

文章编号:1671-8879(2017)06-0121-07

# 非技术变革下交通碳排放转移对 碳排放长期演变的影响

焦 萍,王建伟,芮晓丽,袁长伟

(长安大学 经济与管理学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了明晰非技术变革因素下中国不同省市区间的交通运输碳排放转移对碳排放演变的影响,以了解省域交通行业碳排放演变特征,并针对性地开展政策完善与调控。基于系统动力学理论及演变情景分析,将交通运输碳排放的长期演变规律等作为基本假设条件,构建以广东省和黑龙江省为代表的高、低碳排放省份的交通运输碳排放转移演变动力学模型,并对其进行稳定性分析;运用 MATLAB 软件转化欧拉方程、差分方程等方法,通过忽略未来短期内能源技术变革因素影响下的数值模拟,获得不同政策调控参数下的高低碳排放省份独立发展、高碳排放省份净转出、低碳排放省份净转出 3 种情形下的交通运输碳排放长期演变规律。研究表明:高、低碳排放省份间交通运输碳排放转移的稳态以一个单位的净转移量为临界值存在;交通运输碳排放演变与各省之间的碳排放转移程度和省内政策控制强度相关;高、低碳排放省份独立发展和高碳排放省份净转出时,其演变受高碳排放省份的影响较大;低碳排放省份净转出时,其演变受低碳排放省份的影响较大;实施不同强度的碳排放调控政策能够显著改变未来较长时期内交通运输碳排放量的峰值或达到峰值所需的时间。

**关键词:**交通工程;交通运输;演变模型;碳排放;演变机理

**中图分类号:**U491.92

**文献标志码:**A

## Influence of transportation carbon emission transfer on long-term evolution of carbon emission under nontechnological change

JIAO Ping, WANG Jian-wei, RUI Xiao-li, YUAN Chang-wei

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to clarify the impact of transportation carbon emission transfer between different provinces and cities in China on its evolution of carbon emission under nontechnological change and know the evolution characteristics of carbon emission in transportation industry of provinces, based on the theory of dynamical systems and evolution scenario analysis, a dynamic evolution model of carbon emission transform in high and low carbon emission provinces, represented by Guangdong Province and Heilongjiang Province, was proposed in this paper by

收稿日期:2017-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51278057);霍英东教育基金项目(151075);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310823151006,310823160103,310823151001)

作者简介:焦 萍(1980-),女,山东潍坊人,工学博士研究生,E-mail:1054132960@qq.com。

通讯作者:王建伟(1965-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,E-mail:wangjianwei@chd.edu.cn。

taking long-term evolution law of carbon emission in transportation as the assumptions. The MATLAB software was used to transform Euler equation, difference equation and other methods. Long-term evolution of transportation carbon emission was obtained for independent development of high and low carbon emission provinces, net transfer of high carbon emission provinces and low carbon emission provinces through numerical simulation which ignored the factors of energy technology change in the near future. The results show that steady state of transportation carbon emission transfer in high and low carbon emission provinces exists as the critical value of net transfer of a unit. Evolution of transportation carbon emission is related to the degree of carbon emission transfer between the provinces and the provincial policies control intensity. Evolution of independent development of high and low carbon emission provinces and net transfer of high carbon emission provinces is greatly affected by high carbon emission provinces. Evolution of net transfer of low carbon emission provinces is greatly affected by low carbon emission provinces. Implementation of different intensity of carbon emission regulation policy can significantly change the peak value or peak time of transportation carbon emission in the next long period. 2 tabs, 1 fig, 20 refs.

**Key words:** traffic engineering; transportation; evolution model; carbon emission; evolution mechanism

## 0 引言

交通运输是仅次于能源供应的温室气体排放源。目前,中国各省市交通运输部门多依据其区域内交通运输行业的实际碳排放量和碳减排压力制定各自的碳减排目标。但由于交通运输存在着产品流动、运量转移现象,且随着省市区间经济联系日益增强,其隐含的碳排放转移问题也越加凸显。因此,有必要将不同省份间交通运输部门的相互作用细化为彼此间的碳排放转移,研究其交通运输碳排放演变机理,以指导省际区域间交通运输碳减排横向联合政策的制定。

目前,国内外学者在交通运输碳减排方面已经进行了诸多研究,内容多集中于行业碳排放测算、碳排放潜力预测、碳排放影响因素及减排路径分析<sup>[1]</sup>、碳排放格局<sup>[2]</sup>等,为交通运输碳减排的特征、产生规律及演变趋势等研究提供了基础。在基于投入产出模型的区域间碳排放转移方面:Meng 等探究了电力供应与消费区域间及主要区域间的碳排放转移<sup>[3-4]</sup>;Weber 等针对美国家庭及主要城市交通运输碳排放进行了探究<sup>[5-6]</sup>;Pickett 等提出德国的基础环境设施与私人交通碳排放之间有着错综复杂的关系<sup>[7]</sup>;Wang 等基于能源消耗、生命周期方法以及地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型,分析了 2010 年中国各省级区域存在差异化的碳足迹<sup>[8]</sup>;石敏俊等基于投入产出模型探究了中国省市区间碳排放转移总量及 23 个工业部门

间转移和进出口转移特征<sup>[9-10]</sup>;郭亮将产业经济系统结构演进仿真模型应用于分析中国产业经济系统结构演进<sup>[11]</sup>;张丽君以北京市为典型案例,研究了人口变化、产业调整引起的城市碳基能源代谢空间变化和演变机理<sup>[12]</sup>;许静等基于可拓展的随机性的环境影响评估(STIRPAT)模型,运用动态面板数据模型实证了 1995~2013 年间中国产业转移过程中碳排放动态变化及区域差异<sup>[13]</sup>;高洁构建了基于运输量转移的交通运输碳排放演变动力学模型,并对其影响机理进行了分析<sup>[14]</sup>;胡艳兴等结合重心转移、探索性空间数据分析(exploratory spatial data analysis,ESDA)及 GWR 等模型方法,分析了 1997~2012 年间中国碳排放量的空间相关性、异质性及影响因素,并将各省份划分为不同的碳排放区<sup>[15]</sup>;金汝蕾基于动态演变系统理论,引入煤炭碳排放演变动态系统,预测了煤炭能源消耗产生的碳排放<sup>[16]</sup>;李志鹏采用系统动力学方法和 Vensim 软件模拟了车辆数量、出行量及交通能源消耗和碳排放<sup>[17]</sup>。同时,也有部分学者通过引入环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC),将碳排放演变描述为碳排放量与经济发展之间的关系,说明了碳排放的演变机理<sup>[18]</sup>。

综上可知,现有研究多以定量评价、整体预测或某行业的区域间碳排放或者碳排放转移为主,缺少将碳排放与投入产出模型结合来分析各省区间的交通碳减排转移演变。还有部分研究将多变量的复杂

关系简化为单变量或双变量的简单关系,更多地依赖于各种参数的选取,无法表征交通运输碳排放演变的复杂性<sup>[18]</sup>。因此,为了进一步明晰不同省份间交通运输碳排放转移的长期相互作用,协助横向联合的碳减排政策制定,本文基于不同省份的交通运输特征,以系统动力学和演变情景分析为理论基础,忽略短期内的爆发性技术科技创新因素和偶发性指令或政令因素的影响,建立基于交通运输碳排放转移的动力学长期演变模型,对高、低碳排放省份相互作用进行稳定性分析,并通过数值仿真模拟其长期演变趋势,为省域差异化碳减排和联合碳减排政策提供决策参考。

## 1 基本假设与模型建立

### 1.1 基本假设

(1)不考虑短期内爆发性技术科技创新因素(能源结构变化引起的碳排放变动)和突发性指令或政令因素对交通碳排放的影响。

(2)各省份自身碳排放的增长符合交通运输碳排放的长期演变规律。

(3)将产生交通碳排放转移的两省份按照碳排放的多少将其分为高碳排放省份和低碳排放省份。

(4)交通运输系统具有多种运输方式,通过彼此间的相互配合可极大地拓展、延伸运输范围,即在较大范围内,高、低碳排放省份之间能够跨越空间障碍进行运输交流,实现交通碳排放转移。

(5)总碳排放规模被限制在交通环境承载力和交通资源承载力的范围之内,任何一个省份的交通运输碳排放都受到自身经济、环境、能源等制约。

(6)省份间相互交流、贸易往来等对交通运输碳排放转移的影响方式包括运距、票价、服务水平、出行方式选择等,均体现在假设系数中,不逐一分析。

### 1.2 模型建立

各省份交通运输碳排放量的增长是自身碳排放内禀增量与转移到其他省份碳排放增量之和,因此,省份之间交通运输碳排放转移是碳排放量长期演变的本源机制。将省份的碳排放量作为状态变量,假设 $C(t)$ 为 $t$ 时刻交通运输碳排放量,即 $t$ 时刻省份A、B的交通运输碳排放量 $C_A(t)$ 和 $C_B(t)$ 之和,则有

$$\begin{cases} \frac{dC_A(t)}{dt} = r_A C_A(t) \left[ 1 - \frac{(1+\sigma_A)C_A(t)}{k_A} + \beta_{AB} \frac{C_B(t)}{k_B} \right] \\ \frac{dC_B(t)}{dt} = r_B C_B(t) \left[ 1 - \frac{(1+\sigma_B)C_B(t)}{k_B} + \beta_{BA} \frac{C_A(t)}{k_A} \right] \\ k = k_A + k_B \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_A$ 、 $r_B$ 分别为省份A、B的碳排放量内禀增长率; $k$ 为交通运输碳排放最大量,即交通运输环境承载力; $k_A$ 、 $k_B$ 分别为资源限制条件下省份A、B的交通运输碳排放量阈值; $\beta_{AB}$ 、 $\beta_{BA}$ 分别为由省份A转出到B和由省份B转出到A的碳排放量转移能力系数; $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$ 分别为省份A、B政府对于其内部的碳排放调控系数,为定性指标,取值 $[0, 1]$ 。

高、低碳排放省份的碳排放特征不同,政府部门会出台不同政策对碳排放进行引导和控制,当政府部门对交通碳排放不加管控和采取高强度的引导与最严格的管控措施时,其调控系数分别为0、1。当政府部门在异乎常规的技术更新速度或者法定性政令下短期内迅速采取不可抗的管控、调整措施时,其调控系数大于1,此时应忽略本文基本假设(1)。

## 2 分析与模拟

### 2.1 稳定性分析

尽管无法求出式(1)中 $C_A(t)$ 和 $C_B(t)$ 的解析解,但并不影响分析模型的稳定性和自身的演变趋势,因此可求解式(1)平衡点并进行稳定性分析,逐一分析碳排放转移在稳定条件下的性质和演变趋势,讨论各状态参数的变化与碳排放的关系。

当且仅当 $C_A(t) > 0$ ,  $C_B(t) > 0$ ,即平衡点位于平面坐标系的第Ⅰ象限时,式(1)才有实际意义。为了表示不同省份碳排放转移量的转入和转出方向,引入转入系数 $\alpha$ ,则有

$$\begin{cases} \frac{dC_A^v(t)}{dt} = r_A C_A(t) \left[ 1 - \frac{(1+\sigma_A)C_A(t)}{k_A} - \alpha_{AB} \frac{C_B(t)}{k_B} + \beta_{AB} \frac{C_B(t)}{k_B} \right] \\ \frac{dC_B^v(t)}{dt} = r_B C_B(t) \left[ 1 - \frac{(1+\sigma_B)C_B(t)}{k_B} - \alpha_{BA} \frac{C_A(t)}{k_A} + \beta_{BA} \frac{C_A(t)}{k_A} \right] \\ k = k_A + k_B \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_A^v(t)$ 、 $C_B^v(t)$ 分别为省份A、B的交通运输碳排放量与转入量之和; $\alpha_{AB}$ 、 $\alpha_{BA}$ 分别为由省份B转入到A和由省份A转入到B的碳排放量转移能力系数。

则可令

$$\begin{cases} P(C_A(t), C_B(t)) = \frac{dC_A(t)}{dt} = 0 \\ Q(C_A(t), C_B(t)) = \frac{dC_B(t)}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P(\cdot)$ 、 $Q(\cdot)$ 分别表示省份A、B的演变方程

对时间的求导方程,简写为  $P、Q$ 。

可求得各省份演变过程中的碳排放量、碳排放量与转入量之和的 4 个定态解  $(0,0),\left(\frac{k_A}{1+\sigma_A},0\right),$

$\left(0,\frac{k_B}{1+\sigma_B}\right),\left(\frac{(1+\beta_{AB}+\sigma_A)k_A}{1-\beta_{AB}\beta_{BA}},\frac{(1+\beta_{AB}+\sigma_B)k_B}{1-\beta_{AB}\beta_{BA}}\right);$

$$J=\begin{bmatrix}\frac{\partial P^a}{\partial C_A^a}&\frac{\partial P^a}{\partial C_B^a}\\\frac{\partial Q^a}{\partial C_A^a}&\frac{\partial Q^a}{\partial C_B^a}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_A-\frac{2r_A(1+\sigma_A)C_A}{k_A}+\frac{r_A\beta_{AB}(1+\sigma_B)C_B}{k_B}&\frac{r_A\beta_{AB}(1+\sigma_A)C_A}{k_B}\\\frac{r_B\beta_{BA}(1+\sigma_B)C_B}{k_A}&r_B-\frac{2r_B(1+\sigma_B)C_B}{k_B}+\frac{r_B\beta_{BA}(1+\sigma_A)C_A}{k_A}\end{bmatrix}$$

记  $T=\frac{\partial P^a}{\partial C_A^a}+\frac{\partial Q^a}{\partial C_B^a}$  为  $J$  的迹,  $\Delta=|J|=\frac{\partial P^a}{\partial C_A^a}\cdot$

$\frac{\partial Q^a}{\partial C_B^a}-\frac{\partial P^a}{\partial C_B^a}\frac{\partial Q^a}{\partial C_A^a}$ , 为  $J$  的行列式, 通过判断  $\Delta、T^2-4\Delta$

及  $T$  的正负号, 得到 4 个平衡点的稳定性, 如表 1 所示。

表 1 各省碳排放量与转入量之和演变过程平衡点及稳定性  
Tab. 1 Equilibrium points and stability of amount of carbon emissions and transfer between provinces

碳排放量与转入量之和演变过程平衡点	稳定条件
$(0,0)$	不稳定
$\left(\frac{k_A}{1+\sigma_A},0\right)$	$\alpha_{AB}-\beta_{AB}<1,\alpha_{BA}-\beta_{BA}>1$
$\left(0,\frac{k_B}{1+\sigma_B}\right)$	$\alpha_{AB}-\beta_{AB}>1,\alpha_{BA}-\beta_{BA}<1$
$\left(\frac{(1-\alpha_{AB}+\beta_{AB}+\sigma_A)k_A}{1-(\alpha_{AB}-\beta_{AB})(\alpha_{BA}-\beta_{BA})},\frac{(1-\alpha_{BA}+\beta_{BA}+\sigma_B)k_B}{1-(\alpha_{AB}-\beta_{AB})(\alpha_{BA}-\beta_{BA})}\right)$	$\alpha_{AB}-\beta_{AB}<1,\alpha_{BA}-\beta_{BA}<1$

由表 1 可知, 因  $|\alpha_{AB}|=|\beta_{BA}|, |\alpha_{BA}|=|\beta_{AB}|$ , 在高碳排放省份与低碳排放省份之间的交通运输碳排放的转移过程中, 以一个单位的净转移量为临界值, 将稳态分为 2 种情况, 即  $|\alpha_{AB}-\beta_{BA}|>1$  和  $|\alpha_{AB}-\beta_{BA}|<1$ 。

2.2 参数计算及设置

由于碳排放转移数据是基于投入产出表进行计算的, 考虑到能源、投入产出数据的可获得性及统一口径等方面的局限, 以 2007 年中国交通运输碳排放量为依据对参数进行初始值设置。采用文献[19]中的方法估算 2007 年各省交通运输业能源消费导致的碳排放量  $C$  为

$$C=\sum_{i=1}^nE_iC_{Fi}(1-S_i)C_{Ci}\quad i=1,2,\cdots,n\quad(4)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  种燃料的消费量;  $C_{Fi}$  为第  $i$  种燃料的转换因子, 即第  $i$  种燃料的平均低位发热量;  $C_{Ci}$  为第  $i$  种燃料的碳排放系数, 表示第  $i$  种燃料单位热量的碳排放量<sup>[20]</sup>;  $S_i$  为第  $i$  种燃料中非燃烧使用而作为原材料进入产品中所占比例, 由于本文未将工业生产过程中被用作原料的能源列入研究范围,

$$\left(\frac{(1-\alpha_{AB}+\beta_{AB}+\sigma_A)k_A}{1-(\alpha_{AB}-\beta_{AB})(\alpha_{BA}-\beta_{BA})},\frac{(1-\alpha_{BA}+\beta_{BA}+\sigma_B)k_B}{1-(\alpha_{AB}-\beta_{AB})(\alpha_{BA}-\beta_{BA})}\right)\\(0,0),\left(\frac{k_A}{1+\sigma_A},0\right),\left(0,\frac{k_B}{1+\sigma_B}\right)。$$

在高、低碳排省份碳排放量的转入、转出过程中, 其雅克比矩阵  $J$  为

$$\begin{bmatrix}r_A-\frac{2r_A(1+\sigma_A)C_A}{k_A}+\frac{r_A\beta_{AB}(1+\sigma_B)C_B}{k_B}&\frac{r_A\beta_{AB}(1+\sigma_A)C_A}{k_B}\\\frac{r_B\beta_{BA}(1+\sigma_B)C_B}{k_A}&r_B-\frac{2r_B(1+\sigma_B)C_B}{k_B}+\frac{r_B\beta_{BA}(1+\sigma_A)C_A}{k_A}\end{bmatrix}$$

因此  $S_i$  为 0。

通过计算 2007 年中国各省市市区交通碳排放量可知, 东南沿海地区交通碳排放量明显高于西北、东北地区, 因此, 分别选取广东省和黑龙江省为高、低碳排放省份, 即 A 和 B。

由式(4)可得, 2007 年广东省和黑龙江省交通运输业碳排放量为  $1.190\ 411\times10^7、3.046\ 04\times10^4$  t, 年平均增长率为 5.2%、3.3%, 交通运输碳排放量的上限约为 2007 年数据的 2.5 倍<sup>[14]</sup>。所以, 本文选取各参数的整数值设定模型参数, 其中,  $C_A(t)=1.190\times10^7$  t,  $k_A=2.150\times10^7$  t,  $r_A=0.03$ ;  $C_B(t)=3.05\times10^6$  t,  $k_B=7.40\times10^6$  t,  $r_B=0.05$ ,  $\sigma_A、\sigma_B$  取值如表 2 所示。

表 2  $\sigma_A、\sigma_B$  的取值  
Tab. 2 Values of  $\sigma_A、\sigma_B$

参数	无控制	微调控制	中度控制	高强控制
$\sigma_A$	0	0.10	0.7	1.2
$\sigma_B$	0	0.06	0.5	1.0

2.3 演变模拟及分析

将式(1)通过欧拉方程转换为差分方程, 运用 MATLAB 软件模拟不同碳排放转移量和不同政策调控参数下交通运输碳排放量演变过程。同时, 根据表 1 中的稳态条件和表 2 中的政策调控参数, 研究以广东省和黑龙江省为代表的高、低碳排放省份在不同工况下的交通运输碳排放量演变过程, 见下页图 1。

2.3.1 广东省与黑龙江省独立发展时, 即  $\alpha_{AB}=\beta_{BA}=0, \alpha_{AB}=\beta_{AB}=0$

当广东省与黑龙江省相互独立发展, 即省份之间不产生交通运输碳排放转移且未实施任何政策调控时, 碳排放量的增长状态与自身的内禀增长率相关。由图 1(a)可知, 长期来看,  $C_A$  与  $C_B$  的走向大体相似, 均是经历加速增长、减速增长后趋于稳定状态; 广东省交通运输碳排放量初始值较大, 内禀增长率较小; 黑龙江省碳排放量初始值小, 内禀增长率高。广东省与黑龙江省独立发展, 但实施不同程度

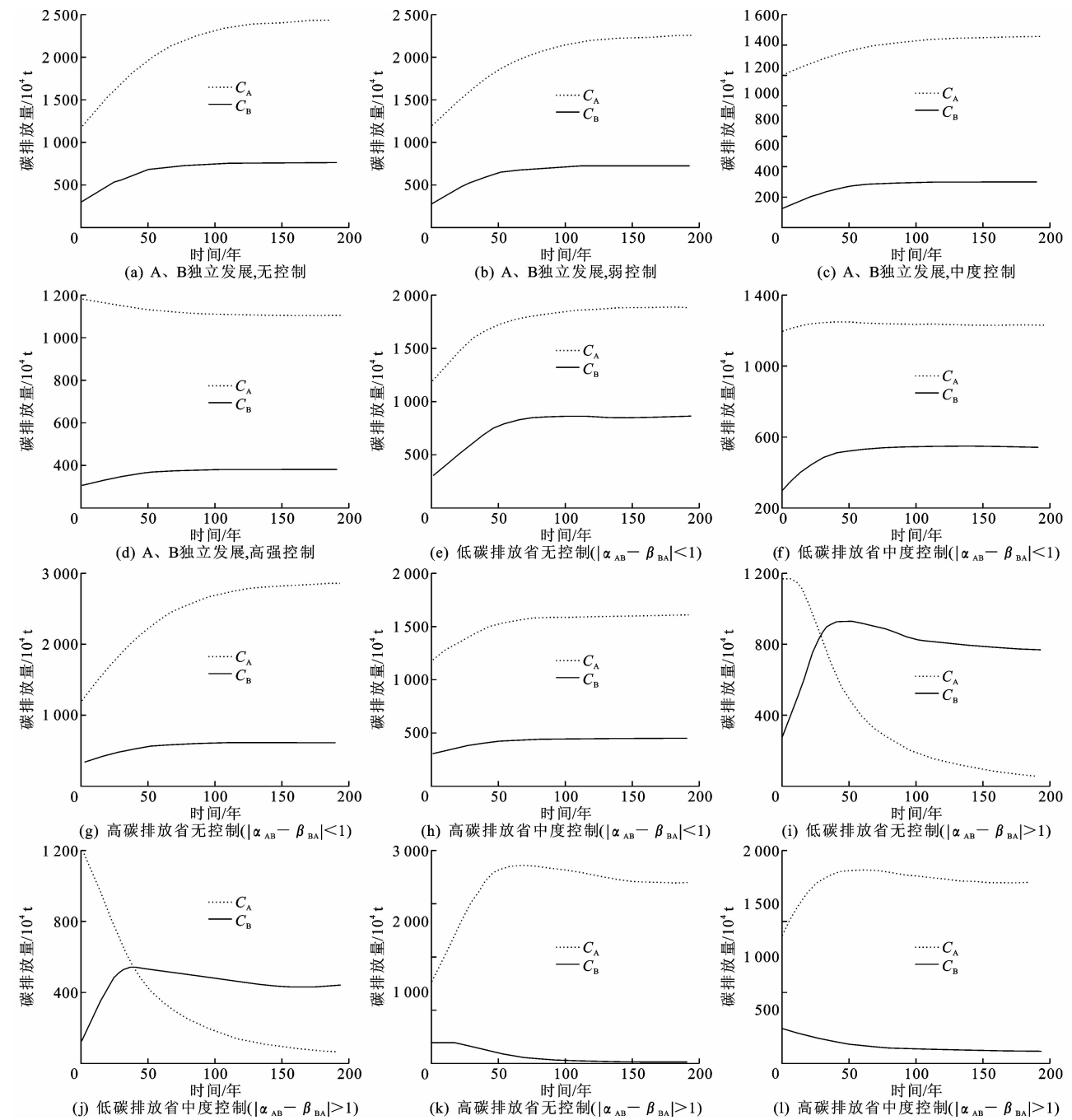


图 1 不同工况下高、低碳排放省的  $C_A$  与  $C_B$  演变

Fig. 1 Evolution of  $C_A$  and  $C_B$  of high and low carbon emission provinces in different cases

的减排政策,当  $\sigma_A < 1$  时,如图 1(b)、(c) 所示,在不同强度的政策控制下,两省的碳排放演变线形并未出现较大变化。但在高强度政策控制下,即出现突发性政策导向时,诸如 2017 年 7 月英国政府宣布将于 2040 年起全面禁售汽油和柴油汽车的政令要求,以及挪威、荷兰、印度、德国等禁售燃油车时间表的公布,均对交通运输碳排放长期演进规律产生了强大的冲击力和不可抗力(即  $\sigma_A = 1.2$ ),使得该区域或省份的交通运输碳排放

量在极短的时间内出现急剧下降的趋势,此时,长期演变模型忽略第 1.1 节基本假设(1)。然而,在实际落实高强度政策调控的过程中,由于交通减排技术更新速度缓慢,同时受运输需求和运输结构的限制,在短时间内很难实现高碳排放省份交通运输碳排放量的稳步下降。如图 1(d) 所示,如果在高碳排放省份广东省实施禁售燃油车政策,一段时间后,源于机动车的碳排放量将逐渐归于 0,省内的交通运输业碳排放量趋于固定。

### 2.3.2 广东省净转出碳排到黑龙江省时,即 $\alpha_{AB} -$

$$\beta_{AB} < \alpha_{BA} - \beta_{BA}$$

(1)  $|\alpha_{AB} - \beta_{BA}| < 1$ , 当广东省适度地向黑龙江省净转出交通运输碳排放量时, 在无政策控制的条件下, 由图 1(g) 可知,  $C_A$ 、 $C_B$  演变线形均未出现改变。但由于各省的碳排放量是自身内部碳排放量与转移到其他省份碳排放量之和, 因此, 广东省净转出碳排放至黑龙江省时,  $C_A$  逐渐增长, 峰值也增大,  $C_B$  峰值较独立发展时略有降低, 交通运输碳排放量整体上由广东省所决定。在适度的政策调控下 [图 1(h)], 交通运输碳排放量演变线形未改变, 但是  $C_A$  峰值显著降低而  $C_B$  峰值适度降低, 整个演变曲线的线形更加平缓。

(2)  $|\alpha_{AB} - \beta_{BA}| > 1$ , 当广东省向黑龙江省净转出较多的交通运输碳排放量且未实施政策控制时 [图 1(k)], 黑龙江省交通运输的中间消耗、最终消耗多由广东省交通运输系统提供, 因此  $C_B$  逐渐降低, 如果这种状态一直持续并不加以调节控制,  $C_A$  将先快速达到峰值, 之后由于  $C_B$  逐渐趋于 0 并迫近于退出交通运输市场的状态, 此时,  $C_A$  将缓慢下降并逐渐趋于平缓。这种情况的实现需要经历相当长的演变过程, 且需有重大技术进步与突破共同促进黑龙江省退出运输市场。在适度的政策调控条件下 [图 1(l)],  $C_A$  峰值显著降低,  $C_B$  也缓慢降低, 最终达到仅产生极少交通运输碳排放的状态。从总体上看, 高碳排放省份决定着整体交通运输的碳排放量。

### 2.3.3 黑龙江省净转出碳排放到广东省时,即 $\alpha_{AB} -$

$$\beta_{AB} > \alpha_{BA} - \beta_{BA}$$

(1)  $|\alpha_{AB} - \beta_{BA}| < 1$ , 由图 1(f) 可知, 当黑龙江省适度地向广东省净转出交通运输碳排放量时, 相比于图 1(e) 无政策控制时, 尽管实施适度的政策控制未改变  $C_A$  与  $C_B$  演变线形, 但却较大程度地降低了各自的峰值, 且明显缩小了  $C_A$ 、 $C_B$  之间的差值, 尤其是广东省交通运输碳排放量增速几乎为 0, 演变曲线极为平缓。

(2)  $|\alpha_{AB} - \beta_{BA}| > 1$ , 由图 1(i) 可知, 当黑龙江省向广东省净转出较多的交通运输碳排放量且未实施任何调控政策时, 将会导致在 20~30 年的中长期演变过程中,  $C_A$  演变曲线急速下降、 $C_B$  快速上升, 两者达到相同值之后,  $C_A$  仍显著降低, 广东省演变为低碳排放省份并有退出运输市场的趋势, 而黑龙江省在演变为高碳排放省份之后迅速达到峰值, 随后略有下降并趋于稳定。当进行适度的政策控制时 [图 1(j)], 相比于图 1(i) 无政策调控时的演变过程,

$C_A$  与  $C_B$  相交点碳排放量相对较小, 且时间滞后 10 年左右, 此后, 黑龙江省演变为高碳排放省份且其交通运输碳排放量基本稳定在演变前期的  $C_B$  水平。

## 3 结 语

(1) 将发生交通运输碳排放转移的两省份按其各自总碳排放量分为高、低碳排放省份, 基于系统动力学理论及演变情景分析, 构建了高、低碳排放省份交通运输碳排放转移的演变动力学模型, 通过基本假设与数值模拟获得了不同碳排放转移情形下的长期演变规律。

(2) 对高、低碳排放省份的交通运输碳排放互相转移的情形进行了稳定性分析, 稳态临界值按照净转移量可分为  $|\alpha_{AB} - \beta_{BA}| > 1$  和  $|\alpha_{AB} - \beta_{BA}| < 1$ 。

(3) 高、低碳排放省份间的交通运输碳排放转移程度对各省的碳排放演变存在差异化影响; 省份内部不同强度的碳排放调控政策能显著改变各省交通运输碳排放量峰值, 当净转出量大于一个单位碳排放时, 调控政策可改变各省交通运输碳排放量达到峰值的时间。

(4) 由于研究对象是具有普遍特征的省份, 在一定程度上具有相对性; 且高、低碳排放省份还会与其他省产生交通运输碳排放的转入或转出, 这是一个动态且复杂的过程; 其次, 政府对其省内部碳排放调控的系数受多种因素影响, 在短期无爆发性技术变革和突发性政令的常态下, 可对省域交通碳排放转移进行长时间跨度的演变模拟, 但随着欧洲等发达国家制定了明确的废弃传统能源的时间表, 碳排放调控系数的大小和其所代表的相应管控力度有待进一步研究与探讨。

## 参考文献:

## References:

- [1] 喻 洁, 达亚彬, 欧阳斌. 基于 LMDI 分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 112-119.  
YU Jie, DA Ya-bin, OUYANG Bin. Analysis of carbon emission changes in China's transportation industry based on LMDI decomposition method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 112-119.
- [2] 尹 鹏, 段佩利, 陈 才. 中国交通运输碳排放格局及其与经济增长的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 7-12.  
YIN Peng, DUAN Pei-li, CHEN Cai. Pattern of trans-

- portation carbon emission and relationship with transportation economic growth in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 7-12.
- [3] MENG Lei, GUO Jue, CHAI Jian, et al. China's regional CO<sub>2</sub> emissions: Characteristics, inter-regional transfer and emission reduction policies[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 6136-6144.
- [4] GUO Jue, ZHANG Zeng-kai, MENG Lei. China's provincial CO<sub>2</sub> emissions embodied in international and inter-provincial trade[J]. Energy Policy, 2012, 42: 486-497.
- [5] WEBER C L, MATTHEWS H S. Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint[J]. Ecological Economics, 2008, 66(2/3): 379-391.
- [6] BROWN M A, SOUTHWORTH F, SARZYNSKI A. The geography of metropolitan carbon footprints[J]. Policy and Society, 2009, 27(4): 285-304.
- [7] PICKETT S T A, CADENASSO M L, GROVE J M, et al. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2001, 32(1): 127-157.
- [8] WANG Shao-jian, FANG Chuang-lin, MA Hai-tao, et al. Spatial differences and multi-mechanism of carbon footprint based on GWR model in provincial China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4): 612-630.
- [9] 石敏俊, 王 妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1327-1338.
- SHI Min-jun, WANG Yan, ZHANG Zhuo-ying, et al. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China[J]. Acta Geographica Sinica 2012, 67(10): 1327-1338.
- [10] 杨顺顺. 中国工业部门碳排放转移评价及预测研究[J]. 中国工业经济, 2015(6): 55-67.
- YANG Shun-shun. Evaluation and prediction on carbon emissions transferring across the industrial sectors in China[J]. China Industrial Economics, 2015(6): 55-67.
- [11] 郭 亮. 产业经济系统结构演进的系统动力学模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- GUO Liang. Research on structural evolution of industrial economic system model based on system dynamics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [12] 张丽君. 城市碳基能源代谢结构分异与演变机理——以北京市为例[D]. 开封: 河南大学, 2013.
- ZHANG Li-jun. Structure differentiation and evolution mechanism of urban carbon-based energy metabolism: A case study of Beijing City[D]. Kaifeng: Henan University, 2013.
- [13] 许 静, 周 敏, 夏 青. 中国省际间产业区域转移的碳排放动态效应及影响机制[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2017, 17(2): 74-85.
- XU Jing, ZHOU Min, XIA Qing. Dynamic effect and mechanism of carbon emission during regional industrial transfer in China[J]. Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition, 2017, 17(2): 74-85.
- [14] 高 洁. 交通运输碳排放时空特征及演变机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- GAO Jie. Temporal-spatial characteristics and evolution mechanism of transport emissions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [15] 胡艳兴, 潘竞虎, 王怡睿. 基于ESDA-GWR的1997~2012年中国省域能源消费碳排放时空演变特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1896-1906.
- HU Yan-xing, PAN Jing-hu, WANG Yi-rui. Spatial-temporal evolution of provincial carbon emission in China from 1997 to 2012 based on ESDA and GWR model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1896-1906.
- [16] 金汝蕾. 碳排放演化动力系统理论及演化情景分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- JIN Ru-lei. Carbon emissions evolutionary dynamic system and evolutionary scenario analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [17] 李志鹏. 基于系统动力学的城市交通能源消耗与碳排放预测——以天津市为例[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- LI Zhi-peng. The forecast of the energy consumption and carbon emission of urban traffic based on system dynamics—An empirical analysis on Tianjin[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [18] GALEOTTI M, LANZA A, PAULI F. Reassessing the environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> emissions: A robustness exercise[J]. Ecological Economics, 2006, 57(1): 152-168.
- [19] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva: IPCC, 2006.
- [20] 袁长伟, 张 倩, 芮晓丽, 等. 中国交通运输碳排放时空演变及差异分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4555-4562.
- YUAN Chang-wei, ZHANG Qian, RUI Xiao-li, et al. Spatiotemporal evolution and difference of transport carbon emissions in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4555-4562.