

Study on the SD Modeling and Simulation of Carbon Emission Trading in the City' Development Process

Lei Li¹, Yan Yan²

1. School of Business, Jiangnan University, Wuxi, China

2. School of Business, Jiangnan University, Wuxi, China

1. inf2007@126.com, 2. yanyan1985sky@163.com

Abstract: Begin with the carbon emission restriction in the process of city' development. Describe the conflict between the economic development and environment protection in current city's development. In current city development model, we add the carbon emission trading mechanism and using SD modeling method to simulate the impact that is brought by emission trading to the whole city' development. At first, this article explain the carbon trading' economic basic in theory; then qualitative analyze the city' development Reason-result chart after exporting the carbon trading policy. In the third, by referring to the statistics almanac, this article quantitative analyze the carbon trading policy's impact degree to the whole city' economic structure and economic development rate. At last, we get the simulation conclusion that the carbon trading wouldn't decrease the city' carbon gross emission. However, it will produce favorable impact to the city's economic system and economic structure. This simulation has important referenced affect to the application of carbon emission trading system.

Keywords: emission cut; city' economic system; carbon emission trading; SD simulation

城市碳排放交易的 SD 模型及仿真

李磊¹, 言彦²

1. 江南大学 商学院, 江苏 无锡 214122

2. 江南大学 商学院, 江苏 无锡 214122

1. inf2007@126.com, 2. yanyan1985sky@163.com

摘要: 从当前城市发展所面临的碳排放瓶颈着手, 描述了当前城市发展过程中面临的经济发展与节能减排之间的矛盾。在现有的城市发展模型中导入了碳排放权交易政策机制, 运用 SD 建模方法模拟仿真了碳排放权交易对城市经济发展的影响。文章首先阐明了产业间进行碳排放权交易的经济基础与理论背景; 接着定性的分析导入碳排放权交易政策以后的城市发展因果关系图; 然后借鉴统计年鉴和相关数据定量的分析了碳排放权对整个城市经济结构与经济发展速度的影响程度。本文最后仿真结果得出结论: 碳排放权交易不会减少城市碳排放总量, 但被严格执行的碳排放权交易会对整个城市经济系统产生有利影响, 并会对城市产业结构产生影响。这种仿真对碳排放权交易的实施有重要借鉴作用。

关键词: 节能减排; 城市经济系统; 碳排放权交易; SD 仿真

1 引言

1968 年美国人戴尔斯在科斯产权交易理论的基础上, 提出了排污权交易理论。目前, 排污权交易作为一种市场经济手段已经比较地广泛应用于大气和水污染的控制中。近些年, 随着温室气体的大量排放全

世界都在聚焦全球变暖问题。2010 年全世界人均碳排放是 5 吨, 按照福利经济学的基本定律: 任何竞争均衡都是帕累托最适度状态。同时, 在帕累托最适度状态都可以用一套竞争价格来实现。这意味着, 凡是低于 5 吨的国家, 事实上就可以出卖碳排放权, 凡是高于 5 吨的国家就需要购买碳排放权。这就成为了碳排放权交易市场存在的客观必要性基础。各国政府在履

基金项目: 国家社会科学基金(08BJY060)及江苏省软科学研究项目(BR2008074)

行《京都议定书》规定碳排放配额的前提下，对本国企业碳排放权控制同时允许其进行交易。企业如果排放少于其预期的碳排放配额，就可以将剩余配额投放到市场进行交易，并获取收益；而那些排放量超过配额许可的企业需要从市场购买额外的许可额度，从而实现国家的碳排放承诺。

由于国外排放权交易较为成熟，研究也比较深入。一些观点具有一定的代表性。Natsours 提出三种重要分配原则^[1]：①按人口分配，体现人人享有排放权的原则；②按历史责任分配，体现“谁排放，谁负责”的公平性原则；③按现行排放源分配，又称作“祖父制”，体现“现实性”原则。三种分配方式各有优劣，在不同场合有不同使用优势。Hahn 指出^[2]，在非完全竞争市场初始排放权的分配方式会影响排放权的配置效率。1990 年美国《清洁大气法修改方案》中提出了三种具体的分配方案：①免费发放、②定价出售、③拍卖出售。Kehoane 等^[3]从政治经济学角度指出，大多数排污权交易计划中采用免费分配方式是政策在制定过程中被管制企业对其施加政治影响所带来的一个直接结果。因为免费发放方式对于大企业更有利。Hahn 研究了在排污权交易市场，市场势力存在导致市场机制的失灵和市场均衡的扭曲^[4]。Tietenberg^[5]则认为，市场势力存在的最终后果是非垄断方选择减排技术的提高而非购买排放权的策略，最终导致排放权交易市场的萎缩。Godby 从实验经济学角度对市场势力进行探讨，发现市场势力对初始排放方案效果具有放大作用，因此政府应加强管制减少市场势力的影响^[6]。

2 两个产业间的碳排放权转移过程

与劳动力，资本等其他生产要素市场类似，存在着一个进行碳排放权交易的生产要素市场。此交易市场分为两级。一级市场是政府对企业的初始配额分配，企业从政府手中获取碳排放权的初始配额；二级市场是企业之间的交易市场，各企业根据自身对碳排放权的需求确定交易量与交易价格。李寿德研究了存在交易成本和不存在交易成本的两种不同前提下两企业和多企业进行排污权交易的交易量和交易价格^[7]。在交易成本很低的前提下，排污权交易市场的出清价格等于企业 A、企业 B 的边际削减成本。由于同一产业间内企业的减排技术能力大致相当，而不同产业间的减排空间存在较大禀赋，如果从城市产业层面思考排污权交易，由于产业间的集体行为会节约大量的信息搜

寻成本。低交易成本的假设更为适用。在不考虑交易成本前提下，产业 i 和产业 j 之间的碳排放权转移过程可用图 1 来近似描述：

假定：①由于行业性质，产业 i 的单位减排边际成本要高于产业 j ，且市场中只存在产业 i 和产业 j 之间的交易；②交易成本很低，可以忽略不计；③产业 i 和产业 j 的管理者都是理性人假设；④存在总量控制，产业 i 和产业 j 都有减排的需求且产业边削减成本函数为线性函数，即存在 k 满足 $C_i = k_i \cdot q_i$ ； q 为削减量。设产业 i 的边际减排成本为 M_i ，需削减总量为 Q_{i0} 的碳排放；产业 j 的边际减排成本为 M_j ，需削减总量为 Q_{j0} 的碳排放。当在满足假定②的前提下，排污权市场出清时，排污权交易市场会产生 q 的交易量，满足 $q_i = q_j = q$ 。此时的市场交易价格 $p = M_i = M_j$ ； $C_i = C_j = C_{ij} = p$ 事实上，根据边际收益递减规律，很容易得出减排量分别为：

$$Q_i = \frac{k_j \cdot (Q_i^0 + Q_j^0)}{k_i + k_j} \quad (1)$$

$$Q_j = \frac{k_i \cdot (Q_i^0 + Q_j^0)}{k_i + k_j} \quad (2)$$

相应交易价格为：

$$p = \frac{k_i \cdot k_j \cdot (Q_i^0 + Q_j^0)}{k_i + k_j} \quad (3)$$

即：理性的管理者总是在自我减排和通过交易市场购买排污权之间作出决策。在市场经济环境下，当产业 i 的边际削减成本大于产业 j 的边际削减成本时，双方会产生交易的需求。通过交易产业 i 减少了削减量，转而向产业 j 购买，从而使总的削减成本降低；同时，产业 j 增加了削减量，并将除满足自身需求以外的排放量出售给产业 i ，在产业 i 降低边际削减成本的同时，产业 j 通过增加削减量而使边际削减成本增加，最终产业 i 和产业 j 的边际削减成本达到平衡并等于最终的市场成交价格^[8]。

3 城市经济系统内的碳排放权交易的因果分析

城市经济系统是典型的多因素影响的复杂自适应系

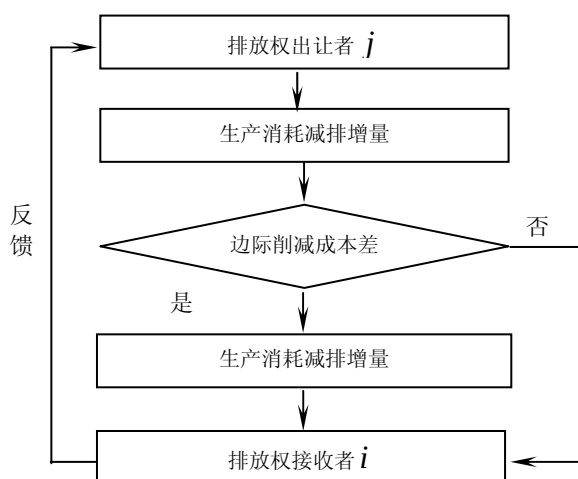


Fig 1 Carbon emission trading process in two industrial
图 1 两产业间碳排放权交易过程

统。就目前的研究来看，一般把城市经济系统的影响因素分为环境、人口、技术、投资、就业等五大子系统^[9]。在传统的环境子系统的分析中，排污量是作为一个硬性指标发放给每一个产业和企业，各企业必须实现各自的减排目标，不存在产业和企业间的排放权交易。导致一些利润率高但边际排放量削减成本高的产业发展受到了限制，而一些利润微薄，带动城市经济发张能量低的行业却有大量的减排空间由于缺乏资金注入不能得到施展，从而拖累了整个城市的经济发展。为了简化模型，本文重点对环境子系统以及与环境子系统相关的子系统做介绍；用 GDP 来衡量城市的经济发展水平；用产业 i 和产业 j 来代表城市的行业。作出因果关系图如图 2 所示。

由因果关系图可以看出，影响 GDP_i 的主要因素有： $TECHR$ ，技术发展水平； $POLLUTE_i$ ，产业 i 的碳排放量； $INVR_i$ ，对产业 i 的投资率； K_i ，资本数量； $TECH-US-GAP$ 产业 i 和产业 j 的削减潜力差距； $EXCHANGE$ ，双方的排放权交易量； GDP ，城市经济发展水平。因果图中存在四条回路：

$$\begin{aligned} GDP_i &\rightarrow GDP \rightarrow INVR_i \rightarrow K_i \rightarrow GDP_i \\ GDP_i &\rightarrow GDP \rightarrow TECHR \rightarrow GDP_i \\ GDP_i &\rightarrow POLLUTE_i \rightarrow INVR_i \rightarrow K_i \rightarrow GDP_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GDP_i &\rightarrow GDP \rightarrow TECHR \rightarrow POLLUTE_i \rightarrow \\ &TECH-US-GAP \rightarrow EXCHANGE \rightarrow \\ &INVR_i \rightarrow K_i \rightarrow GDP_i \end{aligned}$$

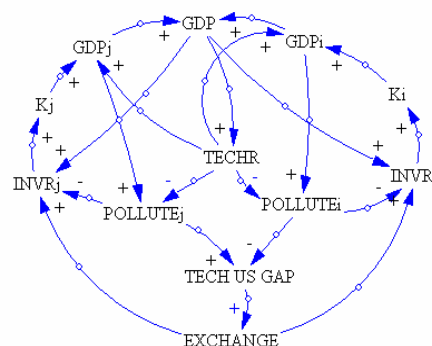


Fig 2 Cause-Result chart of carbon trading in city development
图 2 城市发展过程中碳排放交易的因果关系统

在以上四条回路中，产业 j 的前面三条回路与产业 i 的回路相同，但产业 i 的排放量增加会使产业间削减潜力差距增大，而产业 j 的排放量增大会是产业间的削减潜力差距减小。所以整个因果循环图一共有八条回路。其中以前两条以为代表的产业 i 的回路和产业 j 的回路同为正反馈回路；涉及到排污的四条回路为负反馈回路。以第四条回路为例，产业 i 的产能增加会导致城市 GDP 增加，城市 GDP 增加会提高技术水平，技术水平的提高会导致产业 i 的排放量减少；而产业 i 的排放量增加会导致它与产业 j 之间的削减潜力差距减小（因为产业 i 是排放权交易的接收者），而学检查局的增大会导致交易量增大，进而导致对产业 i 的投资增加，投资增加最终导致产业 i 的产能增加。

4 城市经济系统内排污权交易的 SD 模型构建

城市经济系统的运行是由工业产业和第三产业的表现所决定。而各产业的发展又受人口、环境、技术、资本投资等因素的制约。本文为了简化模型和突出碳排放权交易重要地位，对人口子系统和技术因素子系统作了简化处理，产业 i 和产业 j 的产出用 $C-D$ 生产函数计算得出。根据 $C-D$ 生产函数： $Y_t = A_t K_t^\alpha L_t^\beta$ ，其中 Y_t 代表 t 时刻的生产函数， A_t 代表 t 时刻的技术进步率， K_t 和 L_t 分别代表资本因素和劳动力因素、 α 和 β 分别代表资本弹性和劳动力弹性。由碳排放权交易的原理可知，由于减排需要耗费

费用, 这部分减排成本会减少 GDP 产出在经济再循环中固定资产投资, 而通过碳排放权交易, 交易双方都能降低削减成本, 从而增大下一轮经济增长周期中固定资本的投入, 从而间接影响到下一轮中 GDP 的增长, 本章着重讨论这种碳排放权交易和 GDP 之间的这种关系。限于篇幅, 本文对部分变量和主要方程式进行介绍: (1) GDP_i : i 产业 GDP ; (2) L_i : 投入 i 产业的劳动力; (3) K_i : 投入 i 产业的资本; (4) a_i : 资本弹性; (5) b_i : 劳动力弹性; (6) $INVR_i$: i 产业所占投资比例; (7) $AVERGDP_i$: i 产业人均 GDP ; (8) POP_i : 从事 i 产业的人口; (9) $TolIncomE_i$: i 产业劳动力报酬总额; (10) i 产业的广义技术进步率; (11) $PollutionN_i$: i 产业产生的碳排放; (12) t_i 产业的 GDP 与碳排放转换比例; m_i : i 产业的技术减排参数; (13) $CostEmissionN_i$: 产业 i 的减排成本; (14) $Trading Price$: 碳排放权交易价格; (15) $Trading Volume$: 碳排放权交易量。部分主要方程如下:

$$\begin{aligned}
 A \quad GDP.K &= GDP_i.K + GDP_j.K \\
 L \quad GDP_i.K &= GDP_i.J + DT \cdot \Delta GDP_i \\
 R \quad \Delta GDP_i &= TECHR_i \cdot (a_i \cdot K_i + b_i \cdot L_i) \\
 C \quad L_i &= CostL_i \\
 A \quad K_i.K &= INVR_i K \cdot GDP_i - CostDeEmisS_i.K \\
 &\quad - CostTradingG_i.K \\
 A \quad b_i.K &= TolIncome_i.K / GDP_i.K \\
 A \quad TolIncome_i.K &= GDP_i.K - GDP_i.K \cdot INVR_i.K \\
 N \quad a_i.K &= C - b_i.K \\
 A \quad AVERGDP_i.K &= GDP_i.K / POP_i.K \\
 T \quad TECHR_i &= (300, 0.72), (600, 1.4), \\
 &\quad (1200, 2.82), (2400, 2.92), (4500, 3.11), (7200, 2.8) \\
 A \quad PollutionN_i.K &= t_i \cdot GDP_i.K \\
 A \quad CostDeEmisS_i.K &= INTER \cdot G \cdot \\
 &\quad \{m_i \cdot (PollutionN_i.K - TradingVolumN_i.K)\} \\
 A \quad Trading PriceK &= m_i \cdot m_j \cdot \\
 &\quad (PollutionN_i.K + PollutionN_j.K) / (m_i + m_j)
 \end{aligned}$$

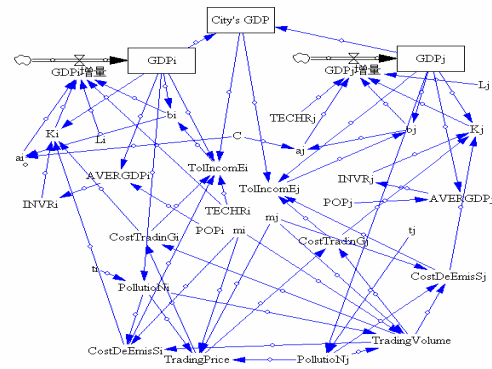


Fig 3 System flow chart of city economic system
concluding carbon trading
图 3 包含碳排放权交易的城市经济系统流图

5 仿真分析与实例研究

5.1 模型检验

在使用模型进行仿真之前, 应该先对模型的有效性进行检验。有效性检验分为理论检验和历史检验, 本文的模型检验分为两部分: 导入碳排放权交易之前的模型采用历史检验, 导入碳排放权交易之后的模型采用理论检验。由于碳排放权通过对 GDP 增量的资本要素 K_i 施加影响而生效。而 K_i 受投资比例 $INVR_i$ 和减排成本 $CostDeEmisS_i$ 和排污权交易成本 $CostTradingG_i$ 的影响。而 $CostDeEmisS_i$ 和 $CostTradingG_i$ 全由 $PollutionN_i$ 与 t_i 两者决定, 所以当取 $t_i=0$ 时, 事实上就使排污权交易失效。此时模型可作为一个无污染治理经济系统的模拟。通过与历史数据比较, 发现模型具有较高的拟合度。当我们取 $t_i>0$ 时, 我们观察到单位 GDP 生成碳系数 t_i 和产业 i 和产业 j 的减排技术系数 m_i 和 m_j 都是由市场和技术要素决定的, 不受

5.2 实例研究

选取无锡地区部分统计数据 (见表 1), 对模型参数作出估计, 由于化工行业和热电行业的碳排放量占城市碳排放比重较大, 且两行业较为符合模型条件, 符合大规模碳排放权交易的条件, 选取为行业 i 和行业 j 。

通过对表中 GDP 和碳排放总量进行多项式非线性回归分析, 我们得出相似系数为 0.9334 的非线性回归方程:

$$y=4\times10^{-7}x^3-0.0023x^2+4.518x-13855 \quad (4)$$

即 $t_i = t_j = 4.518$ 。同理我们得到 m_i 和 m_j 的取值。

Tab 1 Contact of carbon emission and GDP in wuxi
表 1 无锡地区部分统计数据

指标 年	工业 GDP (亿 元)	碳排 放 总 量 (吨)	化工制 品业碳 排放量 (吨)	热电业 碳排放 量(吨)	人口年 变化率	人均碳 排放量 (吨)
2001	683.13	796.81	96.44	241.79	0.0030	1.83
2002	784.52	944.04	119.82	281.99	0.0061	2.15
2003	990.08	1176.31	144.11	359.63	0.0090	2.66
2004	1236.24	1483.86	171.30	428.38	0.0105	3.32
2005	1587.73	1646.57	165.76	499.03	0.0126	3.64
2006	1849.85	1512.11	146.92	531.43	0.0110	3.30
2007	2134.72	1826.20	171.65	662.36	0.0086	3.96
2008	2398.40	1772.42	143.51	730.19	0.0053	3.82

我们估算出 2001 年无锡地区化工行业和热电行业的工业 GDP 产值分别是 233.66 和 789.27 亿元, 本文以 2001 年的 GDP 产值为初始值, 对实行碳排放权交易的 20 年内经济增长进行仿真。得到如图 4 的曲线图。

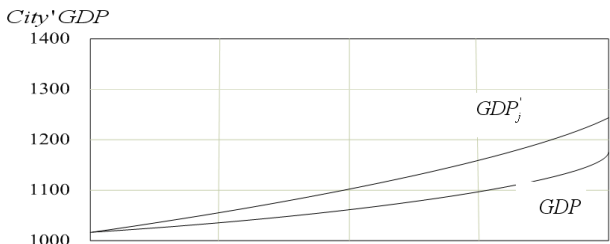


Fig 4 GDP simulation chart between thermoelectricity and chemical industrial in wuxi
图 4 无锡热电、化工产业工业 GDP 仿真图

由图中可以看出, 在执行碳交易政策之后, GDP 增长速率明显快于未执行碳交易政策之前速度, 这是因为碳交易降低了社会总的减排成本, 使得有更多的资金投入再到再生产中, 从而使 GDP 增长加速。我们再单独对热电产业和化工产业进行模拟仿真, 得到如图 5 和图 6。

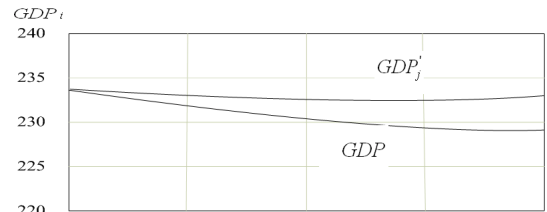


Fig 5 GDP simulation chart of chemical industrial
图 5 化工产业工业 GDP 仿真图

由图 5 可以看出, 化工产业在未来的 GDP 增长呈下降趋势, 但是, 与执行碳排放交易政策之前相比, 由于化工行业存在较低的边际减排成本, 可以通过出售排污权来获取利润, 所以化工行业的下降速率会减缓。

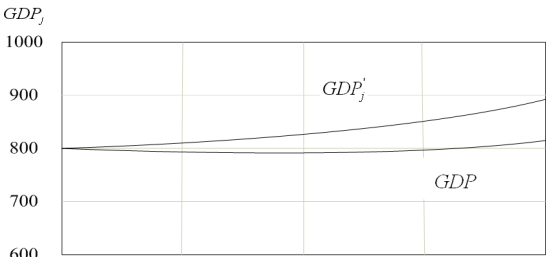


Fig 6 GDP simulation of thermoelectricity industrial
图 6 热电产业工业 GDP 仿真图

热点行业作为碳排放权的购买方, 在执行碳排放权交易政策之后, 可以透过碳交易市场购买排放权, 达到降低减排总成本的目的, 从而实现了产业的增长加速。同时, 我们发现碳排放权的总量与实际情况相比并没有减少。

5 结论

纵观排污权交易在低碳城市中的应用的研究现状和发展趋势, 大多数研究主要关注排污权交易的可行性研究, 初始分配机制, 法理学基础及其经济学意义, 与西方国家相比, 由于排污权交易在我国的应用远不成熟, 较少有研究对排污权交易在城市经济系统的实施影响作出评估。本文以无锡市热电行业与化工行业的产业 GDP 与碳排放量统计数据为基础数据, 对碳排放权交易实施后的两行业发展进行仿真, 发现在实施碳排放权交易之后化工产业的下降趋势得到延缓, 而热点行业通过购买排污权也使本行业得到了更大的提升空间, 这说明了碳排放权交易不光有降低碳排放的作用, 还能起到调节产业结构的作用。

尽管本模型揭示了排污权交易政策在城市经济系统的成功实施需要诸多限制条件。但作为当前最有前途的减排政策, 排污权交易政策在未来的低碳经济时代有其巨大的意义及其应用价值。并且, 排污权交易政策在西方国家的成功实施也充分说明了, 只要合理使用, 排污权交易是一种行之有效的控制碳排放的方法。国家环保总局局长解振华称: “排污权交易的成功实施, 有望以最小的成本解决更大的环境问题。”排污权交易政策作为一条适合我国国情的低成本的环境治

理路线，可以实现经济环境的协调发展，必定会在城市减排运动中被越来越多的运用。低碳经济是指在保持经济又好又快发展的同时保持较低的二氧化碳排放，低碳经济有控制二氧化碳排放总量；碳排放权可交易的特点。本文的系统动力学模型对在低碳经济背景下的低碳城市经济运行作出仿真探索，为以后碳排放权交易政策在城市的实施提供了一定的理论借鉴作用，为排污权交易制度的设计提供依据。

致 谢

感谢国家社会科学基金及江苏省软科学研究项目的资助。

References (参考文献)

- [1] Natsourse a,b,Liuren Wuc.Time-changed Levy processes and option pricing[J].Journal of Financial Economics,2004(71): 113-141.

- [2] Hahn,E and I.Riding on the Smile[J].Risk 7,1984(20):32-39
[3] Kehoane et al and N.How to Grow a Smiling Tree[J].Journal of Financing Engineering 1998(2):127-146
[4] Hahn,E .Van Egteren,H.and M.Weber.Marketable Permits,Market Power,and Cheating[J].Journal of Environmental Economics and Management,1984,30:161-173
[5] Misiolek W S,Elder H W.Exclusionary manipulation of markets for pollution rights[J].Journal of Environmental Economics and Management,1989,16:156-166
[6] Godby,R..Market Power in Laboratory Emission Permit Markets[J].Environmental and Resource Economics, 2002, 23: 279-318
[7] CHEM De-hu, LI Shou-de, JIANG Fu. Oligopoly and Initiate Allocation of Emission Right [J]. Systems Engineering,2004, 22 (10):51-53.
[8] Xie Zhi-yu,Zhu Hong-xin. quantitative economics [M].Shanghai: Fudanpress.2005:78-94
[9] LI Li.. Modeling and Simulation of System Dynamics Model with Multi-objective Programming for Region Circular Economy [D]:[master degree thesis].Sichuan: Sichuan University 2007