

马丽,张博,杨宇.东北地区产业发展与工业SO₂排放的时空耦合效应[J].地理科学,2016,36(9):1310-1319.[Ma Li, Zhang Bo, Yang Yu. The Spatio-temporal Coupling Relationship Between Industrial Development with SO₂ Emission of Northeast China. Scientia Geographica Sinica,2016,36(9):1310-1319.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.09.004

东北地区产业发展与工业SO₂排放的时空耦合效应

马丽^{1,2,3},张博^{2,3},杨宇^{1,2,3}

(1. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室,北京 100101;2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:以工业SO₂为对象,以东北地级市^①为研究单元,运用脱钩指数分析了工业产值变化与SO₂排放规模变化的动态耦合关系及空间格局,并利用LMDI因素分解法对各地市工业SO₂排放变化从规模增长、结构转型和技术升级3方面进行解析。研究发现,在东北地区产业发展过程中,工业产值规模的增长对工业SO₂排放增长呈现正向驱动;而工业技术的进步和节能减排措施的使用促进了工业SO₂排放的降低,而产业结构的作用因区域而异。在环渤海湾地区以及辽源、松原、鹤岗、伊春、七台河、绥化等以木材加工和煤电为核心产业发展的城市,能源基础原材料产业比重的上升促进了地区工业SO₂排放的增加。最后根据不同地市工业SO₂减排的主要驱动因素和限制因素,针对性的分类型、分区域提出促进东北地区产业绿色转型的政策建议。

关键词:产业发展;工业SO₂排放;脱钩;因素分解

中图分类号:F062.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2016)09-1310-10

工业化和产业活动作为人类作用于“人地关系”地域系统的主要行为,是人类影响资源与环境的重要载体。长期以来,国内外学者对于工业化对环境影响进行了大量研究,如经济与环境协调发展的条件、过程以及要素的相互关系研究^[1-4]及著名的经济增长与环境质量关系的环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve,简称EKC)^[5-8]。21世纪初,OCED对于环境污染与经济发展的关系,采用了脱钩的概念^[9]。脱钩即经济增长没有带动相同幅度的环境压力增长,打破了环境压力与经济绩效之间的联系^[10-14]。还有学者采用耦合协调度分析方法^[15,16]。但这些方法都是通过分析经济增长与环境压力数据变化之间的规律,来研究经济增长对环境压力的作用,没有真正揭开二者之间的“驱动与响应”关系。之后因素分解分析被引入EKC研究,通过将经济增长分解为规模、结构、技术等不同因素,通过计算不同因素的变化程度相对于总变化的贡献率来对经济增长的资源环境响应进

行解析,从而推进了经济增长与资源环境关系的研究^[17-23]。

2003年国务院发布振兴东北老工业基地政策实施以来,东北地区工业取得迅速复苏和发展。2005~2013年东北地区工业总产值增幅438.80%,年均增速20.09%超过全国同期水平。同时随着国内节能减排和脱硫脱硝等末端治理措施的实施,东北地区工业SO₂排放量也有所下降,2013年东北地区工业SO₂排放规模比2005年降低6.83万t。其工业结构也不断优化,能源基础原材料部门在工业总产值中的比重从49.77%下降到34.63%,而装备制造业比重从25.4%增加到29.12%,轻纺工业比重也从13.17%提高到22.43%。但是,不同地市由于工业体系不同,产业转型的规模和结构不同,对地区环境压力的影响也不同。为了更为清晰的揭示东北老工业基地振兴与环境质量之间的耦合关系,辨析东北产业发展是绿色的还是褐色的?其空间格局是如何?本文将以地级市为基本研究单元,

收稿日期:2016-05-23;**修订日期:**2016-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(71541020,41371142,41430636)资助。[Foundation: National Nature Sciences Foundation of China (71541020,41371142,41430636).]

作者简介:马丽(1975-),女,山西祁县人,副研究员,博士,主要从事经济地理与区域可持续发展、能源发展与环境影响研究。E-mail: mali@igsnrr.ac.cn

① 本文“地级市”包括东北三省内的哈尔滨、长春、沈阳、大连4个副省级城市。

通过运用脱钩指数和LMDI因素分解法,对产业发展与工业SO₂排放的定量耦合关系,以及工业规模、结构和技术不同因素对工业SO₂排放的贡献率进行分析,从而建立产业转型过程与环境污染排放的定量关系,并为针对性的环境管制和产业转型提供建议。

1 研究方法

1.1 脱钩指数

Vehmas等学者通过计算环境污染排放规模相当于经济产值的弹性系数,构建了“脱钩”与“复钩”的评价模型^[24]。计算公式如下:

$$D_{EI,Y} = \frac{\Delta EI'}{\Delta Y'} = \frac{\Delta EI/EI}{\Delta Y/Y} \quad (1)$$

式中, $D_{EI,Y}$ 是污染物排放相对于工业产值的产值弹性,即工业总产值变动一个百分点引起的污染物排放规模的变化。其中 $\Delta EI'$ 为污染物排放规模的变化速度,是评价时期内排放规模的变化量(ΔEI)与初期排放规模(EI)的比值; $\Delta Y'$ 为工业总产值的变化速度,是评价时期内工业产值的变化量(ΔY)与初期工业产值(Y)的比值。

根据Tapio等对脱钩指数的解释^[25],当经济增速与污染物增速不同步时,二者便呈现出脱钩状态;但当经济增长会导致污染物排放变化时,二者便是有关联,是负脱钩(或“复钩”)状态。由此根据经济增长与污染物排放变化趋势,形成如下组合:当污染物呈现负向增长,而产值正向增长, $D_{EI,Y}$ 值为负时,二者是一种绝对脱钩状态,即产值增长不会导致污染排放的增长;当二者同步正向增长,污染物排放增速小于经济增速导致 $D_{EI,Y}$ 值在0~1之间时,二者为相对脱钩;但如果污染物排放增速高于经济增速导致 $D_{EI,Y}$ 值在1以上时,为扩张性负脱钩;当污染物增速与产值增速皆为负,且污染物排放规模递减增速大于经济递减增速,导致 $D_{EI,Y}$ 在1以上时,为衰退性负脱钩;而当污染物排放规模递减增速小于经济递减增速,导致 $D_{EI,Y}$ 在0~1之间时,为相对负脱钩;而当污染物排放呈正向增长,工业产值增速递减时,二者是绝对负脱钩(表1)。

1.2 脱钩指数分解

脱钩评价模型只能描述产值增长和污染变化趋势的同步关系,无法对发展与环境污染之间的直接作用关系作为更为深入的分析。鉴于此,运用Kaya方程在工业规模、部门结构和环境污染排放之间建立物质联系关系,并通过LMDI法对工

表1 工业产值增长与环境污染脱钩程度判定标准

Table 1 The classification criteria for decoupling degree between pollution emission and industry output

趋势	类型	$\Delta EI'$	$\Delta Y'$	$D_{EI,Y}$
脱钩	绝对脱钩	$(-\mu, 0]$	$(0, +\mu)$	$(-\mu, 0]$
	相对脱钩	$(0, +\mu)$	$(0, +\mu)$	$(0, 1)$
	衰退性脱钩	$(-\mu, 0)$	$(-\mu, 0)$	$[1, +\mu)$
负脱钩	绝对负脱钩	$[0, +\mu)$	$(-\mu, 0)$	$(-\mu, 0]$
	相对负脱钩	$(-\mu, 0)$	$(-\mu, 0)$	$(0, 1)$
	扩张性负脱钩	$(0, +\mu)$	$(0, +\mu)$	$[1, +\mu)$

业经济与污染物排放规模变化之间的脱钩指数进行分解,以分析规模增长、部门结构变化以及技术变化等因素对脱钩指数变化的贡献值。

采用了Kaya恒等式的概念,对工业产值增长与污染物排放之间的脱钩指数进行分解。

$$EI = Y \times \sum_i \frac{EI_i}{Y} = Y \times \sum_i \frac{EI_i}{Y_i} \times \frac{Y_i}{Y} \quad (2)$$

式中, EI 为污染物排放量, Y 为工业总产值, EI_i 为工业部门内部第 i 部门的污染排放量, Y_i 为第 i 部门的产值。因此,污染物排放总规模的变化就受到产值规模(Y)、污染排放强度($IE_i = \frac{EI_i}{Y_i}$)和产业

结构($IS_i = \frac{Y_i}{Y}$)因素的影响,基期污染物排放规模的变化(ΔEI)就可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta EI &= EI_t - EI_0 = \sum_i Y_t^i \times IE_t^i \times IS_t^i - \sum_i Y_0^i \times IE_0^i \times IS_0^i \\ &= \Delta EI_I + \Delta EI_{IE} + \Delta EI_{IS} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, ΔEI_I 为工业产值规模因素, EI' 是评价期末 t 时的污染物排放量, EI^0 是评价初期的污染物排放量, ΔEI_{IE} 为单位产值污染排放系数,即技术因素, ΔEI_{IS} 为产业结构因素。运用对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)进行分析。该方法属于指数分解方法(IDA)范畴,适合分解因素少并且包含时间序列需数据的模型,并且Ang的研究表明该方法可以将余项完全分解,不存在不解释的余项,从而使分解结果更具有说服力^[26]。

$$\Delta EI_I = \frac{EI_t - EI_0}{\ln EI_t - \ln EI_0} \times \ln \frac{I_t}{I_0} \quad (4)$$

$$\Delta EI_{IE} = \frac{EI_t - EI_0}{\ln EI_t - \ln EI_0} \times \ln \frac{IE_t}{IE_0} \quad (5)$$

$$\Delta EI_{IS} = \frac{EI_t - EI_0}{\ln EI_t - \ln EI_0} \times \ln \frac{IS_t}{IS_0} \quad (6)$$

式中, I_t 是评价期末 t 时的工业总产值, I_0 是评价

初期的工业总产值; IE_t 是评价期末 t 时的单位产值污染物排放量, IE_0 是评价初期的单位产值污染物排放量; IS_t 是评价期末 t 时污染高负荷部门在工业总产值中的比重; IS_0 是评价初期污染高负荷部门在工业总产值中的比重。

2 东北地区产业发展与工业 SO₂ 排放空间格局及演化

2.1 东北地区产业发展的空间格局及演化

尽管与2005年(图1a)相比,2013年东北地区工业总产值分布格局没有发生较大的变化(图1b),依然呈现以哈尔滨-长春-沈阳-大连城市带为核心的集聚分布格局,黑龙江北部和辽宁、吉林东西两翼地区工业产值规模相对较低。但是,从不同地市工业产值增速的空间格局可以看出(图1c),2005~2013年工业产值增速较快地区相对集中在工业产值水平较低的东西两翼地区。其中产值增幅和增速最高的地区是辽源市,工业产值增幅超过10.62倍,产值增速高达34.37%;其次是铁岭、四平、白山、白城、双鸭山、绥化和大兴安岭地区等特色产业基地,由于工业基数低,老工业基地振兴政策的实施以及市场环境好转促使这些地区工业很快复苏,产值增速均在30%以上。相对而言,哈尔滨、长春、沈阳、大连、齐齐哈尔、吉林、鞍山、抚顺、葫芦岛等工业产值基数较高,且以装备制造业为产业转型主导方向的城市工业产值增速相对较低,产值增速低于20%。

2.2 东北地区工业 SO₂ 排放高负荷部门发展的空间格局

为分析工业发展结构对工业 SO₂ 排放变化的作用关系,本文对工业 SO₂ 排放高负荷部门的发展与空间格局进行分析。首先定义单位工业产值 SO₂ 排放量较高的部门为工业 SO₂ 排放高负荷部门,通过计算确定造纸及纸制品、非金属矿物制品、黑色金属冶炼、有色金属冶炼和电力生产与供应等五个部门为东北地区工业 SO₂ 排放高负荷部门。随着东北地区整体工业的振兴,工业 SO₂ 排放高负荷部门的产值规模也不断提高。2005~2013年,工业 SO₂ 排放高负荷部门的产值增幅374.51%,年均增速17.95%,但均低于东北地区整体的工业增幅和年均增速,由此导致工业 SO₂ 排放高负荷部门在工业总产值中的比重下降,从2005年的23.87%下降到20.36%,表明从结构的角度东北地区工业发展对 SO₂ 的压力在减缓。但是,不同地区工业 SO₂ 排放高负荷部门的产值增幅和结构比重变化不同。

从产值增幅分布的格局看(图2a),2005~2013年东北地区工业 SO₂ 排放高负荷部门增长地区主要集聚在哈尔滨-长春-沈阳-大连的产业带上,与工业总产值的分布格局相近;增幅最大的是沈阳市、大连和鞍山3个重工业城市,增幅均超过1000万亿元,而其增幅又主要集中在非金属矿物制品和黑色金属冶炼及压延加工业上。其中沈阳和鞍山市这两个部门的增幅之和就超过了1000万亿元,大连也达

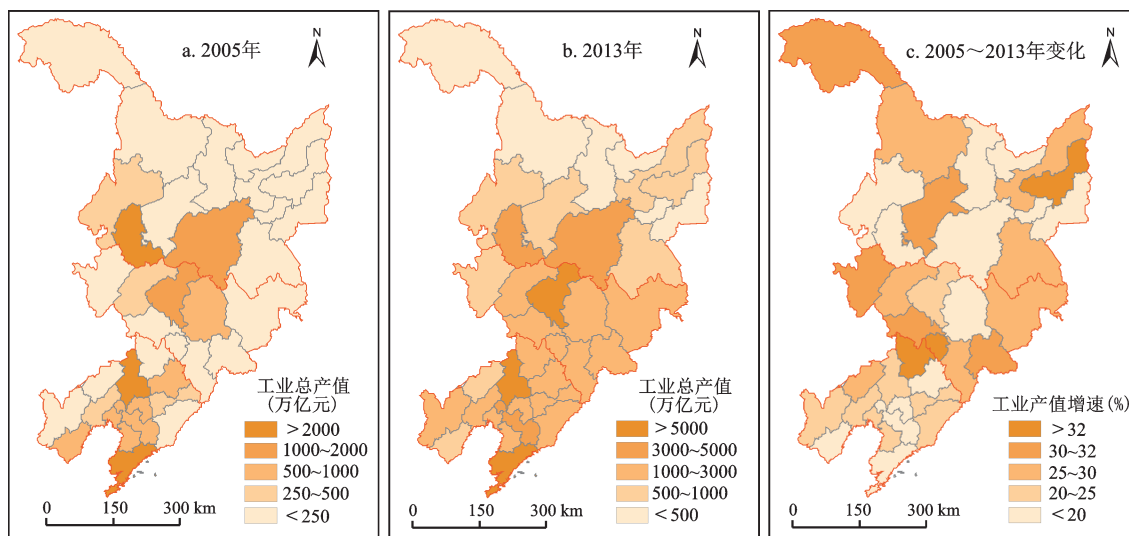


图1 2005~2013年东北地区工业产值及增速分布格局

Fig. 1 Distribution of industrial output and growth speed from 2005 to 2013

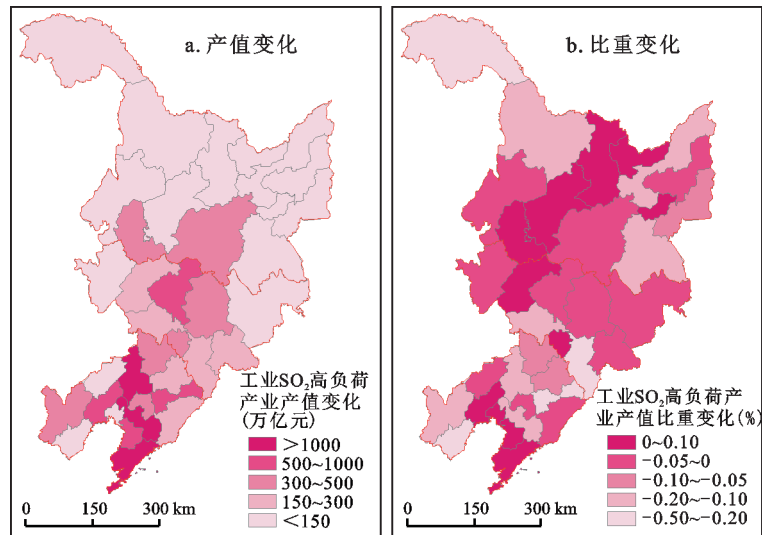


图2 2005~2013年东北地区工业SO₂高负荷产业部门产值和比重增幅
Fig. 2 Growth of industrial output and proportion of high SO₂ sectors from 2005 to 2013

到了近860万亿元;其次是本溪、营口、长春和锦州市,增幅均在600万亿元以上,其中本溪市的增幅也主要集中在黑色金属冶炼及压延加工部门,其占到地区工业SO₂高负荷产业增幅的92.3%。锦州和营口的增幅主要集中在非金属矿物制品和黑色金属冶炼及压延加工业上。长春则主要集中在非金属矿物制品部门,其占到地区工业SO₂排放高负荷部门产值增幅的55.77%。再次是辽阳、哈尔滨、大庆、铁岭、朝阳、吉林、辽源等城市,地区工业SO₂高负荷部门增幅在300万亿元以上,也主要是由非金属矿物制品和黑色金属冶炼及压延加工业产值增长推动;黑龙江省北部地市以及东北地区东西两翼地市工业SO₂排放高负荷部门产值增幅较小。

从工业SO₂排放高负荷部门在地区工业总产值中的比重变化格局看(图2b),比重增加的地市共有11个,主要分布在辽宁省环渤海湾东侧的锦州、盘锦、营口和大连市,吉林省的辽源和白山市,以及黑龙江省的鹤岗、大庆、伊春、七台河和绥化市。其余26个地市的工业SO₂排放高负荷部门比重呈现下降趋势。其中下降最明显的主要集中沈阳城市群地区,如沈阳、鞍山、抚顺、本溪等市。这些城市重点发展了装备制造业(如沈阳)、化工(如抚顺)和医药制造(如本溪)、农副食品加工业(如鞍山)等产业,促进了地区产业结构的转型和工业SO₂排放高负荷产业部门比重的大幅度下降。如本溪市的比重下降幅度达到了27%以上,鞍山市的比重下降幅度也在20%左右。

2.3 东北地区工业SO₂排放量空间格局及其变化

虽然2005年和2013年东北地区工业SO₂排放量的分布呈现与工业总产值、工业SO₂高负荷部门产值分布基本相同的格局,基本集聚分布在以哈尔滨-长春-沈阳-大连为核心的人口产业集聚区。而且,与2005年相比(图3a),2013年工业SO₂排放量的分布(图3b)更为集聚。哈尔滨、长春、吉林、沈阳、辽阳、鞍山、大连这7个地市工业SO₂排放量就占到整个地区工业SO₂排放量的38.3%,比2005年提高了近12个百分点。而且,从地区工业SO₂排放量变化的空间格局上也呈现出这种空间集聚态势(图3c)。基本上从哈尔滨-长春-沈阳-大连的核心城市区域工业SO₂排放量都呈现增加趋势,其中辽宁省的工业SO₂排放量增长主要集中在以沈阳为中心,包括鞍山、阜新、盘锦、辽阳、铁岭、大连的辽中南城市群地区,吉林省则除了四平、辽源和白山外,其余城市工业SO₂排放量都有所增长,而黑龙江省的工业SO₂排放量增长主要集聚在哈尔滨,以及鸡西、鹤岗、伊春和黑河市。

3 2005~2013年东北工业发展与工业SO₂排放的脱钩关系测度

运用公式(1),计算出2005~2013年东北地区不同地市工业总产值与工业SO₂排放的脱钩指数(表2)。由于近年来东北地区的工业总产值呈现持续增长趋势,因此根据表1的分类,目前东北地区34个地级市(延边州和大兴安岭地区缺乏数据)

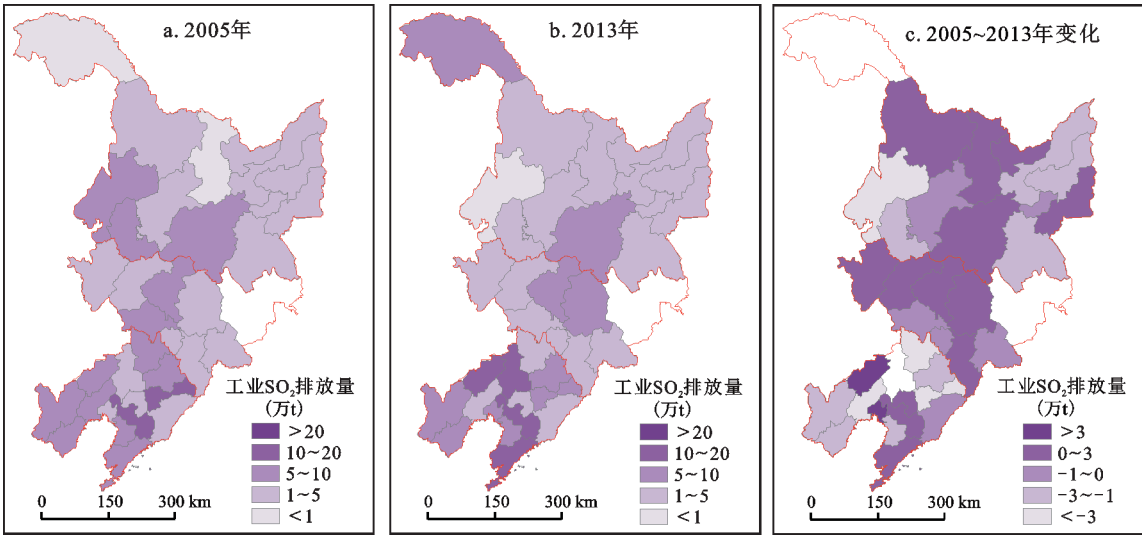


图3 2005~2013年东北地区工业SO₂排放量及其变化格局
Fig. 3 Distribution of industrial SO₂ emission of Northeast China from 2005 to 2013

表2 东北地区工业产值与污染物排放脱钩指数

Table 2 The decoupling index of industrial output and pollutant emission of Northeast China

地区名称	$\Delta EI'$	$\Delta Y'$	$D_{EI,Y}$	类型	地区名称	$\Delta EI'$	$\Delta Y'$	$D_{EI,Y}$	类型
沈阳市	1.83	4.30	0.43	相对脱钩	辽源市	-0.17	9.62	-0.02	绝对脱钩
大连市	0.24	3.09	0.08	相对脱钩	通化市	0.21	5.55	0.04	相对脱钩
鞍山市	0.23	2.47	0.09	相对脱钩	白山市	-0.10	7.62	-0.01	绝对脱钩
抚顺市	-0.34	2.72	-0.13	绝对脱钩	松原市	0.29	6.51	0.04	相对脱钩
本溪市	-0.42	3.47	-0.12	绝对脱钩	白城市	0.10	7.33	0.01	相对脱钩
丹东市	-0.05	4.24	-0.01	绝对脱钩	哈尔滨市	0.09	1.74	0.05	相对脱钩
锦州市	-0.48	4.29	-0.11	绝对脱钩	齐齐哈尔市	-0.90	2.27	-0.40	绝对脱钩
营口市	-0.31	3.98	-0.08	绝对脱钩	鸡西市	0.54	2.47	0.22	相对脱钩
阜新市	0.78	6.22	0.13	相对脱钩	鹤岗市	0.27	1.53	0.18	相对脱钩
辽阳市	0.21	2.95	0.07	相对脱钩	双鸭山市	-0.53	8.54	-0.06	绝对脱钩
盘锦市	1.96	3.49	0.56	相对脱钩	大庆市	-0.23	0.97	-0.24	绝对脱钩
铁岭市	-0.64	9.61	-0.07	绝对脱钩	伊春市	1.09	2.53	0.43	相对脱钩
朝阳市	-0.17	4.58	-0.04	绝对脱钩	佳木斯市	-0.68	6.04	-0.11	绝对脱钩
葫芦岛市	-0.13	1.05	-0.12	绝对脱钩	七台河市	-0.33	1.46	-0.22	绝对脱钩
长春市	0.14	4.15	0.03	相对脱钩	牡丹江市	-0.48	5.19	-0.09	绝对脱钩
吉林市	0.40	3.08	0.13	相对脱钩	黑河市	0.62	5.22	0.12	相对脱钩
四平市	-0.13	7.43	-0.02	绝对脱钩	绥化市	-0.09	7.17	-0.01	绝对脱钩

可以分为绝对脱钩、相对脱钩和扩张性负脱钩3种类型。

表2显示,东北地区有14个城市处于绝对脱钩状态,有20个地级市处于相对脱钩状态,没有城市处于扩张性负脱钩状态,同样处于相对脱钩状态城市的脱钩指数均在0.5以下,表明2005~2013年,东北地区的工业发展并没有带动相同幅度的

工业SO₂排放增长,产值增长对SO₂环境压力的也在逐步降低。在脱钩指数的分布上处于绝对脱钩状态的城市多位于东北地区的东西两翼地区,而中部地区城市多处于工业SO₂与工业增长的相对脱钩状态。这些城市或是地区大工业城市,或是地区主要的火电、钢铁、石化和建材生产基地,工业SO₂排放负荷较高,主要如沈阳、鞍山、阜新、盘

锦、葫芦岛、长春、吉林、鸡西、鹤岗等。

4 东北不同地市工业SO₂排放变化的因素分解

通过运用公式(4~6)对东北地区各地市工业SO₂排放量变化进行因素分解。其中规模因素采用的是工业总产值规模的变化;结构因素则采用的是工业SO₂排放高负荷部门在工业总产值中的比重之和;技术因素则是假设地区所有工业SO₂都是由这些高负荷部门排放的,其值就是这些高负荷部门单位产值的污染排放量。

2005~2013年东北地区工业SO₂排放减少了68 327 t,其中由于工业总产值规模增长4.38倍,由此规模增长的贡献率达到3 437.0%,而工业SO₂高负荷产业比重从2005年的23.87%降低到2013年的22.54%,从而使结构改善贡献率达到了-384%,单位工业产值的SO₂排放量从352.04 t/万元降到了90.71 t/万元,由此技术进步贡献率达到了-3 153%。总体上技术进步和结构改善的贡献率远远超过了规模增长的贡献,由此拉动了东北地区整体工业SO₂排放整体规模的下降。

4.1 规模因素

由于所有地市在2005~2013年期间,工业产值都呈现整体增长趋势,因此规模因素对于工业SO₂排放增长的贡献率皆为正值,呈现增长驱动作用(图4a)。规模贡献率最大的地区是丹东市,贡献率达到3 392.1%;其次是白山、白城、绥化等小型

工业城市,由于工业基数低,增幅明显,贡献率都在2 000%以上;再次是长春、四平、辽源、哈尔滨等集中在哈尔滨-长春经济带的城市,贡献率在1 000%以上;而规模增长贡献率相对较低的城市主要集中在黑龙江和吉林省的外围地区以及辽宁省以沈阳为中心的北部地区,这些城市工业产值的增长幅度相对较低。

4.2 结构因素

从东北地区各地市工业SO₂排放变化的结构贡献率(图4b)可以看出,有23个地市的结构因素贡献率为负值,即在工业总产值结构中SO₂高负荷产业的比重呈现降低增加趋势,由此拉动了地区工业SO₂排放的下降。其中绝对值最高的是通化市,2005~2013年期间随着医药工业的发展,SO₂负荷产业比重大幅度降低,从2005年的51.27%下降到2013年的19.09%。尤其是黑色金属冶炼产业的比重下降了32个百分点,因此其结构因素贡献率达到-520.4%;其次是四平市、白山市、白城市、牡丹江等近几年主要以发展特色轻工业的城市,以及鞍山、朝阳、鸡西等注重产业结构调整 and 接续产业培育的资源型城市,在这些地市结构因素的贡献率绝对值也在100%以上。此外,沈阳、抚顺、本溪、吉林、哈尔滨等在该期间由于大幅度发展装备制造业而导致SO₂高负荷产业比重下降的地市,其结构贡献率也呈现负值,即降低了工业SO₂排放的增长。

2005~2013年结构因素贡献率呈现正值,也即

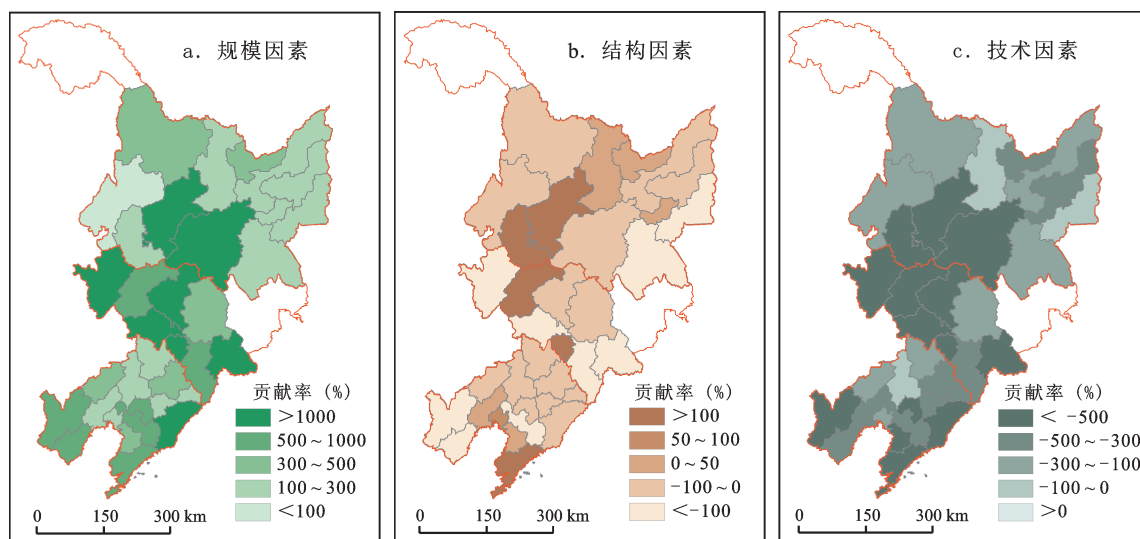


图4 东北地区工业SO₂排放增长的因素分解空间格局

Fig.4 Spatial distribution of factors division to the growth of industrial SO₂ emission

是结构调整对地区工业 SO₂ 排放增长呈现正贡献的地市有 11 个, 这些地市主要集中分布在辽宁环渤海湾地区主要如大连、锦州、营口、盘锦等市, 吉林的松原、辽源市以及黑龙江的鹤岗、大庆、七台河和绥化等市。期间这些地市的 SO₂ 高负荷产业比重都有所增长, 且增长幅度均在 5~7 个百分点之间, 由此对地区工业 SO₂ 排放增长呈现正向驱动。

4.3 技术因素

由于中国节能减排、脱硫脱销等大气污染综合治理等措施的实施, 促使 2005~2013 年期间东北地区各地市单位工业产值的 SO₂ 排放量都呈现显著降低趋势, 其对工业 SO₂ 排放增长的贡献率皆为负值(图 4c)。其中技术因素贡献率绝对值较高的地区主要集中分布在黑龙江中南部以及吉林西部地区, 以及辽宁省的东西两翼地区, 主要如丹东、长春、四平、辽源、白山、松原、白城、绥化等市, 技术贡献率绝对值皆在 1 000% 以上; 以及大连、营口、辽阳、朝阳、哈尔滨、大庆等市, 技术贡献率绝对值在 500% 以上。这些地区或是地区重要的能源重化工产业集聚区, 或是地区重要的火电和冶金项目布局地, 同时也是国家大气环保措施实施最为密集的地区, 因此技术贡献比较显著。

4.4 地区主导因素解析

从公式(4~6)可以看出, 在运用 LMDI 法计算

不同因素的贡献率时, 其不仅与各地区规模、结构和技术因素在研究时期内的绝对变化幅度有关, 而且还与各地区工业 SO₂ 的变化幅度有关。如果工业 SO₂ 的变化幅度越大, 其对各因素贡献率的绝对值有放大作用。因此, 在剔除掉污染物排放幅度后, 针对不同地区计算各因素的贡献率并进行比较, 由此解析出每个地市工业 SO₂ 排放规模变化的主导效应。

在 2005~2013 年东北地区工业 SO₂ 排放变化的驱动因素中, 所有城市的规模效应都为正值, 是地区 SO₂ 排放压力增长的主要驱动力; 技术效应都是负值, 为地区 SO₂ 减排做出重要贡献; 而结构效应有正有负, 即有的地市结构调整促进了地区 SO₂ 的减排, 有的地市结构发展则加重了地区 SO₂ 的压力。从数值绝对数比较来看(表 3), 对于每一个地市, 都呈现以规模效应和技术效应为主导的趋势, 结构效应的作用相对较低。但是, 不同地市规模、技术效应的贡献率不同, 加上结构效应的差异, 最终形成不同的空间格局。

其中, 技术效应大于规模效应的地区有 15 个。其中抚顺、本溪、丹东、铁岭、松原、齐齐哈尔、双鸭山、佳木斯等城市通过承接核心城市的产业转移或培育本地接续产业促进了本地产业的转型升级, 同时通过节能减排和末端治理工艺和设备

表 3 2005~2013 年东北地区各地市工业 SO₂ 变化剔除排放增幅的驱动因素

Table 3 The driving factors to the growth of industrial SO₂ emission in 2005-2013 without emission scale effect

地区名称	规模效应	结构效应	技术效应	地区名称	规模效应	结构效应	技术效应
沈阳市	166.7%	-40.3%	-22.4%	辽源市	236.3%	25.7%	-280.2%
大连市	140.9%	35.9%	-155.5%	通化市	187.9%	-98.8%	-70.1%
鞍山市	124.3%	-31.1%	-72.2%	白山市	215.4%	-22.2%	-203.4%
抚顺市	131.4%	-35.7%	-137.6%	松原市	201.6%	88.2%	-264.3%
本溪市	149.7%	-37.3%	-167.3%	白城市	211.9%	-22.2%	-180.4%
丹东市	165.7%	-0.1%	-170.5%	哈尔滨市	100.8%	-6.6%	-85.2%
锦州市	166.5%	12.4%	-244.6%	齐齐哈尔市	118.4%	-16.9%	-335.5%
营口市	160.5%	8.3%	-206.0%	鸡西市	124.4%	-49.0%	-32.5%
阜新市	197.7%	-19.7%	-120.4%	鹤岗市	92.7%	6.3%	-75.2%
辽阳市	137.3%	-0.5%	-117.5%	双鸭山市	225.6%	-1.6%	-300.0%
盘锦市	150.1%	95.3%	-136.9%	大庆市	67.7%	52.7%	-146.6%
铁岭市	236.2%	-46.4%	-290.6%	伊春市	126.0%	2.1%	-54.6%
朝阳市	171.9%	-27.5%	-163.3%	佳木斯市	195.2%	-53.3%	-254.4%
葫芦岛市	71.9%	-33.7%	-51.7%	七台河市	89.8%	15.8%	-145.2%
长春市	163.8%	-10.2%	-140.1%	牡丹江市	182.3%	-73.9%	-173.2%
吉林市	140.7%	-16.4%	-90.5%	黑河市	182.8%	-33.4%	-101.1%
四平市	213.2%	-56.3%	-170.8%	绥化市	210.1%	76.3%	-295.5%

的采用,技术进步的减排效应加之结构转型,大大超过了规模增长带来的排放增长,由此导致地区工业SO₂排放显著降低。而对于锦州、营口、辽源、大庆、七台河和绥化等城市,虽然工业SO₂排放高负荷部门的比重有所提高,结构效应不利于污染减排,但是技术进步的幅度较大超过了规模效应和结构效应之和,依然导致了地区工业SO₂排放的降低。而大连市虽然技术效应较高,但仍然不敌地区规模效应加上结构压力,导致地区工业SO₂排放呈现提高趋势。因此,对于该类地区的环境管制措施应主要从推动地区工业结构转型升级入手,降低污染排放高负荷产业在产值中的比重。

地区规模效应大于技术效应的地市有19个,其中朝阳、葫芦岛、四平、白山、牡丹江等地市,虽然规模增长对工业SO₂排放的拉动高于技术减排效应,但由于其结构压力逐步减轻,最终结构和技术减排效应超过了规模效应,导致地区工业SO₂排放呈现下降趋势;而沈阳、鞍山、阜新、辽阳、长春、吉林、通化、白城、哈尔滨、鸡西、黑河等地市虽然也是规模效应高于技术减排效应,且结构转型有助于工业SO₂减排,但由于结构和技术效应之和不敌规模效应,最终地区工业SO₂排放依然呈现增长趋势。此外剩余的盘锦、鹤岗、伊春市,地区规模和结构都导致了地区工业SO₂排放压力的加大,且超过了技术效应的贡献,最终地区工业SO₂排放呈现显著增加趋势。因此,对于后两类地区的环境管制措施应采取结构转型和规模控制“双管齐下”,一方面积极促进地区工业结构转型升级,降低污染排放高负荷产业产值的比重;另一方面则要对一些相对产能过剩的能源重化工业采取规模控制、提质增效的措施。

5 结论和讨论

5.1 结论

论文将东北地区除延吉州和大兴安岭地区之外的34个地级市作为研究对象,通过运用脱钩指数对地区工业经济增长与工业SO₂排放变化之间的耦合关系进行了评价,并运用因素分解法,从规模增长、结构转型和技术进步三个维度对东北地区产业转型与环境变化之间的作用关系进行了解析。可以得出如下结论:第一,2005~2013年,随着东北老工业基地振兴相关政策的实施,东北地区各个地市工业经济取得长足进展,但同时其工业

SO₂排放却呈现下降趋势,整体呈现“绿色转型”态势。第二,从空间格局看,工业SO₂排放高负荷产业在哈尔滨—长春—沈阳—大连的人口产业带集聚趋势明显,且在辽宁环渤海湾东侧地区、吉林省辽源和白山市、黑龙江的大庆、鹤岗、伊春、七台河和绥化市,工业SO₂排放高负荷部门比重;辽中南沈阳城市群地区产业转型效果显著,工业SO₂排放高负荷部门比重下降。产业发展和结构调整的空间差异导致不同地市工业SO₂排放变化不同。第三,运用脱钩指数对各地市工业产值与工业SO₂排放的耦合关系进行测度发现,东北地区东西两翼地市多处于工业增长与工业SO₂排放的绝对脱钩状态,而中部地区城市多处于相对脱钩状态,且脱钩指数均在0.5以下,表明东北地区工业增长并没有导致相同幅度的工业SO₂排放增长,产值增长对工业SO₂排放的压力逐步降低。第四,通过LMDI因素分解法,对地区工业SO₂排放增长进行规模效应、结构效应和技术效应解析。对于每一个地市,都呈现以规模效应和技术效应为主导的趋势,结构效应的作用相对较低。整体上,结构转型和技术进步促进了工业SO₂减排并超过了规模效应,导致了整体工业SO₂排放的降低;具体到每个地市各有不同。以技术效应为主体的城市主要集中在大城市周边的特色产业城市,而核心城市及辽宁沿海城市规模效应较高。

5.2 讨论

论文运用Kaya方程建立工业SO₂排放与总产值、产业结构、产业技术之间的恒等式,并运用LMDI法将工业SO₂排放变化解析为规模增长、结构转型和技术升级的不同贡献。该方法虽然是一种识别规模、结构和技术贡献率的简便可行方法,但是结构效应可能被低估,并在很大程度上被技术效应所取代。在本文分析中所关注的结构只是工业部门结构,而忽视了部门内部的产品或产业链结构。在本文中工业SO₂排放高负荷部门之一——黑色金属冶炼与压延业,其既包括位于产业链上游的铁矿石采选—冶炼—粗钢过程,还包括下游的合金、压延、管材加工等多种工序。当行业重点发展下游工艺时,其单位产值的环境污染排放相对较低,但在行业结构上却依然呈现相同的比重。因此,尽管文中工业部门结构演进对工业污染物减排的贡献作用较小,但高污染行业的单位产值污染物排放量降低较快。因此,如果要准

确评价结构对于地区工业污染减排的作用,最佳的分析方法是采用产业生命周期或产业链的方式,分析不同生产环节的污染物减排规模。

参考文献(References):

- [1] Solow R M. Intergenerational equity and exhaustible resources [J]. Review of Economic Studies, 1974, (41):29-45.
- [2] Stiglitz J. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths[J]. Review of Economic Studies, 1974,(41):123-137.
- [3] Cumberland J H. A regional interindustry model for analysis of development objectives[J]. Regional Science Association Paper, 1966, (17): 65-94.
- [4] Leontief W. Environmental repercussions to the economic structure: an input- output approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3):262-271.
- [5] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [6] Panayotou T. Environment degradation at different stages of economic development live hoods in the Third World[M].London: Macmillan Press,1995:175.
- [7] Copeland B, Taylor M S. Trade, growth, and the environment [J]. Journal of Economic Literature, 2004, 42(1):7-71.
- [8] Dinda S. Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey[J]. Ecological Economics, 2004, 49(4):431-455.
- [9] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressures from economic growth [EB/OL]. <http://www.oilis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd.2002>
- [10] OECD. Decoupling: A conceptual overview[R]. Paris: OECD, 2005
- [11] Luken R A, Piras S A. Critical overview of industrial energy decoupling programs in six developing countries in Asia[J]. Energy Policy, 2011, 39:3869-3872.
- [12] Climent F, Pardo A. Decoupling factors on the energy linkage: The Spanish case[J]. Energy Policy, 2007, 3: 522-528.
- [13] 赵一平, 孙祁红, 段宁. 中国经济发展与能源消费响应关系研究——基于相对脱钩与复钩理论的实证研究[J]. 科研管理. 2006, 27(3): 128-134. [Zhao Yiping, Sun Qihong, Duan Ning. Responsive relationship between economic development and energy consumption in China_ a practical research based on comparative de-link and re-link theory. Science Research Management, 2006, 27(3): 128-134]
- [14] 刘航, 赵景峰, 吴航. 中国环境污染密集型产业脱钩的异质性 & 产业转型[J]. 中国人口资源与环境, 2012, 22(4): 150-155. [Liu Hang, Zhao Jingfeng, Wu Hang. The Heterogeneity of the Decoupling of Chinese industries discharging densely different pollutants and the industrial transformation. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(4): 150-155.]
- [15] 张晓东, 池天河. 90 年代中国省级区域经济与环境协调度分析[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 506-515. [Zhang Xiaodong, Chi Tianhe. Differentiating and analysis of the coordination degree between economic development and environment of provincial regions in China. Geographical Research, 2001, 20(4): 506-515.]
- [16] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1299-1307.[Ma Li, Jin Fengjun, Liu Yi. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10): 1299-1307.]
- [17] 刘洪久, 胡彦蓉, Robert Rieg, 等. 基于LMDI模型的CO₂ 排放影响因素研究——以江苏省为例[J]. 工业技术经济, 2012, (4): 43-49.[Liu Hongjiu, Hu Yanrong, Robert Rieg et al. Influence factor analysis carbon dioxide emission base on LMDI model_taking Jiangsu Province as an example. Journal of industrial Technological Economics, 2012, (4): 43-49]
- [18] 张丽君, 秦耀辰, 张金萍, 等. 郑汴都市区一次能源消费的碳排放变化及机理[J]. 地理科学, 2012, 32(3):314-321. [Zhang Lijun, Qin Yaochen, Zhang Jinping et al. Evolution mechanisms of primary energy-related carbon emissions in Zhengzhou-Kaifeng Metropolitan Area. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(3):314-321]
- [19] 查建平, 唐方方, 傅浩. 中国能源消费、碳排放与工业经济增长——一个脱钩理论视角的实证分析[J]. 当代经济科学, 2011, 33(6): 81-89.[Zha Jianping, Tand Fangfang, Fu Hao. Energy consumption, carbon emission and industrial economical growth in China_an empirical analysis based on decoupling theory. Modern Economic Science, 2011, 33(6): 81-89.]
- [20] 范俊韬, 李俊生, 罗建武, 等. 我国环境污染与经济发展空间格局[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6):742-746. [Fan Juntao, Li Junsheng, Luo Jianwu et al. Spatial Patterns of Environmental Pollution and Economic Development in China. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(6):742-746]
- [21] Chweniwechane Jevan. Economic growth, industrialization, and the environment[J]. Resource and Energy Economics, 2012, 34: 442-467.
- [22] 李长嘉, 潘成忠, 雷宏军, 等. 1992-2008 年我国工业废水排放变化效应 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(5): 569-575. [Li Changjia, Pan Chengzhong, Lei Hongjun et al. Decomposing analysis on China's industrial wastewater discharges in 1992-2008. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(5): 569-575).
- [23] 陈六君, 王大辉, 方福康. 中国污染变化的主要因素-分解模型与实证分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(4): 561-570. [Chen Liujiun, Wand Dahui, Fang Fukang. The main factors of pollution change in China: decomposition model and econometric analysis. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2004, 40(4):561-570.]
- [24] Vehmas J, Luukkanen J, Kalvooja J. Material flows and economic growth[M]. Finland (Turku): Turku School of Econo-

- mies and Business Administration, 2003.
- [25] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [26] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred Method?[J]. *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139.

The Spatio-temporal Coupling Relationship Between Industrial Development with SO₂ Emission of Northeast China

Ma Li^{1,2,3}, Zhang Bo^{2,3}, Yang Yu^{1,2,3}

(1. *Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;*

3. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)*

Abstract: In order to find the impact of industrial transformation on the industrial pollution discharge and its spatial pattern, this article analyzes the dynamic coupling relationship between industrial growth and SO₂ emission with the index of decoupling coefficients with industrial SO₂ as the object and prefecture level city of as the unit. It was found that the industrial outputs of cities in Northeast China have really increased while its industrial SO₂ emission decreased in 2005-2013. So, the revitalization of old industrial base in Northeast China could be seen as “green revitalization”. Then, the LMDI model was used to divide the decoupling coefficients into scale, industrial structure and technology upgrading effect. This article found that the scale effect expressed as growth of industrial output value has a positive driving impact on the growth of industrial SO₂ emissions; industrial technology progress promotes the industrial SO₂ emission reduction, and industrial structure's role varies from city to city. Mostly, the higher technology effect is concentrated in special industrial cities in the peripheral of mega city region while scale effect is concentrated in core mega city and coastal cities in Liaoning Province. Industrial transformation of Shenyang metropolitan area is significant and effective, where the development of equipment manufacture sector and decrease of ratio of high SO₂-load sectors in total output had led into the reducing of SO₂ emission. On the other side, in the cities around Bohai Sea of Liaoning Province and cities with wood processing and basic energy and raw material industries as regional pillar industry in Jilin and Heilongjiang provinces, the rising of ratio of energy and basic material sector to total industrial output has led to the growth of industrial SO₂ emission. Finally, according to the main driving factors and limiting factors of SO₂ emission reduction in different cities, this article puts forward policy recommendations to promote the green transformation in Northeast China.

Key words: industrial development; SO₂ emission; decoupling relationship; LMDI model