

# 江苏省工业碳足迹研究及情景模拟

田立新, 钱佳玲

(江苏大学 理学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 工业碳足迹是一个复杂的动态的系统, 针对于江苏省工业碳足迹的现状, 利用系统动力学原理, 借助 Vensim PLE 软件, 建立了江苏省工业碳足迹系统, 把系统分为人口、资源、环境、能源 4 个子系统, 特别考虑到人均 GDP 对教育的影响, 通过教育影响技术, 最终影响 CO<sub>2</sub> 排放量。通过历史数据对江苏省工业碳足迹进行仿真, 并从不同经济结构、技术条件、新能源发展情况等角度设置了 4 种不同的情景, 与原始情景进行比较, 对 2005—2020 年的工业碳足迹进行分析。从情景模拟结果可以看出, 要减少江苏省工业碳足迹, 必须加大力度开发新能源, 调整能源结构, 而技术进步对于工业碳足迹的减少, 效果没有前两者显著。

**关键词:** 碳足迹; 系统动力学; 情景模拟

**中图分类号:** F206

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-3370(2013)03-0026-06

中国自然资源整体消耗严重, 自然资源存量急剧减少<sup>[1]</sup>。江苏省作为我国能源消耗的重要省份, 同时也是我国经济发展最快的省份之一, 为了使我国早日完成应对气候变暖的任务, 实现江苏省经济、能源、环境三者的协调发展, 实行推进低碳发展的举措是毋庸置疑的。用“碳足迹”也称碳排量 (Carbon emissions) 或碳指纹 (Carbon fingerprint), 来衡量温室气体排放对人类活动及气候的影响, 是比较形象而准确的。它是指个体、家庭、装置、公司在整个生命周期中所释放的总的温室气体排放量。

近些年, 国内外的学者对碳足迹进行了一系列的相关研究, 如郭运功、汪冬冬、林逢春<sup>[2]</sup>用碳足迹的相关含义及研究方法, 计算出了上海市 1995—2006 年的总碳足迹、各能源类型碳足迹, 并且分析了能源利用的碳足迹的产业类型、能源利用的碳足迹的产值、能源利用的碳足迹生态压力。在此基础上, 利用 Stirpat 模型研究了经济发展与上海市碳足迹之间的关系, 最后结合实际, 提出了几点管理策略。耿涌、董会娟、郝凤明<sup>[3]</sup>主要介绍了碳足迹的各种概念、碳足迹的分类、碳足迹的计算方法及碳足迹的研究概况, 最后归纳总结了国内外的相关研究, 客观分析了目前碳足迹研究的缺陷。赵荣钦、黄贤金、钟太洋<sup>[4]</sup>通过能源消费的碳排放的模型, 计算了各省市自治区年度能源消费的碳排放, 进一步得出碳足迹状况, 得出结论: (1) 中国 2007 年能源消费碳排放

总量中, 化石能源所占比重为 89%, 农村生物质能源为 11%。(2) 工商业空间与生活的碳排放量最大, 占总碳排放的 90%, 并且给出了政策建议。马晓微、崔晓凌<sup>[5]</sup>利用 LMDI 方法建立了北京第一、二、三产业的能源消费变化影响因素的模型, 根据不同的影响因素对北京产业能源消费的不同, 提出了几点建议。国外方面, A. Laurent, S.I. Olsen, M.Z. Hauschild<sup>[6]</sup>分析了材料的生命周期中, 在假设产生热量和电能的情景下的碳足迹的依赖性, 还讨论了碳足迹作为环境指标的适用性。Benjamin K. Sovacool, Marilyn A. Brown<sup>[7]</sup>通过审查有关车辆排放、建筑、工业、农业和垃圾中能源使用的碳排放, 提供了一个初步的 12 个大城市地区碳足迹的比较。从这些讨论的碳排放, 提供了土地利用、帮助全世界大的城市地区应对气候变化的基础。Angela Druckman, Tim Jackson<sup>[8]</sup>提出了一种模块化框架, 围绕着一个投入产出 (QMRIO) 模型, 在理论上, 综合考虑所有的 CO<sub>2</sub> 的排放, 包括能源生产中使用的商品和服务。T. Kenny, N.F. Gray<sup>[9]</sup>在利用本地数据比较了 6 个模型, 分析了其在爱尔兰三口之家的适用性。I.T. Herrmann, M.Z. Hauschild<sup>[10]</sup>研究了中国和欧洲之间的差异, 可导致贸易产品大量生产增加系统的碳足迹。

由上述研究可以看出, 国内外对碳足迹的定量研究还比较少, 鉴于此, 本文基于系统动力学方法,

收稿日期: 2012-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11171135, 71073072, 51276081); 国家社会科学重大基金资助项目(12 & ZD062); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010329, BK2010329); 教育部博士点基金资助项目(20093227110012)

作者简介: 田立新(1963—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: tianlx@ujs.edu.cn

通过考虑能源消费、CO<sub>2</sub> 排放量、经济、人口这四者之间的相互关系，建立一个比较全面的改进的模型。改进的地方是考虑到了经济增长对教育的促进，教育对技术进步的影响，最终影响 CO<sub>2</sub> 排放量，定量地来研究碳足迹，文中技术进步是用专利申请受理量来刻画的。通过改变参数的值，反复地运行和调试，生成 4 种不同的江苏省工业碳足迹发展的模式。最后，由原始情景和四种模拟情景的对比，提出相关的减排建议。

### 一、江苏省工业碳足迹的预测模型

系统动力学(System Dynamics)是一种“以计算机模拟技术为主要手段，通过结构功能分析，研究和解决复杂动态反馈性系统问题的仿真方法”<sup>[1]</sup>。

#### (一)江苏省工业碳足迹系统各因素之间的关系

江苏省工业碳足迹系统是一个复杂的动态系统。利用系统动力学建模首先要对该系统进行分析。工业碳足迹的产生离不开能源的消费，能源消费所产生的 CO<sub>2</sub> 会导致环境的改变。能源消费的增加会促进经济的发展，经济的发展有利于人民生活水平的提高。所以，在这个系统中，能源、经济、环境、人口这四者的关系是非常密切的。鉴于此，把工业碳足迹系统分为碳足迹经济子系统、碳足迹能源子系统、碳足迹环境子系统、碳足迹人口子系统四个子系统。化石能源的消耗产生了大量的 CO<sub>2</sub>，基于这一现状，本文通过江苏省工业化石能源的消费得出其 CO<sub>2</sub> 排放量，进而对江苏省历年 CO<sub>2</sub> 排放进行仿真预测。

耗，化石能源的消耗会使环境质量下降，从而抑制经济的增长。经济的增长还能促使科技、教育的投入，从而促使技术进步，技术进步有利于新能源的开发，使得碳排放水平降低。再看碳足迹人口子系统和碳足迹经济子系统，人口的增长会导致劳动力数量的增加，劳动力数量的增加为经济增长提供了丰富的人力资源。反之，经济的增长可以带动人民的生活水平的提高，促进人口数量增加，从而继续使劳动力的数量增加。最后看碳足迹能源子系统与碳足迹环境子系统，大量的能源消费会加剧环境的污染，然而由于环境的污染，人们的环保意识会增强，从而降低污染物的排放。

图 1 中主要正反馈回路有：

1. 工业总产值→生活水平→人口→劳动力→工业总产值；
2. 科技投入→生产成本→工业总产值→科技投入；
3. 经济政策→教育投入→技术→新能源开发→化石能源消耗→化石能源总量→经济政策；
4. 经济政策→产业结构→化石能源消耗→化石能源总量→经济政策；
5. 经济政策→贸易方式→化石能源消耗→化石能源总量→经济政策；
6. 工业总产值→化石能源消耗→CO<sub>2</sub> 排放水平→减排成本→工业总产值。

主要负反馈回路：

经济政策→环保投入→碳汇→CO<sub>2</sub> 排放水平→碳源→环境质量→经济政策。

#### (二)江苏省工业碳足迹系统动力学预测模型

根据图 1，设计了江苏省工业碳足迹系统模型(图 2)。该模型不仅考虑到了能源消费需求对工业碳足迹的影响，同时通过煤炭使用量占总能源的比例，细化了能源结构对单位 CO<sub>2</sub> 排放量变化量的影响，特别考虑到人均 GDP 的增加会影响到教育的投入，教育的投入最终会促进技术的进步，从而影响到 CO<sub>2</sub> 的排放，这对江苏省工业碳足迹是会产生影响的，这一关系也体现了图 1 关系图中，经济政策→+教育投入→+新能源开发→-化石能源消耗这一关系，其中技术进步是通过专利申请受理量来刻画的。该模型很好地体现了经济、科技的发展会导致技术的进步，从而影响到单位 CO<sub>2</sub> 排放量的变化，使得人口、经济、环境、资源之间的关系更全面。

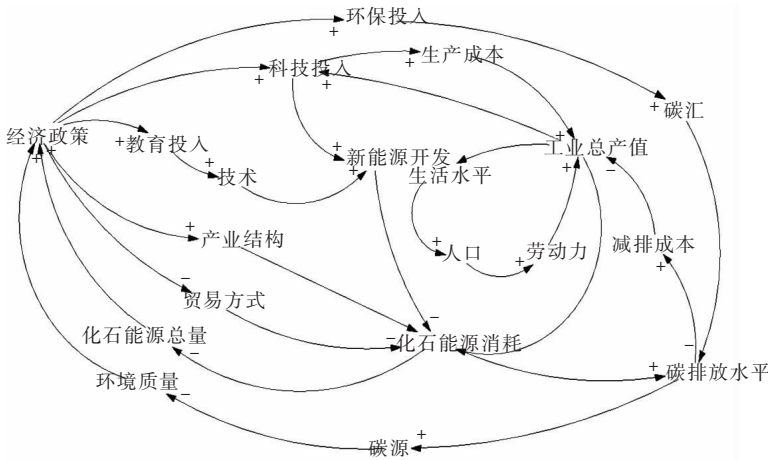


图 1 工业碳足迹系统各因素之间的因果关系图

由图 1 可以看出，碳足迹经济子系统、碳足迹能源子系统、碳足迹环境子系统、碳足迹人口子系统之间存在着复杂的因果关系。首先看碳足迹经济子系统与碳足迹能源子系统，经济的增长会增加工业总产值，工业总产值的增加会促进化石能源的消

耗，化石能源的消耗会使环境质量下降，从而抑制经济的增长。经济的增长还能促使科技、教育的投入，从而促使技术进步，技术进步有利于新能源的开发，使得碳排放水平降低。再看碳足迹人口子系统和碳足迹经济子系统，人口的增长会导致劳动力数量的增加，劳动力数量的增加为经济增长提供了丰富的人力资源。反之，经济的增长可以带动人民的生活水平的提高，促进人口数量增加，从而继续使劳动力的数量增加。最后看碳足迹能源子系统与碳足迹环境子系统，大量的能源消费会加剧环境的污染，然而由于环境的污染，人们的环保意识会增强，从而降低污染物的排放。

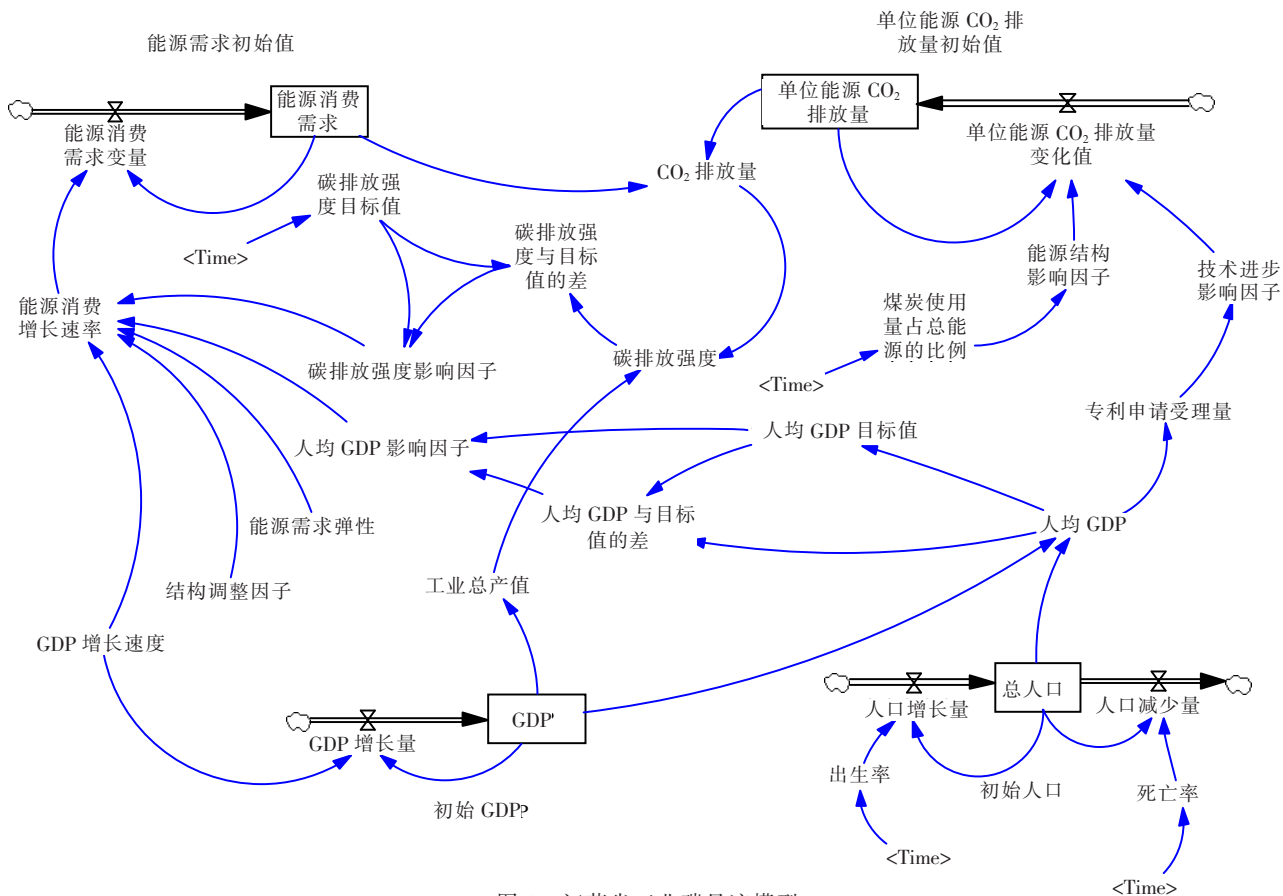


图 2 江苏省工业碳足迹模型

## 二、江苏省工业碳足迹的仿真预测与结果分析

### (一)模型参数的确定与检验

在上述论文构建的碳足迹系统模型中包括常量和变量,其中常量有 6 个,分别是:能源需求初始值、单位能源 CO<sub>2</sub> 排放量初始值、能源需求弹性、结构调整因子、初始 GDP、初始人口。变量中有 4 个状态变量:能源消费需求、单位能源 CO<sub>2</sub> 排放量、GDP 增长量和初始人口,其余都是辅助变量。在本模型中,能源需求初始值、初始 GDP、总人口是根据 2006 年江苏省统计年鉴中得到的,单位能源 CO<sub>2</sub> 排放量本文选用按每吨标准煤产生 0.68 吨 CO<sub>2</sub> 计算,即 0.68 吨/吨标煤(此系数采用国家发改委能源研究所:0.67 吨/吨标煤、日本能源经济研究所:0.68 吨/吨标煤、美国能源部能源信息署:0.69 吨/吨标煤提供系数的平均值 0.68 吨/吨标煤)。根据江苏省“十二五”规划,GDP 增长速度取为 0.11,根据温家宝总理在哥本哈根会议中提出的目标到 2020 年中国碳排放强度在 2005 年基础上降低 40%~45%,论文设 2020 年江苏省碳排放强度目标为在 2005 年基础上降低 45%。

通过能源消费需求,人口总量和工业总产值的历史数据和仿真数据来检验模型的准确性,如表 1、

表 2、表 3 所示。

从表 1、表 2、表 3 中可以看出,模型的预测值和历史数据的拟合程度比较好,误差大多在 5% 以内,个别误差达到了 10%,满足了系统动力学模型误差在 15% 内的这个要求。由此可见,本文所建立的模型可以比较真实地反应实际情况。

### (二)江苏省工业碳足迹的预测结果

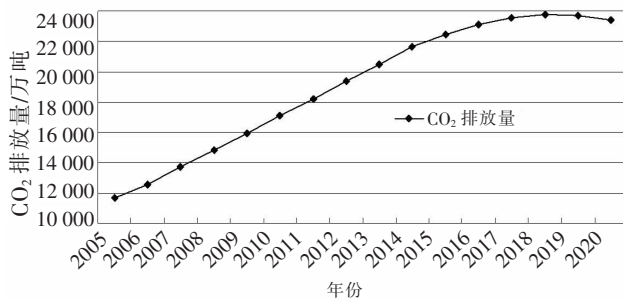


图 3 江苏省 2005—2020 CO<sub>2</sub> 排放量预测值

由图 3 可以看出江苏省 CO<sub>2</sub> 排放量在 2005—2016 年之间增速比较快,之后趋于平缓的趋势,在 2019 年开始略微下降。本文建立的模型只是一个简化的模型,由于这个系统是个开放系统,所以并没有将所有的现实因素都考虑进去。从这个模型中,可以了解到江苏省工业碳足迹的基本走向,CO<sub>2</sub> 排放量的预测值如表 4 所示。

表1 江苏省2005—2009实际与仿真能源消费需求

能源消费需求	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
实际能源消费需求	17 132.40	18 837.925	20 543.45	21 453.48	22 651.90
仿真能源消费需求	17 132.40	18 606.500	20 445.30	22 327.90	24 351.60
误差/%	0.00	-1.230	-0.48	4.08	7.50

表2 江苏省2005—2009实际与仿真人口量

人口量	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
实际人口	7 474.50	7 549.50	7 624.50	7 676.50	7 724.50
仿真人口	7 474.50	7 491.02	7 508.10	7 525.37	7 542.67
误差/%	0.00	0.78	1.53	1.97	2.35

表3 江苏省2005—2009实际与仿真工业总产值

工业总产值	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
实际总产值	9 440.18	11 097.64	13 105.24	15 271.20	16 464.94
仿真总产值	10 448.70	11 598.10	12 873.90	14 290.00	15 861.90
误差/%	-10.68	-4.51	1.77	6.43	3.67

表4 江苏省2005—2020 CO<sub>2</sub>排放量预测值

CO <sub>2</sub> 排放量	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
CO <sub>2</sub> 排放量	11 650.0	12 575.5	13 706.3	14 811.1	15 936.8	17 077.5	18 226.0	19 370.4
CO <sub>2</sub> 排放量	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
CO <sub>2</sub> 排放量	20 504.0	21 640.9	22 451.9	23 098.3	23 544.5	23 758.6	23 724.1	23 443.6

田立新、包森<sup>[12]</sup>采用改进的LMDI能源预测模型利用能源消费总量、结构与CO<sub>2</sub>排放量之间的关系式,得到2010年、2015年和2020年的碳排放预测值分别为19 001.34万吨、24 346.37万吨及23 478.21万吨,与该论文结果相符,但是该论文可以更好地体现出能源、经济、人口、环境四者之间的关系,且通过重新设置参数的值可以快速得到不同情景下的CO<sub>2</sub>排放量的预测值,利用Vensim PLE软件操作起来比较方便。

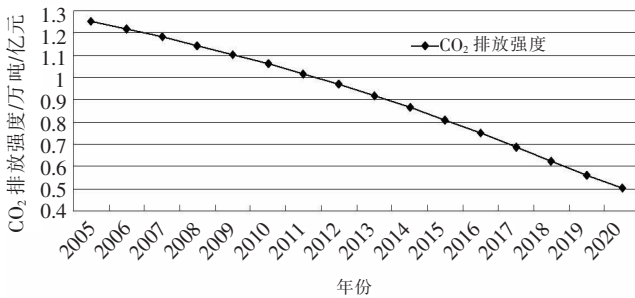


图4 江苏省2005—2020 CO<sub>2</sub>排放强度预测值

从图4和表5可以看出,CO<sub>2</sub>排放强度是在逐年下降的。CO<sub>2</sub>排放强度是由CO<sub>2</sub>排放量和工业总产值的比值确定的。CO<sub>2</sub>排放强度逐年下降,但是CO<sub>2</sub>排放量是上升的趋势,由此可见,工业总产值的增加速度要大于CO<sub>2</sub>排放量的增加速度。

### 三、江苏省工业碳足迹情景模拟

根据江苏省“十二五”规划中提到的“重点发展太阳能光伏、风电装备、生物质能装备、核电装备产业及高效低成本晶硅电池、薄膜电池、集成系统与设备、大功率发电机组、生物质能发电机组”可以看出,新能源的发展已经提上议程,并且随着时间的增加,太阳能风能等发电技术,煤电技术,核电,CCS技术等新能源对CO<sub>2</sub>排放量的影响更大,因此在模型中,加入了新能源对CO<sub>2</sub>排放量的影响,设定它是一个关于时间的函数。通过对模型的调整 and 参数的调整,对江苏省工业碳足迹系统进行情景模拟。图5是加了新能源影响因子之后的江苏省碳足

表5 江苏省2005—2020 CO<sub>2</sub>排放强度仿真结果

CO <sub>2</sub> 排放强度	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
CO <sub>2</sub> 排放强度	1.252 78	1.218 29	1.182 34	1.144 66	1.104 90	1.062 70	1.017 90	0.970 17
CO <sub>2</sub> 排放强度	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
CO <sub>2</sub> 排放强度	0.919 53	0.865 82	0.809 30	0.750 00	0.688 77	0.626 15	0.563 28	0.501 46

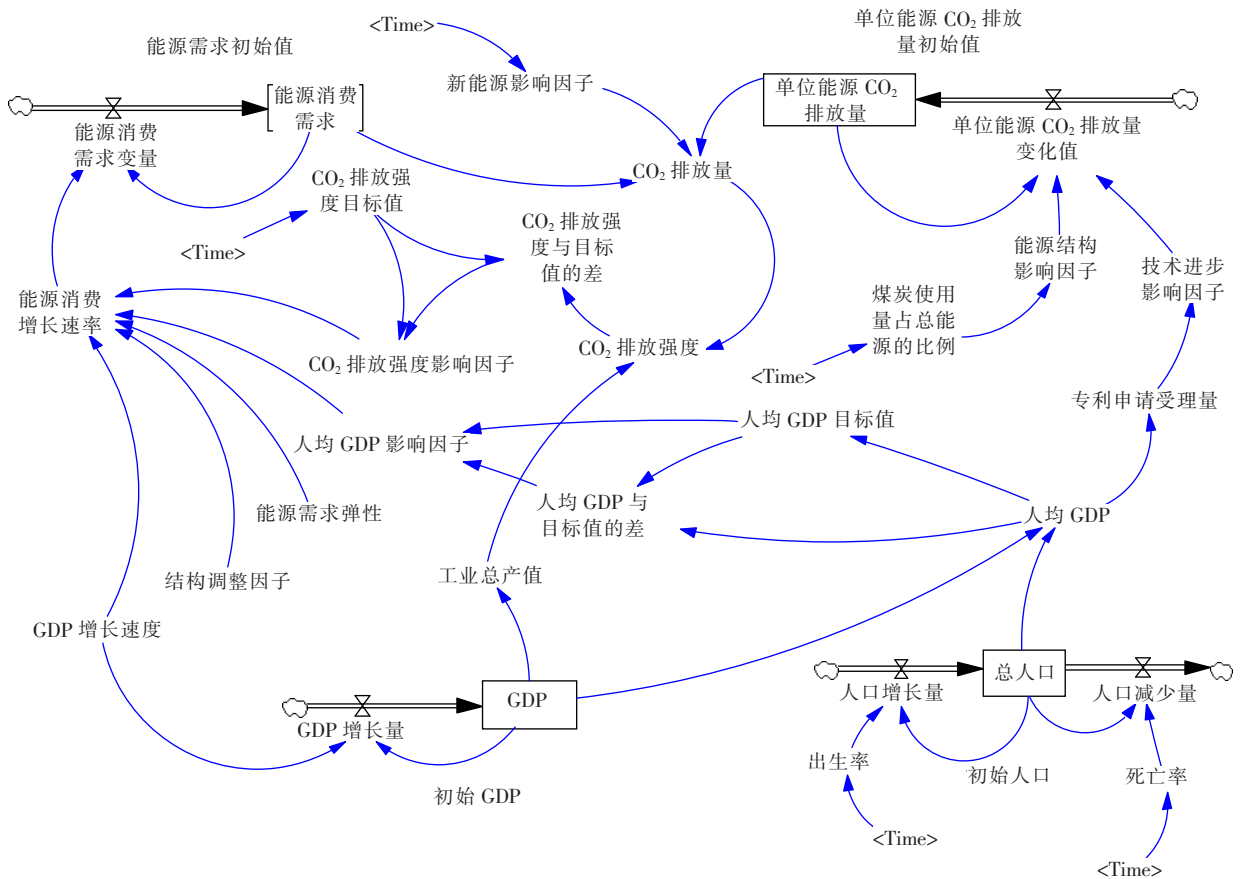


图5 新能源影响下江苏省工业碳足迹模型

迹模型。

模型中影响到CO<sub>2</sub>排放量的主要因素有新能源影响,能源结构和技术进步影响因子,“十二五”主要目标中提到“百亿元GDP专利授权数提高到400件,专利发展水平居全国前列,科技进步贡献率提高到60%以上”,到2015年,发明专利年申请量达到10万件。围绕这几个主要影响因素,本文设定以下4种情景:

情景1. 假定到2020年,新能源发展情况良好,对减排起了一定的作用,能源结构和技术进步保持过去的模式。

情景2. 假定到2020年,新能源发展情况良好,对减排起了一定的作用,能源结构有了改善,技术进步保持过去的模式。

情景3. 假定到2020年,新能源发展情况良好,对减排起了一定的作用,能源结构保持过去的模式,技术进步加速提高。

情景4. 假定到2020年,新能源发展情况良好,对减排起了一定的作用,能源结构有了改善,技术进步加速提高。

由图6可以看出在情景1和情景2下的CO<sub>2</sub>排放量差异不大,情景2和情景4与原始情景比较可以看出,CO<sub>2</sub>排放量在2016年之后下降的比较

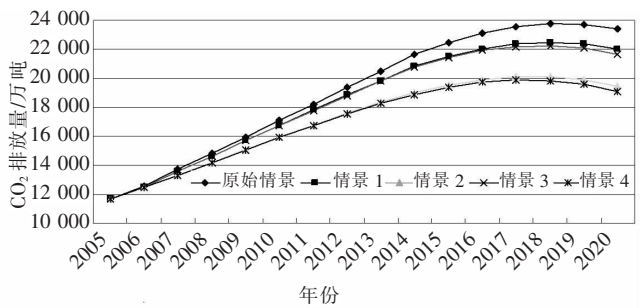


图6 不同情景下CO<sub>2</sub>排放量比较

快。4种情景与原始情景比较,CO<sub>2</sub>排放量都是下降的,说明新能源在减少CO<sub>2</sub>排放量方面的贡献比较大。能源结构的改善相对于技术进步的影响,在减少CO<sub>2</sub>排放量显得更为重要。情景4与原始情景CO<sub>2</sub>排放量差异比较大,也是一个比较理想的情景,由此看来,新能源,能源结构,技术进步共同影响的效果更加明显。

### 四、情景模拟下的减排建议

通过上述情景模拟,可以很清晰地看到不同情景下的CO<sub>2</sub>排放量,鉴于此,以下提出几点相关的减排建议:

1. 情景1、2、3、4与原始情景相比较,CO<sub>2</sub>排放量都降低了,这是由于在模型中加入了新能源影响

因子的作用,由此看来,要降低 CO<sub>2</sub> 排放量,新能源起了很重要的作用,因此江苏省必须加大科技投入,开发新能源,加大减排技术的研发,如 CO<sub>2</sub> 捕获与封存技术,减少由煤炭燃烧产生 CO<sub>2</sub> 对环境的污染。

2. 情景 2 中能源结构得到了改善,碳排放量与原始情景相比较,降低的也比较多。目前,江苏省的能源结构还是以煤炭为主,怎样调整能源结构是需要解决的问题,这需要技术和经济的支持。因此,要

改变这一现状,减少 CO<sub>2</sub> 排放,必须合理调整能源结构,减少煤炭在能源结构中的使用率,提高清洁能源、新能源使用的普遍率。

3. 情景 3 通过技术进步的影响也能达到减少 CO<sub>2</sub> 排放量的目的。因此,要加大科技投入,加大教育的投入,培养具有创新能力,科研能力,实践能力新型人才,把所学落实到所需,推动科学技术的发展,提高科技含量。

#### 参考文献:

- [1] 刘建伟. 建国后至 2008 年中国生态足迹的动态测度与分析[J]. 北京理工大学学报:社会科学版,2011,13(5):1-6.
- [2] 郭运功,汪冬冬,林逢春. 上海市能源利用碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(2):103-108.
- [3] 耿涌,董会娟,郝凤明. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(10):6-12.
- [4] 赵荣钦,黄贤金,钟大洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报,2010,65(9):1048-1057.
- [5] 马晓微,崔晓凌. 北京市终端能源消费及碳排放变化影响因素[J]. 北京理工大学学报:社会科学版,2012,14(5):1-5.
- [6] Laurent A, Olsen S I, Hauschild M Z. Carbon footprint as environmental performance indicator for the manufacturing industry[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010(59):37-40.
- [7] Benjamin K Sovacool, Marilyn A Brown. Twelve metropolitan carbon footprints: a preliminary comparative global assessment [J]. Energy Policy, 2010(38):4856-4869.
- [8] Druckman Angela, Jackson Tim. The carbon footprint of UK households 1990—2004: a socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input-output model[J]. Ecological Economics, 2009(68):2066-2077.
- [9] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009(29):1-6.
- [10] Herrmann I T, Hauschild M Z. Effects of globalization on carbon footprints of products[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2009(58):13-16.
- [11] 蔡林. 系统动力学在可持续发展中的应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008:24.
- [12] 田立新,包森,方国昌. 江苏省能源结构情景分析及碳排放研究[J]. 能源技术与管理,2011(5):1-3.

## The Industrial Carbon Footprint of Jiangsu Province and Scenario Simulation

TIAN Lixin, QIAN Jialing

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** Industrial carbon footprint is a complex dynamic system. Targeting the status of industrial carbon footprint of Jiangsu Province, the paper used the principle of system dynamics with the Vensim PLE software and established an industrial carbon footprint system, which was divided into four subsystems: the population subsystem, the resources subsystem, the environment subsystem and the energy subsystem. The paper gave special consideration to the impact of per capita GDP on education and the impact of education on technology. Because of this relationship, it ultimately led to changes in CO<sub>2</sub> emissions. Through the historical data, the article simulated the industrial carbon footprint of Jiangsu Province and set up four different scenarios. Compared with the original scene, the paper concludes that to reduce industrial carbon footprint of Jiangsu Province people must work hard on developing new energy and adjusting energy structure. However, the effect of technological advances for industrial carbon footprint reduction is less significant than the first two ones.

**Key words:** carbon footprint; system dynamics; scenario simulation

[责任编辑:孟青]