

基于分解分析的中国工业用水和 能耗的趋势差异研究

王 灿 郑馨竺^{*}

引 言

水和能源是现代经济不可或缺的投入要素。然而，在当今中国，这两种资源的短缺问题日益严峻。一方面，中国人均拥有的淡水资源量只有世界人均水平的四分之一。而水资源在全国的空间分布不均又进一步加剧了资源短缺问题。另一方面，中国以煤炭为主的能源结构和对进口能源的高依存度使中国面临确保能源安全的重大挑战。

2000~2014年，全国用水量以年均0.8%的速度下降，但全国能源消耗量却以年均8.1%的速度上升。然而，这两个变量基本上会朝着相同的方向变动并大致表现为一种线性关系（见图1）。

从已往对用水和能耗驱动因素的研究来看，水资源利用和能源消费对一些共同的驱动因素非常敏感。随着经济和人口的快速增长，人们对水资源和能源的需求量不断上升，但技术改进会抑制这种增长势头。生产结构调整也将影响水资源利用和能源消费。这些共同的驱动因素决定了水资源利用和能源消耗之间具有一定的相关性。

^{*} 本章受中国自然科学基金（No. 71273153 和 No. 71525007）与清华大学一力拓集团资源、能源与可持续发展研究中心联合资助。

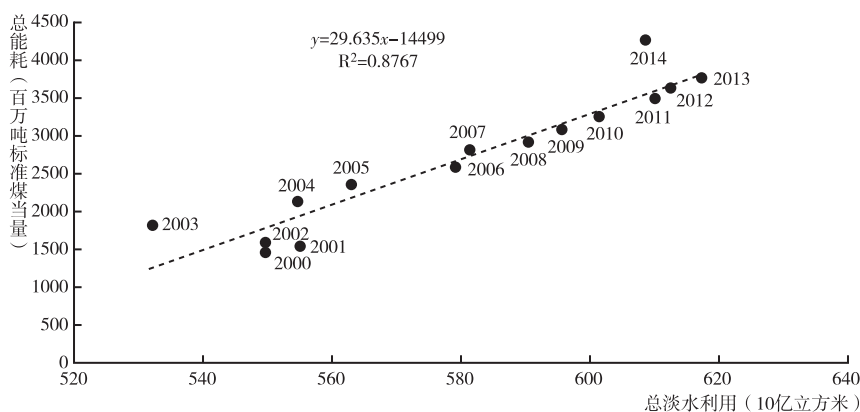


图1 2000~2014年全国范围内水资源利用与能源消费之间的关系

资料来源：笔者根据中国水利部 MWR（2002~2014）和中国统计局 NBS（2014b）计算所得。

为了同时应对水资源短缺和能源危机这两大挑战，实现可持续发展，我们有必要对水资源和能源实行协同管理。而实现协同管理的前提是了解这些共同的驱动因素是如何同时影响水耗和能耗的。尽管已有很多研究分别分析了水耗和能耗的驱动因素，但少有研究关注这两个指标的相关性。因此，本章旨在对这些驱动因素进行深入研究，定量比较它们对水资源利用和能源消费的协同影响关系，并对两种资源的协同管理提出政策建议。本章研究了2002~2012年中国36个工业部门淡水资源利用量与能源消费量的变动趋势，并基于分解分析法量化经济增长、人口增长、结构调整以及资源强度等驱动因素对这两种资源消耗量的影响程度。为了区别2008年全球金融危机（the Global Financial Crisis, GFC）带来的影响，本章将时间跨度划分为2002~2007年和2007~2012年两个阶段。此外，本章还进一步研究了单个工业部门对这些驱动因素的贡献程度，从而识别出具有资源节约潜力的重点部门。

值得一提的是，水资源利用包含取水量和耗水量两个指标，本章的研究主要关注前者。依据美国地质勘探局的定义，取水量是指从地面或者浅层地表中将可利用水资源开采出的水量，耗水量是指开采水量中扣除蒸发或运输损失、融合到产品或作物，或从当前水环境消失的水量后，剩下的那部分水量（Kenny et al., 2009）。本章接下来将在第二节提供有关分解分析的文獻

综述；第三节介绍用于分析的方法论和数据来源；第四节展示工业取水量和能耗量的分解结果，并包含单个工业部门对驱动因素的贡献；第五节总结本章的主要发现并给出一些政策建议。

文献综述

当前，越来越多的研究开始关注资源消费和环境影响的驱动因素，研究内容包括了能源消费（Ma，2014）、能源强度（Zeng et al，2014）、二氧化碳排放（Zhang and Da，2015；Jiang et al.，2015）、二氧化碳强度（Liu et al.，2015）和大气污染物排放（Guan et al.，2014；Liu and Wang，2013；He，2010）等。研究的尺度涉及全球层面（Lan et al.，2016；Peters and Hertwich，2008）、国家层面（Cansino et al.，2016；Feng et al.，2015）和地区层面（Kang et al.，2014；Lu et al.，2015）。例如，Zeng 等（2014）定量研究了五种驱动因素对中国 1997 ~ 2007 年能源强度波动的贡献。Feng 等（2015）评估了影响美国 2007 ~ 2013 年化石燃料燃烧的二氧化碳排放量下降的驱动因素。他们发现，经济衰退而非天然气对煤炭的替代使用是二氧化碳排放量下降的主要驱动力。Ma（2014）从多能源结构、多部门和多地区层面研究了能源消费变动的驱动因素。另外，还有一些研究集中于跨区域碳足迹流动的分解分析。例如，Jiang 等（2015）聚焦中国八个地区的碳足迹，发现区域间贸易和能源强度是碳足迹流动主要的驱动因素。

由于中国是世界上最大的制造业国家以及中国工业是能源密集型的，现有大量研究使用分解分析的方法研究了相关的工业能耗与二氧化碳排放的驱动因素。Zha 等（2009）研究了中国 36 个工业部门 1993 ~ 2003 年能源强度变动的驱动因素，量化了结构效应和强度效应的贡献程度。Hasanbeigi 等（2013）基于分解分析方法回顾和展望了中国制造业能源利用。Zhao 等（2014）比较了日本与中国制造工业部门在能源消费和能源强度上的差异。Wu 和 Huo（2014）通过分析工业和交通运输部门的能源效率，评估中国节能政策的有效性。Liu 等（2007）使用对数平均迪氏指数法（LMDI，以下简称“迪氏指数”）分析了中国 1998 ~ 2005 年工业二氧化碳排放的变化情况。Ouyang 和 Lin（2015）采用了同样的方法，研究了 1991 ~ 2010 年工业二氧化碳排放情况。Yan 和 Fang（2015）使用中国制造业 1993 ~ 2011 年数

据,集中研究与能源相关的二氧化碳排放,并基于情景分析法探索了减排潜力。Liu 等 (2015) 使用迪氏指数法,分析了 1996 ~ 2012 年中国制造业部门二氧化碳排放强度的变化情况,识别了单个部门在二氧化碳排放中的比重。除了对工业能源消费和二氧化碳排放的研究外,还有一些研究分析了中国的工业废气排放量。例如, Fujii 等 (2013) 分析了 1998 ~ 2009 年中国十个工业部门的废气排放情况,并说明了减排政策对空气污染管理的影响。

与现有对能源消费及其相关环境影响的驱动因素的研究形成鲜明对比的是,有关水资源利用驱动因素的研究相对较少。Duarte 等 (2014) 对整个 20 世纪全球水资源利用进行了解,然后使用趋势方法预测未来水资源利用情况。Zhang 等 (2012) 集中分析了北京面临的水资源挑战,并对北京 1997 ~ 2007 年的内部与外部水生态足迹进行了分解分析。这些研究都在政策层面提出了应对水资源短缺问题的策略。

目前,很少有文献同时研究两个或两个以上指标的变动情况。唯一的例外就是 Kopidou 等 (2016) 的研究,他们研究了二氧化碳排放与就业变动中的共同趋势和驱动因素。由此,从文献综述来看,因为本章将驱动因素对工业能源消费和水资源利用的影响进行了对比,所以具有原创性。正如许多研究提到的,这种分解分析的主要目的是对过去的环境表现进行评估,进而提出水资源和能源资源利用的综合管理方法。

方法和数据

驱动因素

本章主要研究了水资源利用和能源消耗的四种驱动因素,它们分别是经济增长、结构调整、资源强度和人口增长。经济增长和人口增长通常被认为是可以同时增加需水量和能耗量。产业结构调整被看作中国应对环境和能源问题的一条重要路径 (State Council of China, 2011)。然而产业结构的调整未必会同时实现节能与节水。一些旨在节能的结构调整可能会增加用水强度,从而对水资源供给造成更大的压力。资源强度是影响水资源开发利用和能源消费变动的另一个重要的驱动因素。本章将资源强度定义为每个部门单位产业增加值所消耗的水资源量或能源量。

研究方法

分解分析方法主要有两种：指标分解分析法（IDA）和结构分解分析法（SDA）。关于 IDA 方法和 SDA 方法的异同，在 Hoekstra 等（2003）、Su 和 Ang（2012）的文献中均有介绍。本章使用的分解方法是 LMDI 方法（Ang and Zhang, 2000；Ang, 2015）。

在 LMDI 模型中，工业淡水取用量可用方程（1）来表示：

$$W = \sum_i W_i = \sum_i f_i s_i e P = \sum_i \frac{W_i}{Q_i} \frac{Q_i}{Q} \frac{Q}{P} P \quad (1)$$

在方程（1）中， W 是总的工业淡水取用量； W_i 是部门 i 的淡水取用量； f_i 是部门 i 的用水强度，定义为部门 i 单位增加值（ Q_i ）所需要的淡水取用量（ W_i ）； s_i 是部门 i 的产出在总的工业产出中所占的比重，即部门 i 的工业增加值（ Q_i ）与总工业增加值（ Q ）的比率； e 是人均工业增加值，即总的工业增加值（ Q ）与全国总人口（ P ）的比值； P 表示全国总人口。

从基期 0 到第 t 年，工业淡水取用量的变化（ ΔW ）可以分解为四个驱动因素的作用：①用水强度效应（ Δf ）；②生产结构效应（ Δs ）；③经济规模效应（ Δe ）；④人口增长效应（ ΔP ）。这些变动可用方程（2）表示：

$$\Delta W = W_t - W_o = \Delta f + \Delta s + \Delta e + \Delta P \quad (2)$$

每一种驱动因素所引起的工业淡水用量的变化，可用方程（3）进行计算。

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sum_i L(W_i^t, W_i^o) \times \ln(f_i^t/f_i^o) \\ \Delta s &= \sum_i L(W_i^t, W_i^o) \times \ln(s_i^t/s_i^o) \\ \Delta e &= \sum_i L(W_i^t, W_i^o) \times \ln(e^t/e^o) \\ \Delta P &= \sum_i L(W_i^t, W_i^o) \times \ln(P^t/P^o) \end{aligned} \quad (3)$$

在这个层面上，总体工业用水的对数均值表达式可以由方程（4）给出：

$$L(W_i^t, W_i^o) = (W_i^t - W_i^o) / (\ln W_i^t - \ln W_i^o) \quad (4)$$

对工业能源消费的分解是类似的。工业能源消费的分解由方程 (5) 给出:

$$E = \sum_i E_i = \sum_i f'_i s_i e P = \sum_i \frac{E_i}{Q_i} \frac{Q_i}{Q} \frac{Q}{P} P \quad (5)$$

在方程 (5) 中, E 是总的能源消耗量; E_i 表示部门 i 的能源消耗量; f'_i 表示部门 i 的能耗强度, 即部门 i 的能源消耗量 (E_i) 与该部门的产业增加值 (Q_i) 的比值; s_i 是部门 i 的产出在总的工业产出中所占的比重, 即部门 i 的产业增加值 (Q_i) 与总工业增加值 (Q) 的比值; e 是人均工业增加值, 定义为全部工业增加值 (Q) 与全国人口 (P) 的比值; P 表示全国总人口。

从基期 0 到第 t 年, 工业能源消耗量的变化 (ΔE) 同样可以分解为四个驱动因素的作用: ①能源强度效应 ($\Delta f'$); ②生产结构效应 ($\Delta s'$); ③经济规模效应 ($\Delta e'$); ④人口增长效应 ($\Delta P'$)。这些变动可用方程 (6) 表示:

$$\Delta E = E_t - E_o = \Delta f' + \Delta s' + \Delta e' + \Delta P' \quad (6)$$

每一种驱动因素引起的能源消费量的变化, 可以用方程 (7) 进行计算。

$$\begin{aligned} \Delta f' &= \sum_i L(E_i^t, E_i^o) \times \ln(f_i^t / f_i^o) \\ \Delta s' &= \sum_i L(E_i^t, E_i^o) \times \ln(s_i^t / s_i^o) \\ \Delta e' &= \sum_i L(E_i^t, E_i^o) \times \ln(e^t / e^o) \\ \Delta P' &= \sum_i L(E_i^t, E_i^o) \times \ln(P^t / P^o) \end{aligned} \quad (7)$$

全部工业水资源利用的对数平均值由方程 (8) 给出。

$$L(E_i^t, E_i^o) = (E_i^t - E_i^o) / (\ln E_i^t - \ln E_i^o) \quad (8)$$

数据来源

本章分析了中国 36 个工业部门, 涵盖了能源生产、供应与制造业。由于数据缺失, 讨论范围不包括水生产与供应部门。每个部门 2002 ~ 2007 年

的工业增加值数据，来自《中国工业经济统计年鉴》（中国国家统计局年度公开数据）。每个工业部门 2012 年增加值数据，来自《2012 年中国投入产出表》（NBS，2012）。能源消耗数据来自 2014 年《中国能源统计年鉴》（NBS，2014a）。每个工业部门的淡水取用数据，来自历年《中国环境统计年报》。参考 Ang 和 Choi（1997）的研究方法，本章用一个极小的正值替代零值，从而解决对数形式变量取值为零的计算问题。如果这些正数接近于零，我们就可以得到收敛的结果。

结果与讨论

递减的淡水取用和增长的能源消费

2002 ~ 2012 年，中国的工业水资源利用量下降了 27.5%（根据中国环保部历年数据）。2002 ~ 2007 年，经济增长驱动淡水取用量增长了 60.9%（见图 2）；人口增长驱动淡水取用量增长了 2.7%（见图 2）。尽管经济和人口的增长对用水量都起到了正的促进作用，但这个阶段工业淡水取用量仍然下降了 6.1 个百分点。这是由用水强度变化（-58.6%）和结构调整（-11.1%）共同引起的。与 2002 ~ 2007 年的情况类似，2007 ~ 2012 年，工业用水强度和结构调整，部分抵消了经济和人口增长引起的淡水取用量的上升，从而使淡水取用量总体下降。

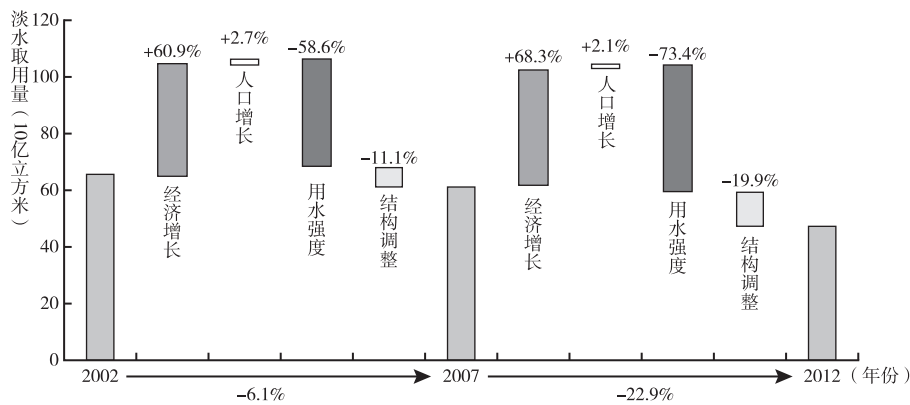


图 2 2002 ~ 2012 年工业淡水开发利用变动情况的分解结果

然而, 尽管工业淡水取用量呈现下降趋势, 但中国工业能源消费量在同期出现十分显著的上升 (见图 3)。计算发现, 2002 ~ 2012 年中国工业能源消费量上升了 137.9%。唯一制约能源消费不断上升的因素是能源强度的下降, 而这一影响因素在金融危机前后也表现出了显著的差异。在全球金融危机之前的五年里, 工业能源消费量上升了 87.5%。能源强度效应 (-18.8%) 完全被经济增长 (+88.3%)、人口增长 (+3.9%) 和结构调整 (+1%) 的作用所抵消。在全球金融危机爆发后的五年里, 能源强度的下降更显著 (-73.5%), 使工业能源消费的增长速度变缓。不过, 能源强度的下降仍未能完全抵消经济增长 (+87.9%)、人口增长 (+2.7%) 和结构调整 (+9%) 对能耗的促进作用。

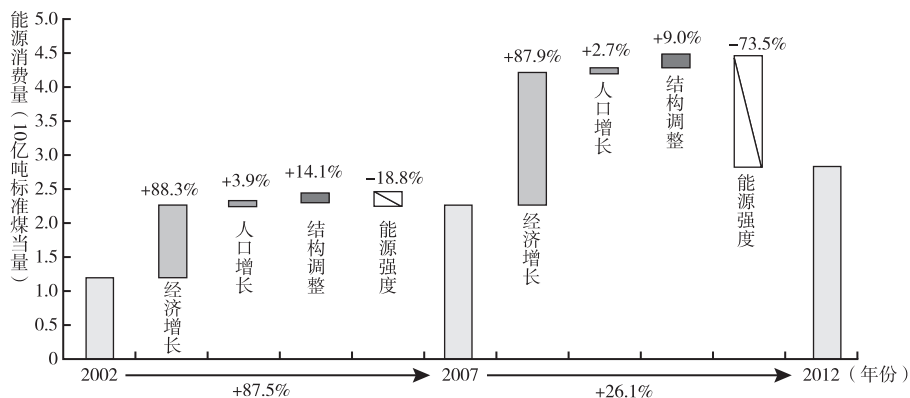


图 3 2002 ~ 2012 年工业能源消费变动的分解结果

通过对这两个驱动因素指标进行比较, 本章有以下发现。2002 ~ 2012 年, 经济发展始终是工业淡水取用量和能源消费量增加的主要驱动因素, 而资源使用强度的下降则是抑制资源消耗量增加的主要因素。此外, 工业淡水取用量和能源消费量表现出不同的变化趋势。出现这种差异的原因在于, 过去十年水资源利用效率提高的幅度要显著高于能源利用效率提高的幅度。用水强度的下降带来的用水量减少的效应, 超过了经济增长带来的用水量增加的效应, 从而在总体上降低了淡水取用量。但这一乐观的情况并没有出现在能源消费上: 能源强度的下降未能抵消经济增长对能耗增加的正向促进效应。

相互影响的经济增长与资源利用强度

从以上分析中可以看出，尽管水资源利用和能源消耗的总体变化趋势不同，但它们具有一些共同的驱动因素。图4提供了每一种驱动因素在单个工业部门中资源消耗的贡献程度。

从图3可以看出，在整个样本期，经济增长引起的能耗增加主要发生在四个工业部门：黑色金属冶炼及压延加工、非金属矿生产、化工生产和有色金属冶炼及压延加工。这些部门的能源强度显著下降（分别是26.6%、13.7%、13.7%和10.2%）[见图4（a）]。由经济增长驱动的淡水取用量的增加，基本发生在电力/热力供应部门。这一部门同时也是生产用水强度下降（56.1%）的主要贡献来源。这就是说，2002~2012年，那些生产规模显著增大的部门，也经历了显著的能源或水资源利用强度的提升[见图4（b）]。这一发现与Kopidou等（2016）关于二氧化碳排放与就业的共同趋势和驱动因素的研究结论是一致的。

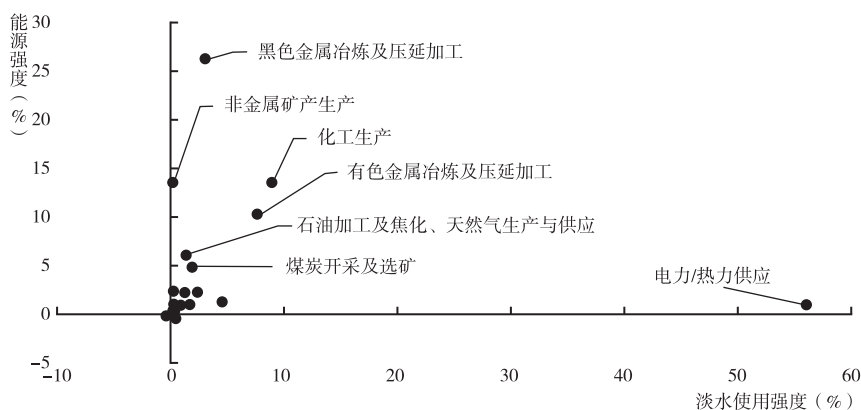
水资源利用和能源消耗的结构变化效应差异

本章研究发现，2002~2012年，结构调整对淡水资源利用和能源消费量的驱动效应存在较大差异（见图2和图3）。生产结构的调整，在一定程度上抑制了工业淡水取用量的增长，但增加了对能耗的需求。

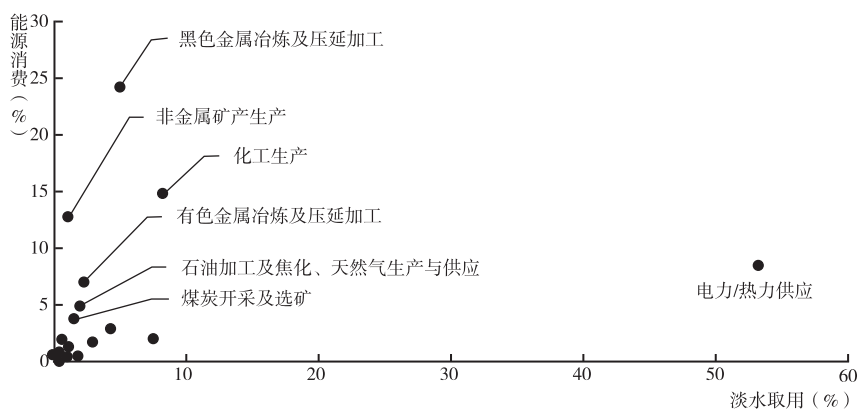
这种结构调整的效应差异产生的原因，可在部门层面上进一步分解说明（见表1）。在结构调整上，17个工业部门的经济增加值在总产出中的份额是下降的，这其中包含一些有代表性的高用水强度的工业部门，如电力/热力供应行业、印刷业、纺织业和饮料生产行业。同时，其他19个部门在工业总产出中的份额是上升的。一些具有代表性的高能源强度行业——如有色金属冶炼及压延加工业、黑色金属冶炼及压延加工业、煤炭开采和选矿行业——是工业能源消费和用水增长的主要来源。工业生产已经向节水但更加耗能的方向调整，这一事实表明中国需要持续改善产业结构。

重点部门的节能节水潜力

本章识别了对淡水利用和能源消费量增长贡献最大的部门。这些部门包含黑色金属冶炼和压延加工行业以及非加工金属矿生产部门。并且，对于



(a) 不同工业部门对资源使用强度效应的贡献程度



(b) 不同工业部门对经济增长效应的贡献程度

图4 不同工业部门的贡献程度

电力/热力供应行业以及有色金属冶炼和压延加工行业来说,虽然它们的能源消费量显著增加,但它们实际上是工业用水量下降的主要来源。基于工业淡水利用量和能源消耗的多部门分解结果(见表1),本章将详细分析各部门的资源用量贡献程度。

电力/热力供应部门

2002~2012年,电力/热力供应部门是工业用水量下降的最主要来源。在此期间,该部门淡水取用量约下降了229亿吨。虽然该部门的经济增长

表1 2002~2012年工业用水和能源消费的部门分解结果

工业部门	工业用水的分解结果(百万吨)					工业能源消费的分解结果(百万吨标准煤当量)				
	Δf	Δs	Δe	ΔP	总量	$\Delta f'$	$\Delta s'$	$\Delta e'$	$\Delta P'$	总量
黑色金属冶炼及压延加工	-2716.1	891.5	4064.6	143.0	2383.0	-499.1	169.7	736.9	26.2	433.7
化工生产	-7519.2	697.9	6638.5	245.1	62.3	-257.2	43.4	454.6	16.2	257.0
非金属矿生产	-288.8	228.0	793.1	26.8	759.0	-256.7	93.1	391.1	13.9	241.4
电力/热力供应	-46554.1	-21487.9	43487.9	1660.0	-22892.1	-19.3	-140.0	260.5	9.4	110.7
有色金属冶炼及压延加工	-6457.2	1636.8	1667.9	66.5	-3085.9	-192.2	136.0	157.2	5.6	106.6
石油加工及焦化、天然气生产与供应	-1307.4	35.7	1971.5	71.1	770.9	-115.3	5.7	207.1	7.4	104.9
煤炭开采与选矿	-1735.9	794.0	1143.0	41.7	242.9	-94.9	79.4	110.7	3.9	99.2
纺织业	-952.0	1327.0	3471.3	125.1	1317.5	-22.1	-34.8	90.4	3.2	36.7
橡胶与塑料制品业	-108.2	-30.4	209.2	7.6	78.2	-10.6	-6.4	43.7	1.5	28.2
金属制品	-1101.4	78.8	763.7	28.6	-230.2	-25.2	5.7	43.2	1.5	25.3
普通设备	-426.6	142.9	226.3	8.5	-49.0	-50.2	29.0	40.8	1.5	21.0
交通运输设备	-587.9	-74.6	519.0	19.4	-124.1	-14.5	-5.4	39.0	1.4	20.5
电子和电信设备	236.7	-214.2	496.9	17.0	536.4	0.9	-11.2	27.6	1.0	18.3
食品加工	-2150.2	536.6	2306.9	83.4	776.7	-43.1	11.2	48.1	1.7	18.0
电气设备和机械	-2.0	-23.2	135.6	4.7	115.0	-5.3	-3.7	25.0	0.9	16.9
黑色金属开采与选矿	-1363.0	1297.9	624.9	21.9	581.7	-45.2	40.9	19.6	0.7	16.1
造纸业	-3942.6	-2077.5	6223.3	228.9	432.1	-23.7	-18.9	55.7	2.0	15.0
非金属矿采选	-435.5	149.0	207.9	7.8	-70.7	-29.2	19.8	21.3	0.8	12.6

续表

工业部门	工业用水的分解结果(百万吨)					工业能源消费的分解结果(百万吨标准煤当量)				
	Δf	Δs	Δe	ΔP	总量	$\Delta f'$	$\Delta s'$	$\Delta e'$	$\Delta P'$	总量
木材加工、竹、藤、棕和秸秆生产	-143.3	61.4	90.5	3.3	11.8	-15.7	11.2	15.5	0.5	11.5
	-309.0	-319.3	841.9	30.6	244.2	-5.4	-9.0	23.9	0.9	10.3
制药业	-297.3	46.9	186.1	7.0	-57.4	-18.5	5.9	21.1	0.8	9.3
专用设备	-1083.9	608.7	800.3	28.7	353.8	-15.4	9.7	12.8	0.5	7.6
其他金属的采选	-1299.9	-61.4	996.4	37.4	-327.4	-17.0	-1.3	24.0	0.9	6.5
食品生产	-279.5	-377.2	1155.0	41.4	539.7	-8.6	-6.9	20.7	0.7	6.0
饮料生产	-22.8	-78.8	215.1	7.7	121.2	-1.8	-4.0	10.9	0.4	5.6
纺织业、服装、鞋、帽制造业	-163.0	-30.1	365.3	13.0	185.2	-0.1	-0.4	4.6	0.2	4.3
服装及其他纤维产品、制革、皮、毛及相关产品生产	-146.7	-115.6	114.0	4.4	-143.9	7.6	-25.8	20.3	0.7	2.8
手工制造和其他制造业,废物收集、分离、加工和处理	-18.6	-8.1	30.7	1.1	5.1	-2.0	-1.2	5.0	0.2	2.0
印刷业	-191.4	144.7	39.0	1.5	-6.3	-5.3	5.8	1.3	0.0	1.9
废弃物资源与废弃物的循环利用	-9.5	9.4	20.5	0.7	21.2	-3.3	1.3	3.6	0.1	1.7
教育与体育用品生产	-234.1	1.6	122.7	4.8	-105.0	-2.1	-0.6	3.9	0.1	1.4
仪器、仪表、文化和办公机械	-26.7	12.1	20.1	0.7	6.2	-3.1	1.6	2.7	0.1	1.3
家具制造业	-162.3	62.2	77.3	2.9	-20.0	-16.8	7.7	9.5	0.4	0.8
气体燃料的生产与供应	-44.4	-54.1	68.9	2.6	-27.0	-1.7	-3.0	3.8	0.1	-0.7
烟草加工业	-788.5	-317.8	831.3	31.3	-243.7	-19.5	-10.9	27.2	1.0	-0.7
化学纤维制造业	-336.9	-188.5	467.5	17.4	-40.6	-44.4	-22.6	56.8	2.1	-8.1
石油与天然气开采										

使用水量增加了约 435 亿吨，但用水强度的下降抵消了这部分影响并降低了淡水取用的总量（ $\Delta f = -466$ 亿吨）。同时，由于经济增长显著地增加了能源消费（ $\Delta e' = 260.5$ 百万吨标准煤当量），能源强度下降的抑制效应还不足以抵消 2002 ~ 2012 年能源消费总量的增长。因此，2002 ~ 2012 年，电力/热力供应行业的能源消费量约增加了 1.11 亿吨标准煤当量。此外，电力/热力供应部门的生产结构调整效应在降低能源消耗上也做出了最大贡献。

黑色金属冶炼及压延加工业

总体而言，2002 ~ 2012 年，黑色金属冶炼及压延加工部门的资源需求量占据了全部工业能源消费量和工业水资源开发用量的绝大部分。该部门生产规模和行业比重显著上升，但能源强度有微幅下降，从而使得能源消费总量增加了约 4.34 亿吨标准煤当量。同时，包含水资源利用强度在内的三种驱动因素对水资源利用的增长具有额外效应，结果导致 2002 ~ 2007 年的水资源用量上升了 33 亿吨。但 2007 ~ 2012 年，黑色金属冶炼及压延加工部门的能源强度和水资源利用强度都有显著改善。在此期间，钢铁生产部门能源效率的改进，极大地补偿了经济增长带来的能源和水资源用量增长的额外效应，全部能耗只增长了 9540 万吨标准煤当量。这些相当大的效率改进，也可以从该部门的水资源利用中看出来。2002 ~ 2007 年，钢铁部门水资源利用强度上升，引起水资源利用总量上升；但 2007 ~ 2012 年，水资源利用强度大幅下降，抑制了水资源消耗。

其他工业部门

除黑色金属冶炼及压延加工部门有着巨大的能源消耗之外，以下部门的能源消耗也大幅度增长：煤炭开采与选矿部门，有色金属冶炼及压延加工部门，化工生产，石油加工及焦化、天然气生产与供应行业。由于能源强度效应有所改善，这些部门的能源消费增长得到抑制。但能源强度的改进，并不足以抵消经济增长的额外效应。2007 ~ 2012 年，能源强度效应有所改善，但其对能源消费的抑制作用依然有限。同时，这些部门的淡水取用量并未表现出明显变化，因为水资源利用强度的改进几乎完全抵消了经济增长的效应。

结 论

通过对覆盖了能源生产、供应和制造业的 36 个工业部门的研究,本章探索了中国工业水资源利用和能源消费变化的驱动因素。本章使用了 LMDI 分解分析方法,应用 2002~2012 年的数据,并围绕 2008 年全球金融危机的潜在影响将样本分成了两个五年的时间区间。本章的主要发现如下。

第一,2002~2012 年,中国工业部门淡水取用量在下降,但能源消费量在不断增长。通过对驱动因素进行分析可以发现,经济增长是工业用水量和能源消耗量增加的主要原因,而资源使用强度的下降是抑制这一增长的主要因素。工业淡水取用量和能源消费量的不同趋势,可以用以下事实来解释:在过去十年中,工业用水强度的下降相比能源使用强度的下降表现出更明显的效应。用水强度下降带来的水资源取用量下降效应,超过了经济增长促进水资源取用量上升的效应,从而在总体上降低了淡水取用量。然而这种乐观局面并未在能源消费的变化趋势中出现。

第二,尽管淡水取用和能源消费的变化趋势显著不同,但两者的共同驱动因素经济增长和资源利用强度的相互影响作用是一致的。那些经历经济增长的部门在提升资源利用率方面更为积极。在全样本时期,经济增长所导致的能源消费上升主要发生在以下四个部门:黑色金属冶炼及压延加工业、非金属矿产品生产行业、化工生产行业 and 有色金属冶炼及压延加工行业。这四个部门也是生产中能源强度下降的最显著来源(分别是 26.6%、13.7%、13.7% 和 10.2%)。同时,由经济增长引致水资源利用量增长的部门,主要是与电力/热力供应相关的部门,其中电力/热力供应部门是生产中水资源利用强度下降的最主要来源(56.1%)。

第三,在整个样本期,产业结构调整对淡水取用量和能源消费的驱动效应是不同的。工业生产的淡水取用量随着产业结构的调整不断减少,但与此同时能耗量随之增加。

第四,本章还识别了一些工业部门,其淡水取用量和能源消费量的变化对整个工业部门具有显著影响。例如,黑色金属冶炼及压延加工业,在用水和能耗方面都具有最大的比重。电力/热力供应部门在提高工业用水效率方面起到了重要的作用。

虽然中国的水资源利用和能源消费之间相互关联,但国家目前对于水资源和能源的管理和决策是相对独立的。实现可持续发展要求管理者重视能源系统和水资源系统的关联性,在全国层面实施节水节能措施以实现协同管理。而探索中国政策与技术方案之间的协同效应以进一步支持综合管理方法的运用也是未来研究的一个重要方面。

参考文献

- Ang, B. W. (2015), LMDI decomposition approach: A guide for implementation, *Energy Policy*, 86: 233–238.
- Ang, B. W. and Choi, K. H. (1997), Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method, *The Energy Journal*, 18(3): 59–73.
- Ang, B. W. and Zhang, F. Q. (2000), A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies, *Energy*, 25(12): 1149–1176.
- Cansino, J. M., Román, R. and Ordóñez, M. (2016), Main drivers of changes in CO₂ emissions in the Spanish economy: A structural decomposition analysis, *Energy Policy*, 89: 150–159.
- Duarte, R., Pinilla, V. and Serrano, A. (2014), Looking backward to look forward: Water use and economic growth from a long-term perspective, *Applied Economics*, 46(2): 212–224.
- Feng, K., Davis, S. J., Sun, L. and Hubacek, K. (2015), Drivers of the US CO₂ emissions 1997–2013, *Nature Communications*, 6: 7714.
- Fujii, H., Managi, S. and Kaneko, S. (2013), Decomposition analysis of air pollution abatement in China: Empirical study for ten industrial sectors from 1998 to 2009, *Journal of Cleaner Production*, 59: 22–31.
- Guan, D., Su, X., Zhang, Q., Peters, G. P., Liu, Z., Lei, Y. and He, K. (2014), The socioeconomic drivers of China's primary PM_{2.5} emissions, *Environmental Research Letters*, 9(2): 024010.
- Hasanbeigi, A., Price, L., Fino-Chen, C., Lu, H. and Ke, J. (2013), Retrospective and prospective decomposition analysis of Chinese manufacturing energy use and policy implications, *Energy Policy*, 63: 562–574.
- He, J. (2010), What is the role of openness for China's aggregate industrial SO₂ emission? A structural analysis based on the Divisia decomposition method, *Ecological Economics*, 69(4), 868–886.
- Hoekstra, R., and van den Bergh, J. C. (2003), Comparing structural decomposition analysis and index. *Energy economics*, 25(1): 39–64.

- Jiang, Y., Cai, W., Wan, L. and Wang, C. (2015), An index decomposition analysis of China's interregional embodied carbon flows, *Journal of Cleaner Production*, 88: 289–296.
- Kang, J., Zhao, T., Liu, N., Zhang, X., Xu, X. and Lin, T. (2014), A multi-sectoral decomposition analysis of city-level greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China, *Energy*, 68: 562–571.
- Kenny, J. F., Barber, N. L., Hutson, S. S., Linsey, K. S., Lovelace, J. K. and Maupin, M. A. (2009), Estimated use of water in the United States in 2005, *United States Geological Survey Circular*: 1344.
- Kopidou, D., Tsakanikas, A. and Diakoulaki, D. (2016), Common trends and drivers of CO₂ emissions and employment: A decomposition analysis in the industrial sector of selected European Union countries, *Journal of Cleaner Production*, 112: 4159–4172.
- Lan, J., Malik, A., Lenzen, M., McBain, D. and Kanemoto, K. (2016), A structural decomposition analysis of global energy footprints, *Applied Energy*, 163: 436–451.
- Liu, L., Fan, Y., Wu, G. and Wei, Y. (2007), Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: An empirical analysis, *Energy Policy*, 35(11): 5892–5900.
- Liu, N., Ma, Z. and Kang, J. (2015), Changes in carbon intensity in China's industrial sector: Decomposition and attribution analysis, *Energy Policy*, 87: 28–38.
- Liu, Q. and Wang, Q. (2013), Pathways to SO₂ emissions reduction in China for 1995–2010: Based on decomposition analysis, *Environmental Science & Policy*, 33: 405–415.
- Lu, Q., Yang, H., Huang, X., Chuai, X. and Wu, C. (2015), Multi-sectoral decomposition in decoupling industrial growth from carbon emissions in the developed Jiangsu Province, China, *Energy*, 82: 414–425.
- Ma, C. (2014), A multi-fuel, multi-sector and multi-region approach to index decomposition: An application to China's energy consumption 1995–2010, *Energy Economics*, 42: 9–16.
- Ministry of Environmental Protection (MEP) (various years), *Annual statistical report on the environment in China*, Beijing: China Environmental Science Press.
- Ministry of Water Resources (MWR) (2002–2014), *China Water Resources Bulletin*, [in Chinese], Beijing: China Waterpower Press.

- National Bureau of Statistics (NBS) (various years), *China industrial economy statistical yearbook*, Beijing: China Statistics Press.
- National Bureau of Statistics (NBS) (2012), *Input-output table*, Beijing: China Statistics Press. Available from: data.stats.gov.cn/ifnormal.htm?u=/files/html/quickSearch/trcc/trcc01.html&h=740.
- National Bureau of Statistics (NBS) (2014a), *China energy statistical yearbook*, Beijing: China Statistics Press.
- National Bureau of Statistics (NBS) (2014b), *China Statistical Yearbook*, [in Chinese], Beijing: China Statistics Press.
- Ouyang, X. and Lin, B. (2015), An analysis of the driving forces of energy-related carbon dioxide emissions in China's industrial sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45: 838–849.
- Peters, G. P. and Hertwich, E. G. (2008), CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy, *Environmental Science & Technology*, 42(5): 1401–1407.
- State Council of China (2011), *Comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction during the 'Twelfth Five-Year Plan' period*, Beijing: State Council. Available from: gov.cn/zwgk/2011-09/07/content_1941731.htm.
- Su, B., and Ang, B. W. (2012), Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: some methodological developments, *Energy Economics*, 34(1): 177–188.
- Wu, L. and Huo, H. (2014), Energy efficiency achievements in China's industrial and transport sectors: How do they rate?, *Energy Policy*, 73: 38–46.
- Yan, X. and Fang, Y. (2015), CO₂ emissions and mitigation potential of the Chinese manufacturing industry, *Journal of Cleaner Production*, 103: 759–773.
- Zeng, L., Xu, M., Liang, S., Zeng, S. and Zhang, T. (2014), Revisiting drivers of energy intensity in China during 1997–2007: A structural decomposition analysis, *Energy Policy*, 67: 640–647.
- Zha, D., Zhou, D. and Ding, N. (2009), The contribution degree of sub-sectors to structure effect and intensity effects on industry energy intensity in China from 1993 to 2003, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4): 895–902.

- Zhang, Y. and Da, Y. (2015), The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 1255–1266.
- Zhang, Z., Shi, M. and Yang, H. (2012), Understanding Beijing's water challenge: A decomposition analysis of changes in Beijing's water footprint between 1997 and 2007, *Environmental Science & Technology*, 46(22): 12373–12380.
- Zhao, Y., Ke, J., Ni, C. C., McNeil, M., Khanna, N. Z., Zhou, N., Fridley, D. and Li, Q. (2014), A comparative study of energy consumption and efficiency of Japanese and Chinese manufacturing industry, *Energy Policy*, 70: 45–56.

(陈三攀 译)