

# 基于因子分析法的城市燃气可持续发展评价

王中元<sup>1,2\*</sup>, 罗东坤<sup>1</sup>

1 中国石油大学(北京)工商管理学院, 北京 102249

2 昆仑能源有限公司, 北京 100101

\* 通信作者, wzhy@cnpc.com.cn

收稿日期: 2017-07-05

国家科技重大专项“页岩气开发经济评价方法研究”(2012ZX05018-005-04)资助

**摘要** 城市燃气可持续发展研究相对较少, 以中国城市燃气为整体研究对象的可持续发展评价仍是空白。本文以系统论和层次分析法工作原理为指导, 以城市燃气可持续发展为整体研究对象, 通过指标的初选和筛选, 构建了由5个子系统和47项具体指标构成的城市燃气可持续发展评价指标体系。在搜集和整理大量原始指标数据基础上, 运用因子分析法对城市燃气可持续发展系统进行了分析和评价。2002—2014年, 各子系统发展呈上升趋势, 但又表现不尽一致。经济子系统波动幅度较大, 社会子系统持续稳定增长, 资源子系统前紧后松, 环境子系统稳中趋缓, 技术子系统最为显著。以城市燃气子系统运动的多维空间结构模型为基础, 结合因子分析法评价结果, 对城市燃气系统整体的发展能力、协调能力、持续能力和可持续发展水平做出评价。总体来看, 城市燃气系统发展能力不断增强, 整体协调性较高, 持续能力稳步提升。在其共同作用下, 城市燃气行业可持续发展水平不断提高。

**关键词** 城市燃气; 可持续发展; 评价指标体系; 因子分析

## 0 引言

本世纪以来, 大力发展天然气、水电、可再生能源等清洁能源已成为中国可持续发展行动中改善能源结构、提高能源效率的重要抓手, 凸显了天然气在未来国家能源消费结构中的战略地位。特别是2002年市政公用事业市场化改革以来, 以城市燃气为主的天然气利用模式逐步形成<sup>[1]</sup>, 城市燃气行业已成为影响国家能源结构战略调整的主要领域, 开展城市燃气可持续发展评价研究具有重要的现实意义。

## 1 城市燃气可持续发展评价研究现状

与其他行业较为丰富的可持续发展研究论文及研

究成果相比, 有关城市燃气可持续发展的研究文献及成果相对较少, 目前的研究主要集中在区域城市燃气可持续发展<sup>[2-3]</sup>和燃气企业可持续发展<sup>[4-6]</sup>两个方面。吴家正<sup>[2]</sup>从经济、社会、资源、科教等方面协调发展的关系出发, 对上海城市燃气可持续发展的模式和对策进行了研究, 提出了燃气事业的可持续发展概念, 是较早开展城市燃气可持续发展研究的文献, 但其并未对燃气事业的可持续发展做出进一步的解释和说明。尚玉秋<sup>[4]</sup>总结出由盈利、规模和能力3个方面共8个指标构成的评价燃气企业地位和水平的方法——燃气企业综合评价指标体系, 来评价城市燃气企业在行业中所处位置, 但指标权重靠经验取得, 尚缺乏科学系统的研究和分析。以中国城市燃气行业为整体研究对象的可持续发展评价至今仍是空白。

引用格式: 王中元, 罗东坤. 基于因子分析法的城市燃气可持续发展评价. 石油科学通报, 2017, 04: 536-545

WANG Zhongyuan, LUO Dongkun. Evaluation of sustainable development of city gas based on factor analysis. Petroleum Science Bulletin, 2017, 04: 536-545. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.050

## 2 城市燃气可持续发展评价体系构建

作为一种有效的政策制定和公共交流工具<sup>[7]</sup>,可持续发展评价指标体系愈来愈成为开展复杂系统评价研究和分析的重要基础。城市燃气可持续发展系统虽然涉及经济、社会、资源、环境和技术等多个方面,但不能简单地将各方面的统计指标进行叠加、集合或罗列<sup>[8]</sup>,而应由集中反映经济、社会、资源、环境、技术等系统内涵和特征的特征参数,按照相互关系及隶属关系划分成不同层次的组合,并由形成一定结构和层次的指标集构成的一个有机体系。

### 2.1 城市燃气评价指标体系框架结构

对复杂系统组成要素的划分和对代表组成要素的指标分析,是刻画和了解系统的基本途径<sup>[9]</sup>。以要素为基本单元,在进行系统层次和结构分析基础上,将这些要素按其功能作用分别组合在一起,构成经济、社会、资源、环境和技术5个方面要素的组合,即:经济子系统、社会子系统、资源子系统、环境子系统和

按照指标体系建立的方法和原则,将城市燃气可持续发展评价指标体系框架分为总体层、系统层、专题层及指标层4个层次(如图1所示)。总体层反映城市燃气可持续发展系统整体可持续发展能力、水平和状况;系统层反映组成系统的经济、社会、资源、环境和技术各个子系统的可持续发展能力、水平和状况;专题层是将各个子系统发展目标进一步分解为不同的侧面(专题)来反映各个子系统在某一个或几个发展方向的可持续发展能力、水平和状况,而指标层则由反映各个要素的具体评价指标组成。专题层是对系统层的进一步阐释和对指标层的归纳,承担承上启下功能。

在具体指标的选择过程中,运用理论分析、专家咨询和频度统计等方法选取、设置和筛选指标,以满足科学性和完备性原则的基本要求<sup>[10]</sup>。指标设立目的清楚,指标名称保持前后一致和连贯,充分考虑指标稳定性及相关性,确保相关数据的可得性和量化程度,避免数据中断使评价研究工作陷于被动。同时,对指标处理的方法依据和反映指标的有关数据来源比较准确可靠,以确保指标选取的科学性和合理性。通过年鉴整理及综合相关数据采集情况,经初步筛选、精选等过程,形成由5个子系统及47项具体指标组成的城

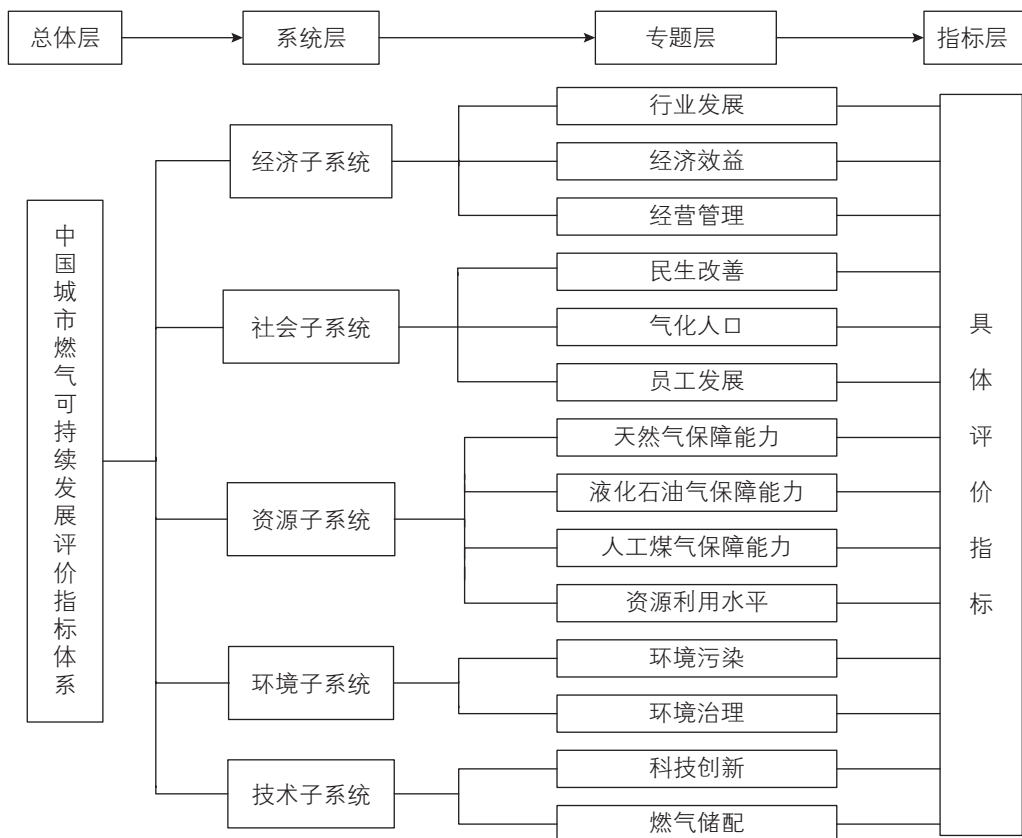


图1 城市燃气可持续发展评价指标体系基本框架结构

Fig. 1 Basic frame structure of city gas sustainable development evaluation indicator system

表 1 城市燃气可持续发展指标体系及各子系统指标原始数据  
Table 1 City gas sustainable development indicators system and raw data of each subsystem index

子系统	指标层	指标名称	年份													
			2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
经济子系统 A	A11	资产总额/亿元	712.14	818.72	902.62	1 186.15	1 465.71	1 632.61	2 201.69	3 379.36	2 982.87	3 457.71	4 471.59	5 252.53	6 407.26	
	A12	主营业务收入/亿元	322.81	391.99	467.45	662.12	880.88	1 137.32	1 592.09	1 888.27	2 505.94	3 205.31	3 358.55	4 136.8	5 227.09	
	A13	燃气行业投资额/亿元	87.33	151.64	209.77	274.63	331	347	420	651	964	1 244	1 605	2 210	2 241.6	
	A21	利润总额/亿元	-1.05	6.47	8.66	16.82	29.83	75.52	125.37	177.47	253.97	314.48	319.45	383.93	429.82	
	A22	总资产贡献率/%	1.9	3.14	3.55	3.58	4.82	8.29	9.85	7.59	11.82	12.63	10.17	11.5	9.61	
	A23	工业成本费用利润率/%	-0.3	1.59	1.81	2.53	3.4	6.97	8.28	10.12	11.37	10.48	9.98	9.98	8.59	
	A24	利税总额/亿元	9.6	20.13	25.17	36.47	61.73	119.9	196.59	239.12	330.32	410	419.43	501.88	564.71	
	A25	主营业务利润率/%	5.64	8.28	8.64	9.49	9.96	13.63	13.73	15.17	17.92	14.73	24.1	16.56	12.52	
	A31	流动资产周转次数/(次/年)	1.45	1.6	1.75	1.96	1.99	2.22	2.31	1.15	2.49	2.73	2.24	2.48	2.49	
	A32	主营业务成本率/%	93.95	91.21	90.90	90.12	89.62	85.76	85.78	84.21	81.63	84.80	84.59	85.34	87.02	
	A33	人均主营业务收入/(万元/人)	23.06	26.72	32.26	44.62	52.75	71.62	87.62	104.38	131.75	161.40	155.02	174.44	203.67	
	社会子系统 B	B11	生活能源天然气消费总量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	51	57	67	79	103	143	170	178	227	264	288	323	343
		B12	生活能源液化石油气消费总量/10 <sup>4</sup> t	1 169	1 293	1 350	1 329	1 456	1 638	1 457	1 496	1 457	1 607	1 635	1 846	2 173
B13		全国人均生活能源天然气消费量/m <sup>3</sup>	3.6	4	5.2	6.1	7.8	10.9	12.8	13.3	17	19.7	21.3	23.8	25.1	
B14		全国人均生活能源液化石油气消费量/kg	7.6	8.6	10.4	10.2	11.5	12.4	11	11.2	10.5	12	12.1	13.6	15.9	
B21		人工煤气用气人口/万人	4 609.3	4 843.33	4 735.91	4 496.35	4 121.58	4 080.52	3 442.22	3 040.12	2 871.97	2 742.53	2 495.58	2 006.15	1 813.05	
B22		天然气用气人口/万人	4 002	4 681	6 065	7 623	9 099	11 133	13 290	15 948	18 856	21 442	24 134	27 338	30 138	
B23		液化石油气用气人口/万人	19 456	21 342	22 520	23 164	22 505	24 389	24 136	23 700	23 601	23 152	22 924	22 310	21 650	
B24		城镇燃气普及率/%	55.90	58.93	61.38	62.77	61.29	65.32	65.49	66.17	67.68	68.53	69.62	70.65	71.55	
B31		就业人员数/万人	14	14.67	14.49	14.84	16.7	15.88	18.17	18.09	19.02	19.86	21.665	23.7149	25.6648	
B32		就业人员平均工资/(元/年)	16 440	18 752	21 805	20 606	23 774	27 886	32 668	41 869	47 309	52 723	58 202	67 085	73 339	
C11		国内天然气产量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	326.6	350.2	414.6	493.2	585.5	692.4	803	852.7	957.9	1 053.4	1 106.1	1 208.6	1 301.6	
C12		天然气净进口量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	-32	-18.7	-24.4	-29.7	-19.5	14.2	13.5	44.2	124.4	279.6	391.7	497.9	565	
C13		天然气供气总量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	132.29	149.31	180.31	228.62	261.24	333.09	391.30	437.26	527.56	732.67	865.18	982.57	1 057.00	
资源子系统 C	C21	国内液化石油气产量/10 <sup>4</sup> t	1 036.8	1 211.7	1 417	1 432.7	1 745.3	1 944.7	1 914.8	1 831.7	2 092.3	2 240.8	2 268.7	2 513.3	2 705.8	
	C22	液化石油气供气总量/10 <sup>4</sup> t	1 278.81	1 300.80	1 315.65	1 407.91	1 458.70	1 669.99	1 531.25	1 552.61	1 486.51	1 408.00	1 371.75	1 350.80	1 318.00	
	C31	人工煤气自制气量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	178.26	178.78	220.29	257.75	285.68	303.77	323.03	335.09	248.14	84.73	60.92	54.77	51.24	
	C32	人工煤气供气总量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	200.11	202.82	215.52	258.87	297.71	323.79	358.51	363.33	284.00	94.24	85.54	70.45	64.50	
	C41	天然气终端消费量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	291.8	339.1	396.7	466.1	573.3	705.2	812.9	895.2	1 080.2	1 341.1	1 497	1 705.4	1 868.9	
C42	天然气终端消费占比/%	45.34	44.03	45.45	49.05	45.57	47.23	48.14	48.84	48.84	54.63	57.79	57.62	56.56		
C43	液化石油气终端消费量/10 <sup>4</sup> t	1 626.8	1 818.2	2 016	2 046.5	2 252.6	2 327.9	2 118.9	2 153.1	2 321.9	2 470.2	2 482.2	2 823.4	3 289.8		

(续表)

子系统	指标层	指标名称	年份												
			2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
环境子系统 D	D11	废水排放量/(t/万元收入)	12.32	9.94	7.49	6.19	3.72	2.49	1.64	1.07	0.77	0.31	0.28	0.30	0.11
	D12	废气排放量/(m <sup>3</sup> /万元收入)	1.39	1.35	0.97	1.19	0.84	0.32	0.35	0.40	0.33	0.08	0.10	0.14	0.09
	D13	二氧化硫排放量/(kg/万元收入)	7.62	7.29	4.15	2.84	2.38	2.28	1.77	1.24	0.80	0.51	0.49	0.38	0.33
	D14	工业烟(粉)尘排放量/(kg/万元收入)	14.33	13.63	2.97	2.33	1.93	1.64	1.54	0.95	0.44	0.37	0.22	0.14	0.10
技术子系统 E	D21	废水处理设施数/套	96	89	83	70	72	70	70	56	58	30	33	33	35
	D22	废气治理设施数/套	448	442	436	293	321	359	433	406	392	187	210	159	227
	D23	固体废物综合利用率/%	78.03	74.24	82.10	72.30	66.40	74.60	66.70	63.60	89.80	97.21	97.80	96.70	95.00
	D24	万元收入能源消费量/(吨标准煤/万元收入)	1.88	1.49	1.17	1.05	0.68	0.60	0.34	0.30	0.25	0.20	0.21	0.17	0.14
E1	E11	科技活动人员数/人	112	110	86	86	88	97	105	275	376	1 018	1 016	1 117	2 425
	E12	R&D项目数/个	8	8	9	9	5	11	14	32	71	65	85	105	157
	E13	R&D项目全时当量/人年	13	10	9	6	9	24	12	143	277	442	567	811	1 795
	E14	项目经费/万元	1 151	1 207	860	1 085	1 232	1 761	1 601	1 811	9 991	13 245	17 844	31 382	55 584
E2	E21	燃气管道长度/10 <sup>3</sup> km	122.474	140.160	159.553	176.744	209.451	246.498	289.281	312.270	355.409	405.467	459.666	513.073	567.542
	E22	人工煤气储气能力/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	3 498.2	4 156.5	4 815.75	3 233.9	4 450.6	3 075.3	2 960.3	2 686.4	2 306.4	1 198.8	1 240.88	1 499.21	929.38
	E23	天然气储气能力/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	4 896	5 231.6	6 200	7 227.8	9 278.5	6 847.4	14 877.2	46 472.6	47 800.2	47 539	54 999.49	60 028.87	61 892.02
	E24	液化石油气储气能力/10 <sup>4</sup> t	102.81	135.99	126.8	127.52	163.09	159.88	156.97	166.41	166.77	168.33	198.58	200.82	194.56

市燃气可持续发展评价指标体系(如表 1 所示)。

### 2.2 城市燃气系统的多维空间结构

城市燃气可持续发展是多层次、多要素共同作用的结果。各子系统不停地运动变化构成了城市燃气可持续发展系统的多维空间结构。如果将各子系统分别看成是城市燃气可持续发展多维空间结构中的一维,则城市燃气可持续发展系统的运动轨迹就是空间结构中由若干个状态点构成的一条曲线。曲线上的每一个点都是有经济维、社会维、资源维、环境维和技术维确定的几何位置以及具有时(空)间、数量和数值具体特征描述的状态点。对城市燃气可持续发展能力的判断,实质上是对城市燃气在多维空间结构中所处几何位置(状态点)进行的描述和评价<sup>[1]</sup>,各子系统的评价值的标准化值即为位置坐标点的维度值。

设Q点为最不可持续的临界点,其位置坐标点为(0,0,0,0,0)。M点为最可持续的理想目标点,其位置坐标点为(1,1,1,1,1)。城市燃气任一状态点设为S(t),其位置坐标点为(x<sub>t</sub>,y<sub>t</sub>,z<sub>t</sub>,u<sub>t</sub>,k<sub>t</sub>),其中,x<sub>t</sub>、y<sub>t</sub>、z<sub>t</sub>、u<sub>t</sub>、k<sub>t</sub>分别为状态点的经济维、社会维、资源维、环境维、技术维的坐标值。t=1,2,...,n。n为评价对象个数。在QM、MS(t)、QS(t)三条直线构成的平面结构中,QM与QS(t)形成的夹角为θ(t)。QM是城市燃气在多维空间结构的最优路径轨迹,任一状态点S(t)在最优路径轨迹上的投射点为S'(t)(如图2所示)。

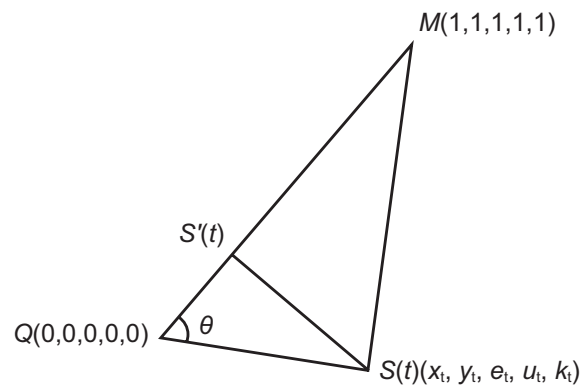


图2 城市燃气可持续发展系统状态点运动轨迹平面结构  
Fig. 2 Plane structure of state point motion trail in city gas sustainable development system

### 2.3 原始指标数据收集

动态地监测城市燃气可持续发展过程 and 变化趋势,必须使所有用于评价的指标都能够得到一个有时间序



列的原始数据的支持,这对完成评价任务和实现评价目的的至关重要。因此,原始数据收集整理过程对样本数据质量和数量的要求就比较高。为了能真实反映城市燃气发展情况,笔者在查阅2003—2016年中国统计年鉴、中国城乡建设统计年鉴、中国能源统计年鉴、中国环境统计年鉴、中国科技统计年鉴、中国人口与就业统计年鉴以及统计资料汇编等大量文献资料基础上,得到城市燃气可持续发展评价指标体系各子系统相关原始数据(如表1所示)。由于统计年鉴等资料数据有一定的滞后性,本次评价以2002—2014年间城市燃气发展状况作为评价对象。

### 3 城市燃气系统的因子分析与综合评价

#### 3.1 因子分析法评价

##### 3.1.1 原始指标数据同趋势化处理

综合评价一般以正向指标为评价基础。对逆向指标需要进行一致化处理。既可以通过取倒数变为正向指标,即 $y_{ij} = 1/x_{ij}$  ( $x_{ij} > 0$ );也可以通过减法取得一致化,即 $y_{ij} = M - x_{ij}$ ,其中 $M$ 为指标 $x_{ij}$ 的一个允许的上界。由于减法一致化方法下的综合评价结果更为稳定<sup>[12]</sup>,故对逆向指标进行减法一致化处理,得到原始指标转换矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

##### 3.1.2 各子系统因子分析

以SPSS19.0对各子系统进行因子分析。

###### (1) 标准化处理

使用标准化处理法(Z-Score法)对原始指标转换矩阵 $Y$ 进行无量纲化处理,使标准化样本矩阵方差为1,均值为0。得标准化矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ :

$$Z_{ij} = (y_{ij} - \bar{y}_j) / s_j \quad (1)$$

其中, $y_{ij}$ 为原始指标转换值, $\bar{y}_j$ 为矩阵 $Y$ 中第 $j$ 项原始指标转换值的均值, $s_j$ 为矩阵 $Y$ 中第 $j$ 项原始指标转换值的标准差。

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (2)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (3)$$

其中, $m$ 为评价样本数。

###### (2) 因子分析适宜检验

一般认为,KMO值小于0.5不适宜做因子分析<sup>[13]</sup>。通过因子分析适宜性检验,得各子系统KMO检验和Bartlett球度检验结果(如表2所示)。各子系统KMO值均大于0.5, sig.(显著性水平)均为0.000,适宜进行因子分析。

###### (3) 主因子提取及权重

按照初始特征值大于1,累积方差贡献率大于85%的原则提取主因子,得各子系统主因子数、主因子特征值和方差贡献率,并按归一化方法确定主因子权重(如表3所示)。除技术子系统主因子累积方差贡献率均达到87%以上外,其他各子系统累积方差贡献率均达到92%以上,具有显著的代表性,变量绝大部分信息都能得到主因子的解释,因子提取效果比较理想。

###### (4) 因子旋转

由于技术子系统只抽取了一个主成分,无法进行旋转。利用SPSS19.0对除技术子系统以外的其他各子系统建立因子载荷矩阵,并进行最大方差正交旋转,使因子载荷相对集中,以突出主因子意义,得各子系统旋转因子载荷矩阵。

###### (5) 计算各子系统因子得分及评价值

对各子系统进行回归,根据各子系统因子得分系数矩阵与各变量标准化值计算因子得分 $FAC$ 。设经济子系统、社会子系统、资源子系统、环境子系统综合评价值分别为 $V_{ES}$ 、 $V_{SS}$ 、 $V_{RS}$ 、 $V_{ENS}$ 、 $V_{TS}$ 。

根据各子系统因子得分及主因子权重,计算各子系统综合评价值,其计算公式为:

$$V_{ES} = FAC_{11} \cdot 0.8909 + FAC_{12} \cdot 0.1091 \quad (4)$$

$$V_{SS} = FAC_{21} \cdot 0.8895 + FAC_{22} \cdot 0.1105 \quad (5)$$

表2 各子系统KMO和Bartlett球度检验结果

Table 2 KMO and Bartlett sphericity inspection result of every subsystem

		经济子系统	社会子系统	资源子系统	环境子系统	技术子系统
KMO值		0.583	0.649	0.653	0.753	0.812
	近似卡方	368.268	322.156	331.872	173.572	181.030
Bartlett球度检验	df	55	45	45	28	28
	sig.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

$$V_{RS} = FAC_{31} \cdot 0.7718 + FAC_{32} \cdot 0.2282 \quad (6)$$

$$V_{ENS} = FAC_{41} \cdot 0.8507 + FAC_{42} \cdot 0.1493 \quad (7)$$

$$V_{TS} = FAC_{51} \cdot 1.0000 \quad (8)$$

根据式 4~8, 计算得各子系统各评价年度综合评价价值(如表 4 所示)。同时, 根据各子系统各评价年度综合评价价值, 可得基于因子分析法的城市燃气各子系统可持续发展变化趋势(如图 3 所示)。

### 3.1.3 各子系统评价

由表 4 及图 3 可知, 城市燃气各子系统发展总体呈上升趋势, 但表现有所差别。技术子系统和社会子系统增长较为显著, 经济子系统波动较大, 而资源子系统和环境子系统前期增长较快而后期相对平缓。

(1)经济子系统波动幅度较大。2002 年底市政公用事业市场化改革后, 受外商投资及非公有资本进入燃

气投资领域许可等限制条件, 燃气行业投资额等指标增长相对较慢, 经济子系统发展徘徊不前。2007 年后受城市燃气优先发展政策影响, 经济子系统发展逐步好转。2011—2012 年, 受主营业务成本率升高和工业成本费用利润率下降等多重影响, 经济子系统增长乏力。随着 2013 年天然气存量气与增量气价格调整政策的实施, 有效刺激了城市燃气天然气利用需求, 经济子系统增长显著。

(2)社会子系统持续稳定增长。2002—2006 年社会子系统保持稳定增长, 燃气行业就业人数和就业人员工资持续得到提高。受天然气利用优先保障民用气政策的积极影响, 2007—2011 年社会子系统增长有所加快。2012 年后, 社会子系统增长速度非常明显, 民生得到较大改善。

表 3 各子系统主因子及权重

Table 3 Principle factors and its weight of every subsystem

子系统	主因子	主因子特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	主因子权重
经济子系统	F11	9.037 3	82.157 1	82.157 1	0.890 9
	F12	1.106 5	10.059 0	92.216 1	0.109 1
社会子系统	F21	8.467 9	84.679 3	84.679 3	0.889 5
	F22	1.052 2	10.522 4	95.201 7	0.110 5
资源子系统	F31	7.634 1	76.340 7	76.340 7	0.793 3
	F32	1.989 1	19.890 7	96.231 5	0.206 7
环境子系统	F41	6.347 2	79.339 6	79.339 6	0.850 7
	F42	1.113 7	13.921 8	93.261 5	0.149 3
技术子系统	F51	6.974 4	87.180 3	87.180 3	1.000 0

表 4 基于因子分析法的各子系统评价价值

Table 4 Evaluation of estimate of every subsystem based on factor analysis method

年份	经济子系统	社会子系统	资源子系统	环境子系统	技术子系统
2002	-0.547 0	-1.184 2	-1.440 8	-1.899 1	-0.955 7
2003	-0.716 1	-1.034 3	-1.261 5	-1.542 2	-0.866 9
2004	-0.677 6	-0.840 1	-0.973 4	-0.612 0	-0.951 8
2005	-0.604 6	-0.768 5	-0.581 8	-0.364 8	-0.767 5
2006	-0.539 5	-0.503 7	-0.226 9	0.086 1	-0.709 5
2007	-0.711 6	-0.235 1	0.458 8	0.271 5	-0.535 6
2008	-0.451 3	-0.117 1	0.274 4	0.532 3	-0.445 4
2009	-0.310 5	0.063 9	0.392 0	0.679 6	-0.061 6
2010	-0.096 0	0.262 4	0.430 6	0.503 2	0.262 5
2011	0.596 6	0.584 0	0.423 8	0.569 7	0.604 2
2012	0.602 3	0.813 7	0.540 7	0.563 0	0.946 0
2013	1.384 9	1.259 9	0.851 2	0.570 5	1.261 5
2014	2.070 5	1.698 9	1.112 9	0.642 2	2.219 8

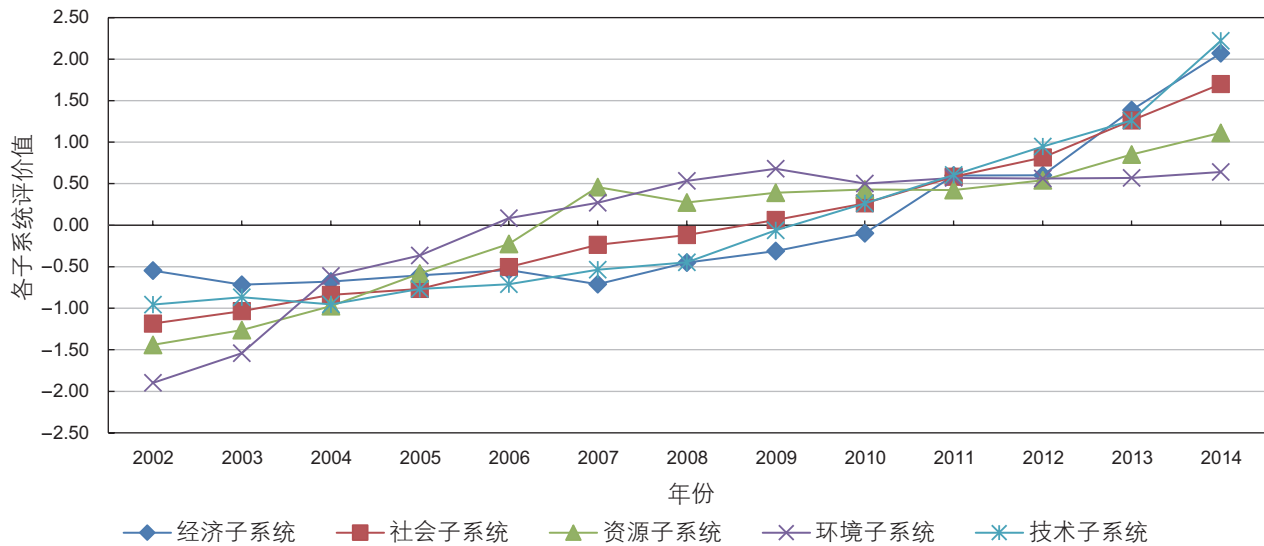


图3 基于因子分析法的各子系统可持续发展趋势图

Fig. 3 Sustainable development tendency of every subsystem based on factor analysis method

(3)资源子系统发展前紧后松。2007年前,国内天然气产量、国内液化石油气产量和天然气供气总量持续保持增长,为资源子系统快速发展做出了重要贡献。2007—2012年,资源子系统发展基本处于徘徊状态。随着国内液化石油气产量和液化石油气终端消费量恢复性增长,2012年后资源子系统发展逐步扭转颓势。

(4)环境子系统发展稳中趋缓。2002—2009年环境子系统持续稳定增长。2010年后,环境子系统发展相对平缓。万元收入能源消费量、废水排放量指标以及固体废物综合利用率指标频繁波动,造成相互抵消,致使环境子系统无法实现有效快速增长。

(5)技术子系统增长最为显著。2002—2008年,科技活动人员数、R&D项目数、R&D项目全时当量和项目经费等指标增长较缓慢,技术子系统保持缓慢增长。2009—2014年,受科技活动人员数、R&D项目数、R&D项目全时当量和项目经费等指标的快速增长,技术子系统发展显著加快。

### 3.2 城市燃气系统整体可持续发展水平测度与评价

城市燃气可持续发展水平是系统发展能力、协调能力和持续能力的综合表现,反映了某一时点城市燃气系统的整体可持续发展能力或水平状况。

#### 3.2.1 综合评价值的标准化处理

城市燃气系统的任一状态点 $S(t)$ 均是由经济维( $x_i$ )、社会维( $y_i$ )、资源维( $z_i$ )、环境维( $u_i$ )、技术维( $k_i$ )的坐标值构成(如图2所示)。为了消除各子系统所得综合评价值在数量级上的差异,保持各子

系统评价结果原有数据之间的关系,需要对各子系统的综合评价值进行标准化法(Z-score)处理,并以处理值作为城市燃气可持续发展水平测度的基础数据。 $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ 、 $u_i$ 、 $k_i$ 分别为经济子系统、社会子系统、资源子系统、环境子系统和技子系统在状态点的评价值的标准化值。

#### 3.2.2 城市燃气可持续发展能力、协调能力、持续能力及可持续发展水平

##### (1)发展能力

若以状态点 $S(t)$ 与目标点 $M$ 之间的欧氏距离 $MS(t)$ 来表示状态点 $S(t)$ 离开临界点向目标点 $M$ 移动程度和能力大小, $MS(t)$ 数值越小,状态点 $S(t)$ 与目标点 $M$ 的距离就越近,发展能力就越强,则城市燃气可持续发展能力 $MS(t)$ 可以用下式表示:

$$MS(t) = \sqrt{(1-x_i)^2 + (1-y_i)^2 + (1-z_i)^2 + (1-u_i)^2 + (1-k_i)^2} \quad (9)$$

##### (2)协调能力

若以 $\cos\theta(t)$ 作为城市燃气系统运动轨迹拟合最优路径轨迹的度量,当 $\cos\theta(t)$ 值越大,表示夹角 $\theta(t)$ 越小,状态点 $S(t)$ 就越接近于最佳运动轨迹 $QM$ ,状态点 $S(t)$ 偏离 $QM$ 越远, $\theta(t)$ 变大, $\cos\theta(t)$ 值逐渐变小,协调能力变差,则城市燃气可持续发展协调能力 $\cos\theta(t)$ 可以表示为:

$$\cos\theta(t) = \frac{(QM^2 + QS(t)^2 - MS(t)^2)}{(2QM \cdot QS(t))} \quad (10)$$

其中, $QM = \sqrt{5}$ 。

$$QS(t) = \sqrt{(x_t - 0)^2 + (y_t - 0)^2 + (z_t - 0)^2 + (u_t - 0)^2 + (k_t - 0)^2}$$

即:

$$QS(t) = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + z_t^2 + u_t^2 + k_t^2} \tag{11}$$

(3) 持续能力

若以投射点  $S'(t)$  与临界点  $Q$  之间的欧式距离  $QS'(t)$  代表状态点  $S(t)$  离开临界点向目标点  $M$  持续运动能力,  $QS'(t)$  距离越长就越接近目标点, 发展就越可持续, 则城市燃气可持续发展的持续能力可以表示为:

$$QS'(t) = QS(t) \cdot \cos\theta(t) \tag{12}$$

(4) 可持续发展水平

以  $SD(t)$  表示城市燃气可持续发展水平, 是系统远离不可持续状态的能力和接近理想状态能力的综合表现。在任一状态下, 城市燃气可持续发展水平可表示为:

$$SD(t) = QS'(t) / (QS(t) + MS(t)) \tag{13}$$

3.2.3 城市燃气可持续发展水平总体评价

将城市燃气各子系统年度评价标准值代入上式(9~13), 计算得各评价年度城市燃气系统发展能力、协调能力、持续能力和整体可持续发展水平变化趋势(如图4所示)。

(1) 发展能力曲线  $MS(t)$  持续下降, 状态点  $S(t)$  不

断向理想目标点  $M$  靠近。

(2) 协调能力曲线  $\cos\theta(t)$  基本呈倒 Z 型分布,  $\cos\theta(t)$  值逐步趋近于 1, 夹角  $\theta(t)$  逐渐变小, 城市燃气系统运动轨迹不断向最优运动轨迹靠拢, 协调能力显著增强, 整体协调性较高。

(3) 持续能力曲线稳步增长, 状态点  $S(t)$  向目标点  $M$  持续运动能力不断增强, 城市燃气系统发展的可持续性不断提高。

(4) 可持续发展水平曲线呈持续增长趋势, 城市燃气系统远离不可持续状态的能力和接近理想状态能力持续得到提升, 可持续发展水平不断提高。

4 结论

因子分析法在城市燃气可持续发展评价中的创新性应用, 为推进城市燃气持续发展提供了重要依据。从总体上看, 城市燃气各子系统发展均呈上升趋势, 为实现系统整体可持续发展水平的不断提高提供了有效支撑。城市燃气系统发展不断向可持续发展目标移动并逐步靠近, 系统整体的发展能力不断增强, 在满足城镇经济社会发展需要和提高人民群众生活质量方面体现了较好的成长性, 夯实了城市燃气可持续发展的物质基础。城市燃气系统整体协调性较高, 城市燃气行业各类要素之间相互配合得当, 逐步实现良性循

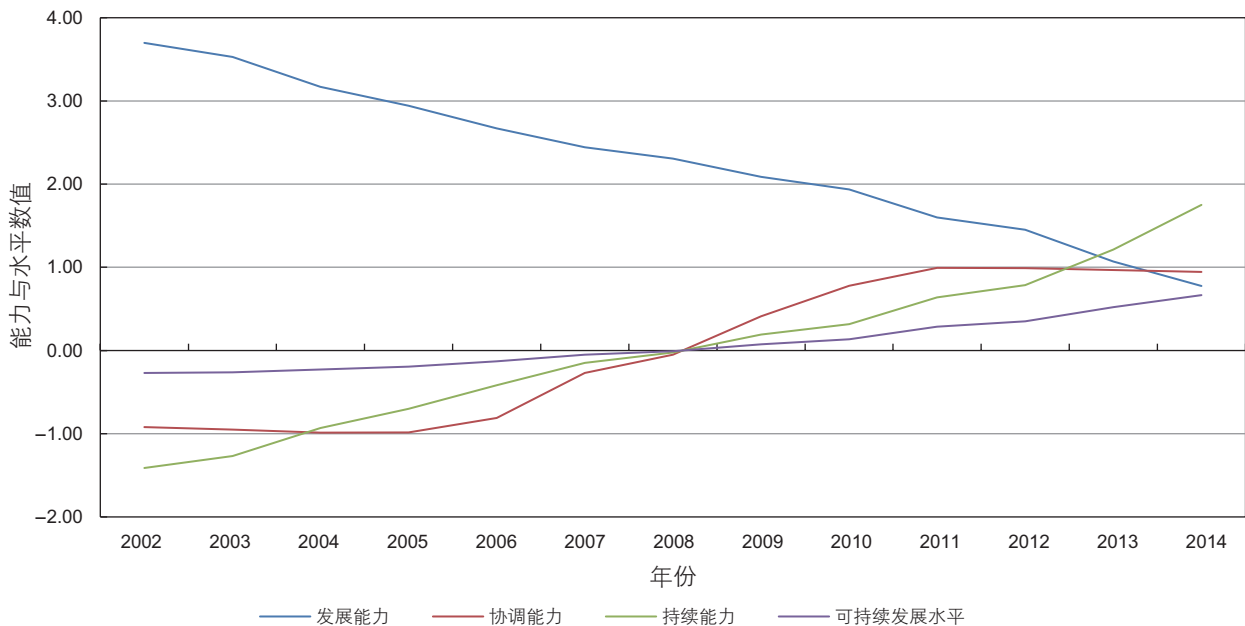


图4 城市燃气系统发展能力、协调能力、持续能力和可持续发展水平变化趋势

Fig. 4 Variation trend of development ability, coordination ability, sustainability and level of sustainable development of city gas system



环和协同互动,各子系统发展较为平衡。城市燃气系统向可持续发展目标延续不断的运动,城市燃气行业发展具有较强的连续性,为城市燃气行业实现可持续

发展提供了质量保证。在城市燃气系统发展能力、协调能力和持续能力共同作用下,城市燃气行业可持续发展水平处在不断提高的过程中。

## 参考文献

- [1] 王中元,罗东坤,王刚,等.中国天然气利用业务的发展规律与展望[J].天然气工业,2014,34(10):121-127. [WANG Z Y, LUO D K, WANG G, et al. Developing rules and prospect of natural gas utilization in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10):121-127.]
- [2] 吴家正.上海城市燃气可持续发展研究[J].煤气与热力,1996,16(5):59-63. [WU J Z. Study on sustainable development of urban gas in Shanghai[J]. Gas & Heat, 1996, 16(5): 59-63.]
- [3] 潘一玲.从能源合理利用谈城市燃气可持续发展[J].城市燃气,2003(10):3-9. [PAN Y L. Discussion on sustainable development of urban gas from rational utilization of energy resources[J]. Urban Gas, 2003(10): 3-9.]
- [4] 尚玉秋.对燃气行业综合评价指标体系的研究[J].城市燃气,2004(5):33-35. [SHANG Y Q. Research on comprehensive evaluation index system of gas industry[J]. Urban Gas, 2004(5): 33-35.]
- [5] 宋敬国.桓台中油燃气可持续发展对策研究[D].大连:大连理工大学,2008:35-42. [SONG J G. The sustainable development of Huantai natural gas company countermeasures studies[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 35-42.]
- [6] 王炜.可持续发展观下的城市燃气公司业绩评价[D].成都:西南财经大学,2014:36-59. [WANG W. Performance appraisal theory about metropolise natural gas company under the guidance of sustainable development concept[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics, 2014: 36-59.]
- [7] SINGH R K, MURTY H R, GUPTA S K, et al. An overview of sustainability assessment methodologies[J]. Ecological Indicators, 2009(9): 189-212.
- [8] 赵玉川,胡富梅.中国可持续发展指标体系建立的原则及结构[J].中国人口.资源与环境,1997,7(4):54-59. [ZHAO Y C, HU F M. Principle and structure in the establishment of index system for China's sustainable development[J]. China Population, Resources and Environment, 1997, 7(4): 54-59.]
- [9] 侯向阳,肖平.可持续发展指标体系的构建方法探讨[J].生态科学,1998,17(2):80-85. [HOU X Y, XIAO P. Survey on building methods of indicators of sustainable development[J]. Ecologic Science, 1998, 17(2): 80-85.]
- [10] 杨凌,元方,李国平.可持续发展评价指标体系综述[J].统计与决策,2007(5):56-59. [YANG L, YUAN F, LI G P. Review of sustainable development evaluation index system[J]. Statistics & Decision, 2007(5): 56-59.]
- [11] 厉红梅,李适宇,罗琳,等.可持续发展多目标综合评价方法的研究[J].中国环境科学,2004,23(4):367-371. [LI H M, LI S Y, LUO L, et al. Studies on multi-objective comprehensive evaluation method of sustainable development[J]. China Environmental Science, 2004, 23(4): 367-371.]
- [12] 张立军,袁能文.线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择[J].统计与信息论坛,2010,25(8):10-15. [ZHANG L J, YUAN N W. Comparison and selection of index standardization method in linear comprehensive evaluation mode[J]. Statistics & Information Forum, 2010, 25(8): 10-15.]
- [13] 辛亚光.基于DEA和因子分析的青岛市可持续发展评价[J].经济研究导刊,2013(7):176-177. [XIN Y G. Evaluation of sustainable development in Qingdao based on DEA and factor analysis[J]. Economic Research Guide, 2013(7): 176-177.]

## Evaluation of sustainable development of city gas based on factor analysis

WANG Zhongyuan<sup>1,2</sup>, LUO Dongkun<sup>1</sup>

1 School of Business Administration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Kunlun Energy Company Limited, Beijing 100101, China

**Abstract** Research into sustainable development of urban gas is relatively sparse, and the evaluation of sustainable development based on the overall research into urban gas in China is still blank. Guided by system theory and analytic hierarchy processes (AHP), this paper took the sustainable development system of China's urban gas as a whole research object, and constructed the city gas sustainable development evaluation index system which consists of 5 subsystems and 47 specific indicators through primaries and screening indexes. On the basis of collecting and arranging a large amount of original index data, the

authors analyzed and evaluated the sustainable development system of urban gas by using the factor analysis method. During 2002-2014, the development of each subsystem has shown an upward tendency, but with different performance. The economic subsystem fluctuates more widely, while the social subsystem continues to grow steadily. The resource subsystem developed fast early on and slowly in the latter stage. The development of the environment subsystem is best described as stable and slow, and the growth of the technology subsystem is most remarkable. Based on the multidimensional spatial structure model of urban gas subsystem movement, and combining the factor analysis evaluation results, this work calculates the development capacity, coordination ability, sustainable ability and sustainable development level of the urban gas system, and then evaluates its sustainable development. Overall, the development capacity of urban gas systems is increasing, the whole system reflects a high degree of coordination, and the sustainable ability has been improved steadily. Under this joint action, the sustainable development level of city gas industry has been increasing continuously.

**Keywords** city gas; sustainable development; evaluation index system; factor analysis

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.050

(编辑 付娟娟)