

我国铝工业经济增长与碳排放脱钩的时空分异研究^①

杨毅¹, 郭尧琦^{2,3}, 朱文松², 黄健柏^{1,3}

(1.中南大学 商学院 湖南 长沙 410083; 2.中南大学 数学与统计学院 湖南 长沙 410083; 3.中南大学 金属资源战略研究院 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于生命周期评价、Tapio 模型,分析了 2006~2016 年间我国铝工业经济增长与碳排放的脱钩状态及时空演变。结果表明,铝工业脱钩状态以扩张连接为主,省域脱钩指数有所下降,脱钩程度显著区域主要分布在中东部发达省份。时间演变上,近十年来各省脱钩程度波动不大,且强弱脱钩状态间差距明显;空间分异上,各省间脱钩程度空间差异呈现逐渐缩小的趋势;空间格局上,2006~2010 年脱钩指数区域分布较为集聚,2011~2016 年脱钩显著区域呈现空间分散态势。

关键词: 脱钩理论; 碳排放; 时空分异; 铝工业

中图分类号: F407

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2018.06.039

文章编号: 0253-6099(2018)06-0168-05

Discussion of Spatio-temporal Differentiation for Decoupling Carbon Emissions from Economic Growth in China's Aluminum Industry

YANG Yi¹, GUO Yao-qi^{2,3}, ZHU Wen-song², HUANG Jian-bai^{1,3}

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Based on life cycle assessment and Tapio's basic model, the decoupling between economic growth in China's aluminum industry and carbon emissions, as well as the spatial-temporal evolution during the period of 2006~2016 were analyzed. Results show that the decoupling in aluminum industry was dominated by expansion connection, index of decoupling by provinces was decreased, and the significant decoupling was mainly distributed in the developed provinces in the central and eastern China. In terms of temporal variation, there was no large fluctuation in the degree of decoupling in each province, but there showed obvious difference between the strong and weak decoupling in the past decade. In terms of spatial variation, there showed a gradually decreasing trend in the degree of decoupling between provinces. In the aspect of spatial pattern, there showed a concentrated regional distribution of decoupling index from 2006 to 2010, while a dispersed regional distribution of significant decoupling from 2011 to 2016.

Key words: decoupling principle; carbon emissions; spatio-temporal differentiation; aluminum industry

铝工业作为我国重要的基础产业,行业上下游关联产业较多,在国家经济发展中具有重要的基础作用。近年来我国铝的年消费量持续上升,2016 年我国铝消费量已占全球消费量的 54%,原铝产量从 2005 年的 781 万吨增加到 2016 年的 2 886 万吨,其中,2010~2015 年年均复合增长率为 14.5%,远高于同期全球其他地区年均复合增长率-0.3%。然而,在铝产量保持高速增长态势的同时,铝工业的环境问题日益突出。

我国政府推出了一系列产业政策,以推动铝行业节能减排和低碳绿色发展。2014 年工信部首发《全国工业能效指南》,对铝等主要有色金属产品和工序能效提出了明确要求^[1]。2015 年,环保部发布铜、铝等工业污染物排放标准。在国务院《“十三五”节能减排综合工作方案》中,提出了电解铝工业铝型材能耗要求^[2]。因此如何大力推进铝工业清洁生产、走绿色制造的道路,降低铝产品的能源消耗和污染排放,将是我国铝工

① 收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(71403298); 国家自然科学基金重点项目(71633006); 教育部人文社会科学研究规划基金(14YJCZH045); 湖南省自然科学基金(14JJ3012)

作者简介: 杨毅(1965-),男,陕西户县人,博士研究生,主要研究方向为资源经济与管理。

通讯作者: 郭尧琦(1982-),男,河南焦作人,副教授,博士,主要研究方向为资源与环境经济统计。

业实现可持续发展的有效途径。为此,本文在经济增速放缓、生态环境亟需改善的背景下,针对我国铝工业产值增长与高污染高能耗现象并存的问题,基于脱钩理论分析了我国铝工业经济增长与碳排放脱钩的时空分异,以期更加全面地认识中国铝行业未来的节能减排方向,同时可以为我国工业经济增长和生态文明体制改革的政策制定提供参考依据。

1 研究现状

对于铝工业的碳排放方面,Koch 等^[3]比较了不同的电力供应方式,表明其会引起铝工业碳排放的不同。Mcmillan 等^[4]通过对 1990~2005 年的铝工业碳排放研究,发现原铝工业不同的研究范围是有结果差别的。Raugei 等^[5]研究了铝工业生命周期评价和贸易过程中环境对地理分配的影响。武娟妮等^[6]对我国原生铝工业的能耗与温室气体排放进行核算。Liu 等^[7]基于生命周期评价,挖掘美国铝工业与碳排放脱钩的潜力。张文娟等^[8]构建了我国原铝行业温室气体排放模型。黎水宝等^[9]研究我国电解铝企业碳排放清单开发技术体系与应用。近年来,国内外陆续开展了工业经济增长与碳排放的关系研究^[10-11]。其中,脱钩理论被应用到经济发展与资源环境协调关系的研究,其研究成果为区域全面协调可持续发展提供重要的理论启示。Tapio 等^[12]将脱钩理论运用到研究能源消费、交通量与经济发展的关系。Becky 等^[13]研究交通运输与经济增长脱钩,将影响因素扩大到包括环境和社会在内的外部因素。Ramos 等^[14]研究生态工业园与水资源污染脱钩,研究表明采用多领导者追随者方式可有效进行水资源整合。国内学者也把“脱钩理论”广泛应用于经济增长与碳排放、能源消耗、工业污染等方面研究^[15-17]。

综上文献梳理,在经济增长与碳排放脱钩方面,国内外研究集中在整个产业经济增长与碳排放脱钩的关系,对于涉及到一个特定产业的相关研究更多集中于对钢铁和石化产业的分析。我国关于“脱钩”的研究,主要涉及区域经济增长与碳排放脱钩,且研究层面大多基于某个省份、某个产业展开,对于铝等有色金属产业的分析较为缺乏,尤其在探讨铝工业经济增长与碳排放方面的研究还有不足。

2 研究设计

2.1 数据来源

考虑到数据的完善性与可比性,本文从全国和省域两个层面开展研究。其中全国层面相关数据来源于 2005~2016 年《中国有色金属工业年鉴》和《中国能源统计年鉴》。在省域层面上,本文数据收集及计算分析了山东、新疆、湖南等共计 18 个省份的脱钩指数,其他省份在样本期内因逐渐退出铝工业,故不做分析。在具体分析中,用铝工业总产值表示铝工业的经济增长指标,产量数据来源于 2005~2016 年《中国有色金属工业年鉴》。铝工业能源消耗数据来源于 2005~2016 年《中国有色金属工业年鉴》,单位用千克标准煤/吨表示。考虑到价格因素对铝工业总产值的影响,本文以 2005 年为基期进行了调整,以保证数据的平稳性。2005~2016 年的铝工业产品出厂价格指数数据来源于历年《中国有色金属工业年鉴》。通过收集和整理,得到 2005~2016 年中国铝工业能源消耗(E)、碳排放量(C)和铝工业总产值(ALO)。

2.2 研究方法

2.2.1 铝工业碳排放量的测算方法

目前学者们根据不同的研究对象采用了不同的数据来源和核算方法。本文从铝土矿的开采工艺开始,至铝锭的铸造工艺结束为过程界限,其铝金属生产系统边界主要包括铝土矿开采、氧化铝生产、炭阳极制作、电解以及铝锭铸造等工艺流程。其中氧化铝环节主要采用拜耳法生产数据进行测算。辅助原料包括预焙用炭阳极的生产。对于铝工业生命周期过程,以原料和能源为输入,以铝产品及其生产过程中的固体、液体废弃物以及气体排放物为输出。铝工业冶炼过程中涉及到的能源消耗燃料主要有天然气、煤、燃料油、焦炭等。根据各燃料相对应的气态污染物排放因子算出 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 、 CH_4 等气态排放物的排放量。不同燃料相对应的各气体污染物排放因子见表 1。其中 CO_2 的排放因子和燃料油、煤油、焦炭的 CH_4 排放因子取自 IPCC2006 年排放系数建议值,天然气的 SO_2 排放因子来自文献[18],其他排放因子数据来自文献[19],煤油的 CO 和 SO_2 排放因子数据缺失,由于用量很少,忽略其 CO 、 SO_2 的排放,以含硫量 0.05% 计算。

表 1 不同燃料的气态污染物排放因子

气态污染物种类	燃料油	煤	天然气	煤油	焦炭
CO_2	2.98 kg/L	2.77 kg/kg	2.09 kg/L	2.56 kg/L	3.14 kg/kg
CO	1.00×10^{-5} kg/MJ	1.50×10^{-4} kg/MJ	3.00×10^{-5} kg/MJ	—	2.04×10^{-4} kg/MJ
SO_2	3.00×10^{-3} kg/kg	1.74×10^{-3} kg/kg	1.00×10^{-4} kg/ m^3	—	1.98×10^{-3} kg/kg
NO_x	5.84×10^{-3} kg/kg	7.50×10^{-3} kg/kg	2.09×10^{-3} kg/kg	7.46×10^{-3} kg/kg	9.00×10^{-3} kg/kg
CH_4	1.16×10^{-4} kg/L	1.00×10^{-5} kg/MJ	5.00×10^{-6} kg/MJ	1.07×10^{-4} kg/L	2.93×10^{-5} kg/kg

根据我国各省域电力能源的组成,重点考虑水电和火电不同比例结构下的碳排放量。对铝工业生命周期的碳排放的测算,在氧化铝环节采用拜耳法生产的数据进行测算。对于电解铝环节的碳排放,根据我国各省域电力能源的组成,重点考虑电力能源结构的差异对碳排放的影响。其碳排放量计算式为:

$$C_i = TP_i Q_i e_f + (1 - TP_i) Q_i e_w \quad (1)$$

式中 C_i 为第 i 省的碳排放总量 kg ; TP_i 为第 i 省火力发电占总发电量的比例 $\%$; Q_i 为第 i 省电解铝产量 t ; e_f 为采用火力和水力发电生产 1 t 电解铝的碳排放系数, kgCO_2 。根据生命周期评价法计算可得:基于拜耳法和火力发电的 1 t 电解铝的碳排放系数为 $2.18 \times 10^4 \text{ kgCO}_2$; e_w 为采用水力发电生产 1 t 电解铝的碳排放系数,根据生命周期评价法计算可得:基于拜耳法和水力发电生产 1 t 电解铝碳排放系数为 $4.91 \times 10^3 \text{ kgCO}_2$ 。运用式(1)可计算 2005~2016 年全国各省铝工业的碳排放总量。

2.2.2 脱钩分析模型

当前,基于增长弹性变化的 Tapio 脱钩状态分析模型考虑了总量变化和相对量变化两个指标,动态地反映变量间的脱钩关系,这在一定程度上克服了在指标选择上的极端性和敏感性,从而使得脱钩关系测度和结果更加客观与准确。Topio^[12] 根据弹性值的大小,将脱钩状态分为 8 类。本文参照 Tapio 脱钩指数计算公式,将铝工业经济增长与碳排放之间的脱钩指数计算公式表示为:

$$DE = \frac{\Delta \text{CO}_2}{\Delta \text{GDP}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 DE 为铝工业碳排放与经济增长的脱钩指数 $\%$; ΔCO_2 为铝工业 CO_2 消耗量的增长率 $\%$; ΔGDP 为铝工业产值的增长率 $\%$ 。

3 实证分析

3.1 脱钩时间演变分析

基于上述构建的 Tapio 脱钩分析模型,通过计算得到 2006~2016 年全国铝工业的工业产值变化率、碳排放变化率以及脱钩指数(见图 1)。由图 1 可知,我国铝工业产值变化率和碳排放变化率在 2007、2012 年达到峰值,仅 2009 年为负值。这与 2009 年我国受世界金融危机影响、经济增长放缓、铝工业市场需求和产量下降有关。此外,我国采取措施淘汰、关闭了一批技术落后、污染严重、效率低下的小企业也有影响。产值变化率与碳排放变化率的趋势几乎一致,波动相当明显,最突出的特征是前一年二者迅速上升,下一年就会迅速下降。导致这种趋势的原因可能是我国作为世界上最大的有色金属产品生产国和消费国,铝工业产值

增长与铝产品的大量生产和消费有关,因此碳排放的下降态势难以持续。总体来说,铝工业产值变化率趋势和碳排放变化率趋势呈增长状态可能是由国家经济平稳增长以及稳步实施能源低碳化战略引起的,而下降趋势可能是受我国工业产业结构升级、节能技术提高以及宏观经济的影响。铝工业的碳排放变化率总体高于产值的排放量,这说明我国铝工业经济增长与碳排放的脱钩不明显,碳排放与经济脱钩的贡献作用尚未显现,我国减碳排技术水平尚待提高。

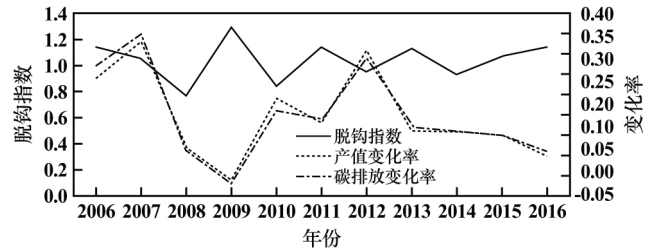


图 1 2006~2016 年全国铝工业产值变化率、碳排放变化率和脱钩指数

3.2 脱钩空间差异分析

为更好描述脱钩指数变化的趋势和特征,本文分为两个时间阶段来考察不同省域之间的差异,进行空间差异分析。我国 2006~2016 年省域的铝工业经济增长与碳排放脱钩指数均值如表 2 所示。从表 2 可以看到,2006~2010 年间我国有 11 个省份(山东、内蒙古、河南、青海、云南、宁夏、山西、陕西、贵州、四川、湖南)的脱钩指数均值处于扩张连接状态,占本文样本容量的 61.1%。其他省份中,以扩张负脱钩和弱脱钩为主。比较脱钩指数均值,其中最高的为新疆,达到 4.38,而湖北省最低,为 0.12。总体来看,2006~2010 年间我国大多数省份铝工业经济增长与碳排放脱钩不明显,这与产量迅速增长、能源使用效率低、减排技术落后等因素有关。从 2011~2016 年我国铝工业经济增长与碳排放脱钩指数均值来看,我国有 6 个省份(山东、新疆、内蒙古、甘肃、陕西、重庆)的脱钩指数均值位于扩张连接状态,占样本容量的 33.3%,相比于 2006~2010 年有了大幅度减少,其余省份中,以衰退连接和衰退脱钩为主。比较 18 个省份的脱钩指数均值,湖南省最高,达到 22.24,辽宁省最低,为 -2.33。通过对比两个时间阶段的脱钩指数,可见山东、内蒙古、陕西 3 个省份在两个阶段时间里的脱钩状态保持不变,这说明这些省份近十年铝工业经济增长与碳排放比较稳定,而变化最明显的福建省由前 5 年的弱脱钩状态到近 6 年的强脱钩状态,脱钩状态转变较快,说明该省铝工业可持续发展能力较强。从省域层面上看,实现扩张连接和扩张负脱钩的省份减少,实现强脱钩、衰退

脱钩的省份数量有所增加 ,并且呈现出省份脱钩程度差距逐渐缩小的趋势。这说明在我国工业化与城市化进程中 ,我国各省份都积极提高能源使用效率、优化能源结构以及提高减排水平 ,增强铝工业的可持续发展能力。

表 2 2006~2016 年我国省域铝工业经济增长与碳排放脱钩指数均值

省份	2006~2010 年 脱钩指数均值	脱钩 状态	2011~2016 年 脱钩指数均值	脱钩 状态
山东	0.98	扩张连接	1.03	扩张连接
新疆	4.38	衰退脱钩	0.96	扩张连接
内蒙古	1.03	扩张连接	0.88	扩张连接
河南	1.06	扩张连接	1.08	衰退连接
甘肃	1.92	扩张负脱钩	1.11	扩张连接
青海	1.18	扩张连接	1.86	扩张负连接
云南	1.20	扩张连接	0.22	弱脱钩
宁夏	0.89	扩张连接	1.28	衰退脱钩
山西	0.97	扩张连接	1.03	衰退连接
陕西	0.96	扩张连接	1.20	扩张连接
广西	5.20	扩张负脱钩	0.78	弱脱钩
贵州	1.00	扩张连接	3.00	衰退脱钩
重庆	1.41	扩张负脱钩	1.02	扩张连接
辽宁	1.00	衰退连接	-2.33	强负脱钩
四川	0.89	扩张连接	0.49	弱负脱钩
福建	0.29	弱脱钩	-0.68	强脱钩
湖北	0.12	弱脱钩	0.92	衰退连接
湖南	1.00	扩张连接	22.24	衰退脱钩

图 2 为铝工业经济增长与碳排放脱钩指数空间格局。从图 2 可以看到 ,2006~2010 年脱钩指数区域分布较为集聚 ,主要分布在 0.8~1.2 之间 ,脱钩程度较好的主要分布在中东部地区 ,西部脱钩程度较差 ,其中西北甘肃(1.92) 、西南广西(5.20) 脱钩程度很低 ,区域差异较小。2011~2016 年脱钩显著区域呈现空间分散态势 ,主要集中在东部、西南地区 ,同时区域差异明显扩大 ,脱钩程度较高的为云南(0.22) 和广西(0.78) ,最低为贵州(3.00) 。比较两时期脱钩指数的空间分布 ,相比于前期 ,后期我国省域整体脱钩指数有所下降。这与我国不断加强“资源节约型”“环境友好型”社会建设有关。而相比前期而言 ,脱钩程度较好的区域后期开始呈现出一定程度的空间分散。两时期铝工业经济增长与碳排放脱钩低值零散分布在中东部发达省区 ,区域差异不明显;而西部省份相较中东部省份 ,脱钩程度变化较大。综合来看 ,两时期铝工业经济增长与碳排放脱钩显著区域分布在中东部发达省份 ,区域差异较大。这与发达省份在铝工业经济快速增长的同时更加注重对产业结构升级、节能减排技术、能源结构调整等方面的投入和改善有关 ,因此具有较高的脱钩指数 ,实现较高度数的脱钩发展。

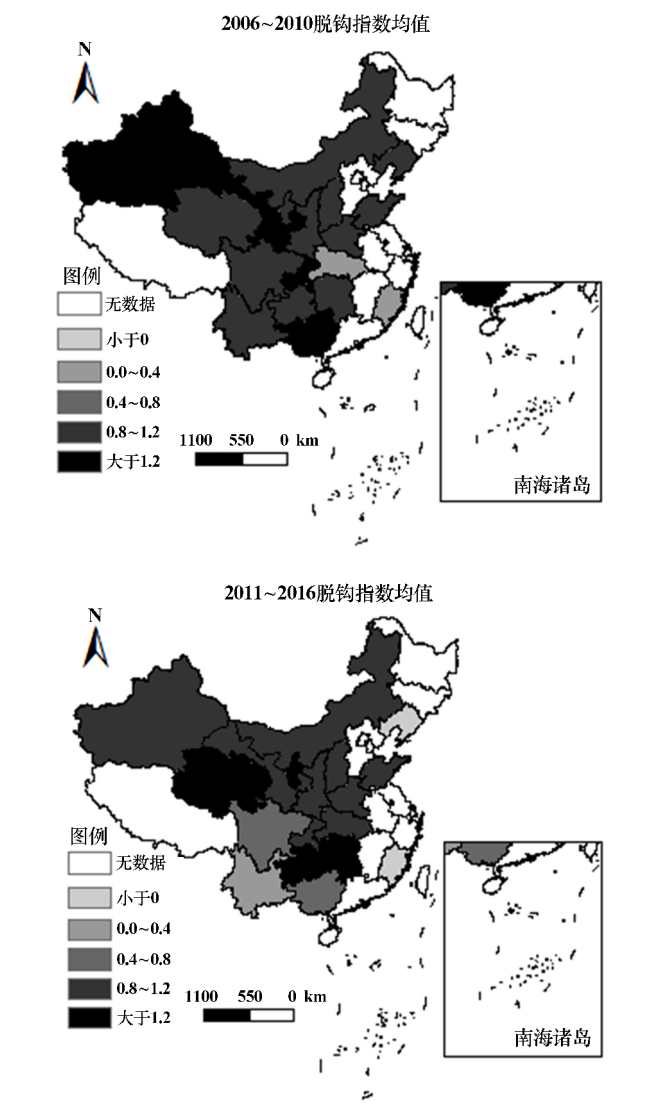


图 2 2006~2016 年我国铝工业经济增长与碳排放脱钩的区域差异

4 结 论

我国是世界上最大的有色金属产品生产国和消费国 ,我国工业化处于中后期阶段。铝工业作为我国能源消耗和碳排放的主要部门 ,如何正确处理其经济增长与碳排放的关系 ,寻求脱钩路径显得尤为重要。本文基于生命周期理论和 Tapio 脱钩模型较为系统地分析了 2006~2016 年我国各省份铝工业经济增长与碳排放脱钩的时空演变 ,得到以下主要结论:

1) 从铝工业经济增长与碳排放脱钩的时间演变来看 ,我国铝工业产值变化率与碳排放变化率趋势几乎一致 ,波动相当明显 ,但碳排放变化率总体高于产值的变化率 ,这说明我国铝工业经济增长与碳排放的脱钩不明显 ,碳排放与经济脱钩的贡献作用尚未显现。从脱钩测度来看 ,我国 2006~2016 年铝工业经济增长与碳排放的脱钩状态以扩张连接为主 ,仅 2009 年为衰

退脱钩,脱钩程度波动不大,说明我国铝工业经济增长与碳排放脱钩程度较低,距离强脱钩状态还存在一定差距。这与我国能源使用效率、能源结构、减排技术密切相关。

2) 从铝工业经济增长与碳排放脱钩的空间分异来看,我国在2006~2016年间,只有7个省份达到过强脱钩状态,其中云南省出现最多,这与其能源结构、能源政策有关。对比两时期阶段脱钩状态,2010年以来我国铝工业实现强脱钩、衰退脱钩的省份数量有所增加,并且呈现出省份脱钩程度差距逐渐缩小的趋势。

3) 从铝工业经济增长与碳排放脱钩指数空间格局来看,2006~2010年脱钩指数区域分布较为集聚,中东部地区脱钩程度较好,区域差异较小。2011~2016年脱钩程度较好区域呈现空间分散分布,同时区域差异明显扩大。2011~2016年期间相较2006~2010年而言,我国省域整体的脱钩指数有所下降,两时期脱钩程度显著区域主要分布在中东部发达省份,区域差异较大。这与铝工业减排技术提升、各省更加注重能源结构调整、产业结构升级等有关。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 全国工业能效指南(2014年版)[Z]. 2014-12-15.
- [2] 中华人民共和国国务院. “十三五”节能减排综合工作方案[Z]. 2017-01-05.
- [3] Koch M, Harnisch J. CO₂ emission related to the electricity consumption in the European primary aluminum production: a comparison of electricity supply approaches[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(5): 283-289.
- [4] Mcmillan C A, Keoleian G A. Not all primary aluminum is created equal: lifecycle greenhouse gas emissions from 1990 to 2005[J]. Environment Science Technology, 2009, 43(5): 1571-1577.
- [5] Raugi M, Ulgiati S. A novel approach to the problem of geographic allocation of environmental impact in lifecycle assessment and material flow analysis[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(6): 1257-1264.
- [6] 武娟妮, 万红艳, 陈伟强, 等. 中国原生铝工业的能耗与温室气体排放核算[J]. 清华大学学报, 2010, 50(3): 407-410.
- [7] Liu G, Bangs C E, Muller D B. Unearthing potentials for e carbonizing the US aluminum cycle[J]. Environment Science Technology, 2011, 45(22): 9515-9522.
- [8] 张文娟, 李会泉, 陈波, 等. 我国原铝冶炼行业温室气体排放模型[J]. 环境科学研究, 2013, 26(10): 1132-1138.
- [9] 黎水宝, 张丽勤, 冀会向, 等. 电解铝企业碳排放清单开发技术体系的研究与应用[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 182-187.
- [10] Abul M K. Carbon emissions, energy consumption and industrial growth in Bangladesh: Empirical evidence from ARDL cointegration and Granger causality analysis[J]. Energy Policy, 2017, 110: 600-608.
- [11] 张震, 李跃, 焦习燕. 能源替代视角下碳排放测算模型构建及减碳机理研究——以煤炭矿区为例[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3): 152-155.
- [12] Tapio, Petri. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the ease of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Journal of Transport Policy, 2005(12): 137-151.
- [13] Loo B P Y, Banister D. Decoupling transport from economic growth: Extending the debate to include environmental and social externalities[J]. Journal of Transport Geography, 2016, 57: 134-144.
- [14] Ramos M A, Boix M, Ausse D, et al. Water integration in eco-industrial parks using a multi-leader-follower approach[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 87: 190-207.
- [15] 易平, 方世明, 马春艳. 地质公园旅游经济增长与生态环境压力脱钩评价——以嵩山世界地质公园为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1284-1296.
- [16] 冯博, 王雪青. 中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 28-34.
- [17] 王泽宇, 卢雪凤, 韩增林, 等. 中国海洋经济增长与资源消耗的脱钩分析及回弹效应研究[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1658-1669.
- [18] 李先瑞, 韩有朋, 赵振农. 住宅区采暖方式的选择[J]. 建筑热能通风空调, 2000(2): 18-21.
- [19] 胡颖, 褚大建. 中国建筑业CO₂排放与产值、能耗的脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(8): 50-56.

引用本文: 杨毅, 郭尧琦, 朱文松, 等. 我国铝工业经济增长与碳排放脱钩的时空分异研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 168-172.