

# 基于信息熵的城市居民家庭能源 消费结构演变分析

——以无锡市为例

耿海青, 谷树忠, 国冬梅

(中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 受能源赋存状况及经济发展水平影响, 不同地区之间的能源消费结构往往存在很大差别, 对其结构演变很难用一个具体的指标来衡量。论文通过信息熵的引入, 试图来解决这个问题, 并最终取得了满意的效果和结论。对无锡市 1990~2002 年间城市居民家庭能源消费结构的熵值演变特征进行动态分析后发现, 1994 年前后, 无锡市城市居民家庭能源消费结构信息熵的变化呈现出截然相反的特征, 并且与城镇居民实际可支配收入及人均能源消费总量变化高度相关。在深入分析其演化特征和原因的基础上, 对无锡市城市居民能源消费结构的演化方向作出了展望。

**关键词:** 能源; 家庭消费; 信息熵; 演变; 无锡

中图分类号: F014.5; F407.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3037(2004)02-0257-06

## 1 能源消费结构的演变规律

正如 H·钱纳里所指出的那样, 经济发展意味着结构的转换<sup>[1]</sup>。对于一个国家或地区来说, 这一结构变化突出表现在两个方面, 一是产业结构的升级换代, 二是城市化水平的提高。出于经济结构和空间结构演化的客观要求, 能源消费结构也会发生明显的规律性变化。一般来说, 当一国的经济发展处于工业化初期时, 能源消费结构主要取决于能源赋存状况, 能源消费模式表现为供给约束型。随着经济发展水平和对外开放程度的提高, 其能源消费结构会逐步向着清洁能源取代传统能源、高效率能源取代低效率能源的方向发展, 本国的能源赋存状况对能源消费的影响会逐渐减弱, 相应地, 其能源消费模式也会最终发展为需求导向型, 这是一个自发的不可逆过程。例如, 几乎所有西方发达国家的能源消费结构都经历了以煤为主→以石油为主→天然气、核能、新能源的转变过程。

改革开放以前, 我国的社会经济体系处于半封闭状态, 能源基本上是自产自用, 消费者没有自由选择的余地, 再加上我国以煤为主的能源赋存状况, 因而形成了高度依赖煤炭的能源消费结构。20 世纪 80 年代以后, 消费者对能源品种选择的自由度逐渐增大。近年来, 随着社会主义市场经济体制的建立, 我国能源消费结构正在向高级化、合理化的方向发展。能源是经济发展的基本推动力, 研究能源消费结构的动态演变规律, 对于分析产业结构的演化和制定能源发展战略, 都有重要的现实意义。

## 2 能源消费结构的定量描述方法

### 2.1 信息熵的概念及其含义

“熵”是建立在热力学第二定律基础之上的, 用以描述自发过程不可逆性的状态函数。最

收稿日期: 2003-06-04; 修订日期: 2003-10-27。

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-SW-318-01-01)。

第一作者简介: 耿海青(1974~), 男, 内蒙古乌兰察布盟人, 博士生, 主要研究方向为资源经济和资源安全。E-mail:

初熵的概念是借助于物体间的热量传递来定义的，但这一定义仅能描述宏观过程的不可逆性，却不能反映体系内部的结构变化特征。为了解释不可逆过程的微观机理，玻尔兹曼最终给出了如下形式的熵函数：

$$S=K_B\ln P$$

其中  $K_B$  为玻尔兹曼常数， $P$  为系统处于某一状态的概率<sup>[2]</sup>。

这一函数的统计物理学含义是：由大量微观粒子组成的宏观系统，其自发演化的方向是由一种几率小的状态变到一种几率大的状态。由于各微观粒子的运动状态彼此独立，因此，在没有外界干预的情况下，系统会自发向混乱度最大的方向演化，直至达到平衡状态。这就是熵增加原理，即孤立系统的熵增量永远非负。

熵概念的提出以及在此基础上建立起来的耗散结构理论，不仅揭示了热力学系统的运动规律，而且在生物学、物理学、社会科学等领域都得到了广泛应用。事实上，在整个自然界和人类社会，凡是与时间有关的不可逆过程均表现为熵增加。

为了与热力学过程有所区别，1908 年，Shannon 首先在信息论中引入了熵的概念，将其定义为信息熵。即对于一个不确定性系统，若用随机变量  $X$  表示其状态特征，对于离散型随机变量，设  $x$  的取值为  $X=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}(n\geq 2)$ ，每一取值对应的概率为  $P=\{p_1,p_2,\dots,p_n\}$  ( $0\leq p_i\leq 1$ ， $i=1,2,\dots,n$ )，且有  $\sum p_i=1$ ，则该系统的信息熵为： $S=-\sum p_i\ln p_i$ 。

这一公式称作申农公式，其定义的熵为广义熵或泛熵，可用来描述任何一种体系或物质运动的混乱度和无序度<sup>[3]</sup>。

### 2.2 信息熵在能源消费结构中的引入

能源消费系统是一个与外界有着广泛物质、能量和信息交换的非线性开放系统。随着时间的推移，能源消费结构不断在外部“扰动”和内部“涨落”的影响下，发生结构上的演替和变化，表现出自发的、具有不可逆性的演化特征，完全符合耗散结构系统的预定假设。因此，我们可以通过引入信息熵的概念来描述其结构变化特征。目前，信息熵在城市领域的应用主要集中在用地结构的变化上<sup>[4,5]</sup>，原因是土地面积在量纲上是一致的，应用起来比较简单。而能源则完全不同，不仅存在物态上的差别，在量纲上也极不统一，所以对能源消费结构的动态演变规律就不可能用一个简单、确定的量来描述。

在此，首先需要解决的问题就是要统一量纲。假设一个经济体消费的能源共有  $m$  种，首先经过热值换算，将其折算成标准煤，例如，假定各种能源分别折合标准煤为  $H_1, H_2, \dots, H_m$ （具体的质量单位要视情况而定），其和为  $H=\sum H_i$ ，( $i=1,2,\dots,m$ )，则各种能源占总量的比例分别为： $P_i=H_i/H$ ， $\sum P_i=1$ 。据此，根据信息论的原理，参照申农公式，可以定义能源消费结构的信息熵为：

$$S=-\sum_{i=1}^m P_i\ln P_i$$

可以用来描述能源消费结构的有序度或复杂程度，揭示其动态演变规律。

### 2.3 能源消费结构的均衡度和优势度

一般来说，当一个国家或地区的经济发展水平很低时，往往会有一种能源在能源生产和消费结构中居于主导地位，20 世纪 60 年代以前我国就属于这种情况。假设处于极端状态，整个能源消费系统中只有一种能源，例如煤炭，此时  $S_{\min}=0$ ；相反，若各种能源折算成标准煤后比例相等，即  $H_1=H_2=\dots=H_m=H/m$ ，则此时  $S_{\max}=\ln m$ 。事实上，在现代社会中，这两种情况均不会出现，信息熵一般会介于二者之间，其值的大小反映了城市民用能源消费结构的复杂程度，而均衡度和优势度则描述了各能源种类之间质量的差别和结构格局。

在这里，基于信息熵公式，定义能源消费结构均衡度的表达式为：

$$E=-\sum_{i=1}^m P_i \ln P_i / \ln m$$

即均衡度是信息熵和最大熵之间的比值,取值范围为  $E \in [0, 1]$ ,其值越大,各能源种类之间比例差别就越小,当  $E=0$  时,能源消费结构的复杂程度最低。优势度的表达式为  $D=1-E$ ,反映了一种或几种能源支配能源消费的程度,与均衡度的意义正好相反。

3 无锡市城市居民家庭能源消费结构演变分析

3.1 无锡市城市居民家庭能源消费结构的熵值演变特征

通过对无锡市 1990~2002 年城市居民人均家庭能源消费构成的分析可以看出(表 1,图 1),以 1994 年为分界点,能源消费结构信息熵的变化明显分为两个阶段,并且与城镇居民人均实际可支配收入及人均能源消费总量(图 2)变化有明显的耦合关系。

表 1 无锡市城市居民人均家庭能源消费构成及信息熵、均衡度和优势度的变化

Table 1 Change of average household energy consumption structure for per-urban resident,information entropy, equilibrium and dominance degree in Wuxi City													
年份	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
电力 (%)	7.63	7.75	10.89	13.63	20.21	23.93	26.64	27.79	36.07	35.16	38.86	40.65	38.98
煤炭 (%)	78.27	68.20	58.29	41.33	22.61	11.21	6.92	12.27	6.29	4.77	5.16	2.90	2.08
液化石油气 (%)	10.31	17.66	21.55	27.65	24.24	24.35	23.53	22.57	21.34	20.97	24.07	20.89	19.46
煤气 (%)	3.79	6.39	9.27	17.39	32.94	40.51	42.91	37.37	36.30	39.10	31.91	35.56	39.48
合计	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
信息熵 $S$	0.842	1.014	1.107	1.297	1.369	1.298	1.241	1.317	1.239	1.207	1.228	1.163	1.133
均衡度 $E$	0.607	0.731	0.799	0.936	0.988	0.936	0.895	0.950	0.894	0.871	0.886	0.839	0.817
优势度 $D$	0.393	0.269	0.201	0.064	0.012	0.064	0.105	0.050	0.106	0.129	0.114	0.161	0.183

注:数据来源于国家统计局无锡市城市社会经济调查队。

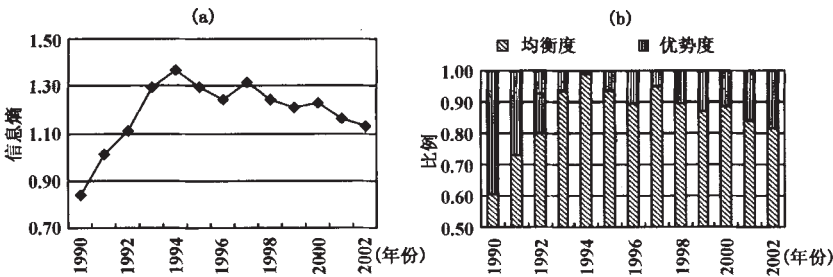


图 1 无锡市城市居民人均家庭能源消费构成熵值演变

Fig.1 Entropy evolution of average household energy consumption structure for per-urban resident in Wuxi City

1990~1994 年是无锡市社会经济条件发生剧烈变动的 4a,人均实际可支配收入按 1990 年不变价计算,迅速从 1 833 元增加到了 2 818 元,年均增速为 11.6%。在经济高速增长的同时,能源消费结构也发生了剧烈的变化,突出表现在电力、液化石油气和煤气等清洁能源对煤炭的替代上。在这 4a 间,无锡市人均电力消费量增加了 34%,液化石油气增加了 55%,煤气增加了 2.3 倍,与此同时,煤炭在民用能源消费构成中的比例却大幅度下降,4a 间共减少了 81%。出于对能源消费结构变动的响应,信息熵从 1990 年的 0.842 迅速上升到 1994 年的 1.369,均衡度则由 0.607 增加到 0.988,表明无锡市城市居民家庭能源消费结构的无序度明显增加了。

从 1994~2002 年,无锡市城市居民家庭能源消费结构的信息熵在总体上处于下降阶段;若结合人均实际可支配收入水平和能源消费总量的变化,又可细分为两个亚阶段。从 1995

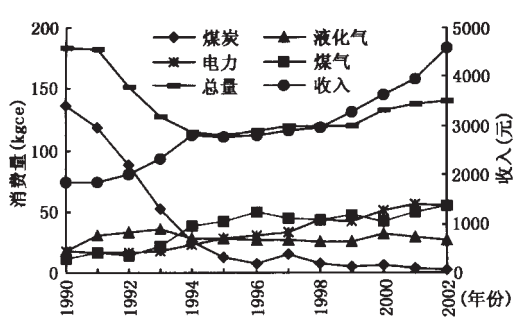


图2 1990~2002年无锡市城市居民人均实际可支配收入(1990年不变价)与家庭生活能源消费构成变化

Fig.2 Change of average real discretionary income and household energy consumption structure for per-urban resident

年开始,无锡市的经济增长明显放缓,进入结构调整时期,城镇居民人均实际可支配收入年均增速仅为1.38%,1995年甚至出现了负增长。在此期间,人均能源消费总量基本保持不变,在结构上则表现为电力消费的快速增长和煤炭消费量的继续减少。受此影响,信息熵整体表现为下降态势,但由于调整阶段结构的不稳定性,在1997年,信息熵的变化出现了明显的异常,但这并不影响能源消费结构的总体演进方向。从1998年开始,无锡市再次进入经济高速增长阶段,在接下来的4a中,人均实际可支配收入年均增速达到了11.4%,电力和煤气最终在民用能源消费结构中居于主导地位。与1994~1998年不同的是,随着居民收入的增长,人均能源消费总量也开始了平稳增长,2002年比1998年增加了19.7kg标准煤,与此相对应,信息熵也从1.239降低到1.133,而优势度则由0.106增加到0.183,表明能源消费结构已经发生了明显的分化。从信息熵的变化趋势来看,从1994年以后,信息熵在总体降低的同时,变动幅度则逐渐减小并最终趋于稳定和收敛,已进入稳定和良性发展阶段。从结构上讲,1994年以前是煤炭占主导地位的阶段,1994年以后则是电力和煤气在家庭能源消费结构中占主导地位的阶段。家庭能源消费结构信息熵的变化,反映了系统由低级有序向高级有序、进而有序度不断增加的方向演化。

城市民用能源消费系统是一个典型的耗散系统,而耗散系统由无序向有序、由低级有序向高级有序的演化,都是以突变的方式来的完成的,突变的发生,需要环境变量达到某一阈值<sup>[6]</sup>。在1994年前后,我国的经济运行环境发生了很大变化。尽管自20世纪80年代初期以来我国就一直推行改革开放的政策,直到90年代初,仍然没有完全摆脱计划经济思想的束缚,以邓小平同志1992年年初重要谈话和党的十四大为标志,我国改革开放和现代化建设才真正进入了一个新的发展阶段,明确提出了建立社会主义市场经济体制的改革目标。从1994年1月起,财税、金融、外汇、投资以及住房和社会保障制度方面的改革才全面展开。正因为如此,才会出现无锡市的众多经济变量同时在1994年发生转折的奇特现象。就无锡市城市居民家庭能源消费结构来说,1994年以前是调整阶段,1994以后才步入良性发展的轨道。

3.2 无锡市城市居民家庭能源的发展趋势

在现代化城市的民用能源构成中,可以划分为不可替代的两个部分,一个是电力,另一个是城市燃气。随着社会进步和居民生活水平的提高,电力需求一般会呈现出快速增长的态势。从1990年到2002年,无锡市城市居民家庭电力需求的收入弹性年均值为1.44,远高于其他能源的需求弹性。与需求不相适应的是,无锡市的电力供给还有很大缺口。2001年,电力自给率仅为71.8%<sup>①</sup>,无法满足社会发展的需求。从1998年开始,无锡市再次进入经济高速增长阶段,可以预见,在未来几年内,电力在家庭能源消费结构中的比例将进一步上升。与此相适应,电网和电源的建设,应该成为未来基础设施建设的主要内容之一。

此外,世界各国的燃气工业大体经历了这样的发展历程,即以煤制气为主的阶段→以油制气为主或煤、油气混合应用的阶段→以天然气为主的阶段<sup>[7]</sup>。目前,无锡市正处于煤、油气混合应用阶段。但从能源结构的变化过程来看,并不符合一般的演替规律。从1993年开始,液化石油气在能源消费结构中的比例逐年下降,煤气的比例反而不断上升,到2002年,已经占能源消费总量的39.48%,成为城市燃气的主体,但在人均能源支出构成中,煤气所占的比

1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
①无锡市经济贸易委员会.无锡市能源利用状况分析报告.2002.32~33.



例仅为 23.8% ,可以说 ,煤气定价过低是造成结构不合理的主要原因<sup>②</sup>。2001 年 ,无锡市煤气的自给率为 80.5% ,而液化石油气则高达 137.4%<sup>①</sup> ,因此 ,无论是从环境保护的角度还是从无锡市的能源供给状况来看 ,液化石油气的消费量都应该有一个较大幅度的提高。20 世纪 70 年代以后 ,在发达国家的城市燃气构成中 ,天然气所占的比例就已超过了 50% ,美国、加拿大等国的城市燃气 ,现在基本上全是天然气。目前 ,我国天然气在一次能源消费结构中的比例 ,尚不足世界平均水平的 1/10 ,且主要是作为工业原料来使用的 ,城市用天然气仅占总消费量的 12% 左右<sup>[8]</sup> ,无锡市天然气的使用更是一片空白。随着“西气东输”工程的启动 ,无锡市的家庭能源消费结构必将发生根本性的变化 ,届时 ,煤将从城市居民家庭能源消费结构中彻底消失 ,煤气和液化石油气的使用量也将大幅下降 ,而天然气和电力将成为家庭能源消费结构的主体 ,并将长期处于支配地位 ,与此相对应 ,信息熵还将会发生大幅度的下降并最终保持稳定。

#### 4 结论与讨论

城市是一个典型的耗散系统 ,与周围地区存在着广泛的物质和能量交换 ,并且在这种物质和能量的交换过程中 ,结构和功能不断强化 ,有序度不断增强。能源的输入输出 ,是城市与外部环境之间最基本的联系方式 ,能源结构的变化 ,是产业结构演化和环境质量变迁的重要外在表现。因此 ,能源消费结构信息熵是城市可持续发展能力的重要表征。作为一种研究方法 ,能源消费结构信息熵无论在国家尺度上 ,还是对于单个城市 ,甚至具体到某一个工厂或家庭这样的微观领域 ,都是非常适用的。从无锡市城市居民家庭能源消费结构信息熵的演变特征来看 ,随着时间的推移和人均收入水平的提高 ,经历了一次明显的“倒 U”型变化 ;而类似的情形 ,在社会财富分配、工业化水平及环境质量的变化中都会发生。笔者对我国不同规模等级城市的民用能源消费结构信息熵进行了初步计算 ,发现存在这样一个规律 ,即超大城市的熵值大于特大城市 ,特大城市的熵值又大于大城市 ,中小城市的熵值演变特征则不明显 ;从近几年的变化看 ,大城市、特大城市和中等城市的民用能源消费结构信息熵都在不断增加 ,而超大城市的信息熵已出现下降趋势。这说明随着城市规模的扩大 ,信息熵会表现出先增加、后减少的变化规律。总体而言 ,我国中等城市、大城市和特大城市目前都处于信息熵“倒 U”型曲线的左侧 ,而超大城市已越过转折点进入右侧。城市化进程中出现的各种倒 U 型曲线 ,彼此之间应该存在一定的耦合关系 ,如何将能源消费结构信息熵的变化与城市环境质量变化、工业化进程等因素结合起来分析 ,是很值得进一步研究的问题。

#### 参考文献(References):

- [1] 戴伯勋,沈宏达,等.现代产业经济学[M].北京:经济管理出版社,2001.[DAI Bo-xun,SHEN Hong-da,et al.Modern Industry Economics.Beijing:Economy &Management Press,2001.]
- [2] 湛垦华,沈小峰,等.普利高津与耗散结构理论[M].西安:陕西科学技术出版社,1998.[ZHAN Ken-hua,SHEN Xiao-feng,et al. Prigogine and the Dissipation Structure Theory.Xi 'an: Shaanxi Science and Technology Press,1998.]
- [3] 蔡绍洪,彭仕政,等.耗散结构与非平衡相变原理及应用[M].贵阳:贵州科技出版社,1998.[CAI Shao-hong,PENG Shi-zheng,et al.Dissipation Structure and the Change of Non-equilibrium State:Principle and Application.Guiyang:Guizhou Science and Technology Press,1998.]
- [4] 谭永忠,吴次芳.区域土地利用结构的信息熵分异规律研究[J].自然资源学报,2003,18(1):112~117.[TAN Yong-zhong,Wu Ci-fang.The laws of the information entropy values of land use composition.Journal of Natural Resources,2003,18 (1):112~117.]
- [5] 陈彦光,刘明华.城市土地利用结构的熵值定律[J].人文地理,2001,16(4):20~24.[CHENG Yan-guang,LIU Ming-hua.The basic laws of the Shannon entropy values of urban land-use composition.Human Geography,2001,16(4):20~24.]

- [6] 赵凯荣.复杂性哲学[M].北京:中国社会科学出版社,2001.[ZHAO Kai-rong.Complexity:the Mystery of Human Understandings.Beijing: China Social Science Press, 2001.]
- [7] 胥俊章,张儒源,等.能源利用[M].北京:能源出版社,1982.[XU Jun-zhang,ZHANG Ru-yuan,*et al.*Energy Use.Beijing:Energy Press, 1982.]
- [8] 庞名立. 中国天然气市场问题的讨论 [J]. 中国能源,2001,144 (11):17~21.[PANG Ming-li.Problem about the natural gas market of China.*The Energy of China*,2001,144(11):17~21.]

## Analyses on evolution of household energy consumption structure based on information entropy

GENG Hai-qing , GU Shu-zhong , GUO Dong-mei

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101,China)

**Abstract :** The evolvement of energy structure is generally towards the cleaner and more efficient direction.To a concrete region,the energy structure is not only determined by the energy situation in local area but also correlated to the economic development level.So the energy structure and its evolvement are quite complex.Since the energies are various and also the dimensions are different,it is difficult to describe it by a definite quantity and it is also a difficulty to contrast energy structure between two different regions.Finally we found a key to solve this problem, it is the informational entropy, a status function that can be used to describe the complexity and chaos of any system that consists of many factors,so we can quote this concept to study the energy consumption system.In this paper,we take Wuxi City as a case,use information entropy as well as equilibrium and dominant degree to describe the evolvement character of household energy consumption structure.The result of data analysis is satisfactory.Besides the informational entropy,some other laws in dissipation system are also suitable.The evolvement characters of information entropy are completely different before and after 1994 in Wuxi City.The evolvement trend is consistent with the average real discretionary income and total energy consumption for per-urban resident.Based on the profound analysis of evolvement character and its reason,this paper gives a primary prospect of the energy structure for urban resident in Wuxi City.With the implementation of "Moving West Gas East Project ",the household energy consumption structure will have a drastic change.Electric power and natural gas will became the two main energies in household energy structure.

**Key words:** energy; household consumption; information entropy; evolvement; Wuxi City