

# 动物圈约束下的节能减排系统协调发展分析

傅 敏 田立新 方国昌\*

**摘要:**节能减排是控制温室气体排放、减缓气候变化的有效途径之一。如何在城市系统之间实现节能减排系统协调发展是研究节能减排的一大要义。本文基于非线性动力学知识,在动物圈约束下的节能减排系统框架下,讨论了不同城市之间动物圈约束下的系统协调发展问题。将城市碳循环系统中的动物圈引入三维节能减排系统,构建新的四维动物圈约束下的节能减排系统。基于自适应同步控制方法,构造Lyapunov函数,探讨了两个城市系统之间节能减排协调发展的条件。借助统计数据,对南京、扬州-镇江节能减排演化系统实现协调发展的问题进行了情景分析,研究得出碳排放峰值是两个城市系统协调发展的关键因素。

**关键词:**动物圈;碳循环;节能减排;协调发展

## 一、问题提出

温室气体排放已经成为全球的焦点问题(Nishitani et al., 2015),而节能减排可以有效地控制温室气体排放。科学地建立节能减排系统,以及对系统中变量之间的演化关系进行深入探讨,有助于厘清发展思路,探索降低碳排放的优化路径(Zhang et al., 2014; Jiang, 2016),促进经济发展与资源环境保护协同发展,提高能源利用效率、优化能源结构(Abam et al., 2014; Li et al., 2015)。更进一步地,有助于向低碳经济转型,加快经济增长方式转变以及经济结构

---

\*傅敏,江苏大学能源发展与环境保护战略研究中心,邮政编码:212013,电子信箱:fumin@ujs.edu.cn;田立新(通讯作者),江苏大学能源发展与环境保护战略研究中心,南京师范大学数学科学学院,邮政编码:210023,电子信箱:tianlx@ujs.edu.cn;方国昌,江苏大学能源发展与环境保护战略研究中心,南京财经大学经济学院,邮政编码:210023,电子信箱:fgchang79@163.com。

本文系国家自然科学基金项目“企业和居民的绿色低碳行为研究”(71690242)、“区域碳循环演化分析下的排放效应及战略研究”(71303095)、“基于碳税的节能减排演化分析及调控战略研究”(71303205),国家自然科学基金重大研究计划培育“基于大数据的微观宏观行为综合分析”(91546118),国家博士后科学基金资助项目“新能源价格视角下的温室气体减排演化机制与调控研究”(2015T80519)、“基于新能源价格的节能减排演化分析及调控战略研究”(2014M551524)和江苏省博士后基金资助项目“温室气体减排演化机制及调控研究——基于新能源价格视角”(1401049C)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的建设性意见,文责自负。

调整(Shimada et al., 2007; 齐绍洲、付坤, 2013)。节能减排系统中的变量之间,以及约束措施之间都有着非常复杂的演化关系,其中,动物圈约束下的节能减排系统逐渐成为目前研究的热点问题。

动物圈约束下的节能减排系统发展带有比较明显的地域属性,不同区域的节能减排发展并不均衡(Li et al., 2010; Gong et al., 2014),也是一个复杂的非线性耦合系统。动物圈对节能减排系统的影响非常显著,随着动物圈的活跃程度的增加,系统中的碳排放随之增加,进而会抑制节能减排的开展速度,影响经济增长等变量(Cox et al., 2000; Chimner et al., 2016; Mari et al., 2016)。同时,动物圈中碳的发展速度受制于碳排放及经济的发展程度。在节能减排系统中引入动物圈约束变量,探讨诸多变量间的相互影响逐渐成为当前的热点问题(Huang et al., 2015; Tantisattayakul et al., 2016)。碳循环对城市化、农业经济等有重要的影响(赵荣钦, 2011; 庞容等, 2015),不同的系统之间有着非常复杂的演化关系(Fang et al., 2012; 方国昌等, 2013)。在不同区域节能减排发展的速度、比例、顺序等方面,需要有一个合理的安排,既要有侧重点,又要兼顾各方,做到统筹兼顾(Shao & Li, 2012)。这样可以实现不同系统之间的协调发展(Munson, 2007),有益于促进整个动物圈约束下的节能减排系统的发展。

已有文献关于碳循环的模型有碳-气候模型(Cox et al., 2000)、相互作用模型(Gorham, 2014),研究方法有动力学方法(Zachos et al., 2008)等,也有学者定性表述碳循环机制及影响(赵海凤等, 2014; 仲启铨等, 2015)。研究内容比较广泛,取得了丰富的研究成果。关于系统的协调发展问题大多是从控制-优化的角度进行研究。本文在原三维节能减排系统的基础上(Fang et al., 2012),引入城市碳循环系统中的动物圈,构建了新的四维动物圈约束下的节能减排系统,探讨了动物圈约束下的节能减排系统协调发展问题,在区域间碳循环协调发展方面做了有益的尝试。本文运用定量分析理论,构建科学的动物圈约束下的节能减排模型,用系统动力学模型结合仿真分析进行政策试验,并借助统计软件对数据进行模拟分析,探讨不同城市碳循环系统的协调发展机制,创新了研究方法。研究结果对目前关注的热点问题给出了自己的见解,相比之前的研究,本文的理论依据充分,实证分析更加形象,更符合碳循环系统的现实情形。

## 二、理论模型

### (一)模型的建立

城市碳循环系统研究可以较详细地给出区域之间碳的交换过程,从而进一步了解系统中各因素间的相互关系及人类(动物)活动的影响程度。区域碳循环系统的协调发展,可以使人类活动碳排放强度维持在恰当的范围,保持陆地生态系统的持续稳定发展。动物圈约束下的节能减排系统的研究对突破当前的资源环境瓶颈,探寻可持续发展的优化路径有着重要的作用。根据节能减排、碳排放、经济增长、动物圈中的碳含量等相互影响的复杂关系,可得四维

动物圈约束下的节能减排系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = a_1 x(y/M - 1) - a_2 y + a_3 z - a_4 u \\ \dot{y} = -b_1 x + b_2 y(1 - y/C) + b_3 z(1 - z/E) + b_4 u \\ \dot{z} = c_1 x(x/N - 1) - c_2 y - c_3 z - c_4 u \\ \dot{u} = d_1 u(y - P) + d_2 z \end{cases} \quad (1)$$

系统(1)中,  $x(t)$  为随时间变化的节能减排量<sup>①</sup>,  $y(t)$  为随时间变化的碳排放量(能源消耗产生的碳排放量),  $z(t)$  为随时间变化的经济增长量(GDP),  $u(t)$  为随时间变化的动物圈中的碳含量。其中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 、 $d_j$ 、 $M$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $N$ 、 $P$  为正常数,  $t \in I$ ,  $I$  为一个经济时期 ( $i=1, 2, 3, 4$ ;  $j=1, 2$ ;  $M$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $N$ 、 $P$  的单位都可转化为标准煤),  $M$  为  $y(t)$  对  $x(t)$  影响的转折点,  $C$  为一个经济时期内  $y(t)$  的峰值,  $E$  为一个经济时期内  $z(t)$  的峰值,  $N$  为  $x(t)$  对  $z(t)$  影响的转折点,  $P$  是  $y(t)$  对  $u(t)$  影响的拐点, 其他变量的解释详见(Fang et al., 2012)。

系统(1)具有普遍的适用性, 对系统(1)的深入研究有助于剖析碳循环与节能减排的内在联系, 探寻中国特色的节能减排优化之路, 有助于中国兑现《巴黎协定》的承诺。在本研究中用系统(1)表示南京和扬州-镇江两个城市的节能减排演化系统(南京用A表示, 扬州-镇江用B表示)。一般来说, A、B城市的情况略有不同, 也就是两个系统的相关参数会有差别。就宁镇扬(南京、镇江、扬州)来说, 扬州市南临长江, 与镇江市隔江相望, 西南部与南京市相连, 与镇江同是南京都市圈核心层城市。从地理位置上讲, 南京与镇江、扬州有两个连接点, 在江南是栖霞与镇江句容, 在江北是六合与扬州仪征。三个城市在城市规模、经济结构等方面有着相似之处, 因此选择宁镇扬作为样本研究城市节能减排系统之间的互动关系。有助于发挥各自优势, 明确各自定位, 在互融互通互补的发展中实现互利共赢(Shieh, 2011; 梅海燕, 2016)。

将三个城市放在一起探讨, 另外一个原因是宁镇扬同城化的提出。宁镇扬同城化是江苏省首个区域同城化发展规划, 目的是全面实施主体功能区规划, 推进空间资源整合联动, 构建科学合理的生产、生活和生态空间布局, 形成“一带三圈四轴”的同城化发展格局。《宁镇扬同城化发展规划》明确了南京-镇江-扬州三地同城化发展的要求及发展目标, 提出了城乡统筹、产业布局、生态环境、公共服务、基础设施、改革开放以及创新体系等七个方面的重点任务。从《规划》可以看出生态环境建设也是宁镇扬同城化的重要任务, 因此将三个城市放在一起讨论是很有必要的。镇江市总体规模不大, 如果单独拿出镇江市与南京市、扬州市对比研究, 研究对象不对等, 会影响分析的效果。只研究南京、扬州的协调发展, 又与宁镇扬同城化的理念相悖, 因此本文将扬州与镇江合为一体, 作为一个整体与南京市进行研究。目前中国都市圈发展

①节能减排量及其他变量的数据来源见下文“数据获取与参数识别”。

趋势愈加明显,在此研究的基础上,可以将研究结论进一步推广到长三角都市圈,也可以将研究范围扩大到其它大型都市圈。

为了下面分析方便并不失真实性,假定A、B两城市的  $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 、 $u(t)$  的发展系数(除下文提到的节能减排发展系数等四个系数)及变量间的相互影响的拐点相同,其他参数不同,得到A、B城市的系统(2)、系统(3)。

A城市(南京市)动物圈约束下的节能减排系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = ax_1(y_1/M - 1) - a_2y_1 + a_3z_1 - a_4u_1 \\ \dot{y}_1 = -b_1x_1 + by_1(1 - y_1/C) + b_3z_1(1 - z_1/E) + b_4u_1 \\ \dot{z}_1 = c_1x_1(x_1/N - 1) - c_2y_1 - cz_1 - c_4u_1 \\ \dot{u}_1 = du_1(y_1 - P) + d_2z_1 \end{cases} \quad (2)$$

B城市(扬州市、镇江市)动物圈约束下的节能减排系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = a'x_2(y_2/M - 1) - a_2y_2 + a_3z_2 - a_4u_2 \\ \dot{y}_2 = -b_1x_2 + b'y_2(1 - y_2/C) + b_3z_2(1 - z_2/E) + b_4u_2 \\ \dot{z}_2 = c_1x_2(x_2/N - 1) - c_2y_2 - c'z_2 - c_4u_2 \\ \dot{u}_2 = d'u_2(y_2 - P) + d_2z_2 \end{cases} \quad (3)$$

在系统(2)和(3)中,  $a$ 、 $a'$  分别为  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  的发展系数,由于A、B两个城市节能减排投入、节能减排技术发展及相关政策的差距,因此两城市的节能减排发展系数不同。 $b$ 、 $b'$  为  $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$  发展速度的弹性系数,因两城市的工业结构、能源消耗比例等存在一定的区别,因此  $b$ 、 $b'$  也不尽相同。 $c$ 、 $c'$  为节能减排等的投入对经济增长的抑制系数,两地经济发展速度,经济规模及对节能减排等的投入不同,因此抑制系数不同。 $d$ 、 $d'$  为  $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$  的发展系数,A、B两个城市动物圈规模等有差异,发展系数也不相同。其他系数的实际意义体现在变量间相互影响之中,因两城市同属于长三角都市圈,变量之间的相互关系存在一定的共性,可以认为这些系数基本相同。

## (二)系统同步的条件

不同系统之间的同步,更容易实现系统间的协调发展。对系统(2)和系统(3)来说,两个系统同步利于宁-镇-扬的统一管理,更容易实现此区域的节能减排发展目标。对于具有不同未知参数的两个系统的同步问题,普遍使用的方法是自适应同步控制方法(Xie et al., 2015; Tang et al., 2016)。这里不妨设A城市节能减排系统为驱动系统,B城市节能减排系统为响应系统。对(3)式施以适当的控制值,假设控制项为  $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 、 $u_3(t)$ 、 $u_4(t)$ 。 $u_1(t)$  是对B城市节能减排速度的一个控制,这与A、B两城市的节能减排量、碳排放量、经济增长量及动物圈中碳含量等存在一定的关系, $u_1(t)$  是复杂的多元函数。同样, $u_2(t)$ 、 $u_3(t)$ 、 $u_4(t)$  是对B城市碳排放发展

速度、经济发展速度、动物圈中碳含量发展速度的控制,都受到其它变量的约束,是诸多变量的综合影响,是复杂的非线性函数。

驱动系统为系统(2),响应系统为系统(4):

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = a'x_2(y_2/M - 1) - a_2y_2 + a_3z_2 - a_4u_2 + u_1(t) \\ \dot{y}_2 = -b_1x_2 + b'y_2(1 - y_2/C) + b_3z_2(1 - z_2/E) + b_4u_2 + u_2(t) \\ \dot{z}_2 = c_1x_2(x_2/N - 1) - c_2y_2 - c'z_2 - c_4u_2 + u_3(t) \\ \dot{u}_2 = d'u_2(y_2 - P) + d_2z_2 + u_4(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\begin{cases} a' = a + \gamma_1 a \\ b' = b + \gamma_2 b \\ c' = c + \gamma_3 c \\ d' = d + \gamma_4 d \end{cases}$ ,  $\gamma_i (i=1, 2, 3, 4)$  表示对应未知参数之间的关系。

系统(2)和系统(4)的误差系统为(5):

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -ae_1 - a_2e_2 + a_3e_3 - a_4e_4 + \frac{a}{M}(x_2y_2 - x_1y_1) + \gamma_1a(x_2y_2/M - x_2) + u_1(t) \\ \dot{e}_2 = -b_1e_1 + be_2(1 - y_1 + y_2/C) + b_3e_3(1 - z_1 + z_2/E) + b_4e_4 + \gamma_2b(y_2 - y_2^2/C) + u_2(t) \\ \dot{e}_3 = c_1e_1(x_1 + x_2/N - 1) - c_2e_2 - ce_3 - c_4e_4 - \gamma_3cz_2 + u_3(t) \\ \dot{e}_4 = d_2e_3 - dPe_4 + d(u_2y_2 - u_1y_1) + \gamma_4du_2(y_2 - P) + u_4(t) \end{cases} \quad (5)$$

因此,两系统的同步问题转化为误差系统(5)在原点的渐近稳定问题,证明过程见附录。

基于系统对应的实际情形,  $C$  是区域(城市)碳排放的峰值,本质上反映出将来能源的最大消耗量,目前一段经济时期内是无法达到的,则在一定的经济时期内应有  $y_1 + y_2 < 2C$ 。所以在适当的控制器下,满足  $C < y_1 + y_2 < 2C$  时, A、B两城市节能减排系统是可以达到同步的。

### 三、数据获取与参数识别

节能减排的数据按因采取措施提高能源利用率,发展新能源、CCS(碳捕获与封存)以及森林碳汇等减少的碳排放计算所得(Fang et al., 2012)。碳排放及经济增长的数据来自《江苏省统计年鉴》《江苏省环境统计年报》《中国城市统计年鉴》《南京市统计年鉴》《南京市经济普查年鉴》《扬州市统计年鉴》《镇江市统计年鉴》(时间跨度为1999年-2013年)。考虑到数据的可得性,本文中动物圈主要包括人、猪、牛、羊等大型动物。动物圈中,人的平均年呼吸量参数选为0.079 tC/a,动物呼吸的碳排放主要考虑牛、猪、羊等大型动物,牛为0.796 tC/头·a,猪的碳排放系数为0.082 tC/头·a,羊为0.041 tC/头·a,其它个体小的动物忽略不计(赵荣钦,2012)。

借助基于遗传算法的BP神经网络可辨识出 A、B系统的参数。首先将系统(2)或(3)离散化,取系统的实际数据中前  $n-1$  组数据作为输入数据,后  $n-1$  组数据作为输出数据,对输入输

出变量归一化处理,使  $\bar{x}_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ , 选定合适的前馈神经网络,置所有可调参数为随机数。将其输出结果代入差分方程,所得结果与目标输出比较得到误差  $e$ 。

南京市对应的系统(A系统)的相关参数见表1(误差  $e \leq 1.44 \times 10^{-3}$ )(赵荣钦,2012)。

表1 实际系统参数(南京)

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$c_1$	$c_2$
0.0876	0.0013	0.0162	0.0098	0.4257	0.0262	0.7982	0.0221	0.0352	0.0065
$c_3$	$c_4$	$d_1$	$d_2$	$M$	$C$	$E$	$N$	$P$	
0.0812	0.0314	0.0196	0.0012	0.8973	1.3415	2.5143	0.3429	0.9475	

扬州市统计年鉴数据中动物圈只能查阅到人口数,家畜只能查阅到猪的相关数据。这点与南京市、镇江市动物圈的数据有些区别。为保证数据获取的口径一致,表2的  $u(t)$  中的家畜数据为猪的相关数据。扬州-镇江市城市节能减排系统数据如表2。

表2 扬州-镇江市节能减排系统中  $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 、 $u(t)$  的数据

年份	$x$	$y$	$z$	$u$
2000	1.03809	1.029359	1.092741	1.033528
2001	1.08117	1.123719	1.180344	1.047182
2002	1.154596	1.474323	1.290903	1.321296
2003	1.204616	1.645516	1.488247	1.333602
2004	1.360181	1.766277	1.796846	1.284553
2005	1.455948	2.014861	2.274964	1.268125
2006	1.824971	1.930581	2.648417	1.212787
2007	1.818608	2.193468	3.192365	1.048281
2008	1.911112	2.232237	3.829383	1.065394
2009	1.901921	2.437497	4.306268	1.091145
2010	1.135525	2.533467	5.146733	1.110721
2011	2.103344	2.658661	6.031084	1.124937
2012	2.313392	2.678799	6.790036	0.99292
2013	2.214887	2.806003	7.541422	0.994508

注:表2中的数据为标准化后的数据,以1999年为基准线。

在参数辨识过程中只需辨识  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$ 、 $d'$  的数值,其他参数保持不变(同表1)。经过多次调试和运行,得到扬州-镇江对应的实际系统中的参数如表3所示(误差为  $e \leq 6.19 \times 10^{-3}$ )。实际系统中参数的获取,为进一步分析南京和扬州-镇江对应的两个系统的协调发展提供了条件。参数是基于实际数据获取的,因此得到的分析结果也更有说服力。

表3 实际系统参数(扬州-镇江)

$a'$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$b_1$	$b'$	$b_3$	$b_4$	$c_1$	$c_2$
0.0785	0.0013	0.0162	0.0098	0.4257	0.0257	0.7982	0.0221	0.0352	0.0065
$c'$	$c_4$	$d'$	$d_2$	$M$	$C$	$E$	$N$	$P$	
0.0827	0.0314	0.0185	0.0012	0.8973	1.3415	2.5143	0.3429	0.9475	

#### 四、实证结果与分析

以往关于碳循环的研究,大多是从地理角度出发探究碳循环的演化机理及发展规律。本文主要探讨动物圈约束下的不同节能减排系统间的协调发展。动物圈的引入对整个系统的变量都有影响,会给系统带来更加复杂的演化行为。在节能减排演化过程中,我们发现包括人类在内的动物圈的活动是致使温室气体变化的主要原因,深入探究动物圈对节能减排、碳排放、经济增长的演化影响,可以进一步剖析当前节能减排系统的内在属性,有助于深入剖析节能减排系统中的关键因素,了解当前节能减排系统中存在的实际问题,并给出恰当的解决方案。

两城市对应的节能减排系统的协调发展,关键是看节能减排的协调发展。文中第二部分和第三部分的分析给出了A、B两城市对应的节能减排系统协调发展的条件,节能减排系统中碳排放的峰值  $C$  是两城市是否能协调发展的关键因素。当峰值(达到峰值的时间)变化时,系统会展现出复杂的动力学行为。图1展示了系统(3)(扬州-镇江市节能减排系统)中碳排放峰值变化时的节能减排发展图。

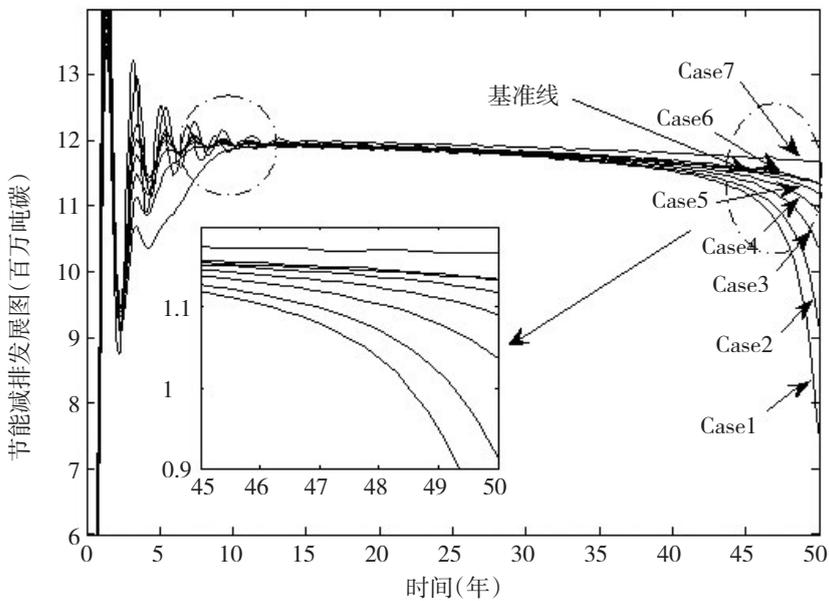


图1 节能减排发展图(C)

在图1中, Case1-6为B城市(扬州-镇江市)对应的节能减排系统中参数  $C$  从11.415至12.415逐渐增大时的节能减排演化图, Case7对应  $C=13.415$  时的节能减排演化图。基准线对应的是A城市(南京市)节能减排系统中当  $C=13.415$  时的节能减排演化图(此时的  $C$  值不一定是系统对应的碳排放峰值,但对  $C$  演变过程中所带来的现象的分析,也可以找到两个系统的演化规律,探究两个系统协调发展的条件)。观察图1可以发现当B城市对应的节能减排

系统中参数  $C$  逐渐变大时, B 系统与 A 系统协调发展的越快, 即图 1 中左边圆形区域内 Case 1-7 与基准线吻合越来越密切。但是随着时间的推移, 原本吻合很好的曲线会慢慢偏离, 图 1 中可以看到, 几条曲线在经过初期的震荡后吻合, 然后慢慢分开。然而, Case 5 和 Case 6 仍然与基准线非常贴近, 也就是在 Case 5 至 Case 6 对应的  $C$  值中肯定有一个值  $C'$ ,  $C'$  对应的曲线与基准线完全吻合, 实现真正的协调发展。

系统的研究对象南京、镇江、扬州彼此接壤, 分居长江两侧, 经济往来频繁, 城市碳循环中大气、水、动植物的碳循环比较密切。南京市、扬州-镇江市城市系统中节能减排的协调发展, 会进一步带动系统中碳排放、经济增长、动物圈中的碳含量等变量的协调发展, 乃至促进整个城市碳循环系统的协调发展, 为探究更大范围碳循环的协调发展提供了研究范例。

## 五、研究结论

基于非线性动力学, 在三维节能减排系统的基础上, 本文引入城市碳循环系统中的动物圈约束变量, 构建动物圈约束下的四维节能减排系统, 研究了南京市、扬州-镇江市节能减排系统的协调发展问题。借助基于遗传算法的 BP 神经网络, 辨识出实际系统中的参数。基于自适应同步控制方法, 探讨了两个城市系统之间节能减排协调发展的条件, 研究得出碳排放峰值是两个城市系统协调发展的关键因素, 并给出了同步发展条件下碳排放峰值的取值范围。以节能减排演化趋势为衡量指标, 进一步探究了南京市、扬州-镇江市节能减排如何实现协调发展。

中国各地区经济发展不平衡, 节能减排情形更是千差万别。区域间节能减排协调发展研究, 可以更好地发挥各地区的长处, 互相补充、互相协作, 发挥节能减排的整体优势。东部地区是我国经济发达地区, 物质技术基础雄厚, 科技教育比较发达, 管理水平较高, 经济处于“成熟”型阶段。南京市、扬州市、镇江市处于东部发达地区, 选择南京市、扬州-镇江市开展城市系统节能减排协调发展研究, 更容易达到协调发展的理想化状态。该研究为城市碳循环协调发展的研究提供了新方向。

本文将动物圈引入三维节能减排系统, 并探讨了系统的协调发展问题。研究过程突出运用定量分析, 用系统动力学模型结合仿真分析进行政策试验, 并借助统计软件对数据进行模拟分析, 探讨不同城市碳循环系统的协调政策发展机制, 创新并丰富了研究方法。事实上, 城市碳循环系统中包含很多的变量, 如植物圈, 土壤圈等等, 这些变量都可以逐步引入节能减排系统中。此外, 第三部分参数识别环节中节能减排数据的计算, 及扬州市动物圈数据的不完整, 使得误差只达到  $10^{-3}$  次方, 这些可能会对参数识别及后面的情景分析有所影响。而且, 城市节能减排系统还受到低碳意识, 政府调控等变量的约束, 也可以将更多的城市纳入系统中进行对比分析。这些都将在未来进一步研究。

附录:

定理1:在系统的控制函数取(6)式,参数估计率取(7)式情况下,当  $y_1+y_2 > C$  时,系统(5)是渐近稳定的。即对于任意的初始值  $[x_1(0), y_1(0), z_1(0), u_1(0)]^T$  和  $[x_2(0), y_2(0), z_2(0), u_2(0)]^T$ , 有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e\| = 0$ ,  $e = [e_1, e_2, e_3, e_4]^T$ 。

$$\begin{cases} u_1(t) = a_2 e_2 - a_3 e_3 + a_4 e_4 - \frac{a}{M}(x_2 y_2 - x_1 y_1) - \hat{\gamma}_1 a(x_2 y_2 / M - x_2) \\ u_2(t) = b_1 e_1 - b_3 e_3(1 - z_1 + z_2 / E) - b_4 e_4 - \hat{\gamma}_2 b(y_2 - y_2^2 / C) \\ u_3(t) = -c_1 e_1(x_1 + x_2 / N - 1) + c_2 e_2 + c_4 e_4 + \hat{\gamma}_3 c z_2 \\ u_4(t) = -d_2 e_3 - d(u_2 y_2 - u_1 y_1) - \hat{\gamma}_4 d u_2(y_2 - P) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_1 a = (x_2 y_2 / M - x_2) e_1 \\ \hat{\gamma}_2 b = (y_2 - y_2^2 / C) e_2 \\ \hat{\gamma}_3 c = -z_2 e_3 \\ \hat{\gamma}_4 d = (u_2 y_2 - u_2 P) e_4 \end{cases} \quad (7)$$

(6)式和(7)式中,  $\tilde{\gamma}_i = \gamma_i - \hat{\gamma}_i (i=1, 2, 3, 4)$ , 而  $\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3, \hat{\gamma}_4$  为  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  的估计值。

证明:构造 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2) + \frac{1}{2}(\tilde{\gamma}_1^2 a^2 + \tilde{\gamma}_2^2 b^2 + \tilde{\gamma}_3^2 c^2 + \tilde{\gamma}_4^2 d^2) \quad (8)$$

将公式(6)、(7)入公式(5),计算可得:

$$\dot{V} = -a e_1^2 + b(1 - y_1 + y_2 / C) e_2^2 - c e_3^2 - d P e_4^2 \quad (9)$$

(8)式和(9)式中,当  $V$  是正定的,  $\dot{V}$  是负定的时候,可以判断系统的渐近稳定性。原系统中  $a, b, c, d$  均为正数,由  $\dot{V} < 0$  有  $1 - \frac{y_1 + y_2}{C} < 0$ , 即  $y_1 + y_2 > C$  时,系统(5)在原点是渐近稳定的。

### 参考文献:

- [1] 方国昌,田立新,傅敏,孙梅. 新能源发展对能源强度和经济增长的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(11):2795-2803.
- [2] 梅海燕. 城乡一体化发展的探索与思考[J]. 经济研究导刊, 2016, (22): 118.
- [3] 庞容,吕志强,朱金盛,庆旭瑶,邓睿. 基于碳循环的农业净碳排与农业经济的脱钩分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 253-259.
- [4] 齐绍洲,付坤. 低碳经济转型中省级碳排放核算方法比较分析[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2013, 66(2): 85-92.
- [5] 赵海凤,闫昱霖,张彩虹,张大红. 森林参与碳循环的三种模式:机制与选择[J]. 林业科学, 2014, (10): 134-139.
- [6] 赵荣钦. 城市生态经济系统碳循环及其土地调控机制研究——以南京市为例[D]. 南京:南京大学, 2011.
- [7] 赵荣钦. 城市系统碳循环及土地调控研究[M]. 南京:南京大学出版社, 2012.

- [8] 仲启铖,王开运,周凯,来琦芳. 潮间带湿地碳循环及其环境控制机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, (01): 174–182.
- [9] Abam,F.I., B.N.Nwankwojike, O.S.Ohunakin, and S.A.Ojomu. Energy Resource Structure and On-going Sustainable Development Policy in Nigeria: A Review[J]. International Journal of Energy & Environmental Engineering, 2014, (5):1–16.
- [10] Chimner,R.A., T.G.Pypker, J.A.Hribljan, P.A.Moore, and J.M.Waddington. Multi-decadal Changes in Water Table Levels Alter Peatland Carbon Cycling[J]. Ecosystems, 2016, 19(6): 1–16.
- [11] Cox,P.M., R.A.Betts, C.D.Jones, S.A.Spall, and I.J.Totterdell. Acceleration of Global Warming due to Carbon-cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model[J]. Nature, 2000, 408(6809): 184–187.
- [12] Fang,G.C., L.X.Tian, M.Sun, and M.Fu. Analysis and Application of a Novel Three-dimensional Energy-saving and Emission-reduction Dynamic Evolution System[J]. Energy, 2012, 40(1): 291–299.
- [13] Gong,Y., S.J.Li, and Y.Bai. Traffic Guidance and Control Spatial-temporal Fusion Algorithm for Energy-saving and Emission-reduction[J]. Kongzhi Yu Juece/Control & Decision, 2014, 29(7): 1330–1334.
- [14] Gorham,E. The Role of Northern Peatlands in the Carbon Cycle, and Their Probable Response to Climate Warming[J]. 大气科学进展: 英文版, 2014, 31(5): 1181–1196.
- [15] Huang,R.Z., M.Riddle, D.J.Graziano, J.Warren, S.Das, S.U.Nimbalkar, J.Cresko and E.Masanet. Energy and Emissions Saving Potential of Additive Manufacturing: The Case of Lightweight Aircraft Components[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 135(04): 1559–1570.
- [16] Jiang,J.H. China's Urban Residential Carbon Emission and Energy Efficiency Policy[J]. Energy, 2016, 109(05): 866–875.
- [17] Li,L., C.Z.Gong, S.Z.Tian, and J.L.Jiao. The Peak-shaving Efficiency Analysis of Natural Gas Time-of-use Pricing for Residential Consumers: Evidence from Multi-agent Simulation[J]. Energy, 2015, 96(12): 48–58.
- [18] Li,X.Z., X.Cai, and C.M.Fu. An Energy Saving and Emission Reduction Based Bidding Transaction Mode under Carbon Trading Mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 35(10): 48–52.
- [19] Mari,X., U.Passow, C.Migon, A.B.Burd, and L.Legendre. Transparent Exopolymer Particles: Effects on Carbon Cycling in the Ocean[J]. Progress in Oceanography, 2016, 151(11): 13–37.
- [20] Munson,R. Recycling Energy: How Industry is Leading a Clean-technology Revolution[J]. The Electricity Journal, 2007, 20(7): 79–85.
- [21] Nishitani,K., K.Kokubu, and T.Kajiwara. Does Low-carbon Supply Chain Management Reduce Greenhouse Gas Emissions More Effectively than Existing Environmental Initiatives? An Empirical Analysis of Japanese Manufacturing Firms[J]. Journal of Management Control, 2015, 27(10): 1–28.
- [22] Shao,Y. and P.Li. The Analysis of Design Methods about High-rise Public Building Energy Saving[J]. Advanced Materials Research, 2012, 575: 84–89.
- [23] Shieh,L. Becoming Urban: Rural-urban Integration in Nanjing, Jiangsu Province[J]. Pacific Affairs, 2011, 84(3): 475–494.
- [24] Shimada,K., Y.Tanaka, K.Gomi, and Y.Matsuoka. Developing a Long-term Local Society Design Methodology towards a Low-carbon Economy: An Application to Shiga Prefecture in Japan[J]. Energy Policy, 2007, 35(9): 4688–4703.
- [25] Tang,Z., J.H.Park, and T.H.Lee. Topology and Parameters Recognition of Uncertain Complex Networks via Nonidentical Adaptive Synchronization[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(4): 2171–2181.
- [26] Tantisattayakul,T., C.Pharino, O.Chavalparit, and P.Kanchanapiya. Energy, Environmental, and Economic Analysis of Energy Conservation Measures in Thailand's Upstream Petrochemical Industry[J]. Energy for Sustainable

Development, 2016, 34(07): 88–99.

[27] Xie,X.P., S.X.Weng, and H.F.Zhang. Reducing the Conservatism of Stability Analysis for Discrete-time T-S Fuzzy Systems Based on a Delayed Lyapunov Function[J]. Neurocomputing, 2015, 171(07): 1139–1145.

[28] Zachos,J.C., G.R.Dickens, and R.E.Zeebe. An Early Cenozoic Perspective on Greenhouse Warming and Carbon-cycle Dynamics[J]. Nature, 2008, 451(7176): 279–283.

[29] Zhang,Y., X.Y.Zheng, H.Zhang, G.F.Chen, and X.Wang. Carbon Emission Analysis of a Residential Building in China through Life Cycle Assessment[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2014, 10(1): 150–158.

## Evolution Analysis on Coordinated Development of Energy Conservation and Emission Reduction System under the Restraint of Animal Circle

Fu Min<sup>a</sup>, Tian Lixin<sup>a,b</sup> and Fang Guochang<sup>a,c</sup>

(a: Center for Energy Development and Environmental Protection, Jiangsu University; b: School of Mathematical Sciences, Nanjing Normal University; c: School of Economics, Nanjing University of Finance and Economics)

**Abstract:** Energy saving and emission reduction (ESER) is one of the effective ways to control greenhouse gas emissions and mitigate climate change. Achieving ESER coordinated development between different cities is a key point of studying ESER. This paper discusses the coordinated development of ESER in different urban systems with the restraint of animal circle based on nonlinear dynamics method. The animal circle in carbon cycle system is introduced into the three dimensional ESER system, and the ESER system with the restraint of animal circle is constructed. The Lyapunov function is given based on the adaptive synchronization control method. The conditions for the coordinated development of energy-saving and emission-reduction between the two cities are discussed. With the aid of statistical data, a scenario analysis is conducted. Coordinated development of ESER- carbon cycle in Yangzhou- Zhenjiang and Nanjing is explored. Studies have shown that, the key factors of the coordinated development of the two urban systems are the peak values of carbon emissions.

**Keywords:** Animal Circle; Carbon Cycle; Energy-saving and Emission-reduction; Coordinated Development

**JEL Classification:** O13, Q48, Q54

(责任编辑:朱静静)