

引用格式:张优,程明今,刘雪薇.中国煤炭铁路运输生命周期温室气体排放研究[J].资源科学,2021,43(3):601-611.[Zhang Y, Cheng M J, Liu X W. Life cycle greenhouse gas emissions from China's coal railway transport[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 601-611.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.16

中国煤炭铁路运输生命周期温室气体排放研究

张 优^{1,2},程明今¹,刘雪薇¹

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室,南京大学环境学院,南京 210023;

2. 南京大学地球科学与工程学院,南京 210023)

摘 要:中国煤炭储量丰富、消耗量大且其资源禀赋与经济发展水平呈逆向分布,大宗煤炭铁路运输所导致的温室效应不容忽视。由于铁路机车的技术应用存在时空异质性,因而有必要从生命周期视角解析煤炭铁路运输温室气体排放的时空变异特征,探索减排潜力。本文在构建煤炭铁路运输生命周期温室气体排放(Life Cycle Greenhouse Gas Emissions, LC-GHGEs)核算模型的基础上,量化1999—2017年3类机车的省级LC-GHGEs因子,刻画LC-GHGEs的总体变化趋势与时空分异特征。结果显示:①随着西北电力机车工作量占比大幅提升与西南水电的大力发展,西北、西南铁路运输的LC-GHGEs因子呈显著下降,而华北、华东呈略微上升,省际差异逐步缩小。②1999—2017年,煤炭铁路运输LC-GHGEs总量首先呈现相对稳定的增长趋势,经历2002—2011年的煤炭“黄金十年”后开始迅速下降,然后在2017年再次上升。自2002年起,电力机车替代内燃机车成为温室气体排放最大的贡献者。③内蒙古替代山西成为LC-GHGEs贡献最高的煤炭输出省份,重点输出省份的西向转移加剧了煤炭铁路运输的温室效应。煤炭铁路运输LC-GHGEs在输入省份的分布较为分散,钢铁生产大省的贡献较为突出。最后,基于上述研究结果,从机车技术升级、能源结构调整、调运系统优化等方面提出了如何有效降低煤炭铁路运输温室气体排放的对策建议。

关键词:煤炭流动;碳排放;生命周期;气候变化;煤炭贸易

DOI: 10.18402/resci.2021.03.16

1 引言

“富煤贫油缺水”的资源禀赋决定了中国以煤炭为主体的能源消费结构^[1]。然而煤炭分布不均,主要集中在北方,南方的煤炭储量占比仅为13.6%^[2]。煤炭资源与国民经济发展水平呈逆向分布,煤炭大批量长距离运输不可避免^[3]。改革开放以来,随着国民经济的快速发展,煤炭产量与消费量激增^[4]。为了满足各省煤炭需求,省际煤炭流动量从1980年的1.4亿t上升至2017年的18亿t,煤炭省际调入量与消费总量的比值也从22.7%上升至46.8%^[2](图1)。运输行业是中国温室气体排放的重点行业^[5,6],而煤炭运输是其重要组成部分^[7]。已有研究估算

2014年省际煤炭的铁路调运过程产生的CO₂高达639万t^[8],因此大宗煤炭流动所导致的温室效应不容忽视。铁路一直以来都是中国煤炭的主导运输方式^[9,10],其机车类型占比与能耗强度由于技术变革与区域发展存在显著的时空异质性^[11]。铁路运输的温室气体排放不仅有来自能源消费过程的直接排放(如内燃机的柴油燃烧),也包括来自能源上游生产与开采过程的间接排放^[12,13]。因而从生命周期视角解析煤炭铁路运输温室气体排放的时空变异特征,对探索运输行业温室气体减排具有重要意义。

为了明确中国煤炭调运格局下的省际铁路CO₂排放量并厘清省际差异原因,吕涛等^[8]在计算各省

收稿日期:2020-11-04;修订日期:2021-01-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502801)。

作者简介:张优,女,湖南衡阳人,博士后,研究方向为能源系统与煤化工的资源环境影响评估。E-mail: zhangyou@nju.edu.cn

通讯作者:刘雪薇,女,山东平度人,博士后,研究方向为物质循环与废弃物资源化。E-mail: xwliu0722@gmail.com

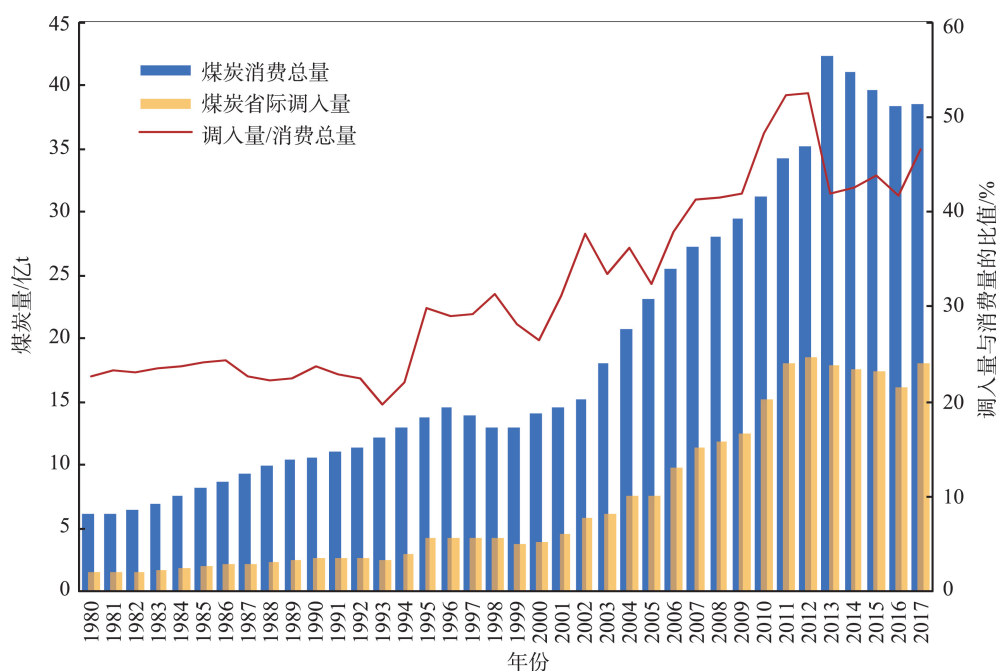


图1 1980—2017中国煤炭消费与省际调入

Figure 1 Coal consumption and inter-provincial import in China, 1980-2017

内燃机车与电力机车单位周转排放量的基础上,结合两类机车的周转比例,得到各省铁路的排放系数,并利用该系数对2014年各省铁路在煤炭调运过程中产生的CO₂排放量进行了测算,但未刻画其排放趋势及其演化规律。为了评估铁路机车温室气体排放的变化特点,有学者基于铁路部门逐年统计数据,核算了中国铁路机车连续年份的CO₂排放强度与总量^[14-16]。然而上述研究忽视了铁路运输的省际差异,而且未基于生命周期视角,缺乏对能源上游开采加工过程的关注。考虑到中国煤炭运输网络的重要性,众多学者在煤炭运输通道^[17,18]与供应链网络^[19]的优化方面开展了大量的研究,如Li等^[9]通过构建中国省级能源系统优化模型模拟不同碳排放情境下的煤炭运输模式。上述研究为煤炭运输碳减排提供了思路。然而,如果能在理解中国煤炭运输碳排放的时空分异特征及其变化趋势的基础上开发碳减排优化模型,研究结果将更具参考价值。因此,本文在构建煤炭铁路运输生命周期温室气体排放(Life Cycle Greenhouse Gas Emissions, LC-GHGEs)核算模型的基础上,量化了1999—2017年3类机车的省级生命周期温室气体的排放因子,并结合煤炭铁路运输量刻画了其生命周期温室效

应的总体变化趋势与时空分异特征,识别重点过程与区域,为减缓煤炭运输温室效应的政策制定提供数据支持。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 系统边界

考虑到中国煤炭铁路运输数据的可获得性与空间分异特征,本文的时空边界为中国1999—2017年31个省级行政区(因数据缺失,不包括港澳台地区,下同)的煤炭铁路运输。根据动力类型的不同,火车主要划分为:蒸汽机车、内燃机车以及电力机车,分别以煤炭、柴油、电力作为动力来源。基于中国机车分类与能源生产特征,本文构建如图2所示的系统边界,涵盖的温室气体包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)以及氧化亚氮(N₂O)。

对于铁路运输系统而言,LC-GHGEs可划分为机车运行过程的直接排放与机车耗能上游生产过程导致的间接排放。内燃机车的排放过程包括柴油燃烧与柴油上游生产过程,蒸汽机车的排放过程包括煤炭燃烧与煤炭上游生产过程。电力机车生命周期温室气体的排放均为间接排放,主要包括电力生产及其主要燃料煤炭上游生产过程。与其他发电方式相比,火力发电是温室气体的主要排放过

2021年3月

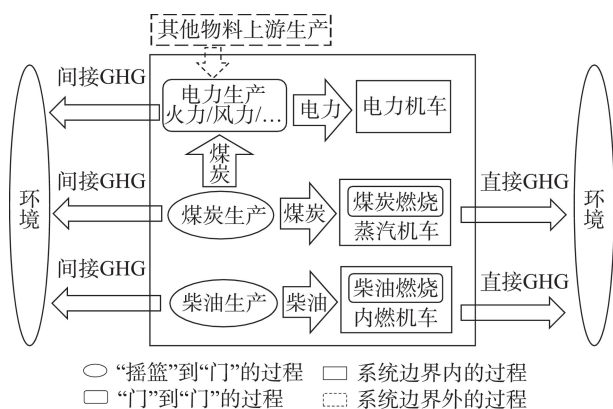


图2 铁路运输温室气体排放的系统边界

Figure 2 System boundary of the greenhouse gas emissions from railway transportation

程,且燃煤发电依旧是中国主要的发电形式,因此考虑煤炭上游生产过程,而风电、核电等其他发电形式所输入物料的上游生产并不在本文的系统边界。

2.2 煤炭铁路运输LC-GHGEs核算模型

煤炭铁路运输LC-GHGEs的影响因素包括运输距离、煤炭运输量以及机车的LC-GHGEs因子。受限于数据的可获取性,本文构建的煤炭铁路运输LC-GHGEs核算模型基于以下3个假设:①煤炭铁路运输包括省内运输与省际运输,本文假设省内的运输距离为省份近似半径,省际运输为两个省级行政中心(省会)之间的距离。省份近似半径是将每个省的形状近似为一个圆,然后基于省份面积求得。虽然上述假设会给研究带来一定的不确定性,但是在数据难以获取的情况下,基于每个省份的实际地理情况作出上述假设,可以认为是合理的。②煤炭运输过程中可能会经过多个省份,研究假设煤炭运输列车为煤炭流出省份的机车,因此采用该省机车的LC-GHGEs因子。③各省煤炭铁路运输的各类机车工作量占比及其能耗强度与其所在铁路局的平均水平一致。LC-GHGEs核算模型中重要参数的字母缩写、实际含义与单位如表1所示。

在上述模型假设的基础上,结合各省煤炭铁路运输量与3类机车的LC-GHGEs因子及其工作量占比,煤炭铁路运输LC-GHGEs总量的核算方法如下:

$$GHG_{y-sum} = \sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^{31} [D_{ij} \times M_{yij} \times \sum_{x=1}^3 (CTG_{yi-x} \times q_{yi-x})] \quad (1)$$

式中: GHG_{y-sum} 为 y 年份煤炭铁路运输LC-GHGEs

表1 LC-GHGEs核算模型重要参数

Table 1 Important parameters of the life cycle greenhouse gas emissions (LC-GHGEs) calculation model

参数缩写	参数含义
GHG_{y-sum}	y 年份煤炭铁路运输LC-GHGEs总量/t
CTG_{yi-x}	y 年 i 省第 x 类机车的LC-GHGEs因子/(t/t·km)
CTG_{yi-ele}	y 年 i 省电力机车的LC-GHGEs因子/(t/t·km)
CTG_{yi-k}	y 年 i 省内燃或蒸汽机车的LC-GHGEs因子/(t/t·km)
CTG_k	柴油或煤炭上游生产的LC-GHGEs因子/(t/t)
A_{yi-ele}	y 年 i 省电力机车的电力消耗强度/(kW·h/t·km)
A_{yi-die}	y 年 i 省内燃或蒸汽机车的柴油消耗强度/(t/t·km)
M_{yij}	y 年从 i 省通过铁路运输至 j 省的煤炭量/t
q_{yi-x}	y 年 i 省第 x 类机车的工作量占比
c_{yi}	y 年 i 省燃煤发电过程的煤炭消耗强度/(t/kW·h)
E_{yi-ele}	y 年 i 省电力生产过程的GHG排放因子/(t/kW·h)
Q_{yi-m}	y 年 i 省第 m 种火力发电能源的消耗量/t
T_{yi-n}	y 年 i 省第 n 种发电方式的发电总量/(kW·h)
r_{yi-n}	y 年 i 省第 n 种发电方式的自用电率
LHV_m	第 m 种能源的平均低位发热量/(MJ/t)
C_m	第 m 种能源的单位低位发热量的含碳量/(t/MJ)
OR_m	第 m 种能源的碳氧化率
F_{m-CH_4}	第 m 种能源的单位低位发热量所对应的CH ₄ 的排放因子/(t/MJ)
F_{m-N_2O}	第 m 种能源的单位低位发热量所对应的N ₂ O的排放因子/(t/MJ)
E_k	柴油或煤炭燃烧过程的GHG排放因子/(t/t)
D_{ij}	i 省的近似半径/km

总量;当 $i \neq j$ 时, D_{ij} 为 i 省与 j 省的运输距离,当 $i = j$ 时, D_{ij} 为 i 省的近似半径; M_{yij} 为 y 年从 i 省通过铁路运输至 j 省的煤炭量; CTG_{yi-x} 为 y 年 i 省第 x 类机车的LC-GHGEs因子; q_{yi-x} 为 y 年 i 省第 x 类机车的工作量占比。

3类机车的LC-GHGEs因子核算是本文的难点。一方面各省所属铁路局的机车能耗强度存在时空差异,另一方面电力、内燃、蒸汽机车的能源类别分别为电力、柴油、煤炭,这3种能源的LC-GHGEs因子也存在时空差异。值得注意的是,由于电力的时空分异特征最为显著而且数据可获得,本文核算的电力LC-GHGEs因子具有时空分异,柴油与煤炭LC-GHGEs因子为时空均质。

2.2.1 电力机车LC-GHGEs因子

电力机车生命周期温室气体排放主要来自电力生产与煤炭上游生产过程。根据东北电网、华北

电网、华中电网、华东电网、西北电网与南方电网的划分边界,首先基于分省的能源平衡表、发电量以及发电厂用电率分别核算各省所在电网的电力生产过程GHG排放因子、燃煤发电的煤耗强度,然后基于IPCC方法对Ecoinvent数据库中煤炭生产过程温室效应的评估结果计算煤炭上游生产过程的GHG排放,具体核算方法如下:

$$CTG_{yi-ele} = A_{yi-ele} \times (E_{yi-ele} + c_{yi} \times CTG_{coal}) \quad (2)$$

$$E_{yi-ele} = \sum_{i=1}^z \sum_m [Q_{yi-m} \times LHV_m \times (C_m \times OR_m \times 44/12 + F_{m-CH_4} \times 28 + F_{m-N_2O} \times 265)] / \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^z \sum_n [T_{yi-n} \times (1 - r_{yi-n})]$$

式中: CTG_{yi-ele} 、 A_{yi-ele} 分别为 y 年 i 省电力机车的LC-GHGEs因子、电力消耗强度; E_{yi-ele} 为 y 年 i 省电力生产过程的温室气体排放因子; c_{yi} 为 y 年 i 省燃煤发电过程的煤炭消耗强度; CTG_{coal} 为煤炭上游生产的LC-GHGEs因子; z 为与 i 省属于同一区域电网的省份数量; Q_{yi-m} 为 y 年 i 省第 m 种火力发电能源的消耗量; LHV_m 、 C_m 、 OR_m 分别为第 m 种能源的平均低位发热量、单位低位发热量的含碳量以及碳氧化率; $44/12$ 为 CO_2 的相对分子质量比碳原子的相对原子质量; F_{m-CH_4} 、 F_{m-N_2O} 分别为第 m 种能源的单位低位发热量所对应的 CH_4 、 N_2O 的排放因子; 28 、 265 分别为 CH_4 、 N_2O 的全球增温潜势,单位为 CO_2 -eq; T_{yi-n} 、 r_{yi-n} 分别为 y 年 i 省第 n 种发电方式的发电总量、自用电率。

2.2.2 内燃机车与蒸汽机车的LC-GHGEs因子

内燃与蒸汽机车LC-GHGEs分别来自柴油、煤炭的上游生产和燃烧过程。柴油、煤炭上游生产过程的温室气体排放因子采用IPCC方法对Ecoinvent数据库中该燃料生产过程温室效应的评估结果,燃烧过程基于燃料的含碳量与碳氧化率进行计算,具体核算方法如下:

$$CTG_{yi-k} = A_{yi-k} \times (E_k + CTG_k) \quad (4)$$

$$E_k = LHV_k \times (C_k \times OR_k \times 44/12 + F_{k-CH_4} \times 28 + F_{k-N_2O} \times 265) \quad (5)$$

式中: $k=1, 2$, 1为内燃机车消耗柴油, 2为蒸汽机车消耗煤炭; CTG_{yi-k} 、 A_{yi-k} 分别为 y 年 i 省内燃(蒸汽)机车的LC-GHGEs因子、柴油(煤炭)消耗强度;

E_k 为柴油或煤炭燃烧过程的温室气体排放因子; CTG_k 为柴油或煤炭上游生产过程的LC-GHGEs因子; LHV_k 、 C_k 、 OR_k 分别为柴油或煤炭平均低位发热量、单位低位发热量的含碳量以及碳氧化率; F_{k-CH_4} 、 F_{k-N_2O} 分别为柴油或煤炭的单位低位发热量所对应的 CH_4 、 N_2O 的排放因子。

2.3 煤炭铁路运输LC-GHGEs减排情景设置

为了估算不同温室气体减排方法下,煤炭铁路运输温室气体排放的削减潜力,本文在煤炭流动情况不变(以2017年为基准)的条件下设置了如下4种情景:①各铁路局电力机车的工作量占比达到100%,其他条件不变(全电力机车情景);②各铁路局电力机车均达到目前最低电力消耗强度,其他条件不变(低电耗强度情景);③电力机车均使用目前最为低碳的电力,其他条件不变(低碳电力情景);④上述3种优化情景叠加实现,即各铁路局电力机车的工作量占比达到100%,均达到目前最低电力消耗强度,且均使用目前最为低碳的电力,其他条件不变(全组合情景)。

2.4 数据来源

国家铁路行政区域间煤炭运输量、铁路机车的能耗强度以及工作量占比数据均来自《中国铁道年鉴(2000—2018年)》^[20];电力机车温室气体排放计算所需的能源消耗、燃煤发电的煤耗强度数据来自《中国能源统计年鉴(2000—2018年)》^[21];分省的发电量以及发电厂自用电率数据来自《中国电力年鉴(2000—2018年)》^[22]。 CH_4 、 N_2O 的全球增温潜势数据来自IPCC的气候变化2014综合报告^[23]。煤炭、柴油的上游生产过程数据来自Ecoinvent数据库,其中煤炭数据为中国的生产数据,柴油由于中国数据不可得,只能采用欧洲的生产数据。

3 结果与分析

3.1 铁路运输LC-GHGEs因子的时空分异特征

各省1999—2017年4个时间断面的铁路运输LC-GHGEs因子如表2所示,根据其变化量可将各省划分为因子下降组、因子上升组。总体上,西北、西南铁路运输的LC-GHGEs因子呈下降趋势,华北、华东呈上升趋势,省际差异逐步缩小。1999年各省铁路运输LC-GHGEs因子的变异系数为32.7%,显著高于2017年的24.8%。青海、西藏的下

2021年3月

表2 1999—2017年铁路运输LC-GHGEs因子的时空分异

Table 2 Spatiotemporal variations of life cycle greenhouse gas emissions (LC-GHGEs) factors of

railway transportation, 1999-2017

(kg CO₂-eq /万 t·km)

地区	1999年	地区	2005年	地区	2010年	地区	2017年	地区	变化量
西藏	251.5	陕西	162.8	陕西	150.0	陕西	149.4	青海	-116.2
青海	251.5	西藏	158.1	西藏	128.7	北京	138.1	西藏	-116.2
重庆	153.3	青海	158.1	青海	128.7	天津	138.1	重庆	-72.8
四川	153.3	云南	153.6	云南	127.7	河北	138.1	四川	-72.8
贵州	143.1	山西	148.0	北京	119.3	西藏	135.4	贵州	-64.6
云南	137.5	甘肃	142.0	天津	119.3	青海	135.4	云南	-43.5
甘肃	129.5	宁夏	142.0	河北	119.3	山东	134.5	甘肃	-41.5
宁夏	129.5	重庆	133.5	甘肃	118.8	辽宁	127.6	宁夏	-41.5
黑龙江	118.4	四川	133.5	宁夏	118.8	吉林	127.6	湖北	-40.5
北京	115.4	贵州	126.1	山西	111.8	福建	111.9	河南	-39.2
天津	115.4	北京	111.2	山东	111.6	黑龙江	103.1	湖南	-24.1
河北	115.4	天津	111.2	内蒙古	108.3	内蒙古	102.5	广西	-23.7
山西	115.4	河北	111.2	辽宁	107.8	上海	102.5	海南	-23.5
辽宁	111.7	湖南	110.2	吉林	107.8	江苏	102.5	广东	-23.0
吉林	111.7	辽宁	107.0	重庆	107.2	浙江	102.5	山西	-18.1
新疆	109.8	吉林	107.0	四川	107.2	安徽	102.5	黑龙江	-15.4
陕西	108.1	广东	104.8	新疆	105.5	新疆	100.3	江西	-11.0
河南	105.3	河南	104.6	贵州	105.0	山西	97.4	新疆	-9.5
湖北	105.3	新疆	102.5	福建	97.4	云南	93.9	内蒙古	3.9
内蒙古	98.6	海南	101.2	江西	91.4	甘肃	88.1	上海	6.1
湖南	97.9	黑龙江	96.8	黑龙江	91.4	宁夏	88.1	江苏	6.1
上海	96.4	湖北	95.7	河南	88.6	重庆	80.5	浙江	6.1
江苏	96.4	福建	93.5	湖南	88.3	四川	80.5	安徽	6.1
浙江	96.4	江西	90.9	广东	86.7	贵州	78.5	辽宁	16.0
安徽	96.4	广西	88.9	海南	86.7	江西	77.8	吉林	16.0
海南	95.7	内蒙古	81.4	湖北	82.4	湖南	73.7	北京	22.7
广东	95.0	上海	77.4	上海	80.4	海南	72.2	天津	22.7
广西	93.5	江苏	77.4	江苏	80.4	广东	72.0	河北	22.7
福建	88.8	浙江	77.4	浙江	80.4	广西	69.8	福建	23.1
江西	88.8	安徽	77.4	安徽	80.4	河南	66.0	陕西	41.3
山东	79.2	山东	74.9	广西	80.2	湖北	64.8	山东	55.3
CV/%	32.7		23.9		17.2		24.8		

降幅度最突出,一方面青藏铁路内燃机车工作量占比从100%降至29%,与之相对的,电力机车工作量占比大幅度提升,而该铁路局电力机车的LC-GHGEs因子显著低于内燃机车;另一方面青藏铁路局内燃机车的柴油消耗强度下降了29%。贵州、重庆、四川属于成都铁路局,1999年电力机车占比就达到79%,因位于水利资源丰富的西南地区,水力发电的大力发展促进水电占比提高,使得电力LC-GHGEs因子下降了35%~40%,因而铁路运输LC-GHGEs因

子也随之下降。铁路运输LC-GHGEs因子的时空分异特征说明中国铁路机车的升级换代在一定程度上缓解了铁路运输导致的温室效应,而南方水电的发展进一步削减了电力LC-GHGEs因子,对电力机车占据主导地位的地区而言,清洁能源(水电、核电等)占比的提升成为温室气体减排的主要驱动力。

2017年各省铁路运输LC-GHGEs因子呈现的总体空间分异特征为北高南低。除哈尔滨铁路局

外,目前电力机车为中国铁路运输的主力。与南方地区相比,北方地区电网结构中火力发电占比更高,从而导致电力机车的LC-GHGEs因子更高。陕西的排放因子最高,是最低省份河南的2.3倍。一方面陕西所属西北电网的LC-GHGEs因子是河南所属华中电网的1.6倍,另一方面陕西所属西安铁路局的电力机车能耗强度高达 $152.1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{万 t} \cdot \text{km}$,是河南所属郑州铁路局的1.4倍。陕西作为煤炭输出大省,挖掘其铁路运输温室气体排放因子削减潜力,对促进煤炭铁路运输的温室气体减排有重大意义。值得注意的是,黑龙江所属哈尔滨铁路局的电力机车占比仅为21%,但由于其内燃机车的能源消耗强度较低,黑龙江铁路运输LC-GHGEs因子处于全国中游位置。由此可见,绝大部分地区的电力机车比内燃机车更为低碳,但东北、华北、华东地区的电力机车LC-GHGEs因子更高,由于其电力机车能耗强度较高,而内燃机车能耗强度较低。

3.2 煤炭铁路运输生命周期温室效应的总体变化趋势

为满足各地需求,煤炭流动格局呈现由北向南、自西向东的空间特征。1999—2017年间,煤炭铁路运输LC-GHG累计排放总量为1.3亿 $\text{t CO}_2\text{-eq}$,年际变化趋势如图3所示。结果显示,煤炭铁路运输LC-GHGEs总量首先呈现相对稳定的增长趋势,在2012年达到峰值后开始迅速下降,然后2017年再次上升。虽然铁路运输LC-GHGEs因子对上述变化趋势存在部分影响,但煤炭运输量的年际变化是影响煤炭铁路运输排放总量的主导因素。21世纪以来,随着中国经济的迅速增长,工业化与城镇化的进程加快,各省的煤炭需求量急剧增加,煤炭行业快速发展,煤炭流动量也随之上升。然而,随着经济增速放缓,水力发电大力发展以及进口煤冲击,在经历2002—2011年的煤炭“黄金十年”以后,各省需求过于饱和,煤炭由于产能过剩,价格连续暴跌,中国主要口岸的煤炭价格从2012年的111.9美元/t跌至2016年的71.4美元/t^[24],煤炭流动量也逐年下降,直到2017年才呈现上涨趋势。

煤炭铁路运输LC-GHGEs总量的结构变化显示:①1999年蒸汽机车对LC-GHGEs总量贡献占比为4.9%,2003年起蒸汽机车正式退出中国煤炭铁路运输的历史舞台;②1999年内燃机车对煤炭铁路运

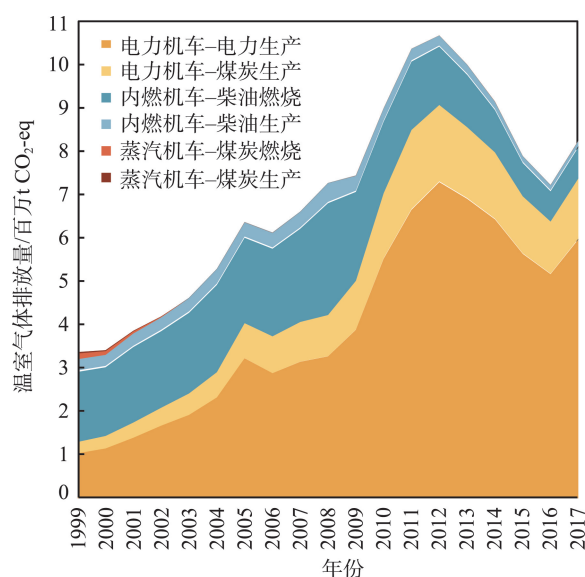


图3 1999—2017年煤炭铁路运输温室气体排放总量的年际变化

Figure 3 Inter-annual variation of total life cycle greenhouse gas emissions (LC-GHGEs) from coal railway transportation, 1999-2017

输LC-GHGEs的贡献占比为56.2%,随着内燃机车被逐步淘汰,电力机车逐渐成为温室气体排放的主要贡献者,2017年对排放总量的贡献占比高达89.8%;③随着电力机车工作量占比的提升,电力生产过程从2003年起替代内燃机车的柴油燃烧过程,成为煤炭铁路运输温室气体的主要排放过程,2017年其贡献占比为72.6%,其次为煤炭生产过程,贡献占比为17.2%。

3.3 煤炭铁路运输生命周期温室效应的时空分异

煤炭运输过程涵盖的输出省份与输入省份类似贸易关系中的“生产者”与“消费者”。为了进一步挖掘煤炭铁路运输LC-GHGEs总量的时空分异特征,本文从煤炭输出与输入两个角度展开分析,结果如图4所示。

首先基于煤炭输出角度,中国煤炭资源分布相对集中,因而输出省份较为集中,并且随着时间的推移,集中程度更为突显。1999—2017年,对铁路运输LC-GHGEs总量贡献居前两位的煤炭输出省份内蒙古、山西的位置发生了替换。1999年,山西是最大的煤炭输出省份,对煤炭铁路运输LC-GHGEs总量的贡献占比为35.7%,其次为内蒙古、河南、黑龙江,贡献占比分别为11.6%、8.7%、8%。随着2001年西部大开发战略的实施,国家对西北煤炭资

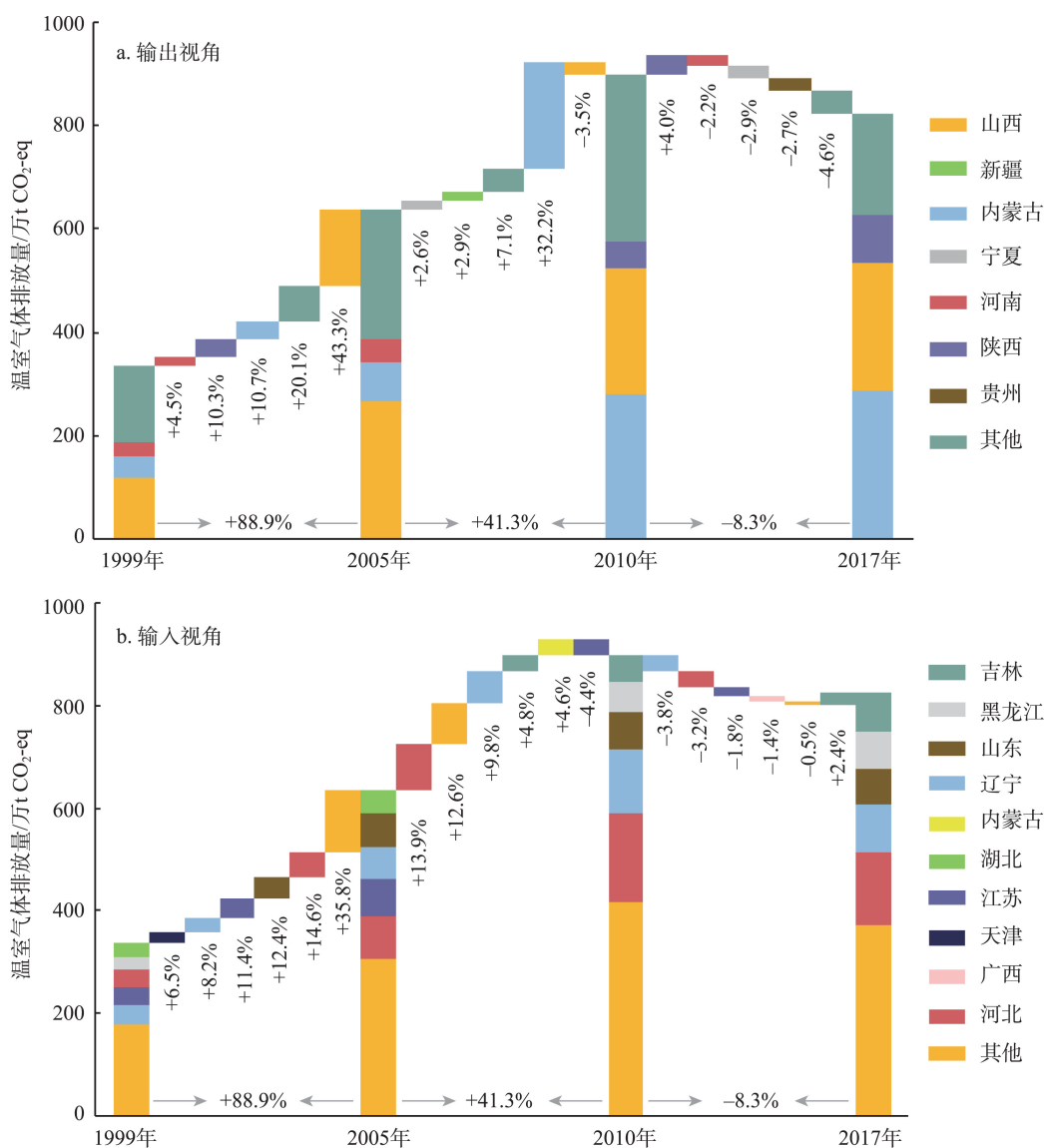


图4 1999—2017年煤炭铁路运输LC-GHGEs的时空分异

Figure 4 Spatiotemporal variations of total life cycle greenhouse gas emissions (LC-GHGEs) from coal railway transportation, 1999-2017

源的开发力度逐渐加大,西北的煤炭输出量逐渐升高。2017年,内蒙古、山西的煤炭输出对GHG的贡献占比分别为34.9%,30.2%。陕西、新疆分别从1999年的11、13位跃至3、4位,贡献占比依次为10.9%,4.0%。虽然煤炭重点输出基地逐步朝西北地区偏移,利用资源禀赋促进了当地的经济的发展并缓解了煤炭大省山西的资源环境压力。然而与山西相比,新疆、内蒙古等西北地区距离煤炭输入省份更远,因此煤炭重点输出省份的转移加剧了煤炭铁路运输的温室效应。

与输出相比,煤炭铁路运输LC-GHGEs在输入

省份的分布则更为分散。1999—2017年,贡献最为突出的煤炭输入省份也发生了变化。1999年,对铁路运输LC-GHGEs总量贡献较为突出的煤炭输入省份为辽宁、江苏、河北、湖北,贡献占比分别为11.0%、10.2%、9.8%、7.8%。上述4个省份均为1990年代的钢铁生产大省,钢材产量居全国前列,钢铁行业对焦炭的需求量巨大,因此煤炭消耗量较大。随着河北逐渐发展成为中国首屈一指的钢铁大省,2017年河北的煤炭输入对铁路运输LC-GHGEs的贡献从第3位跃居第1位,其次为辽宁、黑龙江,三者贡献占比分别为17.1%、11.3%、9%,江苏则从第2位

跌至第8位。总体来看,经济较为发达地区的煤炭输入对铁路运输温室气体排放总量的贡献占比呈下降趋势,由于其产业发展逐步降低了对煤炭的依赖程度,例如广东、浙江、江苏、北京、上海等。

3.4 煤炭铁路运输生命周期温室效应削减潜力分析

不同温室气体减排方法下,煤炭铁路运输温室气体排放情景分析的结果如图5所示:4种情景对煤炭铁路运输温室气体削减率分别为2.1%、11.4%、43.4%、57.4%。从铁路机车发展历程来看,未来电力机车占比还将进一步提升,这将有助于煤炭铁路运输温室气体排放的削减,但由于目前电力机车的普及度已较高,尤其是在煤炭输出大省,因而削减潜力较低。其次,各铁路局电力机车均达到目前最低电力消耗强度对煤炭铁路运输 LC-GHG 减排效果虽高于情景1,但由于煤炭输出大省内蒙古、山西电力机车的电力消耗强度已达到较低的水平,因此在煤炭流动情况不变的条件下,减排效果也欠佳。电力机车均使用目前最为低碳的电力对煤炭铁路运输温室气体减排效果颇为显著,如果能与情景1、2叠加实现,将进一步扩大减排量。由此可见对煤炭铁路运输系统而言,降低电力 LC-GHGs 强度最具温室气体减排潜力,尤其是对煤炭运输量较大而电力结构中火电占据主导位置的北方地区。

4 讨论

本文结果显示:铁路运输 LC-GHGs 因子具有

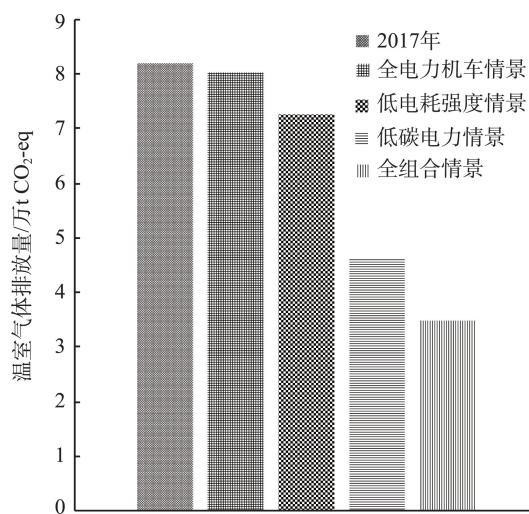


图5 煤炭铁路运输 LC-GHGs 情景分析

Figure 5 Scenario analysis of life cycle greenhouse gas emissions (LC-GHGs) from coal railway transportation

显著的时空分异特征,然而 Ecoinvent 数据库涵盖的中国铁路运输清单数据一方面较为陈旧,清单中蒸汽机车、内燃机车、电力机车的占比分别为1.6%、69.7%、28.7%,与中国当前水平(内燃机车、电力机车的占比分别为15%、85%)相差甚远;另一方面未考虑各铁路局的机车占比与机车能耗强度的显著差异,而上述空间差异对环境影响评估结果存在较大的影响。未来可以在本文的基础上,结合铁路基础设施投入等数据,进一步构建中国分区域化的铁路运输清单,从而弥补现有数据库时效性不足与空间分异特征缺失。

为了验证结果的科学与可靠性,将本文2014年的评估结果与吕涛等^[8]核算的2014年各省铁路在煤炭调运过程中产生的CO₂排放量结果进行对比。吕涛等的研究并不是基于生命周期的视角,忽视了发电所消耗煤炭的上游生产过程碳排放,导致高排放系数区域的识别结果存在偏差。本文识别的高排放系数区域均分布在西北、华北地区,其中陕西的排放系数最高,北京次之,云南位于中游水平;而吕涛等的研究结果显示云南的排放系数最高,北京最低。上述对比结果进一步印证了未立足生命周期视角的评估可能会忽视某些重要过程的排放,从而导致“热点”识别失误。从排放总量来看,吕涛等核算的CO₂排放总量为639万t,低于本文的结果(914万t CO₂-eq)。通过对比研究边界、核算模型发现造成上述差异的主要原因是本文核算边界涵盖了煤炭在省内的铁路运输,而吕涛等仅考虑煤炭省际铁路运输;其次本文基于生命周期视角,而吕涛等仅考虑内燃机柴油燃烧与电力机车电力发电过程,不考虑柴油与发电所消耗煤炭的上游生产过程所造成的碳排放;此外吕涛等仅核算CO₂,本文涵盖的温室气体还有CH₄以及N₂O。如果将本文结果中柴油与发电所消耗煤炭的上游生产过程以及煤炭省内铁路运输所造成的GHG排放扣除掉,则与吕涛等的结果基本接近(632万t)。与碳排放总量的原因类似,本文核算的铁路排放系数更高。

机车技术的升级换代大幅降低了铁路运输的温室气体排放强度,但仍有部分省份的铁路排放系数显著高于其他省份,尤其是煤炭输出大省陕西,应针对这类煤炭外运大省开展针对性的机车技术改造升级,提高其能源利用效率。同时,中国煤炭

2021年3月

铁路运输的电力机车占比已处于较高水平,因此降低电力 LC-GHGEs 强度最具减排潜力,尤其是对煤炭运输量较大而电力结构中火电占据主导位置的北方地区。已有研究也表明减少化石能源消费能实现控制气候与改善空气质量的双赢^[25,26],华北、西北地区的电网具有最大的减排经济效益^[27],政府可以根据当地情况鼓励使用低碳能源,如风能^[28,29]、太阳能^[30]、核能^[31]、生物质能^[32]等。例如,新疆、宁夏和内蒙古均拥有丰富的太阳辐射资源,具有巨大的太阳能发电潜力。同时应加大储能技术、大规模可再生能源发电并网的研发示范和应用,强化电网建设,从技术上为可再生能源的规模化利用提供保障^[33]。此外,煤炭重点输出基地逐步朝西北地区偏移,可能会使得煤炭运输的平均距离提升,同时产业升级换代也使得输入省份的煤炭需求量随之变化,相关职能部门应针对新时代煤炭供需关系,进一步优化煤炭铁路运输网络,减少不必要的煤炭长距离运输,构建更为低碳的煤炭调运系统。

5 结论

本文通过构建煤炭铁路运输 LC-GHGEs 核算模型,对 1999—2017 年煤炭铁路运输的 LC-GHGEs 因子及其总量的时空分异特征进行了分析,主要结论如下:

(1) 1999—2017 年,西北、西南铁路运输的 LC-GHGEs 因子呈下降趋势,华北、华东呈上升趋势,省际差异逐步缩小。西北地区因子下降的主要原因是电力机车工作量占比大幅度提升,对 1999 年电力机车就占据主要地位的西南地区而言,则是因为水电的大力发展促使电力 LC-GHGEs 因子下降了 35%~40%。目前电力机车为中国铁路运输的主力,而北方电网结构中火力发电占比更高,因此铁路运输 LC-GHGEs 因子呈现的总体空间分异特征为北高南低。

(2) 1999—2017 年,煤炭铁路运输 LC-GHGEs 总量首先呈现相对稳定的增长趋势,经历 2002—2011 年的煤炭“黄金十年”后开始迅速下降,然后在 2017 年再次上升,累计排放总量为 1.3 亿 t CO₂-eq。随着内燃机车被逐步淘汰,电力机车逐渐成为温室气体排放的主要贡献者,电力生产过程从 2003 年起替代内燃机车的柴油燃烧过程,成为煤炭铁路运输温室气体的主要排放过程,其次为煤炭生产过程。

(3) 随着西北煤炭资源开发力度加大,煤炭输出量也逐渐升高。内蒙古替代山西成为煤炭铁路运输 LC-GHGEs 贡献最高的煤炭输出省份,陕西、新疆则从 11、13 位跃至 3、4 位。与山西相比,新疆、内蒙古等西北地区距离煤炭输入省份更远,因此煤炭重点输出省份的转移加剧了煤炭铁路运输的温室效应。与输出相比,煤炭铁路运输 LC-GHGEs 在输入省份的分布则更为分散。1999 年对 GHG 排放贡献较为突出的煤炭输入省份均为 1990 年代的钢铁生产大省。随着河北发展成为中国首屈一指的钢铁大省,河北的贡献占比从第 3 位跃居第 1 位,其次为辽宁、黑龙江,江苏则从第 2 位跌至第 8 位。由于经济发达地区的产业发展逐步降低了对煤炭的依赖程度,其贡献占比呈下降趋势。

(4) 未来电力机车占比的进一步提升,有助于煤炭铁路运输温室气体排放的削减,但由于目前电力机车的普及度已较高,尤其是在煤炭输出大省,因而削减潜力较低。电力机车均达到目前最低电力消耗强度对煤炭铁路运输 LC-GHG 减排效果虽高于电力机车占比提升,但由于煤炭输出大省内蒙古、山西电力机车的电力消耗强度已达到较低的水平,因此在煤炭流动情况不变的条件下,减排效果也欠佳。对煤炭铁路运输系统而言,降低电力 LC-GHGEs 强度最具温室气体减排潜力,尤其是对煤炭运输量较大而电力结构中火电占据主导位置的北方地区。因此政府可以根据当地情况鼓励使用低碳能源,如风能、太阳能等。

参考文献(References):

- [1] Zhang Y, Yuan Z W, Margni M, et al. Intensive carbon dioxide emission of coal chemical industry in China[J]. Applied Energy, 2019, 236: 540–550.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 1980–2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 1980–2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook, 1980–2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 1980–2017.]
- [3] 徐伟. 我国煤炭流通体系的现状、问题及发展趋势[J]. 发展研究, 2014, (8): 10–23. [Xu W. The status, problem and trend of coal distribution system in China[J]. Development Research, 2014, (8): 10–23.]
- [4] Han S, Chen H, Long R Y, et al. Peak coal in China: A literature review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129:

- 293–306.
- [5] Wang Q, Ge S T. Carbon footprint and water footprint in China: Similarities and differences[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140070.
- [6] Yin X, Chen W Y, Eom J Y, et al. China's transportation energy consumption and CO₂ emissions from a global perspective[J]. *Energy Policy*, 2015, 82: 233–248.
- [7] 周新军. 交通运输业能耗现状及未来走势分析[J]. *中外能源*, 2010, 15(7): 9–18. [Zhou X J. Present situation and trend of energy consumption in traffic and transportation industry[J]. *Sino-global Energy*, 2010, 15(7): 9–18.]
- [8] 吕涛, 王飞, 刘凤. 中国跨区域铁路煤炭运输 CO₂ 排放及运输格局优化研究[J]. *中国煤炭*, 2017, 43(5): 16–21. [Lv T, Wang F, Liu F. Study on CO₂ emission from interprovincial railway coal transportation and transport pattern optimization[J]. *China Coal*, 2017, 43(5): 16–21.]
- [9] Li N, Chen W Y. Modeling China's interprovincial coal transportation under low carbon transition[J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 267–279.
- [10] Oberschelp C, Pfister S, Raptis C E, et al. Global emission hotspots of coal power generation[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 113–121.
- [11] 马超云, 梁肖, 毛保华, 等. 铁路运输能源消耗现状分析[J]. *中国铁路*, 2010, (11): 51–55. [Ma C Y, Liang X, Mao B H, et al. The analysis of energy consumption situation of railway transportation [J]. *Chinese Railways*, 2010, (11): 51–55.]
- [12] Sherwood J, Bickhart R B, Murawski E, et al. Rolling coal: The greenhouse gas emissions of coal rail transport for electricity generation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120770.
- [13] Mutchek M, Cooney G, Pickenpaugh G, et al. Understanding the contribution of mining and transportation to the total life cycle impacts of coal exported from the United States[J]. *Energies*, 2016, 9 (7): 559–559.
- [14] 何吉成, 李耀增. 1975–2005 年中国铁路机车的 CO₂ 排放量[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(1): 35–39. [He J C, Li Y Z. Estimation of CO₂ emission of locomotives in China during 1975–2005 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(1): 35–39.]
- [15] 徐雨晴, 何吉成, 胡国权. 中国铁路运输 33 年来的温室气体排放[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 515–521. [Xu Y Q, He J C, Hu G Q. Estimation of greenhouse gas emissions from Locomotives in China railways in recent 33 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 515–521.]
- [16] 任福民, 黄定仪, 杨月芳, 等. 铁路运输业碳排放的评定方法[J]. *北京交通大学学报*, 2015, 39(3): 62–69. [Ren F M, Huang D Y, Yang Y F, et al. Carbon emission assessment in railway transportation[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(3): 62–69.]
- [17] 柳君波, 高俊莲, 徐向阳. 中国煤炭供应行业格局优化及排放[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 473–486. [Liu J B, Gao J L, Xu X Y, et al. Pattern optimization and carbon emissions of coal supply in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 473–486.]
- [18] Wang W, Wang C J, Jin F J. Spatial evolution of coal transportation at coastal ports in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(2): 238–256.
- [19] Li J Y, Wang L, Tan X. Sustainable design and optimization of coal supply chain network under different carbon emission policies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119548.
- [20] 中国国家铁路集团有限公司. 中国铁道年鉴 2000–2018[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000–2018. [China State Railway Group Company Limited. *China Railway Yearbook 2000–2018*[M]. Beijing: China Railway Press, 2000–2018.]
- [21] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2000–2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000–2018. [Department of Energy Statistics of National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Energy Statistical Yearbook 2000–2018*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000–2018.]
- [22] 中国电力年鉴编辑委员会. 中国电力年鉴 2000–2018[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000–2018. [Editorial Board of China Electric Power Yearbook. *China Electric Power Yearbook 2000–2018* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000–2018.]
- [23] 政府间气候变化专门委员会(IPCC). 气候变化 2014: 综合报告[R]. 日内瓦: IPCC, 2014. [Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Synthesis Report*[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.]
- [24] 国家煤炭工业协会. 中国煤炭工业年鉴[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017. [China National Coal Association. *China Coal Industry Yearbook*[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2017.]
- [25] Shindell D, Smith C J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels[J]. *Nature*, 2019, 573(7774): 408–411.
- [26] Millstein D, Wiser R, Bolinger M, et al. The climate and air-quality benefits of wind and solar power in the United States[J]. *Nature Energy*, 2017, DOI: 10.1038/nenergy.2017.134.
- [27] Yue H, Worrell E, Crijns-Graus W. Modeling the multiple benefits of electricity savings for emissions reduction on power grid level: A case study of China's chemical industry[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 1603–1632.
- [28] Li H, Jiang H D, Dong K Y, et al. A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119192.
- [29] Davidson M R, Zhang D, Xiong W M, et al. Modelling the potential for wind energy integration on China's coal-heavy electricity grid[J]. *Nature Energy*, 2016, DOI: 10.1038/nenergy.2016.86.

- [30] Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. *Nature*, 2012, 488: 294–303.
- [31] Sovacool B, Schmid P, Stirling A, et al. Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power[J]. *Nature Energy*, 2020, 5: 928–935.
- [32] 李艳梅, 张雷, 程晓凌. 中国碳排放变化的因素分解与减排途径分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(2): 218–222. [Li Y M, Zhang L, Cheng X L. A decomposition model and reduction approaches for carbon dioxide emissions in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(2): 218–222.]
- [33] 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国电力行业碳减排相关政策评价[J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2368–2376. [Liu Q, Tian C, Zheng X Q, et al. Evaluation of CO₂ emission reduction policies in China's power sector[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2368–2376.]

Life cycle greenhouse gas emissions from China's coal railway transport

ZHANG You^{1,2}, CHENG Mingjin¹, LIU Xuewei¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The greenhouse gas emissions from China's coal railway transport should not be ignored considering the rich coal reserves and large consumption, as well as the spatial difference between the distribution of coal resources and economic activities. Due to the significant spatial and temporal heterogeneity of locomotive technology application, it is necessary to analyze the spatial and temporal variations of life cycle greenhouse gas emissions (LC-GHGEs) from coal railway transport and explore its reduction potential. Based on the calculation model of LC-GHGEs from coal railway transport, the provincial LC-GHGEs factors of the three types of locomotives from 1999 to 2017 were calculated. Then the overall change trend and spatial and temporal variations of LC-GHGEs from coal railway transport were characterized quantitatively. The results show that: (1) With the rising proportion of electric locomotive in the northwest and the development of hydropower in the southwest, their LC-GHGEs factors had a significant downward trend in Northwest and Southwest China, while increased slightly in North China and East China. Therefore, the inter-provincial differences have gradually narrowed. (2) From 1999 to 2017, the LC-GHGEs of coal railway transportation showed a relatively stable growth trend first. After the coal "golden decade" from 2002 to 2011, it began to decline rapidly, and rose again in 2017. Electric locomotive has become the largest contributor to greenhouse gas emissions by replacing diesel locomotive since 2002. (3) Inner Mongolia has replaced Shanxi as the coal exporting province with the highest contribution to LC-GHGEs. And the westward shift of key coal exporting provinces intensified the greenhouse gas emissions. Compared with export, the contribution of importing provinces was more scattered, and the main contributors are large iron and steel production province. Finally, suggestions are proposed from locomotive technology upgrade, energy structure adjustment, and transportation system optimization to effectively reduce greenhouse gas emissions from coal railway transport.

Key words: coal flow; carbon emissions; life cycle; climate change; coal trade