

引用格式:戴铁军,王婉君,刘瑞. 中国社会经济系统资源环境压力的时空差异[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1942-1955. [Dai T J, Wang W J, Liu R. Spatio-temporal variation of resource and environmental pressure in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1942-1955.] DOI: 10.18402/resci.2017.10.13

中国社会经济系统资源环境压力的时空差异

戴铁军,王婉君,刘 瑞

(北京工业大学循环经济研究院,北京 100124)

摘 要:直接物质投入(DMI)和本地过程排放(DPO)是物质流分析框架中两个重要指标,可以反映一个经济系统的资源环境压力。本文基于经济系统物质流分析方法(EW-MFA, Economy-Wide Material Flow Analysis)核算中国30个省(市)1992年和2014年的人均DMI和人均DPO指标,分析中国社会经济系统资源环境压力的时空变化。结果显示:对比1992年和2014年,各省份的资源环境压力均呈增大趋势,其中黄河中游和西北各省份的资源环境压力增长最快;各省份的资源环境压力差距较大,总体呈现西北高、东南低的分布格局,其中内蒙古、山西、青海、宁夏等西北和黄河中游省份的资源环境压力最大,北京、上海、天津、广东等东部省份的资源环境压力最小,这一分布情况主要由各省份资源禀赋和产业结构差距较大导致;中国各经济区均面临不同程度的资源环境问题,但改变中国资源环境压力大、可持续发展潜力不足的关键在西北和黄河中游以及北部沿海和东部沿海经济区。

关键词:社会经济系统;物质流分析;EW-MFA;资源环境压力;时空差异;可持续发展;中国

DOI: 10.18402/resci.2017.10.13

1 引言

改革开放以来,中国经济取得了举世瞩目的成就,也带来了严重的资源环境问题。2010年,中国的资源消耗量占到全世界的34%,矿产资源消耗量占到亚洲全部消耗量的70%以上^[1]。2014年化石燃料燃烧排放的二氧化碳达到了90.23亿t,与1990年相比增加了307%^[2]。巨大的资源消耗和废弃物排放造成了严重的环境污染和生态破坏,给中国的可持续发展带来了巨大挑战。因此,解决资源环境问题是当务之急。

资源环境问题的出现是人类活动对自然生态系统干扰的结果。人类一方面从自然界开采资源,另一方面向自然界排放废弃物。当这些开采的资源和排放的废弃物对自然界的影响超过其承受能力时,就会出现资源环境问题。因此,解决资源环境问题的关键在于降低资源开采量和废弃物排放

量。经济系统物质流分析法(EW-MFA, Economy-Wide Material Flow Analysis)将经济系统看成一个黑箱,以重量为单位描述进出经济系统的物质流,可以全面核算一个经济系统运转所需的资源和排放的废弃物,从而衡量和评价一个经济系统的资源环境压力。故,本文将采用该方法分析中国社会经济系统的资源环境问题。

关于中国国家层面物质流的研究众多。如陈效速等^[3,4]、李刚等^[5,6]、刘敬智等^[7]、徐明等^[8]、王鹤鸣等^[9]均研究了中国不同时期的物质流动情况。随着国家层面物质流分析方法逐渐成熟, SERI (Sustainable Europe Research Institute)¹⁾ 和 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)²⁾ 分别建立了全球尺度的国家物质流数据库,核算了上百个国家的物质流输入指标,其中就包括中国。通过以上学者的分析,中国国家层面的

收稿日期:2017-02-08; 修订日期:2017-07-11

基金项目:北京市教育委员会社科计划重点项目(SZ20161005002)。

作者简介:戴铁军,男,河北唐山人,教授,博士生导师,主要研究方向为产业生态学与循环经济。E-mail: daitiejun@bjut.edu.cn

1) SERI (Sustainable Europe Research Institute). Global Resource Extraction 1980 to 2013. Online Database. <http://www.materialflows.net/materialflowsnet/data/data-download/>.

2) CSIRO And UNEP. Asia-Pacific Material Flows Online Database. <http://www.cse.csiro.au/forms/form-mf-start.aspx>.

<http://www.resci.cn>

2017年10月

物质流动情况得到了较为充分的揭示。

与此同时,一些学者也将EW-MFA的方法引入省市层面,开展了区域物质流研究。2004年,徐一剑等考察了贵阳市1978-2002年间的物质流动情况^[10]。此后,北京^[11]、陕西^[12]、辽宁^[13]、安徽^[14]、天津^[15]、上海^[16]、广东^[17,18]、江苏^[19,20]、海南^[21]、常州市武进区^[22]、张掖^[23]、邯郸^[24]、青岛^[25]、吉林四平^[26]、厦门^[27]、京津冀^[28]等均开展了物质流分析。这些分析主要以某个地区的社会经济系统为研究对象,分析该系统的物质流输入和输出情况。值得注意的是,虽然这些研究均采用EW-MFA的分析框架,但均为独立研究,其物质分类、数据来源和指标选取等差异较大。例如,徐明等分析辽宁省物质流时未计算省际的调入调出量^[13],而黄晓芬等分析上海市物质流时统计了该指标^[16]。张音波等在计算广东省物质流时将生活垃圾排放量纳入了物质输出指标^[17],但丁平刚等在计算海南省物质输出量时则未计算^[21]。此外,一些研究在收集数据时使用了国家层面的数据,如沈怀军对安徽的分析^[14];而一些研究仅采用了当地的数据,如吴小庆等的研究^[19]。在指标选取方面,一些研究仅分析了物质输入指标,如李丁等对国内19个城市的分析^[29];而一些研究不仅分析了物质输入和输出指标,还计算了隐藏流,如马忠等对张掖的分析^[23]。以上差异造成了各研究的结果缺乏可比性,如徐明计算的2003年辽宁省的直接物质投入量为3.27亿t,而黄晓芬计算的同一时期的上海市直接物质投入量为3.47亿t,这就是说2003年辽宁省的直接物质投入量比上海市低,显然与实际不符。因此,虽然目前许多地区开展了物质流分析,但其结果的可比性较低,展现各地区实际差距存在困难,难以从国家层面指导各地区发展。

为弥补以上不足,本文尝试从省(市)层面出发,研究中国各省(市)1992年和2014年的物质流动的特征与趋势,以评估和分析中国经济系统资源环境压力的时空变化,从而探索降低资源环境压力的途径。

2 研究方法 with 数据说明

2.1 系统边界界定

中国内地共有31个省级行政区域。鉴于西藏数据不完善,本文仅分析其余30个省级行政区域(以下简称省份)。需要注意的是,1997年,重庆从四川划出,设为直辖市。为保证数据的一致性,1992年的四川物质流数据不包括重庆的部分。需要说明的是,由于数据获取困难,此次研究也不包括香港、台湾和澳门。

2.2 研究方法 with 数据处理

依据欧盟和OECD的物质流分析框架^[30,31](如图1所示),支撑一个地区经济系统运转的直接物质投入(DMI, Direct Material Input)包括本地开采(DE, Domestic Extraction)的物质以及外地调入的物质。这些物质进入经济系统后,经过生产、消费以及废弃过程,一部分作为净存量(NAS, Net Additions to Stock)留在经济系统中;一部分通过系统边界调出到其他地区;其余部分变为排放物和废弃物返回到环境中。返回环境中的物质被称为本地过程排放(DPO, Domestic Processed Output)。相关指标及计算公式见表1。

直接物质投入(DMI)和本地过程排放(DPO)是物质流分析框架中最重要的两个指标,分别代表了该省份的资源压力和环境压力。各省份人口和经济发展水平差距巨大,而人口多且经济发达省份的资源环境压力显然会高于人口少且经济落后的

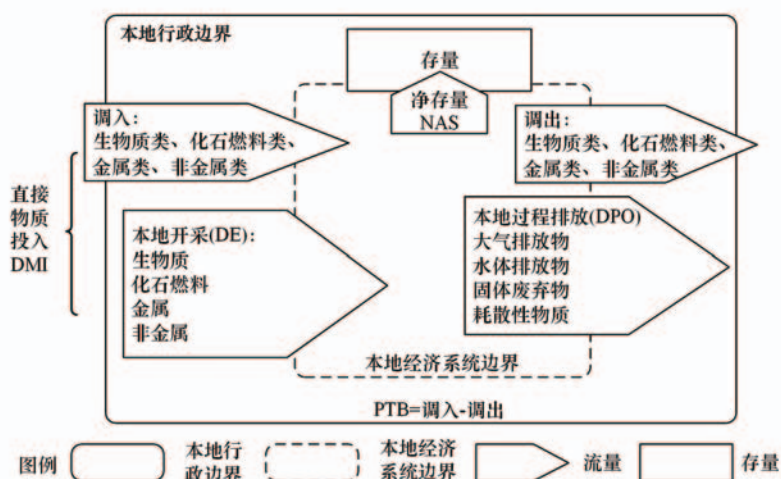


图1 EW-MFA的基本核算框架与指标体系

Figure 1 Economy-wide material flow analysis framework and indicator system

表1 本文涉及的物质流指标及其计算公式

Table 1 Conception and computational formula of indicators used in this article	
指标	含义
本地开采(<i>DE</i>)	由本地开采并进入经济系统的物质,包括生物质、化石燃料、金属和非金属。
调入	由外地输送到本地的原材料、半成品和成品。
直接物质投入(<i>DMI</i>)	进入经济系统的物质总量, $DMI=DE+$ 调入。
本地过程排放(<i>DPO</i>)	经过生产和消费过程后排放到环境中的废弃物,包括大气排放物、水体排放物、固体废弃物和耗散性物质。
调出	由本地输送到外地的原材料、成品和半成品。
实物贸易平衡(<i>PTB</i>)	经济系统的实物贸易盈余或赤字, $PTB=$ 调入-调出。
资源产出率	指消耗单位资源所创造的GDP,资源产出率= GDP/DMI

省份,因此对比分析各省份 *DMI* 和 *DPO* 的绝对量缺乏实际意义。故本文选取人均 *DMI* 和人均 *DPO* 指标来反映各省份的资源环境压力,考察各省份的资源产出率以对比其发展潜力,并结合人均 *PTB* 指标分析各省份物质输入和输出的构成情况。人口和GDP数据均来自《中国统计年鉴(1993-2015)》^[38],GDP转化为2005年不变价。

根据欧盟01导则^[30]和欧盟2013版编制指南^[32],核算中国30个省份的*DMI*和*DPO*数据。鉴于国家公布的统计数据有更高的质量且各省份数据的一致性较好,本文将以国家级年鉴和数据库作为主要

数据来源,以地方年鉴和数据库作为补充。本地开采和本地过程排放的物质分类和数据来源如表2所示。

调入调出是区域物质流分析的难点,结合石磊等所建立的区域物质流核算框架及测算方法^[46]估算。计算公式如下:

$$D_t = C_t - Q_t \tag{1}$$

式中 D_t 为该区域第 t 年某种物质的调入调出量; C_t 为该物质第 t 年的消耗量; Q_t 为该物质第 t 年的生产量。当第 t 年该物质的消耗量大于生产量时, D_t 为正数,则认为该物质存在调入;相反, D_t 为负数,则

表2 物质分类、数据来源与估算方法

Table 2 Material classification and data sources				
一级	二级	三级	数据来源	估算方法
本地 开采	生物质	农作物	《中国农业年鉴(1993-2015)》 ^[33]	无
		木材、竹材	《中国林业年鉴(1993-2015)》 ^[34]	无
		水产品	《中国农业年鉴(1993-2015)》 ^[33]	无
		已使用的农作物残余	《中国农业年鉴(1993-2015)》 ^[33]	估算,估算方法见参考文献[35]
		饲料作物和放牧生物	《中国农业年鉴(1993-2015)》 ^[33]	估算,估算方法见参考文献[35]
	化石燃料	原煤、原油、天然气	《中国能源统计年鉴(1991-2015)》 ^[36]	无
	金属	黑色金属、有色金属等	《中国矿业年鉴》 ^[37] 和各省份矿产资料	无
	非金属	冶金辅助材料类、化工原料类、黏土类、建筑类等	《中国矿业年鉴》 ^[37] 和各省份矿产资料	无
		混凝土用砂石	《中国统计年鉴(1993-2015)》 ^[38]	估算,估算方法见参考文献[39]
本地 过程 排放	水体排放物	有机物、总氮、总磷、氨氮、石油类、挥发酚、重金属和氰化物	《中国环境年鉴(1993-2015)》 ^[40]	无
	大气排放物	SO ₂ 、工业烟粉尘	《中国环境年鉴(1993-2015)》 ^[40]	无
		CO ₂	《中国能源统计年鉴(1991-2015)》 ^[36]	估算,估算方法见参考文献*
	固体废弃物	工业固废	《中国环境年鉴(1993-2015)》 ^[40]	无
		生活垃圾	《中国统计年鉴(1993-2015)》 ^[38]	估算,估算方法见参考文献[41,42]
		建筑垃圾	《中国统计年鉴(1993-2015)》 ^[38]	估算,估算方法见参考文献[43-45]
	耗散性物质	农药、农用化肥、农用薄膜	《中国农业年鉴(1993-2015)》 ^[33]	无
		有机肥	《中国农业年鉴(1993-2015)》 ^[33]	估算,估算方法见参考文献[32]

注: * IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.

2017年10月

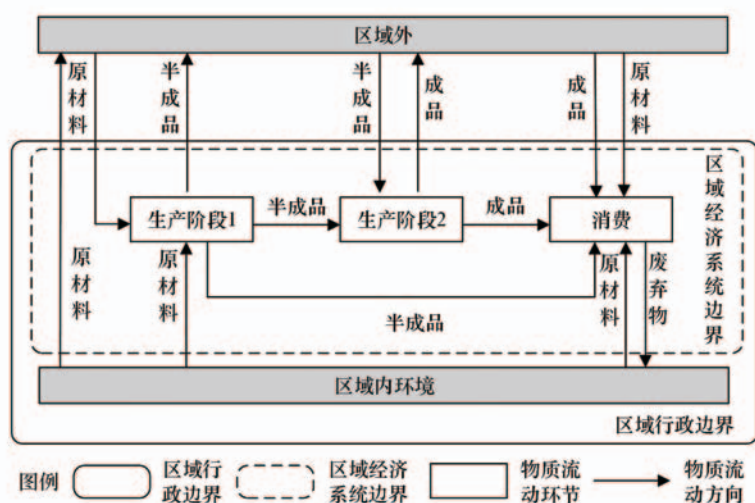


图2 区域调入调出核算框架

Figure 2 Calculating framework of regional imports and exports

认为该物质存在调出。如图2所示,调入调出的物质按产品种类可分为原材料、半成品和成品。其生产量一般可以直接从年鉴上获得。但消费量数据往往不可得,需要估算,可根据半成品的产量估算原材料的消费量,根据成品的产量估算半成品的消费量。成品的消费量可根据社会保有量或人均消费量来估算。具体估算方法如下。

生物质方面,将居民和工业所消费的半成品和成品量全部折算成原材料量,仅统计原材料的调入调出量。居民消费包括粮食、食用油、蔬菜及食用菌、猪肉、牛羊肉、禽类、蛋类、奶类、水产品、干鲜瓜果。其中,食用油折算为大豆量^[47]。肉蛋奶按照各自饲料转化率转为饲草重量^[48]。工业消费包括成品糖、糖果、方便食品、糕点、饼干、味精、酱油、白酒、啤酒、黄酒、葡萄酒,并将其转为粮食的量^[49]。

能源的调入调出量可由《中国能源统计年鉴(1991-2015)》^[36]直接得到。

金属方面,估算了铁矿石、钢材的调入调出量。铁矿石消费量按照各地钢材产量乘以3.85^[50]折算。钢材消费量计算了建筑、铁路机车、铁路客车、铁路货车、锅炉、大中型拖拉机、汽车、自行车和发电设备所消耗的钢材量。金属成品的调入调出将归到成品中加以说明。非金属方面,估算水泥和平板玻璃的调入调出量,其消

费量来自《中国建筑业统计年鉴(1997-2015)》^[51]。

成品方面,统计了居民主要耐用消费品的调入调出量,即家用汽车、摩托车、洗衣机、电冰箱、彩色电视机、空调、照相机、移动电话、固定电话、风扇、计算机、微波炉。生产数据来自统计年鉴。消费数据包括新增消费量和更新消费量。新增消费量由各省份居民耐用品拥有总量估算得到,具体公式如下:

$$C_t = S_t - S_{t-1} \quad (2)$$

C_t 为第 t 年的某种耐用品的消费

量; S_t 为第 t 年某种耐用品的全社会

存量; S_{t-1} 为第 $t-1$ 年某种耐用品的全社会存量。各省份居民耐用品拥有总量由平均每百户年末主要耐用品拥有量与各省份家庭户数相乘得到。更新消费量根据产品寿命估算得到^[52-54]。各产品数据为数量单位,需转化为重量单位^[52,55]。

3 结果与分析

3.1 物质输入端

3.1.1 人均 DMI 时空差异分析

本文采用人均 DMI 表征各省份资源压力,如图3所示。区域划分以国务院发展研究中心报告中提

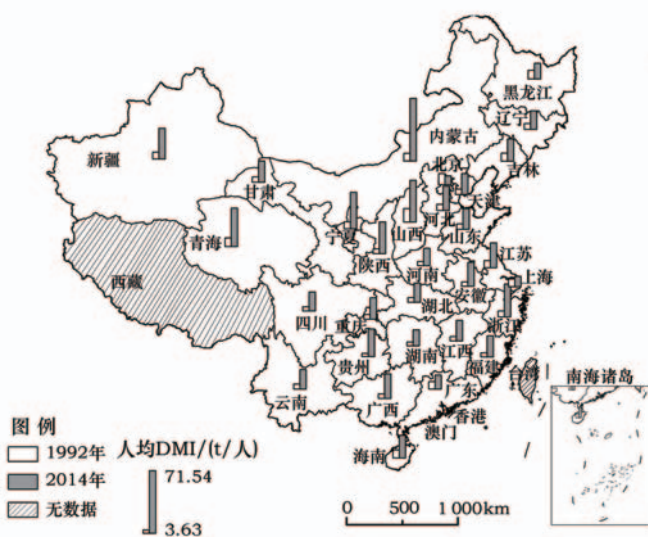


图3 1992年和2014年中国各省(自治区、直辖市)人均 DMI

Figure 3 DMI per capita in 30 provinces of China in 1992 and 2014

出的八大经济区为标准。具体为:北部沿海经济区为北京、天津、河北和山东;东部沿海经济区为江苏、上海和浙江;南部沿海经济区为福建、广东和海南;长江中游经济区为安徽、湖北、湖南和江西;黄河中游经济区为内蒙古、陕西、山西和河南;西北经济区为宁夏、甘肃、青海和新疆;西南经济区为四川、云南、广西、贵州和重庆;东北经济区为黑龙江、吉林和辽宁。北部沿海、东部沿海和南部沿海经济区统称为东部,黄河中游和长江中游经济区统称为中部,西部包括西南和西北经济区。

1992年,各省份人均DMI为(3.63~15.27)t/人,最高与最低相差3.21倍。人均DMI最高的5个省份为山西(15.27t/人),北京(12.7t/人)、青海(9.98t/人)、黑龙江(9.92t/人)和辽宁(9.39t/人),最低的五个省份为贵州(3.63t/人)、湖南(4.50t/人)、河南(4.55t/人)、安徽(4.73t/人)和四川(4.76t/人)。吉林、浙江、河北、新疆、宁夏、江苏、广东、内蒙古、上海、海南、辽宁、黑龙江、青海、北京和山西的人均DMI超过全国平均水平(6.49t/人)。从分布上看,东北、东部沿海和南部沿海经济区的人均DMI较高,长江中游、西南和北部沿海经济区的人均DMI较小。

2014年,各省份人均DMI差距变大,为(9.99~71.54)t/人,最高与最低相差6.16倍。人均DMI最高的5个省份为内蒙古(71.54t/人)、山西(47.56t/人)、青海(43.91t/人)、宁夏(41.69t/人)和浙江(37.24t/人),最低的五个省份是北京(9.99t/人)、上海(11.87t/人)、广东(15.95t/人)、黑龙江(17.79t/人)和湖南(18.33t/人)。海南、安徽、河北、广西、江苏、贵州、新疆、陕西、浙江、宁夏、青海、山西、内蒙古的人均DMI超过全国平均水平(25.55t/人)。从分布上看,与1992年相比,黄河中游和西北经济区的人均DMI增长明显,已成为中国资源压力最高的两个地区。东部沿海经济区的资源压力仍较高。南部沿海经济区的资源压力较小,其次是东北和长江中游经济区。资源压力向中国北部集中。

从发展速度上看,各省份人均DMI

均有较大幅度的增长,平均增长速度为6.43%。年均增长速度最高的五个省份为贵州(10.34%)、内蒙古(10.03%)、陕西(9.03%)、安徽(8.29%)和浙江(8.12%),最低的5个省份为北京(-1.09%)、上海(1.27%)、黑龙江(2.69%)、广东(2.88%)和辽宁(4.64%)。有18个省份的年均增长率高于全国平均水平,分别为甘肃、河北、湖南、湖北、河南、青海、新疆、重庆、四川、江西、福建、宁夏、广西、浙江、安徽、陕西、内蒙古和贵州。这些省份主要位于西北、西南、黄河中游和长江中游经济区,说明这些省份的资源压力增加较快。

3.1.2 资源利用效率时空差异分析

图4展示了各省份1992年和2014年的资源产出率,这是衡量可持续发展的一个重要指标。较高的资源产出率代表了较高的经济效益和较低的资源消耗,即更大的发展潜力。1992年,各省份资源产出率为(252.07~1722.66)元/t,最高与最低相差5.83倍。资源产出率最高的五个省份为上海(1722.66元/t)、天津(1393.24元/t)、北京(1255.51元/t)、浙江(898.94元/t)和福建(835.07元/t),最低的五个省份为山西(252.07元/t)、青海(340.87元/t)、甘肃(398.73元/t)、广西(422.97元/t)和宁夏(438.72元/t)。山西、青海、甘肃、广西、宁夏、海南、安徽、内蒙古、黑龙江、江西、四川、云南、贵州、河北、湖北、吉林、陕西和辽宁的资源产出率低于全国平均水平

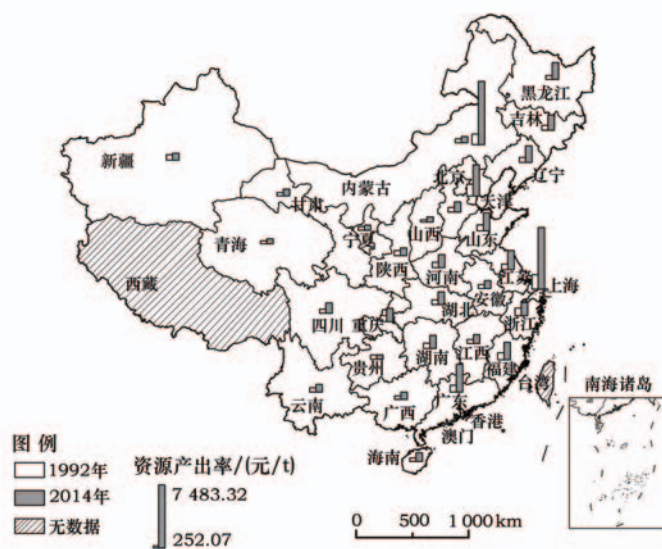


图4 1992年和2014年中国各省(自治区、直辖市)资源产出率

Figure 4 Resource productivity in 30 provinces of China in 1992 and 2014

2017年10月

(616.60元/t)。从分布上看,资源产出率较高的省份主要分布于东部沿海、北部沿海和南部沿海经济区,黄河中游、西北和西南经济区的资源产出率最低。

2014年,各省份的资源产出率为(532.84~7483.32)元/t,最高与最低相差13.04倍,各省份差距明显扩大。资源产出率最高的5个省份为北京(7483.32元/t)、上海(7315.93元/t)、天津(3702.55元/t)、广东(3295.41元/t)和江苏(2270.31元/t),最低的5个省份为贵州(532.83元/t)、山西(590.13元/t)、宁夏(597.58元/t)、青海(606.44元/t)和内蒙古(733.67元/t)。贵州、山西、宁夏、青海、内蒙古、甘肃、新疆、广西、云南、陕西、安徽、海南、江西、河北、四川、湖北和河南的资源产出率低于全国平均水平(1542.83元/t)。从分布上看,与1992年类似,资源产出率最高的省份位于南部沿海、东部沿海和北部沿海经济区,西北、西南和黄河中游经济区最低。资源产出率呈现出明显的“东、中、西”梯度发展格局。

从增长速度看,资源产出率的年平均增长速度为4.23%,低于人均DMI的增长速度,说明中国技术水平的提升速度未能跟上资源投入的增长速度。增长速度最快的5个省份为北京(8.45%)、上海(6.79%)、黑龙江(6.79%)、广东(6.60%)和江苏(5.83%),最慢的5个省份为贵州(0.15%)、新疆(1.02%)、宁夏(1.41%)、陕西(1.84%)和内蒙古(2.27%)。贵州、新疆、宁夏、陕西、内蒙古、浙江、云

南、青海、甘肃、广西、安徽、江西、重庆、河北、山西、海南、湖南、河南、四川和福建的增长速度低于全国平均水平。与人均DMI类似,这些省份同样集中于西北、西南、黄河中游和长江中游经济区,即中西部。中西部和东部的差距正在扩大。

综合考察人均DMI和资源产出率可知,西北和黄河中游经济区的人均DMI较高,资源产出率较低,其中内蒙古、山西、青海和宁夏总体情况最差。北上广等东部省份的人均DMI较小,资源产出率较高。

3.1.3 物质输入构成

图5和图6比较了各省份2014年人均DMI以及人均PTB的主要组成成分。由图可知,陕西、贵州、内蒙古、新疆、四川、安徽、云南、江西、山西、湖南、青海、河南、海南、重庆、宁夏、广西、湖北、黑龙江、河北和甘肃的人均调入量占人均DMI比例小于20%,说明大部分省份的发展主要依靠本地资源。上海(81.7%)、天津(68.51%)、北京(60.23%)的调入量占比最高,对外部资源的依赖程度最大。

分析2014年各省份4种资源的人均占有量可知,各省份的资源禀赋差异较大。化石燃料是最为集中的资源,人均占有量为(0.00~40.56)t/人,内蒙古、山西、陕西、宁夏、新疆、贵州和青海的人均占有量高于全国平均水平(3.10t/人)。从分布上看,黄河中游和西北经济区的人均占有量最高,其次是东北、北部沿海和西南经济区,长江中游、东部沿海和

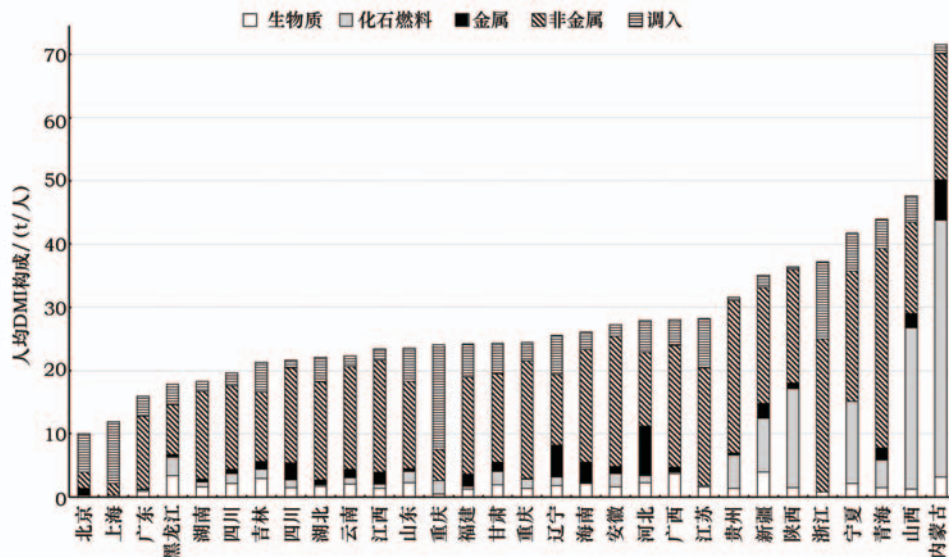


图5 2014年中国各省(自治区、直辖市)人均DMI的规模与构成

Figure 5 Scale and structure of DMI per capita in 30 provinces of China in 2014

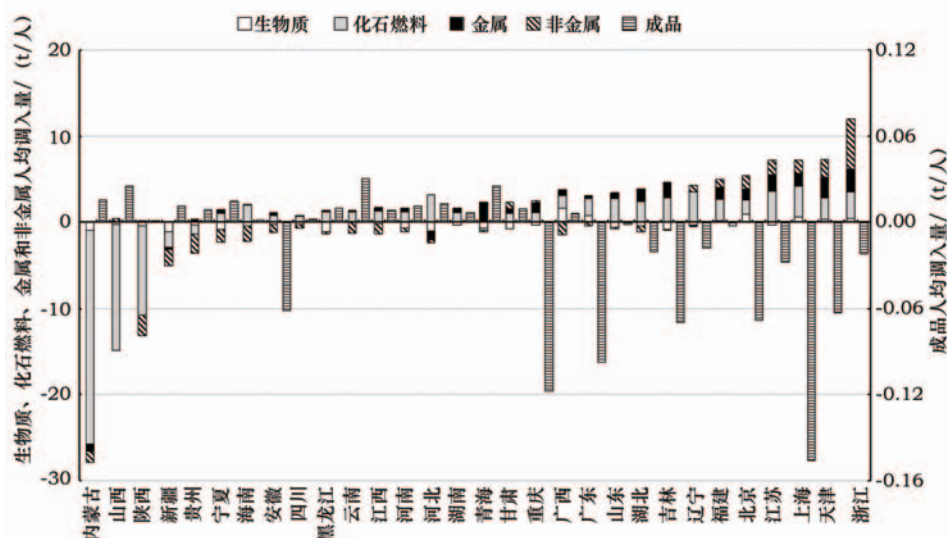


图6 2014年中国各省(自治区、直辖市)人均PTB的规模和构成

Figure 6 Scale and structure of PTB per capita in 30 provinces of China in 2014

注:正数为调入,负数为调出。

南部沿海经济区的人均占有量最低。与此类似,黄河中游和西北经济区的人均化石燃料净调出量同样较高。显然,这些经济区为其他地区的发展提供了能源保障。人均化石燃料调入量最高的省份位于长江中游和北部沿海经济区。

金属的集中程度仅次于化石燃料,人均占有量为(0.00~7.98)t/人,河北、内蒙古、辽宁、海南、四川、新疆、山西、福建、江西和青海的人均占有量高于全国平均水平(1.51t/人)。从分布上看,黄河中游、北部沿海以及西北经济区的人均占有量最高,其次是东北、南部沿海和长江中游经济区,东部沿海和西南经济区最低。而黄河中游、北部沿海和西北经济区也是人均金属净调出量最大的经济区。这些经济区正是全国主要的金属矿产开采与冶炼基地。人均金属净调入量较大的省份主要分布于东部沿海经济区。

各省生物质的人均占有量为(0.22~3.97)t/人,新疆、广西、黑龙江、内蒙古、吉林、河北、山东、海南、宁夏、河南、云南、甘肃的人均占有量高于全国平均水平(1.80t/人)。人均占有量最高的省份分布于黄河中游、东北和北部沿海经济区,其次是西北和长江中游经济区,南部沿海、东部沿海以及部分西南经济区的人均占有量最小。黄河中游、东北和西北经济区也是生物质人均净调出量最大的经济

区。这些经济区是中国主要的农产品产区,为全国提供了粮食保障。人均净调入量最大的经济区为东部沿海和西南经济区。

非金属是分布最广且占DMI比例最高的资源,人均占有量为(1.89~31.63)t/人,青海、浙江、贵州、安徽、宁夏、内蒙古、广西、重庆、江苏、新疆、陕西、海南、江西、云南、湖北、福建的人均占有量高于全国平均水平(15.07t/人)。人均占有量最高的经济区为西北、东部沿海和西南经济区,其次是长江中游、黄河中游和南部沿海经济区,东北和北部沿海经济区最低。与其他资源类似,西北和西南经济区的人均非金属净调出量也较高,东北和北部沿海经济区的人均净调入量较高。值得注意的是,东部沿海经济区的人均占有量和人均调入量均较高,这可能是由于这些经济区是中国的制造业基地需要大量资源,且城市建设消耗了大量的非金属产品。

由以上分析可知,各省份资源禀赋和产业结构的差异带来了省间大量的物质转移。西北和黄河中游经济区能矿资源最为丰富,尤其是内蒙古、新疆、山西和陕西。这些经济区以采矿冶金以及农牧业为主,仅采矿业就占到工业总产值的40%以上(2014年),是资源调出的主要区域。西北和黄河中游经济区以原材料参与价值链分工,处于价值链的底端,故人均DMI高,资源产出率低。北部沿海、东

2017年10月

部沿海和南部沿海经济区资源最为匮乏,尤其是上海、天津、北京和广东,是中国制造业中心,也是资源调入和成品调出较大的区域,其资源调入量占到各省份总调入量的40%左右,成品调出量占到总调出量的60%左右。这些经济区的产业大多处于价值链的高端环节,因此资源产出率较高。

3.2 物质输出端

3.2.1 人均DPO时空差异分析

图7展示了各省份人均DPO的变化情况。1992年,各省份人均DPO为(1.44~7.17)t/人,最高与最低相差3.98倍。相比于人均DMI,各省份人均DPO的差异并不显著,说明各省份所承受的环境压力较为平均。人均DPO最高的五个省份为上海(7.17t/人)、北京(7.14t/人)、青海(6.45t/人)、天津(5.62t/人)和新疆(5.23t/人),最低的省份为海南(1.44t/人)、福建(1.83t/人)、安徽(2.00t/人)、广西(2.17t/人)和江西(2.18t/人)。上海、北京、青海、天津、新疆、山西、吉林、宁夏、辽宁、河北、内蒙古、甘肃、湖北、黑龙江和重庆的人均DPO高于全国平均水平(3.01t/人)。从分布上看,西北、东北和北部沿海经济区的人均DPO最高,南部沿海、西南和长江中游经济区的人均DPO最低。

2014年,各省份人均DPO为(7.05~23.67)t/人。与1992年相比,差距有所缩小,最高与最低相

差2.36倍。人均DPO最高的5个省份为宁夏(23.67t/人)、青海(23.25t/人)、内蒙古(22.14t/人)、新疆(17.05t/人)和山西(12.99t/人),最低的五省份为江西(7.05t/人)、海南(7.18t/人)、湖南(7.23t/人)、安徽(7.45t/人)和广西(7.57t/人)。宁夏、青海、内蒙古、新疆、山西、河北、辽宁、天津、山东、江苏、上海、浙江和贵州的人均DPO高于全国平均水平(9.8t/人)。从分布上看,2014年的情况与1992年较为近似。西北和北部沿海经济区的人均DPO较高,黄河中游经济区增长较快已取代东北经济区成为人均DPO较高的地区,西南和长江中游经济区最低。

从增长速度看,增长速度最快的5个省份为内蒙古(8.73%)、宁夏(7.95%)、福建(7.73%)、海南(7.58%)和山东(6.31%),最慢的五省份为北京(0.32%)、上海(1.74%)、吉林(2.86%)、天津(3.31%)和黑龙江(3.88%)。内蒙古、宁夏、福建、海南、山东、江苏、贵州、浙江、安徽、青海、河南、广西、河北、陕西、云南、四川和新疆的年均增长速度超过全国平均水平(5.52%)。增长最快的省份主要分布于黄河中游、东部沿海、南部沿海以及西北经济区,东北和长江中游经济区的增长速度最慢。

总体上看,西北和黄河中游经济区人均DPO的规模和增长速度均较高,这些地区的生态环境状况日趋恶化,需要给予更多关注。

3.2.2 物质输出构成

本地过程排放包括大气排放物、水体排放物、固体废弃物和耗散性物质。不同排放物和废弃物所造成的环境影响各不相同。下面将逐一分析这四种物质。

图8展示了2014年各省份4种物质的人均排放量。可知,大气排放物占比最高,为78.12%~95.15%。宁夏(21.77t/人)、青海(19.45t/人)、内蒙古(19.37t/人)、新疆(15.05t/人)和山西(11.92t/人)是人均大气排放量最高的5个省份,这些省份同时也是人均碳排放量较高的省份。由于CO₂是最主要的大气排放量,人均碳排放量较高导致这些省份的人均大气排放量高。从分布

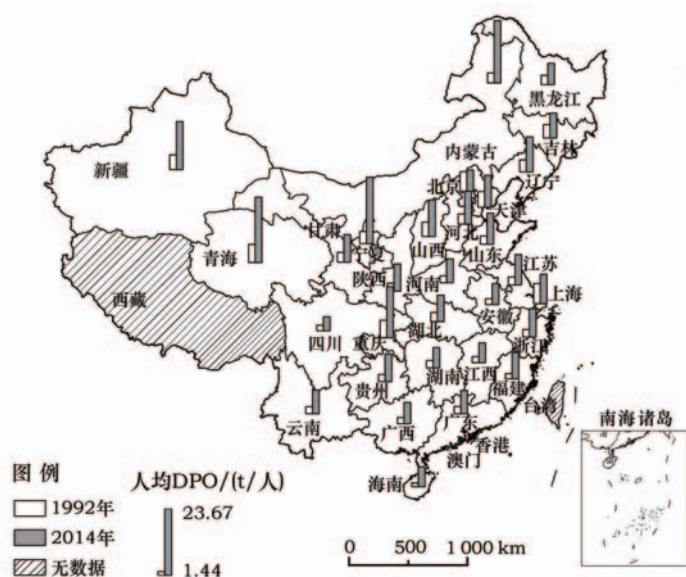


图7 1992年和2014年中国各省(自治区、直辖市)人均DPO

Figure 7 DPO per capita in 30 provinces of China in 1992 and 2014

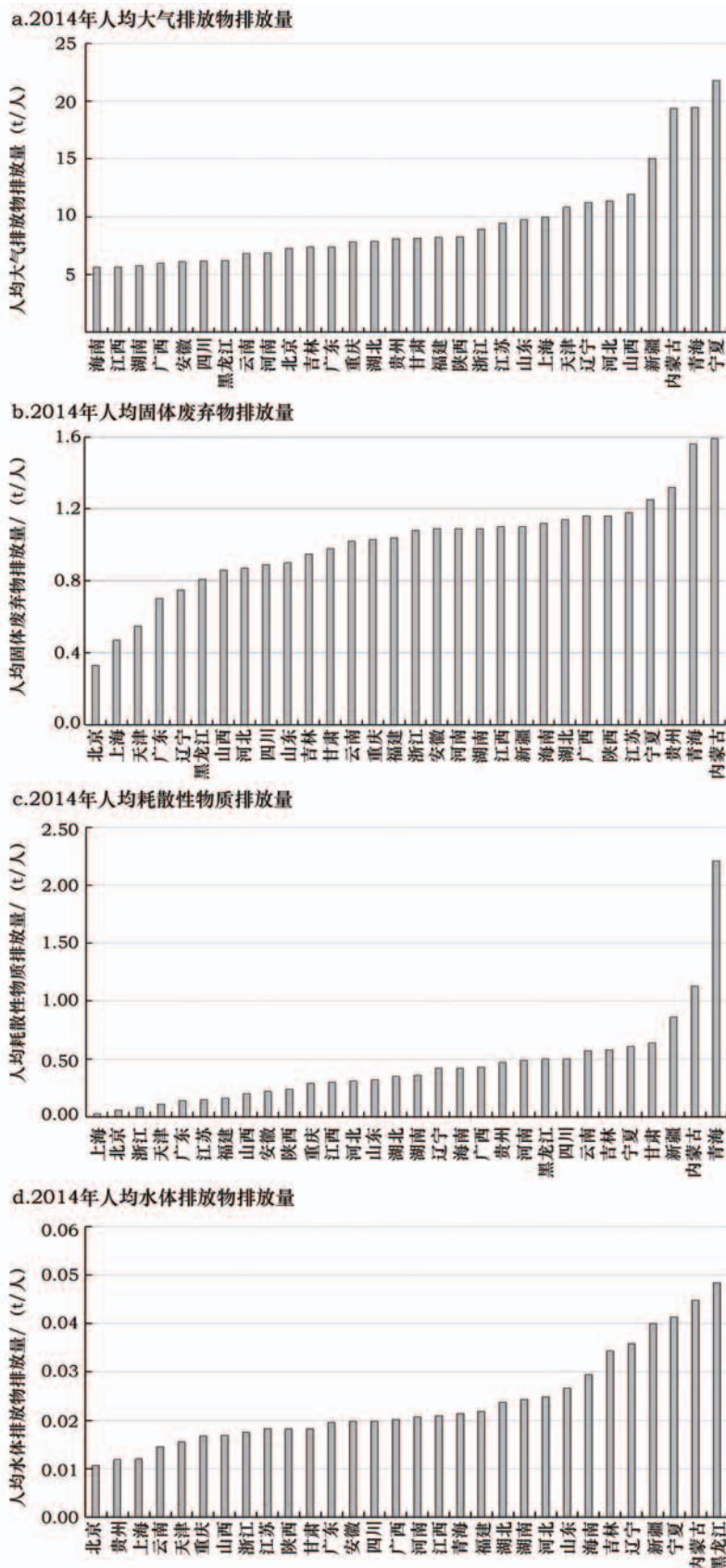


图8 2014年中国各省份四种排放物人均排放量

Figure 8 Per capita emissions for the four types of materials in 30 provinces of China in 2014

上看,人均大气排放量较高的省份主要集中在西北、黄河中游以及北部沿海经济区,西南和长江中游经济区的排放量较低。

固体废弃物是DPO的第二大来源,各省份人均固体废弃物排放量差距较小,占比为4.30%~15.66%。人均排放量最高的5个省份为内蒙古(1.59t/人)、青海(1.56t/人)、贵州(1.32t/人)、宁夏(1.25t/人)和江苏(1.18t/人)。随着生活水平提高和城市化建设加快,各省份生活垃圾和建筑垃圾的排放量逐渐增加,已成为固体废弃物的主要来源,控制固体废弃物要从生活垃圾和建筑垃圾入手。从分布上看,人均固体废弃物排放量较大的省份集中于西北和长江中游经济区,东北和北部沿海经济区的人均排放量最低。

耗散性物质是DPO的第三大来源,主要来自农牧业生产,占比为0.29%~9.50%。人均排放量最高的五个省份为青海(2.21t/人)、内蒙古(1.13t/人)、新疆(0.86t/人)、甘肃(0.64t/人)和宁夏(0.61t/人)。这些省份是中国农作物和畜产品的主要产地,产生了大量的农牧业废弃物。耗散性物质难以回收和处理,并会随着空气和水流扩散到其他地区,要给与足够的重视。要从源头入手,降低农业生产资料的使用量,并妥善处置牲畜粪便。从分布上看,西北、西南、黄河中游和东北经济区的人均耗散性物质排放量较大,东部沿海、南部沿海经济区的人均排放量最低。

水体排放物占DPO比例最小,为0.09%~0.64%。由于水的流动性,水体排放物产生的环境影响较大,一直是中国关注的重点。人均排放

2017年10月

量最大的五个省份为黑龙江(0.05t/人)、内蒙古(0.04t/人)、宁夏(0.04t/人)、新疆(0.04t/人)和辽宁(0.04t/人)。从分布上看,人均排放量较高的地区主要为东北、北部沿海和西北经济区,东部沿海和西南经济区最低。

4 讨论

4.1 数据可信度分析

如前所述,目前尚无学者分析30个省份的物质流动情况。为检验数据的可信度,本文将30个省份的DMI合计与两个最新的研究成果,即UNEP^[41]以及王鹤鸣等^[9]的数据进行对比,如图9所示。从图9可知,DMI各省份合计与王鹤鸣等的数据较为接近,与UNEP的趋势较为一致。三者的变异系数由1995年的18.79%降至2008年的7.98%,差异度逐年下降,可认为30个省份的数据有较高的可信度。

4.2 八大经济区的资源环境压力

由各省份的人均DMI、人均DPO和资源产出率指标可得出中国八大经济区的资源环境压力排名,见表3。人均DMI和人均DPO越小,资源产出率越高,则该经济区排名越高,说明该经济区发展情况越好。分析表3可知:

(1)从总体上看,中国资源环境压力呈现西北高、东南低的分布特征。南部沿海和长江中游经济区的发展情况最佳,其次是东北、北部沿海、东部沿海和西南经济区,西北和黄河中游经济区的情况最差。

(2)与1992年相比,2014年南部沿海、北部沿海和东北经济区总体排名有所提升,黄河中游、西北和西南经济区总体排名呈下降明显,长江中游和东部沿海经济区总体无变化。这说明随着西部大开发和中部崛起战略的实施,中国资源环境压力正在向中西部转移。

(3)西北、黄河中游以及北部沿海、东部沿海经济区应是中国重点关注的地区。西北和黄河中游经济

区资源环境压力最大,且是中国重要的生态屏障和生态系统最为脆弱的地区。因此,协调好这些经济区的经济与环境关系,保护好生态环境,对中国可持续发展尤为重要。北部沿海和东部沿海经济区是中国制造业中心,每年从其他地区调入了大量的物质,占到全国总调入量的40%左右。故,降低这些经济区的资源压力,可同样减轻其他地区的资源环境影响。应从这些经济区入手改变中国资源环境压力大,资源产出率不足的局面。

5 结论

本文对比分析了30个省份1992年和2014年的人均物质输入输出指标的规模和结构,以及资源产出率,并在此基础上分析了中国八大经济区的资源环境压力情况,展现了中国资源环境压力的时空变化。研究结果显示:

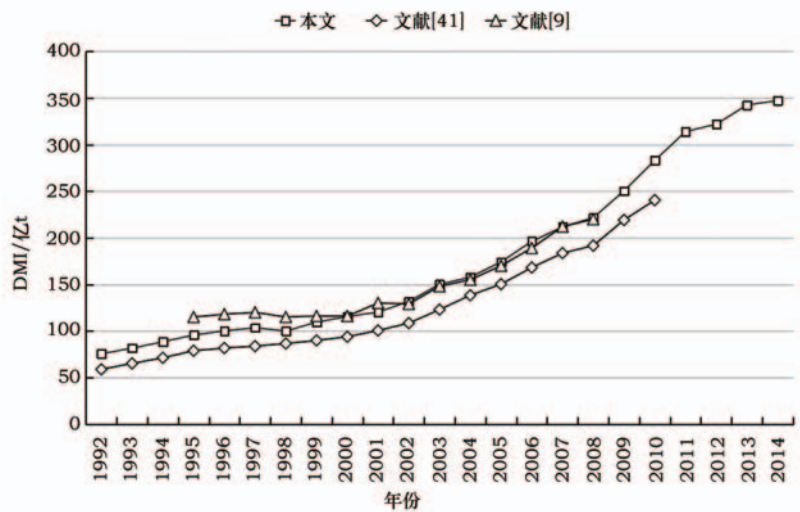


图9 中国各省(自治区、直辖市)DMI合计结果与其他研究
国家层面数据的比较

Figure 9 Comparison of the total DMI in 30 provinces of China with that in national level

表3 八大经济区排名情况

Table 3 Rankings of eight economic zones

经济区	人均DMI		资源产出率		人均DPO		总分	
	1992年	2014年	1992年	2014年	1992年	2014年	1992年	2014年
东北	8	2	4	4	7	4	19	12
北部沿海	3	4	3	3	6	6	15	13
东部沿海	7	6	1	2	5	5	13	13
南部沿海	6	1	2	1	1	3	9	5
黄河中游	4	8	8	7	4	7	16	22
长江中游	1	3	5	5	3	1	9	9
西北	5	7	7	8	8	8	20	23
西南	2	5	6	6	2	2	10	13

(1)各省份的资源压力差异较大。2014年各省份的人均DMI界于(9.99~71.54)t/人。且该差异呈扩大趋势,最高值与最低值的差异由1992年的3.21倍升至2014年的6.16倍。从分布上看,中国的资源压力呈现北高南低的分布格局,黄河中游、西北经济区的资源压力最大,尤其是内蒙古、山西、青海和宁夏。

(2)各省份资源产出率差异同样较大且呈扩大趋势。2014年各省份的资源产出率界于(532.84~7483.31)元/t,最高值与最低值的差异由1992年的5.83倍升至2014年的13.04倍。从分布上看,资源产出率呈现沿海高内陆低的分布格局。西北和黄河中游经济区的资源产出率最低,且增长速度较慢,尤其是内蒙古、山西、青海和宁夏;南部沿海、东部沿海和北部沿海的资源产出率最高,最高的省份为北京、上海、广东和天津。

(3)各省份的发展主要依靠内部资源,但资源禀赋和产业结构差异较大,并由此带来了区域间大量的物质转移。4种资源中,化石燃料分布最为集中,主要分布于内蒙古、山西、陕西和宁夏等西北和黄河中游经济区;其次是金属和生物质,主要分布于河北、内蒙古、新疆等黄河中游和北部沿海经济区;非金属的分布最为广泛。从分布上看,西北和黄河中游经济区资源能源最为丰富,尤其是内蒙古、新疆、山西和陕西,为其他地区提供了大量的原材料。这些地区以能矿产业和农牧产业为主,以原材料参与价值链分工,故资源压力较大,可持续发展潜力不足。北部沿海、东部沿海和南部沿海经济区资源最为匮乏,尤其是上海、天津、北京和广东,是中国的制造中心,为其他地区提供了大量的成品。这些地区多处于价值链较高端的环节。

(4)相比于资源端,各省份环境压力的差距并不显著,人均DPO区间为(1.44~7.17)t/人。且省份之间的差异呈减小趋势,由1992年的3.98倍降至2014年的2.36倍。其中,宁夏、青海、内蒙古和新疆4省的规模和增长速度均较快,需予以重点关注。从经济区来看,该指标呈现出北部高,南部低的特征。长江中游、西南和南部沿海经济区的人均排放量最小,其次是东北、东部沿海和北部沿海经济区,西北和黄河中游经济区的压力最大。

(5)4种排放物中,大气排放物占比最高(78.12%~95.15%),其次是固体废弃物(4.30%~15.66%)和耗散性物质(0.29%~9.50%),水体排放物占比最小(0.09%~0.64%)。碳排放、生活和建筑垃圾以及农业排放的规模和占比日益扩大,需重点关注。

(6)中国八大经济区均面临着不同程度的资源环境问题。相比而言,西北和黄河中游、北部沿海和东部沿海经济区应是改变中国资源环境压力大,可持续发展潜力不足的关键。西北和黄河中游经济区的资源环境问题最为严峻,尤其是内蒙古、新疆、山西、陕西、宁夏和青海。可借鉴南部沿海经济区发展的经验和教训,通过提升西北和黄河中游经济区的产业结构,设立环保门槛,鼓励企业引进先进的节能减排技术等减少发展中的资源环境压力。北部沿海和东部沿海经济区是中国的制造业中心,代表省份为上海、北京、天津、江苏、浙江和山东。要注重研发与创新,推动制造业产业转型升级,实现制造业产业由劳动与资本型密集型向技术知识密集型产业转变。

参考文献(References):

- [1] Schaffartzik A, Mayer A, Gingrich S, et al. The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950-2010[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26(1): 87-97.
- [2] International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion: 2015 Edition[M]. Paris: OECD/IEA, 2015.
- [3] Chen X, Qiao L. A preliminary material input analysis of China[J]. *Population & Environment*, 2001, 23(1): 117-126.
- [4] 陈效速, 赵婷婷, 郭玉泉, 等. 中国经济系统的物质输入与输出分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(4): 538-547. [Chen X Q, Zhao T T, Guo Y Q, et al. Material input and output analysis of Chinese economy system[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2003, 39(4): 538-547.]
- [5] 李刚. 基于可持续发展的国家物质流分析[J]. 中国工业经济, 2004, (11): 11-18. [Li G. Material flow analysis of nations based on sustainable development [J]. *China Industrial Economy*, 2004, (11): 11-18.]
- [6] 李刚, 张彦伟, 孙丰云. 中国环境经济系统的物质需求量研究[J]. 中国软科学, 2005, (11): 39-44. [Li G, Zhang Y, Sun F Y. Study on material requirement of environmental-economic sys-

2017年10月

- tem in China[J]. *China Soft Science*, 2005, (11):39-44.]
- [7] 刘敬智,王青,顾晓薇,等. 中国经济的直接物质投入与物质减量分析[J]. 资源科学, 2005, 27(1):46-51. [Liu J Z, Wang Q, Gu X W, et al. Direct material input and dematerialization analysis of Chinese economy[J]. *Resources Science*, 2005, 27(1):46-51.]
- [8] Ming X, Zhang T. Material flows and economic growth in developing China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2006, 11(1):121-140.
- [9] Wang H, Seiji H, Yuichi M, et al. Resource use in growing China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4):481-492.
- [10] 徐一剑,张天柱,石磊,等. 贵阳市物质流分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12):1688-1691. [Xu Y, Zhang T, Shi L, et al. Material flow analysis in Guiyang[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(12):1688-1691.]
- [11] 戴铁军,张沛. 基于物质流分析的北京市绿色GDP核算[J]. 生态经济, 2016, 32(8):129-134. [Dai T J, Zhang P. Accounting of the green GDP in Beijing based on material flow analysis approach[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(8):129-134.]
- [12] 张思锋,雷娟. 基于MFA方法的陕西省物质减量分析[J]. 资源科学, 2006, 28(4):145-150. [Zhang S F, Lei J. Analyzing dematerialization of Shaanxi Province based on MFA[J]. *Resources Science*, 2006, 28(4):145-150.]
- [13] 徐明,贾小平,石磊,等. 辽宁省经济系统物质代谢的核算及分析[J]. 资源科学, 2006, 28(5):127-133. [Xu M, Jia X P, Shi L, et al. Accounting and analyzing material metabolism in the economic system of Liaoning Province[J]. *Resources Science*, 2006, 28(5):127-133.]
- [14] 沈怀军. 安徽省环境经济系统的物质流分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007. [Shen H J. The Material Flow Analysis of Environment Economic System in Anhui Province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.]
- [15] 刘伟,鞠美庭,于敬磊,等. 天津市经济-环境系统的物质流分析[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(6):8-11. [Liu W, Ju M T, Yu J L, et al. Analysis on material flow of economic and environmental system in Tianjin[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2006, 19(6):8-11.]
- [16] 黄晓芬,诸大建. 上海市经济-环境系统的物质输入分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3):96-99. [Huang X F, Zhu D J. Material input analysis of Shanghai economic and environmental system[J]. *China Population Resources and Environment*, 2007, 17(3):96-99.]
- [17] 张音波,陈新庚,彭晓春,等. 广东省环境经济系统的物质流分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5):1021-1031. [Zhang Y B, Chen X G, Peng X C, et al. Material Flow Analysis (MFA) of the environment and the economy in Guangdong Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5):1021-1031.]
- [18] 张音波,夏志新,陈新庚,等. 基于物质流分析方法的区域可持续发展动态研究-以广东省为例[J]. 资源科学, 2007, 29(6):212-218. [Zhang Y B, Xia Z X, Chen X G, et al. Dynamics of regional sustainable development based on material flow analysis: a case study in Guangdong Province[J]. *Resources Science*, 2007, 29(6):212-218.]
- [19] 吴小庆,王远,刘宁,等. 基于物质流分析的江苏省区域生态效率评价[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10):890-895. [Wu X Q, Wang Y, Liu N, et al. Regional eco-efficiency evaluation of Jiangsu Province based on MFA[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10):890-895.]
- [20] 黄和平,毕军,袁增伟,等. 基于MFA与AHP的区域循环经济发展动态评价-以江苏省为例[J]. 资源科学, 2009, 31(2):278-287. [Huang H P, Bi J, Yuan Z W, et al. Regional circular economic development assessment based on MFA and AHP: a case study of Jiangsu Province, China[J]. *Resource Science*, 2009, 31(2):278-287.]
- [21] 丁平刚,田良,陈彬. 海南省环境经济系统的物质流特征与演变[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8):66-71. [Ding P G, Tian L, Chen B. Material flow characteristics and evolution of environmental-economic system in Hainan Province from 1990-2008[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8):66-71.]
- [22] 黄和平,毕军,李祥妹,等. 区域生态经济系统的物质输入与输出分析-以常州市武进区为例[J]. 生态学报, 2006, 26(8):2578-2586. [Huang H P, Bi J, Li X M, et al. Material Flow Analysis (MFA) of an eco-economic system: a case study of Wujin District, Changzhou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8):2578-2586.]
- [23] 马忠,龙爱华,尚海洋. 黑河流域张掖市物质流账户体系的初步构建[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6):953-959. [Ma Z, Long A H, Shang H Y. Preliminary construction of the regional material flow accounts in Zhangye[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6):953-959.]
- [24] 楼俞,石磊. 邯郸市物质流分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4):201-204. [Lou Y, Shi L. Material flows analysis for Handan City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4):201-204.]
- [25] 钱翌,杨立杰,段克. 青岛市环境-经济系统的物质流分析[J]. 青岛科技大学(社会科学版), 2009, 25(1):76-80. [Qian Y, Yang L J, Duan K. Analysis on material flow of environmental economic system in Qingdao[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Social Sciences)*, 2009, 25(1):76-80.]
- [26] 沈万斌,赵涛,刘鹏,等. 物质流分析模型的应用研究[J]. 东北师大学报(自然科学), 2009, 41(1):127-132. [Shen W B, Zhao T, Liu P, et al. Application of material flow analysis model[J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 41(1):127-132.]

- [27] 魏婷,朱晓东. 厦门市生态经济系统物质流分析[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3800-3810. [Wei T, Zhu X D. Material flow analysis of Xiamen City's eco-economic system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3800-3810.]
- [28] 戴铁军,赵迪. 基于物质流分析的京津冀区域物质代谢研究[J]. 工业技术经济, 2016, 35(4): 124-133. [Dai T J, Zhao D. Research on material metabolism of Beijing-Tianjing-Hebei region based on material flow analysis[J]. *Industrial Technology Economy*, 2016, 35(4): 124-133.]
- [29] 李丁,汪云林,付允,等. 基于物质流核算的数据包络分析-国内19个主要城市的实证研究[J]. 资源科学, 2007, 29(6): 176-181. [Li D, Wang Y L, Fu Y, et al. The efficiency analysis of material flow account for the 19 cities' of China[J]. *Resources Science*, 2007, 29(6): 176-181.]
- [30] Eurostat. Economy Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators-A Methodological Guide[M]. Luxembourg: Statistical Office of the European Union, 2001.
- [31] OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). Measuring Material Flows and Resource Productivity: Volume 1[M]. Paris: OECD, 2008.
- [32] Eurostat. Economy Wide Material Flow Accounts: Compilation Guide 2013[M]. Luxembourg: European Statistical Office, 2013.
- [33] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993-2015. [Editorial Committee Of China Agriculture Yearbook. China Agriculture Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993-2015.]
- [34] 国家林业局. 中国林业年鉴[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993-2015. [State Forestry Administration. China Forestry Yearbook [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993-2015.]
- [35] 毕于运,王道龙,高春雨,等. 中国秸秆资源评价与利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008. [Bi Y Y, Wang D L, Gao C Y, et al. Straw Resource Evaluation and Utilization in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008.]
- [36] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991-2015. [Department of Energy Statistics, NBOS. China Energy Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1991-2015.]
- [37] 中国矿业年鉴编辑部. 中国矿业年鉴[M]. 北京: 地震出版社, 2002-2015. [Editorial office of China Mining Yearbook. China Mining Yearbook[M]. Beijing: Seismological Press, 2002-2015.]
- [38] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1993-2015. [National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1993-2015.]
- [39] UNEP International Resource Panel. Global Material Flows And Resource Productivity[R]. Paris: United Nations Environment Programme, 2016.
- [40] 中国环境年鉴编辑委员会. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 1993-2015. [Editorial Committee of China Environment Yearbook. China Environment Yearbook[M]. Beijing: China Environment Yearbook Press, 1993-2015.]
- [41] 岳波,张志彬,孙英杰,等. 我国农村生活垃圾的产生特征研究[J]. 环境科学与技术, 2014, (6): 129-134. [Yue B, Zhang Z B, Sun Y J, et al. Characteristics of rural household solid wastes in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, (6): 129-134.]
- [42] 宋国君. 中国城市生活垃圾管理状况评估研究报告[R]. 北京: 国家发展与战略研究院, 2015. [Song G J. Assessment Report of Municipal Solid Waste Management in China[R]. Beijing: National Development and Strategy Institute, 2015.]
- [43] 刘贵文,徐可西,张梦俐,等. 被拆除建筑的寿命研究-基于重庆市的实地调查分析[J]. 城市发展研究, 2012, 19(10): 109-112. [Liu G W, Xu K X, Zhang M L, et al. A study on the life-span of demolished buildings: based on the investigation of demolished building in Chongqing[J]. *Urban Development Studies*, 2012, 19(10): 109-112.]
- [44] 陈军,何晶晶,邵立明,等. 拆毁建筑垃圾产生量的估算方法探讨[J]. 环境卫生工程, 2007, 15(6): 1-4. [Chen J, He P J, Shao L M, et al. Methods Discussion on Quantity Estimating of Demolition Waste[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2007, 15(6): 1-4.]
- [45] 王罗春,赵由才. 建筑垃圾处理与资源化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. [Wang L C, Zhao Y C. Disposal and Recycling of Construction Waste [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.]
- [46] 石磊,楼俞. 城市物质流分析框架及测算方法[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 196-200. [Shi L, Lou Y. Methodology and procedure for urban-wide material flows analysis[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 196-200.]
- [47] 乔娟. 中国大豆国际竞争力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004. [Qiao J. The International Competitiveness of Soybean in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2004.]
- [48] 周道玮,刘华伟,孙海霞,等. 中国肉品供给安全及其生产保障途径[J]. 中国科学院院刊, 2013, (6): 733-739. [Zhou D W, Liu H W, Sun H X, et al. Meat supply security and strategy of guaranteeing the production of meat in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, (6): 733-739.]
- [49] 陈永福. 中国食物供求与预测[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004. [Chen Y. Food Supply Demand and Projection in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004.]
- [50] 卜庆才. 物质流分析及其在钢铁工业中的应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005. [Bu Q C. Substance Flow Analysis and its Application in Steel Industry[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.]
- [51] 国家统计局固定资产投资统计司. 中国建筑业统计年鉴[M].

2017年10月

- 北京:中国统计出版社,1997-2015. [Department of Investment and Construction Statistics of the National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook on Construction[M]. Beijing: China Statistics Press,1997-2015.]
- [52] 张伟,蒋洪强,王金南,等. 我国主要电子废弃物产生量预测及特征分析[J]. 环境科学与技术,2013,36(6):195-199. [Zhang W, Jiang H Q, Wang J N, *et al.* Amount of electronic waste generated in China: prediction and characteristics analysis[J]. *Environmental Science & Technology*,2013,36(6):195-199.]
- [53] 刘景洋,乔琦,昌亮. 我国各省市报废汽车量预测[J]. 再生资源与循环经济,2011,4(3):31-33. [Liu J Y, Qiao Q, Chang L. Forecast on the amount of end-of-life vehicles in province and municipalities in China[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*,2011,4(3):31-33.]
- [54] 国家经济贸易委员会,国家发展计划委员会,公安部,等. 摩托车报废标准暂行规定[J]. 道路交通管理,2002,(10):46-46. [State Economic and Trade Commission, State Development Planning Commission, Ministry of Public Security, *et al.* Interim provisions on the scrap standard of motorcycles[J]. *Road Traffic Manage*,2002,(10):46-46.]
- [55] 张礼军. 基于物质流和生态足迹核算的甘肃省循环经济评价研究[D]. 兰州:兰州大学,2011. [Zhang L J. Evaluation on Recycle Economy of Gansu Province Based on Accounting of Material Flowing and Eco- footprint[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2011.]

Spatio-temporal variation of resource and environmental pressure in China

DAI Tiejun, WANG Wanjun, LIU Rui

(Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Direct material input (DMI) and domestic processed output (DPO) are the two main indicators in the economy- wide material flow analysis (EW- MFA) reflecting resource and environmental pressure in an economic system. To analyze spatial and temporal changes in China's resource and environmental pressure, we calculated DMI per capita input and DPO per capita for 30 provinces in 1992 and 2014 based on EW-MFA. Results of this study show that resource and environmental pressures in these provinces have increased during the past 23 years. The northwest and middle reaches of Yellow River regions have the highest growth rate in resource and environmental pressure. These provinces have very large differences in resource and environmental pressure, which is obviously high in the northwest and low in the southeast. The northwest and middle reaches of Yellow River regions, such as Inner Mongolia, Shanxi, Qinghai and Ningxia have the highest resource and environmental pressure. Eastern areas such as Beijing, Shanghai, Tianjin and Guangdong, have the lowest resource and environmental pressure. This distribution is caused by large gaps in the resource endowment and industrial structure among provinces. Different regions in China have different resource and environmental problems. However, the northwest and middle reaches of Yellow River regions, and the northern and eastern coastal regions need to be improved to reduce high resource and environmental pressure and to realize sustainable development across China.

Key words: socioeconomic system; material flow analysis; EW-MFA; resource and environmental pressure; spatio-temporal variation analysis; sustainable development; China