在效率评价过程中整数变量广泛存在且不可忽

视。例如，在评价一些燃煤电厂的环境效率时，工厂的锅炉、汽轮机、发电机等设备台数和工人数量这些重要的指标只能选取整数值，目前的 DEA 效率评价模型关于变量的假定对此就会失效。另一方面，目前的 DEA 模型无法对整数变量进行准确计算，只能进行简单的近似求解，所得到的近似结果与现实情况往往相差甚远，甚至根本不具有可比性。这也是需要进一步研究的问题。

四

在本书相关内容的研究和起草阶段，我们曾得到国家统计局，安徽省环境保护厅和安徽省统计局等单位领导、专家的无私支持，并先后赴北京、天津、南京和合肥等地进行调研搜集资料，前后举行过多次规模不等的专家咨询会和学术讨论会，对书中涉及的评价理论、指标体系和评价方法反复论证，多次修改。其中，宋马林撰写了本书第二、七、八、九、十章，参与撰写了第十一、十二和十四章；胡虎子撰写了第一、三、四和六章；程晨撰写了第五章；宋雅晴撰写了第十一和十二章，参与撰写了第一和第三章；陈坤撰写了第十三章；徐龙撰写了第十四章；杨杰撰写了第十五章；王舒鸿、彭军、吴青青与曹秀芬等也参加了本书的讨论和撰写。

本书得到安徽财经大学学术著作出版基金的资助，在此表示特别感谢。

在本书撰写的过程中，我们深切地感受到这一研究的理论难度，我们也更加感觉到，对书中涉及的许多问题的研究还未最终完成，恳请有关专家和各界人士多加指导，以期在后续研究中臻于完善。

宋马林

2014 年 3 月

目 录

第一部分 碳排放与环境效率评价理论研究

第一章 碳排放效率的基本内涵	3
第一节 碳排放效率及其相关概念	3
第二节 碳排放效率的测度	4
第二章 环境效率评价的相关问题	10
第一节 环境效率评价研究的起源	10
第二节 国内外研究现状与综述	15

第二部分 碳排放效率的测度及其影响因素

第三章 区域碳排放效率的测度与分析	23
第一节 区域碳排放效率实证方法	23
第二节 区域投入-产出数据的计算	24
第三节 区域碳排放效率测算结果分析	28
第四章 工业行业碳排放效率测度和分析	35
第一节 行业投入-产出数据计算	36
第二节 行业碳排放效率的测算结果及分析	44
第五章 我国农村低碳经济实施效率分析	51
第一节 模型简介	51
第二节 数据与测度指标的描述性分析	55
第三节 我国农村低碳经济实施效率分析	58
第六章 碳排放效率影响因素分析	64
第一节 影响因素指标的确定	64
第二节 碳排放效率实证模型的构建	66
第三节 影响因素实证结果的讨论	69

第三部分 环境效率评价方法及其改进

第七章 网络 CCR-SBM 环境效率评价模型	75
第一节 网络 CCR-SBM 相关研究简述	75
第二节 网络 CCR-SBM 模型的构建	77
第三节 基于网络 CCR-SBM 的实例分析	81
第八章 考虑非期望产出的非径向-双目标 DEA 模型	84
第一节 非径向-双目标 DEA 模型的构建	85
第二节 基于非径向-双目标 DEA 模型的实证分析	90
第九章 考虑非期望产出的 Super-efficiency 模型	94
第一节 Super-efficiency 模型相关研究简述	94
第二节 Super-efficiency 模型的构建	95
第三节 基于 Super-efficiency 模型的实例分析	100

第四部分 环境效率评价方法的统计分析

第十章 环境效率评价模型的最小二乘估计	109
第一节 DEA 统计属性分析的相关文献	109
第二节 环境效率评价模型与非参数最小二乘估计	110
第三节 环境效率评价模型统计属性的实证分析	117
第十一章 环境效率评价的系统聚类分析	122
第一节 环境效率测度和比较分析	123
第二节 区域环境效率水平的差异分析	131
第十二章 环境效率影响因素的 Tobit 检验	136
第一节 环境效率影响因素模型构建	138
第二节 Tobit 回归与影响因素分析	139
第三节 我国农村低碳经济实施效率的影响因素分析	145

第五部分 碳排放与环境效率评价案例分析

第十三章 碳排放的驱动力分析与未来发展规划	153
第一节 碳排放的驱动力分析	153
第二节 低碳目标下的未来发展规划	163
第十四章 基于统计检验的安徽省各地市环境效率分析	169
第一节 模型介绍	169
第二节 安徽省各地市环境效率测算	171
第三节 安徽省各地市环境效率分析	175

第四节	基于统计检验的安徽省各地市环境效率统计分析·····	180
第十五章	对外开放视阈下的碳排放与环境效率·····	188
第一节	中国的对外开放与碳排放·····	190
第二节	FDI 对环境效率的影响·····	198
第三节	国际垂直专业化下环境效率的动态分析·····	206
第四节	本章小结·····	216
参考文献	·····	218

第一部分

碳排放与环境效率评价理论研究

碳排放效率的基本内涵

第一节 碳排放效率及其相关概念

一般而言，碳排放包括多种温室气体的排放，主要是二氧化碳排放。因此，本书所指的碳排放，如无特别说明，就为二氧化碳排放。在国内，对碳排放效率的研究是近几年才兴起的，在此之前随着对能源问题、环境问题的关注，学者们已经提出一些与之相关的效率评价的概念，如生态效率、能源效率、碳生产率等，下面对这些概念做出界定。

一、与碳排放相关的概念

1. 生态效率

生态效率是在 1992 年联合国里约环境与发展大会上被首次提出来的，是指生态资源满足人类需要的效率，用投入和产出的比值表示。“投入”是指企业生产或经济体消耗的能源和资源以及它们所造成的环境负荷，“产出”是指企业生产或经济体提供的产品和服务的价值。生态效率用地区生产所消费的所有资源和吸纳其废弃物所需要的单位有用土地的面积所对应的地区生产总值来测度。生态效率受国内生产总值(GDP)、人口规模、劳动生产率、第三产业占 GDP 的比重、城市化水平、经济活动能耗等因素的影响。生态效率是经济效率和环境效益的统一，是将宏观上的可持续发展与微观企业、中观行业的发展规划相结合。目前，生态效率已成为政策制定者的重要参考指标。

2. 能源效率

目前学术界对能源效率的定义并没有统一的说法，大家普遍比较接受的是 Patterson(1996)基于“帕累托效率”对能源效率的定义，即指用较少的能源投入

生产出同样数量的、有用的产出或者服务，通俗地讲，能源效率就是单位能源消耗所带来的经济效益多少的问题。对能源效率的度量可以采用单位产值能耗、单位产品能耗、单位建筑面积能耗等指标，也可借助于 DEA 技术将能源消耗作为一个投入指标，计算在同样产出条件下潜在的能源消耗与实际的能源消耗的比值，作为对能源效率的度量。

3. 碳生产率

麦肯锡咨询公司在 2008 年 10 月发布的一篇名为《碳生产率挑战：遏制全球变化保持经济增长》的报告中首次提出碳生产率。它被定义为单位二氧化碳的 GDP 产出水平，又可以称为“碳均 GDP”，与“单位 GDP 的碳排放强度”成倒数关系。该报告指出，任何成功的气候变化减缓技术必须满足两个条件——既能稳定大气中的温室气体含量，又能保持经济的增长，而碳生产率将这两个目标很好地结合了起来。

二、碳排放效率的概念

一般而言，较高的碳排放效率就是以较小的碳排放量换取较快的经济增长速度、较小的能源消费量。考虑到碳排放与能源消费、经济发展等因素的关系，学者们提出一系列评价碳排放效率的指标，像单位能源的碳排放量、单位 GDP 能耗、单位 GDP 的碳排放量、人均单位 GDP 碳排放量等。也有部分学者借助于 DEA 技术将碳排放作为一种产出，在资本、劳动、能源投入不增加，作为产出的 GDP 不减少的情况下，将潜在的碳排放量与实际的碳排放量的比值作为二氧化碳的排放效率。

可见生态效率主要研究经济活动所造成的能源、资源的消耗以及所造成的环境负荷与产出的关系，缺乏对碳排放的针对性。虽然能源消费与碳排放之间关系紧密，但二者的侧重点不同。能源效率强调节能；碳排放效率则突出减排。碳生产率定义为单位二氧化碳的 GDP 产出水平，虽然突出碳排放与经济发展的关系，但割裂了碳排放与能源消费等因素的关系。所以碳排放效率最能体现碳排放与经济发展、能源消费等因素之间的关系。

■ 第二节 碳排放效率的测度

通过对碳排放效率研究的不断深入，形成了一系列对碳排放效率的评价指标，从学者提出的先后顺序来分，依次为单位能源的碳排放量、单位 GDP 能耗、单位 GDP 碳排放量、人均单位 GDP 碳排放量，以及最近提出的基于 DEA 的对碳排放效率的测度。本节将对以上提到的对碳排放效率测度的各种方法指标进行详细的介绍。

一、比例指标测度碳排放效率

单位能源的碳排放量、单位 GDP 能耗、单位 GDP 碳排放量、人均单位 GDP 碳排放量等指标都是比例指标。单位能源的碳排放量反映的是二氧化碳与能源消费的关系。由于能源消耗与碳排放之间确定的数量关系，单位 GDP 能耗和单位 GDP 碳排放量都可以被认为反映了经济增长与碳排放的关系。单位能源的碳排放量、单位 GDP 能耗、单位 GDP 碳排放量都只是反映了碳排放与单独某一个影响因素的关系，是单因素指标。人均单位 GDP 碳排放量还反映了碳排放与经济增长和人口因素的关系，该指标是一个多因素指标，在反映碳排放效率方面较前三个指标更加全面。

碳排放效率受经济发展、能源消费等多个因素的共同影响，表现出明显的全要素特点。以上四个评价指标都是比例指标，受处理方法的限制，比例指标不能表现出碳排放效率全要素的特点。随着 DEA 技术在经济学中的广泛应用，借助该技术可以体现碳排放效率全要素的特点。

二、静态碳排放效率的测度

所谓静态碳排放效率，是指被评价单位在某个时间段内的碳排放效率。我们使用 DEA 技术实现对静态碳排放效率的测度，其结果就体现了碳排放效率全要素的特点。

在个体进行生产时，投入资本、劳动、能源获得产出的同时也带来二氧化碳的排放，此处我们将碳排放也作为一种产出，但是二氧化碳不是我们想要的产出，我们将碳排放称为坏的产出，相对应的是好的产出。考虑碳排放效率的定义，对于二氧化碳这种坏的产出和好的产出我们不能做同样的处理。所以，在使用 DEA 技术测算碳排放效率时，我们先要借助于某种技术将好的产出和坏的产出统一到一个投入-产出模型中，这种技术就是环境生产技术。

(一)环境生产技术

当投入一定的生产要素后，我们获得了 GDP、工业总产值等我们想得到的产出，同时也获得了废水、废气和固体废弃物等我们不想得到的产出，我们把这些不想得到的产出称为非期望产出，与此相对应，把 GDP、工业总产值等我们想得到的产出称为期望产出。对于一个地区，投入资本(K)、劳动力(L)和能源(E)，得到期望产出 GDP(Y)，同时也得到一种非期望产出碳排放(C)，这个生产过程可以描述如下：

$$T = \{(K, L, E, Y, C) : (K, L, E) \text{ 可以生产 } (Y, C)\} \quad (1.1)$$

通常，将包含碳排放等非期望产出在内的生产过程称为环境生产技术(Zhou

et al., 2008a)。

在传统的生产理论中, T 通常被假定为闭合和有界的, 也就是说, 有限的投入不可能得到无限的产出, 只能得到有限的产出。另外, 投入和期望产出被认为是强可处置的, 也就是说, 如果使用给定的投入可以得到两种产出, 那么也可以得到这两种产出任意加权平均的产出。

为了能够合理地描述既包含期望产出又包含非期望产出的环境生产技术, 不同的学者提出不同的处理办法。一个简单的处理办法就是把非期望产出作为投入 (Seiford and Zhu, 2002), 但是 Forsund 和 Sarafoglou (2002) 指出, 将非期望产出作为投入处理会导致物质平衡方程的冲突。被普遍认同的一个观点是 Färe 等 (1989) 提出的非期望产出的弱可处置性 (weak disposability) 和零和性。非期望产出的弱可处置性具体是指非期望产出的减少必然导致期望产出的减少, 二者同比例减少。非期望产出的零和性具体是指非期望产出伴随着期望产出的产生而产生, 要想使非期望产出为零, 那么只有停止生产。

环境生产技术已将期望产出和非期望产出进行了很好的结合, 但是依然无法直接进行分析。目前普遍的做法就是运用 DEA 将环境生产技术进行模型化。

1. DEA

DEA 是 Charnes、Coopor 和 Rhodes 于 1978 年首先提出来评价生产效率的非参数方法。DEA 通过考虑多种投入 (即资源) 的运用和多种产出 (即服务) 的产生, 能够用来比较提供相似服务的多个服务单位之间的效率。每个服务单位称为一个 DMU。其原理主要是通过保持 DMU 的输入或者输出不变, 借助于数学线性规划方法确定相对有效的生产前沿面, 将各 DMU 投影到 DEA 的生产前沿面上, 通过比较单个 DMU 偏离生产前沿面的程度来评价它们的相对有效性。

2. 环境生产技术的 DEA 模型

假设有 I 个地区, 地区 i ($i=1, 2, \dots, I$) 的投入指标是资本 (K_i)、劳动 (L_i)、能源 (E_i); 产出指标是生产总值 (Y_i) 和二氧化碳排放量 (C_i), 将环境生产技术运用 DEA 表示如下:

$$\begin{aligned}
 T = \{ & (K, L, E, Y, C) \} \\
 & \sum_{i=1}^I \lambda_i K_i \leq K \\
 & \sum_{i=1}^I \lambda_i L_i \leq L \\
 & \sum_{i=1}^I \lambda_i E_i \leq E \\
 & \sum_{i=1}^I \lambda_i Y_i \geq Y
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i C_i = C$$

$$\lambda_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, I$$

其中, λ_i 表示每个横截面观测值的权重, $\lambda_i \geq 0$ 表示环境生产技术是规模报酬不变的; 不等式表明投入和期望产出的强可处置性, 等式表明非期望产出的弱可处置性和两类产出的零和性。

(二) 静态碳排放效率求解

通过 DEA 我们已将环境生产技术进行了模型化, 但是模型化后的环境生产技术只是一组限制条件, 我们依然无法求出二氧化碳的排放效率。在过去的一段时间里, 大量学者利用环境 DEA 技术进行环境效率的测算, 其中以 Tyteca (1996) 提出的非期望产出导向的 DEA 效率指数最为著名。理论上, 非期望产出的效率指数就是投入导向的 Shephard 距离函数的倒数, 本质上 Shephard 距离函数的求解过程就是一个线性规划过程。根据 Tyteca (1996) 构造非期望产出导向的 DEA 效率指数的方法, 我们定义了基于碳排放导向的 Shephard 距离函数, 具体如下:

$$D(K, L, E, Y, C) = \sup \{ \lambda : (K, L, E, Y, C/\lambda) \in T \} \quad (1.3)$$

结合式(1.2)和式(1.3), 我们写出基于碳排放导向的 Shephard 距离函数的线性规划形式。

$$[D(K, L, E, Y, C)]^{-1} = \min \rho$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^I \lambda_i K \leq K \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i L \leq L \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i E \leq E \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i Y \geq Y \\ \sum_{i=1}^I \lambda_i C = \rho C \\ \lambda_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, I \end{cases} \quad (1.4)$$

其中, $\min \rho$ 就是式(1.3)中的 λ 。基于碳排放导向的 Shephard 距离函数的线性规划的基本原理是, 根据某个时期 I 个地区的投入、期望产出和碳排放量构造一个共同生产前沿面, 通过该前沿面可以知道, 某个地区在该时期投入不增加和期望产出不减少的情况下, 最优的碳排放量(或者潜在的碳排放量)与该地区实际的碳排放量的比值就是式(1.4)中 ρ 的求解结果, 也即该地区在该时期的碳排放效