

基于灰色关联与优势分析的能源消费与工业环境污染的实证研究*

于凤玲 陈建宏[#]

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要 从能源生产和消费弹性系数出发介绍近 20 年来中国能源的消费状况, 并且根据统计数字, 作出了关于能源消费总量与人均生活能源消费量及工业废水、工业废气、工业固体废物的曲线关系图。为了能定量地说明上述变量之间的关系, 引入灰色关联分析, 计算出能源消费与工业环境污染之间的灰色关联度以及灰色关联矩阵。通过灰色关联分析, 得出结论: 能源消费与工业环境污染具有显著关联, 要降低工业环境的污染, 就要减少传统能源的使用, 大力发展清洁能源以及提高能源的使用效率。通过定量计算为政府提倡大力使用清洁能源提供可靠的依据。

关键词 环境污染 能源消费 灰色关联 弹性系数

长期以来, 人类在享受能源消费所带来的经济发展、社会进步、科技水平不断提高等利益的同时也承受着能源消费所带来的负面影响。自 1992 年在联合国召开的环境与发展会议上提出“可持续发展”的科学思想并得到全球共识以来, 能源消费作为全球环境污染主要来源之一, 引起越来越多人的关注。2007 年 12 月 26 日, 国务院新闻办发表了《中国的能源状况与政策》白皮书, 强调了要促进能源与环境协调发展等政策措施。自此, 可以看出能源消费与环境污染问题已经迫在眉睫。

1 国内外研究状况

近些年, 国内外许多专家对能源消费、经济增长与环境污染问题进行了研究。OCAK 等^[1]阐述了土耳其能源利用效率与可持续发展的关系, 认为政府部门应鼓励和呼吁使用可再生能源(如核能、地热能、太阳能、风能等), 以节约一次性能源的使用和减低对环境的污染。BILEN 等^[2]对土耳其的能源生产、能源消费以及环境污染进行了研究, 指出土耳其在发展过程中长期过多地依赖进口能源, 不但给土耳其造成严重的经济负担, 更重要的是能源消费给这个国家带来了严重的空气污染、水污染等环境问题, 从而提出各国政府应积极推进可再生能源的研发, 倡导可再生能源的利用以满足能源与环境的要求。NICHOLAS 等^[3]指出能源消费量与温室效应、CO₂ 的含量息息相关。COLE 等^[4]、DE BRUYN^[5]、SELLEN 等^[6]通过环境库兹涅茨曲线

研究环境污染与经济发展的关系。ALAM 等^[7]分析了能源强度增长、人口增长等影响巴基斯坦环境恶化的因素。VENKATESH 等^[8]研究了奥斯陆(挪威)直接能耗与运行维护水、系统废水的关系, 说明能耗与城市供水、污水处理是直接相关的, 能源的使用有助于生命周期环境影响。SOYTAS 等^[9]讨论了美国的能源消费、收入与碳排放的关系, 能源消费会引起碳排放量的增加, 但收入增加不一定能解决环境污染问题。在国内, 曹孜等^[10]、包森等^[11]、陈建宏等^[12]对能源消费与工业碳排放量进行灰色关联分析, 说明传统能源消费量对工业碳排放量的产生有很大的关联作用。张雷^[13]也对中国一次能源消费的碳排放区域格局变化进行了研究。罗文柯等^[14]、穆海林等^[15]、刘爱芹^[16]、杨俊等^[17]分别对能源消费需求、能源消费量与经济增长进行分析和讨论。陈军等^[18]利用面板数据分析方法研究了中国煤炭消耗对污染排放的影响。结果表明, 煤炭消耗对不同污染物排放的影响各不相同, 但总体而言, 煤炭消耗对废气排放的影响最为显著。因此, 要进一步实现节能减排, 必须以煤炭消耗及其消耗动因为依据, 不断明确和分解不同区域不同污染物排放的控制目标, 优化区域产业结构和能源结构。刘海莺等^[19]利用格兰杰因果关系进行检验及协整分析, 对中国经济增长与能源消费的动态关系进行了实证分析, 定量揭示出经济增长对能源消费的依赖性。王强等^[20]就近 30 年来中国工业经济转型过程中能源消费与碳排放的关联

第一作者: 于凤玲, 女, 1977 年生, 博士研究生, 讲师, 研究方向为资源与环境经济学。[#] 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 50774092); 全国优秀博士学位论文专项资金资助项目(No. 200449)。

表1 中国能源生产与消费弹性系数¹⁾

年份	能源生产弹性系数				能源消费弹性系数				GDP 总值比上年增长率/%
	能源生产比上年增长/%	电力生产比上年增长/%	能源生产弹性系数	电力生产弹性系数	能源消费比上年增长/%	电力消费比上年增长/%	能源消费弹性系数	电力消费弹性系数	
1990	2.2	6.2	0.73	1.63	1.8	6.2	0.47	1.63	3.8
1991	0.9	9.1	0.58	0.99	5.1	9.2	0.55	1.00	9.2
1992	2.3	11.3	0.10	0.80	5.2	11.5	0.37	0.81	14.2
1993	3.6	15.3	0.16	1.09	6.3	11.0	0.45	0.79	14.0
1994	6.9	10.7	0.26	0.82	5.8	9.9	0.44	0.76	13.1
1995	8.7	8.6	0.53	0.79	6.9	8.2	0.63	0.75	10.9
1996	3.1	7.2	0.80	0.72	3.1	7.4	0.31	0.74	10.0
1997	0.3	5.1	0.31	0.55	0.5	4.8	0.06	0.52	9.3
1998	-2.7	2.7	0.03	0.35	0.2	2.8	0.03	0.36	7.8
1999	1.6	6.3	0.21	0.83	3.2	6.1	0.42	0.80	7.6
2000	2.4	9.4	0.28	1.12	3.5	9.5	0.42	1.13	8.4
2001	6.5	9.2	0.79	1.11	3.3	9.3	0.40	1.12	8.3
2002	4.7	11.7	0.52	1.29	6.0	11.8	0.66	1.30	9.1
2003	14.1	15.5	1.41	1.55	15.3	15.6	1.53	1.56	10.0
2004	14.4	15.3	1.43	1.51	16.1	15.4	1.60	1.52	10.1
2005	10.0	13.5	0.88	1.19	10.6	13.5	0.93	1.19	11.3
2006	7.4	14.6	0.58	1.15	9.6	14.6	0.76	1.15	12.7
2007	6.5	14.5	0.46	1.02	8.4	14.4	0.59	1.01	14.2
2008	5.4	5.6	0.56	0.58	3.9	5.6	0.41	0.58	9.6
2009	5.4	7.1	0.59	0.78	5.2	7.2	0.57	0.79	9.1

注: ¹⁾数据来源于1991—2010年的《中国统计年鉴》。

变化进行了分析,结果表明,工业部门能源消费的持续增长是中国能源消费总量增长与碳排放量增长的主要驱动因子。

本研究从能源生产与消费弹性系数出发介绍中国能源的消费状况,利用曲线图从直观上定量分析能源消费与工业环境的污染关系,从而为政府和企业部门进行决策提供参考。

2 中国能源消费状况

改革开放以来,中国经济进入了快速发展时期,GDP和能源消费量也随之快速增长,这种经济的增长是以高投入、高消费能源为代价的。1953年中国能源消费总量为5 411万t(以标准煤计),2009年能源消费总量达306 647万t,增长了55.67倍。中国的能源消费一直以煤炭为主,建国初期煤炭消费量占能源消费总量的90%以上,到1978年煤炭消费量占能源消费总量的70.7%,从改革开放到2009年,煤炭消费量一直处于能源消费总量的68.0%~76.2%。中国能源生产与消费弹性系数如表1所示。

由表1分析可知:

(1) 能源生产情况:纵观这20年,全国能源生

产逐年增长(1998年因金融风暴全球经济下滑,从而能源生产增长出现负数)。其中,电力生产稳步增长,尤其是进入21世纪,电力生产增长更明显,且能源生产弹性系数在2003年全国GDP增长达到10.0%时超过1.0,这说明能源年平均增长速度是GDP年平均增长速度的1.41倍。

(2) 能源消费弹性系数比较:2003—2004年,能源消费弹性系数均大于1.5,即能源消费量年平均增长速度是GDP年平均增长速度的1.5倍以上。其中,电力消费弹性系数进入21世纪后大多超过1.0,这说明电力消费相对于经济发展的增长速度更为迅猛。

(3) 能源消费增长情况:这20年里,能源消费一直处于增长状态,尤其是进入21世纪,2004年能源消费增长达到最大值(16.1%),而当年GDP增长也超过10%。

生活消费能源主要包括煤炭、电力、煤油、液化石油气、天然气和煤气等。研究居民生活能源消费结构的变化以及能源消费对环境的污染程度,有助于引导人们向着污染低和节能的方向发展,有利于全社会的可持续发展。图1为20年来中国能源生产总量(以标准煤计)、消费总量及人均生活能源消

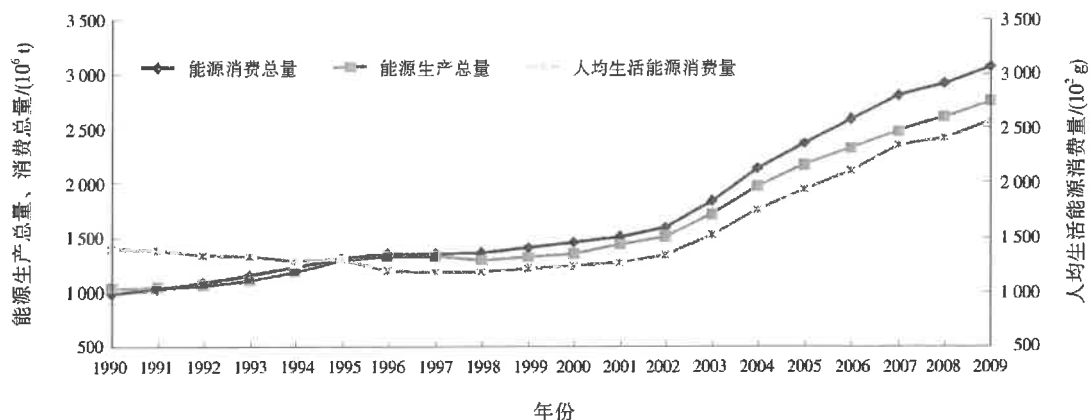


图1 中国能源生产总量、消费总量及人均生活能源消费量的变化曲线

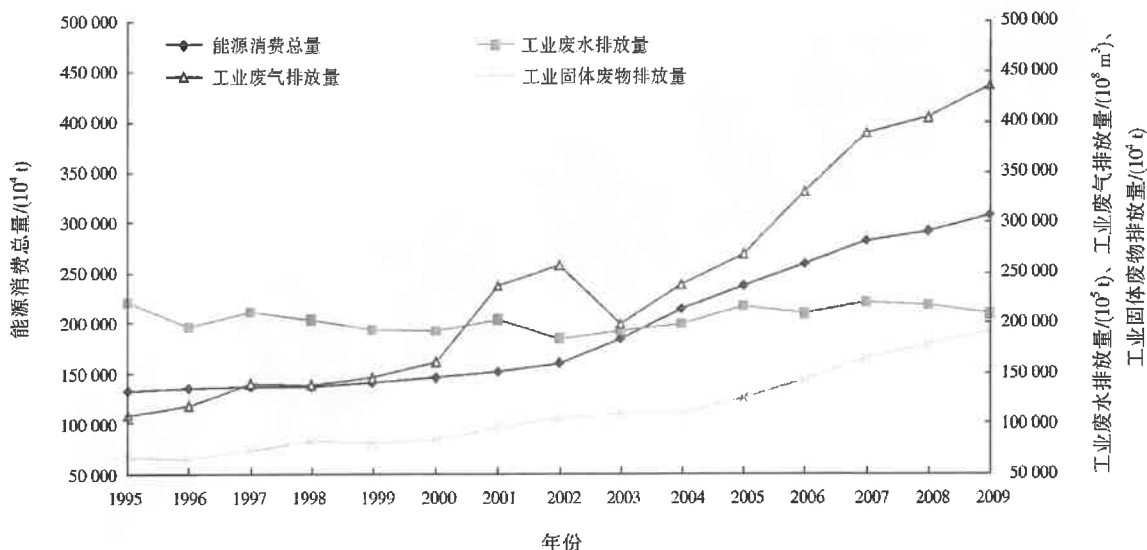


图2 1995—2009年中国能源消费总量和工业废水、工业废气以及工业固体废物的排放量

费量(以标准煤计)的变化曲线。从图1可以看出,能源消费总量基本高于能源生产总量,尤其是近几年。中国是世界上少数以煤炭为基础能源的大国,自1993年成为石油净进口国以来,是世界上石油产品需求量最大的国家之一。中国目前的能源生产总量仅次于美国和俄罗斯,位居世界第3位。据国际能源署2010年7月19日的报告,2009年中国能源消费总量已经略高出美国,居世界第1位。可见,中国已经成为能源生产和消费的大国。中国不仅是能源生产、能源消费大国,还是能源浪费大家,单位国民生产总值能耗是日本的6倍,美国的3倍。

3 能源消费与工业环境污染

能源是工业发展的基础,能源的大量消费引起了很多环境污染问题。1995—2009年中国能源消费总量和工业废水、工业废气以及工业固体废物的

排放量统计数据如图2所示。从图2可以看出,随着能源消费总量增加,工业环境污染中废气排放量增加较明显。为了量化曲线之间关联程度,引入灰色关联理论。

4 灰色关联理论

灰色系统理论是研究“部分信息已知,部分信息未知”的不确定性系统。灰色关联分析是灰色系统理论中的一种分析方法,旨在对于一个不确定性的系统,通过一定的方法寻找系统中各子系统之间的数值关系。灰色关联分析的基本思想是根据序列曲线集合形状的相似程度来判断紧密程度。曲线越接近,相似序列之间的关联度就越大,反之越小。该方法的优点:(1)克服了传统的回归分析、方差分析、主成分分析等所要求的大量数据;(2)计算量小,传统的统计分析一般要高等计算机才能完成;(3)灰色关

联分析不会出现量化结果与定性分析结果不相符的现象。灰色关联分析^[21]的步骤为:

第一,确定参考数列与比较数列。本研究选取能源消费总量为参考数列,工业废水、工业废气及工业固体废物的排放量为比较数列。

第二,对变量数列进行无量纲化处理。由于系统中各因素的物理意义不同,其系统中数据的量纲也不一定相同,所以必须对数据进行标准化处理。标准化处理的常用方法是初始化和均值化,本研究采用初始化处理。参考数列初始化处理记为 $X_0(k)$,比较数列初始化处理记为 $X_i(k)$ (其中, k 、 i 分别取 $1,2,3,\dots,N$)。

第三,计算差序列、最大差、最小差。差序列: $\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$;两级最小差 $\Delta_{\min} = \min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$;两级最大差 $\Delta_{\max} = \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 。

第四,计算灰色关联系数($C_i(k)$)。其计算公式为:

$$C_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \eta \Delta_{\max}}{|X_0(k) - X_i(k)| + \eta \Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中: η 为分辨系数,取值范围为 $0 \sim 1$,一般取 0.5 。

第五,计算灰色关联度(r_i)。其一般表达式为:

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_i(k) \quad (2)$$

5 灰色关联实证分析

5.1 能源消费总量与工业环境污染的灰色关联分析

根据1995—2009年《中国统计年鉴》的数据,依据灰色关联的步骤得到 $\Delta_{\min} = 0$, $\Delta_{\max} = 1.748\ 725$,计算得关联系数序列(见表2)。

表2 关联系数序列

年份	$C_1(k)$	$C_2(k)$	$C_3(k)$
1995	1.000 000	1.000 000	1.000 000
1996	0.864 525	0.929 758	0.949 283
1997	0.916 982	0.766 032	0.905 205
1998	0.885 548	0.779 397	0.808 564
1999	0.820 246	0.750 594	0.853 482
2000	0.786 982	0.686 517	0.844 107
2001	0.796 385	0.449 073	0.721 459
2002	0.698 629	0.423 927	0.691 440
2003	0.621 175	0.653 865	0.762 009
2004	0.546 061	0.592 954	0.952 315
2005	0.517 222	0.550 877	0.881 105
2006	0.460 313	0.436 277	0.800 084
2007	0.435 424	0.368 381	0.689 282
2008	0.415 010	0.358 753	0.627 681
2009	0.386 765	0.333 333	0.592 037

再根据灰色关联度公式,得 $r_1 = 0.676\ 751$, $r_2 = 0.605\ 316$, $r_3 = 0.805\ 204$ 。灰色关联度用来分析变量之间的相关性,一般认为灰色关联度大于 0.6 为显著。因此,能源消费总量与工业废水、工业废气及工业固体废物排放量之间有较强的灰色相关度,其相关系数均大于 0.6 ,这说明能源消费总量与工业环境污染问题之间存在显著的关联。这主要是因为中国的能源消费一直以来以煤炭为主,大量煤炭燃烧后的残渣成为环境污染的主要来源之一,因此降低煤炭消费量有助于减少工业固体废渣。此外,能源是工业发展的动力,尤其是中国的工业化过程中工业的发展甚至是整个经济的发展都是以消费大量的能源为代价的。大量能源消费与工业的快速发展形成大量的工业废水,使很多水源被污染,这也是废水排放量与能源消费相关度较大的原因之一。大量能源消费释放出大量的温室气体、各种硫化物以及不完全燃烧释放的一氧化碳等气体,造成大气污染。

5.2 能源消费与工业环境污染的优势分析

优势分析是灰色关联分析的一种,当参考数列不止1列,被比较的因素也不止1个时所进行的关联分析叫做优势分析。此时,参考数列称为母数列,比较数列称为子数列。通过母数列和子数列所构成的关联矩阵中元素间的关系,可以判定因素的优势和非优势。理论计算与上面的灰色关联分析的计算步骤类似。目前,能源消费种类繁多,包括煤炭、石油、天然气、水电、核电、风电、太阳能和生物质能等。考虑到中国的能源消费结构及统计数据的可得性,把能源消费按煤炭、石油、天然气、清洁能源(主要是水电、核电和风电)4项各自的消费量构成母数列 $Y_i = (\text{煤炭, 石油, 天然气, 清洁能源}) (i=1,2,3,4)$,把工业废水、工业废气、工业固体废物排放量构成子数列,记为 $X_j = (\text{工业废水, 工业废气, 工业固体废物}) (j=1,2,3)$ 。根据1996—2010年《中国统计年鉴》的数据整理得原始数据,以1995年数据为参考数列,根据灰色关联分析方法,得到灰色关联矩阵 R_{ij} 如下:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.726\ 3 & 0.594\ 8 & 0.769\ 1 \\ 0.580\ 4 & 0.700\ 0 & 0.869\ 3 \\ 0.695\ 6 & 0.881\ 7 & 0.831\ 1 \\ 0.653\ 4 & 0.682\ 6 & 0.918\ 5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从 R_{ij} 中可看出, $R_{43} = 0.918\ 5$ 是所有元素中值

最大的一个,说明工业固体废物的排放量与清洁能源的使用关联度最大,这正是中国乃至全世界为了减少污染,实现可持续发展正大力提倡使用清洁能源的依据。

6 政策建议

从能源的生产弹性系数、消费弹性系数以及GDP的增长比说明了中国能源的消费状况;中国经济的高速发展是以高能耗、高环境污染为代价的。选取1995—2009年能源消费总量与工业废水、废气和工业固体废物的排放量进行灰色关联分析,说明能源消费与工业环境污染显著相关。为促进社会经济的发展与环境友好,提出以下建议:

(1) 改变能源消费结构,大力发展绿色能源。中国的能源消费70%以上依靠煤炭,20%左右是石油。煤炭与石油的消费会带来大量的工业废气、工业废水与工业固体废物,所以应降低煤炭与石油的使用量,大力开发和利用清洁能源。在农村及一些边远地区,大量牲畜粪便、农作物秸秆的随处堆放或是焚烧均会造成环境污染,应充分利用这些生物质能,使其变废为宝,为国家节约能源。

(2) 调整工业结构,走低碳经济发展之路。美国著名的经济学家西蒙·库兹涅茨等通过对世界多个国家的经济发展、产业结构调整 and 环境污染之间的关系进行研究,证实了产业结构与环境污染有重大相关作用。而工业结构的调整是整个产业结构调整的重要内容,所以要走低污染、低碳经济的环保之路,必须对工业结构进行调整,逐步减少对高能耗、高污染工业的投入,从而转向能源利用效率高的高新技术工业。

(3) 提高能源利用效率,实现节能减排。确立较为严格的工业污染物排放标准,给处理规范的工业企业发放排污许可证,并收取污染物的排放税等来限制其排放。通过引进高新技术,减低生产过程中污染物的排放强度;强化减排目标责任制度,严格实施各项处罚和问责制度;同时综合运用能源价格、税收、法律等一系列措施,以促进节能减排。

参考文献:

- [1] OCAK M, OCAK Z, BILGEN S, et al. Energy utilization, environmental pollution and renewable energy sources in Turkey [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(6): 845-864.
- [2] BILEN K, OZYURT O, BAKIRCI K, et al. Energy production, consumption, and environmental pollution for sustainable development: a case study in Turkey [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(6): 1529-1561.
- [3] NICHOLAS A, PAYNE J E. CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(8): 3282-3286.
- [4] COLE M A, RAYNER A J, BATES J M. The environmental Kuznets curve: an empirical analysis [J]. *Environment and Development Economics*, 1997, 2(4): 401-416.
- [5] DE BRUYN S M. Explaining the environmental Kuznets curve: structural change and international agreements in reducing sulphur emissions [J]. *Environment and Development Economics*, 1997, 2(4): 485-503.
- [6] SELDEN T M, SONG Daqing. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1994, 27(2): 147-162.
- [7] ALAM S, FATIMA A, BUTT M S. Sustainable development in Pakistan in the context of energy consumption demand and environmental degradation [J]. *Journal of Asian Economics*, 2007, 18(5): 825-837.
- [8] VENKATESH G, BRATTEB H. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: case study of Oslo (Norway) [J]. *Energy*, 2011, 36(2): 792-800.
- [9] SOYTAS U, SARI R, EWING B T. Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States [J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(3/4): 482-489.
- [10] 曹改, 彭怀生, 鲁芳. 工业碳排放状况及减排途径分析 [J]. *生态经济*, 2011(9): 40-45.
- [11] 包森, 田立新, 王军帅. 中国能源生产与消费预测和碳排放研究 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1247-1253.
- [12] 陈建宏, 王文哲, 熊汉富. 湖南省 CO₂ 排放因素的灰色关联分析 [J]. *地域研究与开发*, 2010, 29(4): 131-134.
- [13] 张雷. 中国一次能源消费的碳排放区域格局变化 [J]. *地理研究*, 2006, 25(1): 1-9.
- [14] 罗文柯, 施式亮, 李润求, 等. 灰色预测模型在能源消费需求预测中的应用 [J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(4): 32-37.
- [15] 穆海林, 王文超, 宁亚东, 等. 基于改进灰色模型能源消费预测研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2011, 51(4): 493-497.
- [16] 刘爱芹. 山东省能源消费与工业经济增长的灰色关联分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 103-107.
- [17] 杨俊, 王庆存. 能源消费与经济增长动态关系分析 [J]. *经济问题探索*, 2011(9): 1-7.
- [18] 陈军, 李世祥. 中国煤炭消耗与污染排放的区域差异实证 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 72-78.
- [19] 刘海莺, 赵莹. 能源消费与中国经济增长关系的实证分析 [J]. *统计与决策*, 2011(3): 128-129.
- [20] 王强, 伍世代, 李婷婷. 中国工业经济转型过程中能源消费与碳排放时空特征研究 [J]. *地理科学*, 2011, 31(1): 36-41.
- [21] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2010.

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2012-06-15)