

新型煤化工的生命周期碳排放趋势分析

武娟妮¹, 张岳玲², 田亚峻³, 谢克昌^{4,5}

(1. 环境保护部环境规划院, 北京 100012; 2. 华北电力大学, 北京 102206; 3. 北京低碳清洁能源研究所, 北京 102209; 4. 太原理工大学, 太原 030024; 5. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 近年来新型煤化工的发展势头强劲, 不仅使煤转化过程的碳排放有大幅增长的趋势, 更会带动整个产业链碳排放的增长。为了全面认识新型煤化工发展给气候变化带来的潜在影响, 本文采用生命周期评价的方法, 以煤制烯烃、煤间接液化、煤直接液化、煤制天然气作为新型煤化工的代表, 分析了从煤炭生产到产品消费的整个产业链的碳排放现状和趋势。结果显示, 从生命周期的角度认识煤化工发展带来的碳排放潜力, 中期新型煤化工生命周期 CO_{2eq} (CO_2 当量) 排放量是现状的 10 倍, 远期甚至达到现状的 21 倍, 新型煤化工发展呈现过热势头, 这给我国的碳减排目标带来不容忽视的压力, 其中尤以煤制天然气、煤经甲醇制烯烃和间接液化发展潜力较大; 分析表明, 整个产业链的碳排放主要来自于煤转化过程, 约占 54%~63%, 然而该环节排放的 CO_2 纯度较高, 适于碳捕集、利用和封存 (CCUS), 可以显著降低新型煤化工快速发展给气候变化带来的影响; 其次, 新型煤化工上下游产业链碳排放约占 37%~46%, 其中用电导致的间接排放占 7%~15%, 可通过推广超临界和超超临界发电技术以及高压和超高压输电技术减排。

关键词: 煤制烯烃; 煤间接液化; 煤直接液化; 煤制天然气; 生命周期; 碳排放

中图分类号: TQ53; X511 文献标识码: A

Analysis on Carbon Emission Based on the Life Cycle of New Coal Chemical Industry

Wu Juanni¹, Zhang Yueling², Tian Yajun³, Xie Kechang^{4,5}

(1. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206; 3. National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing 102209, China; 4. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 5. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: New Coal Chemical Industry is developing vigorously recently, which not only leads to a significant carbon emission growth from coal conversion, but also from the upstream and downstream industrial chain. In order to comprehensively figure out the potential influence of New Coal Chemical Industry to climate change, Life Cycle Assessment method is used to calculate the current and potential CO_2 emission of coal to olefins (CTO), direct coal to liquid (CTL), indirect CTL, and coal to synthetic natural gas (SNG). The result shows that, the CO_{2eq} emission in the middle term will be 10 times as much as the present value, and the emission in the long term emission will be 21 times as much as the present value. The New Coal Chemical Industry is overheating and it will bring significant pressure to carbon emission reduction goal of China. Coal to SNG contributes the most to carbon emissions growth, followed by CTO and indirect CTL. 54%~63% of CO_2 comes from the conversion process which has high purity and could be significantly decreased by CCUS. The CO_2 emission from upstream and downstream industrial chain accounts for about 37%~46%, in which the indirection emission due to electricity usage accounts for 7%~15%, which could be reduced through the promotion of the supercritical and ultra-supercritical power generation technology, and the high and ultrahigh pressure transmission technology.

Key words: coal to olefins; direct coal to liquid; indirect coal to liquid; coal to synthetic natural gas; life cycle; carbon emission

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-11-05

作者简介: 武娟妮, 环境保护部环境规划院, 工程师, 主要从事环境规划研究和生命周期评价研究; E-mail: wujn@caep.org.cn

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”(2011-ZD-7)

本刊网址: www.engingsci.cn

一、前言

我国是 CO₂ 的排放大国, 主要排放源来自煤炭利用。根据国际能源署公布的数据, 2012 年我国共排放约 8.25×10^9 t CO₂, 位居世界第一, 占全世界排放总量的 26%, 其中煤炭的贡献比重占到 82.3%^[1]。随着我国的经济增长, 煤炭消费量也逐年攀升, 2014 年我国消费煤炭约 3.51×10^9 t, 虽然相比 2013 年下降 2.9%, 出现了 15 年来首次负增长, 但仍比 2010 年增长约 9.7%。我国的煤炭消费量仍处于高位, 碳排放量居高不下。根据全球碳计划公布的 2013 年度全球碳排放量数据, 我国的 CO₂ 排放量占世界排放总量的 29%^[2], 人均碳排放量首次超过欧盟, 我国在国际上面临的碳减排压力越来越大。

在煤炭利用中, 目前煤化工(包括炼焦)的耗煤量约占我国煤炭消费总量的 23.3%。近年来, 由于巨大的利润空间, 以及我国煤替油战略的实施, 各地纷纷建设和规划大规模的新型煤化工项目, 发展势头表现强劲, 预计未来新型煤化工的碳排放量会发生飞跃式的增长。但是通常讨论煤化工的碳排放问题时, 人们往往会忽略由于煤化工发展所带动的相关煤炭产业链的变化, 因此对问题的认识缺乏全面性。本文采用生命周期评价的方法, 以煤制烯烃、煤间接液化、煤直接液化、煤制天然气作为新型煤化工的代表, 分析了从煤炭生产到产品消费的整个产业链的碳排放现状和趋势, 从而全面认识新型煤化工发展给气候变化带来的潜在影响。

二、新型煤化工产业现状与发展趋势

(一) 煤制烯烃

根据调研统计, 截至 2014 年年底, 煤经甲醇制烯烃(CTO)已有 6 个项目投产, 合计产能 2.90×10^6 t, 分别为神华包头 6×10^5 t 项目和中原石化 2×10^5 t 项目、惠生南京 3×10^5 t 项目、宁波禾元 6×10^5 t 项目、中煤榆林 6×10^5 t 项目和延长石油靖边能源化工 6×10^5 t 项目。煤经甲醇制丙烯(CTP)已有两个项目投产, 合计产能 1.46×10^6 t, 分别为 1×10^6 t 神华宁东项目和 4.6×10^5 t 大唐多伦项目。近年来, 由于高油价和低煤价造就了巨大

的利润空间, 煤经甲醇制烯烃技术又在近年来取得重大技术突破, 所以各地积极规划煤经甲醇制烯烃项目, 希望利用当地煤炭资源创造显著经济效益。根据调研, 在建的煤经甲醇制烯烃项目合计产能 3.5×10^6 t, 还未通过审批的煤经甲醇制烯烃规划项目多达 30 个, 规划产能 1.477×10^7 t。煤经甲醇制丙烯的规划项目近 10 个, 规划产能 5.91×10^6 t。

(二) 煤间接液化

根据调研统计, 截至 2014 年年底, 煤间接液化现状产能 5×10^5 t, 分别为 1.6×10^5 t 潞安项目、 1.8×10^5 t 神华鄂尔多斯项目和 1.6×10^5 t 伊泰项目, 3 个项目均已实现稳定示范生产。在建的有 6 个项目, 分别为 1.8×10^6 t 潞安项目、 1×10^6 t 兖矿榆林项目、 4×10^6 t 神华宁东项目、 1×10^6 t 伊泰新疆伊犁项目、 2×10^6 t 伊泰新疆甘泉堡项目和 1.2×10^6 t 伊泰内蒙古杭锦旗项目, 合计产能 1.1×10^7 t。此外, 根据调研, 规划产能约 1.2×10^7 t。

(三) 煤直接液化

目前, 煤直接液化技术尚处于工业示范阶段。由于其技术难度大、投资风险高, 只有神华集团有限责任公司一家企业在示范该技术。神华有限责任公司的煤直接液化一期第 1 条生产线年产 1.08×10^6 t 油品到目前运行顺利, 如第 2、3 条线建成之后产能将达到 3.24×10^6 t。

(四) 煤制天然气

煤制天然气是近年来我国煤化工发展的热点之一。根据调研统计, 截至 2014 年年底, 已投产的主要有 3 个, 分别是大唐克旗一期工程 (1.33×10^9 m³·a⁻¹)、新疆庆华伊犁一期工程 (1.375×10^9 m³·a⁻¹) 和内蒙古汇能一期工程 (4×10^8 m³·a⁻¹), 合计产能 3.105×10^9 m³。据统计, 在建和审批通过的项目高达 9.57×10^{10} m³·a⁻¹。此外, 根据调研, 还未通过审批的煤制天然气规划项目产能约为 8.6×10^{10} m³。

在以下的分析中, 将已投产产能作为现状产能, 将现状产能和获批产能之和作为中期产能, 将中期产能和规划产能作为远期产能。上述 5 种新型煤化工的现状、中期和远期产能及原料煤耗如表 1 所示。从 3 个阶段的产能变化可以看出, 新型煤化工目前处于快速发展的起步阶段, 随着技术不断突破、示

范项目稳定运行,大规模的商业化运营已逐渐展开,尤其煤制天然气、煤制烯烃和间接液化是新型煤化工的发展热点。新型煤化工的发展必然会带动煤炭消费量的增加,从煤炭消费量看,5种主要新型煤化工中期煤耗将为现状的9.9倍,增加近 3.9×10^8 t,远期煤耗潜力甚至达到现状的20倍,比现状增加 8.6×10^8 t,新型煤化工的发展意愿呈现出过热势头。

三、新型煤化工生命周期碳排放研究边界

本文将在上述新型煤化工发展规模趋势的前提下,从生命周期的角度,评估5种新型煤化工将会带来的 CO_2 排放趋势。五种新型煤化工生命周期边界均从煤炭生产开始,到产品消费结束。主要包括原料煤生产、煤炭运输、煤炭转化、产品运输、产品消费、废弃产品的处置和回收6个环节。由于废弃产品的处置和回收数据难以获取,该环节未包含在本文的边界内。煤化工生命周期中用到大量电力,而电力生产将产生大量 CO_2 ,尤其是在我国以火电为主的情况下,所以本文将电力生产环节纳入研究边界。其余煤化工生命周期中使用的原料由于使用量较少,或生产过程没有显著的 CO_2 排放,均不纳入本研究边界。

本文主要关注 CO_2 排放(包括同样属于温室气体

体的甲烷),所以与 CO_2 排放无关的过程输入输出清单不再分别列出。新型煤化工生命周期各环节的能源输入和 CO_2 排放如图1所示。

(一) 原料煤生产

煤炭生产的直接碳排放主要包括两个方面,①煤炭开采前和开采中抽放的瓦斯气,即甲烷。根据调研,排放量为 6.15 立方米·吨煤炭 $^{-1}$,而 1 t甲烷的温室效应当量为 21 t CO_2 $^{[3]}$,从而计算出生产 1 t煤炭的由于瓦斯排放而造成的碳排放为 0.092 t;②燃烧柴油排放的 CO_2 。根据文献,生产 1 t煤炭需耗油 0.001 t $^{[4]}$,而燃烧 1 t柴油排放 3.16 t CO_2 $^{[3]}$,从而计算得出生产 1 t煤炭由燃烧柴油排放的 CO_2 为 0.003 t。通过以上两项加和得到生产 1 t煤炭直接排放 0.095 t CO_2 当量($\text{CO}_{2\text{eq}}$)。

此外,煤炭生产用电会导致间接的 CO_2 排放。

(二) 煤炭运输

我国煤炭的主要运输方式为铁路,所以本文将煤炭运输方式设定为铁路。煤炭运输的碳排放主要来自于柴油燃烧,按照铁路每百吨千米柴油消耗 0.5 kg计算 $^{[5]}$,则运输 1 t煤炭经过 1 km排放 0.0158 kg CO_2 。运输距离按照我国平均运煤距离 700 km计算 $^{[6]}$ 。

表 1 新型煤化工的现状、中期、远期产能及原料煤耗(单位: 10^4 t*)

新型煤化工	现状		中期		远期	
	产能	原料煤耗	产能	原料煤耗	产能	原料煤耗
煤经甲醇制烯烃	290	1 827	640	4 032	2 117	13 337
煤经甲醇制丙烯	146	940	146	940	737	4 746
间接液化	50	255	1 150	5 865	2 350	11 985
直接液化	108	424	324	1 273	324	1 273
煤制天然气	31.05	1 000	988.05	31 815	1 848.05	59 507
合计		4 446		43 926		90 849

注: *煤制天然气产能的单位为 10^8 m 3 。

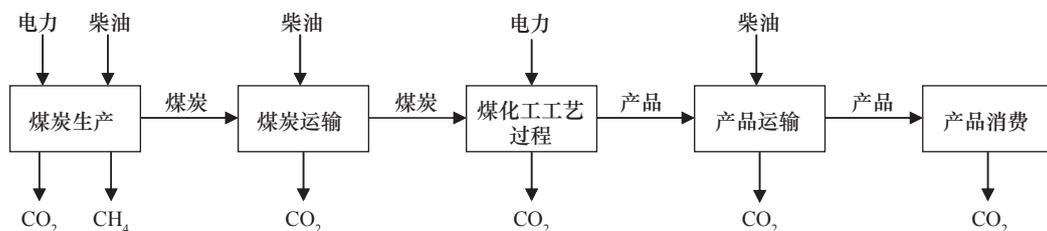


图 1 新型煤化工生命周期系统边界

(三) 煤炭转化

煤经甲醇制烯烃过程包括煤气化、合成气净化变换、甲醇合成及甲醇制烯烃四项核心技术,煤制烯烃过程中 CO₂ 主要来自煤气化过程和甲醇合成过程^[7]。通过调研,煤经甲醇制烯烃生产 1 t 烯烃排放 7.40 t CO₂,煤经甲醇制丙烯生产 1 t 丙烯排放 5.22 t CO₂。

煤间接液化工艺主要由煤的气化、合成及精炼三大步骤组成,煤间接液化过程中的 CO₂ 主要来自气化和合成过程^[7]。通过调研,煤间接液化生产 1 t 油品排放 5.59 t CO₂。

煤直接液化工艺是把固体状态的煤在高压和一定温度下直接与氢气反应,使煤炭直接转化成液体油品的工艺技术。该反应流程短,CO₂ 产率较低^[7]。通过调研,煤直接液化生产 1 t 油品排放 3.90 t CO₂。

煤制天然气的主要生产过程包括煤气化、粗煤气变换、酸性气脱除、甲烷化等工艺单元,煤制天然气过程的 CO₂ 主要来自于煤气化和煤气变换环节。通过调研,煤制天然气生产 1 000 m³ 天然气排放 2.54 t CO₂。

此外,煤炭转化过程用电会导致间接的 CO₂ 排放。

(四) 产品运输

烯烃产品的运输方式设定为卡车,油品的运输方式设定为油罐车,其碳排放均来自于柴油燃烧。按照柴油货车每百吨千米油耗为 5.2 kg^[5] 计算,则运输 1 t 烯烃或油品经过 1 km 排放 0.164 kg CO₂。

天然气通过管道运输,碳排放主要来自于天然气燃烧供能和天然气的泄露。燃烧供能方面,根据调研,管道运输 1 000 m³ 天然气经过 1 km 能耗为 0.024 5 m³ 天然气,按照燃烧 1 000 m³ 天然气产生 1.89 t CO₂^[3] 计算,则排放 0.046 kg CO₂。天然气泄露方面,根据调研,管道运输天然气的损耗为每千米 0.000 06%,其中甲烷的含量按 95% 计算,则运输 1 000 m³ 天然气经过 1 km 泄露 0.008 kg CO_{2eq}。两者合计,运输 1 000 m³ 天然气经过 1 km 排放 0.054 kg CO_{2eq}。

产品运输距离按照我国公路货物平均运距计算,2009 年为 175 km^[8]。

(五) 产品消费

烯烃的消费环节不产生 CO₂ 排放,油品和天然

气经过燃烧后生成 CO₂ 排入大气,按照燃烧 1 t 柴油产生 3.16 t CO₂,燃烧 1 000 m³ 天然气产生 1.89 t CO₂ 计算。

(六) 煤炭生产和煤炭转化用电

煤炭生产和煤炭转化中含有用电导致的 CO₂ 排放。电力生产的方式包括火电、水电、风电、核电等,其中火电由于燃烧大量煤炭而成为主要的碳排放源,2014 年我国火电发电量占总发电量的 75.2%^[9]。2014 年,我国火电供电煤耗为 318 克标准煤·千瓦时⁻¹^[9],按照燃烧 1 kg 标准煤排放 2.66 kg CO₂^[3] 计算,可以得出火电的供电 CO₂ 排放为 0.85 kg·(kW·h)⁻¹。

输电过程不产生直接的碳排放,但是输电线路损失会导致电量损失,降低能量使用效率,可以认为是间接碳排放源。2014 年全国电网输电线路损失率为 6.34%^[9],可以得出用户使用 1 kW·h 电力,电厂需供电 1.07 kW·h。

需要用电的环节包括煤炭生产和煤炭转化。根据调研,各环节用电量如表 2 所示。

表 2 新型煤化工生命周期各环节用电量

生产环节	单位产品用电量/(kW·h·t ⁻¹)
煤炭生产	28
煤经甲醇制烯烃	2 858
煤经甲醇制丙烯	2 457
间接液化	890
直接液化	977
煤制天然气	276*

注:*煤制天然气单位产品用电量的单位为 kW·h·(1 000 m³)⁻¹。

四、新型煤化工的生命周期碳排放趋势分析

(一) 整体碳排放趋势

根据以上参数设定和 5 种新型煤化工产品现状、中期、远期的产能,计算得到其现状、中期和远期的生命周期碳排放,如图 2 所示。

可以看出,按照目前新型煤化工的发展势头,将带动其生命周期 CO_{2eq} 排放量大幅增长。5 种新型煤化工产品的现状生命周期 CO_{2eq} 排放量为 7.026×10⁷ t,约占全国 CO₂ 排放总量的 0.7%;中期 CO_{2eq} 排放量将达到 7.145 7×10⁸ t,是现状的 10 倍,约占目前 CO₂ 排放总量的 7.2%,将给我国的

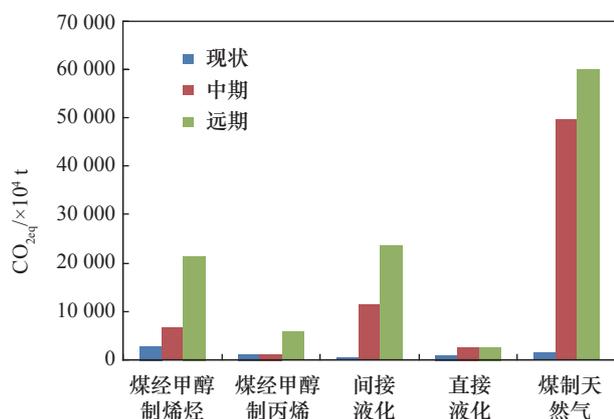


图 2 新型煤化工现状、中期、远期生命周期 CO_{2eq} 排放

碳减排目标带来一定的压力；远期甚至达到 $1.462\ 55 \times 10^9$ t，是现状的 21 倍，约占目前 CO₂ 排放总量的 14.7%，如果任由新型煤化工项目无序发展而不加以限制的话，这一压力将是不容忽视的。

与产能的扩张速度相似，煤制天然气的生命周期碳排放增幅最大，远期 CO_{2eq} 排放量 $9.282\ 5 \times 10^8$ t，超过其余 4 种产品 CO_{2eq} 排放量的总和；煤经甲醇制烯烃和间接液化均有明显增幅。

煤化工产品可以替代石油化工产品，所以煤化工发展导致的 CO₂ 新增量应减去替代的石油化工生产同样产品排放的 CO₂。但是由于煤炭是富含碳的物质，煤化工过程的 CO₂ 排放显著高于石油化工过程，所以产品替代带来的 CO₂ 减排相对于煤化工本身排放的 CO₂ 来说微乎其微，对本研究的结果不会造成明显影响。

(二) 生命周期各环节碳排放趋势

本节将新型煤化工的生命周期碳排放进行分解，其现状、中期、远期的排放分别如图 3 的 a、b、c 所示。每种产品的生命周期 CO₂ 排放结构是相对固定的，对于煤经甲醇制烯烃和煤经甲醇制丙烯，CO₂ 主要在煤转化过程中排放，此外，由于两条路线在煤转化过程中用电量较大，所以由用电导致的 CO₂ 间接排放也占相当比重；对于间接液化、直接液化和煤制天然气，CO₂ 同样主要在煤转化过程中排放，由于这三条路线产品为富含碳元素的燃料，所以消费环节将排放大量 CO₂。为了不同路线具有对比的一致性，图 3 中产品运输距离取公路货物平均距离 175 km，但是该数值比天然气的运输距离偏小，如按照西气东输一期管道 4 200 km 计算，天然气运输产生的碳排放仍然仅占煤制天然气产业链碳

排放的 5.4%，所以运输距离不会影响上述结论。

总体而言，煤转化过程的工艺排放是新型煤化工产业链碳排放的关键环节，占 54%~63%，其排放量将从现状的 4.397×10^7 t 增加到中期的 $3.828\ 7 \times 10^8$ t 和远期的 $8.085\ 4 \times 10^8$ t。但同时也说明，新型煤化工上下游产业链碳排放占 37%~46%，排放量不容忽视，所以应从生命周期的角度认识煤化工发展带来的碳排放潜力，而非仅从煤转化过程角度。

(三) 减排潜力

煤制天然气、煤制烯烃和间接液化是新型煤化工碳排放的主要增长点，但这些碳排放可以在一定程度上通过技术降低。如前所述，这几条路线的生命周期 CO₂ 排放主要在于煤转化过程，尤其是煤气化过程，该过程排放的 CO₂ 纯度较高（大于 85%），是碳捕集、利用和封存（CCUS）的理想 CO₂ 来源。如果已投产的项目实现碳捕集、利用和封存，例如，CO₂-EOR，则现状生命周期 CO_{2eq} 排放可减少 45% 左右，从 7.026×10^7 t 降低至约 3.838×10^7 t；如在建的项目也实现碳捕集、利用和封存，则中期生命周期 CO_{2eq} 排放可减少 52% 左右，从 $7.145\ 7 \times 10^8$ t 降低至约 $3.443\ 4 \times 10^8$ t；如规划的项目也能实现碳捕集、利用和封存，则远期生命周期 CO_{2eq} 排放可减少 54% 左右，从 $1.462\ 55 \times 10^9$ t 降低至约 $6.666\ 5 \times 10^8$ t。需要说明的是此处未考虑碳捕集、利用和封存本身的 CO₂ 排放，但这不会影响结论方向。

此外，用电导致的间接 CO₂ 排放占新型煤化工产业链总排放 7%~15%，该部分 CO₂ 可通过降低供电煤耗和提高输电效率减排，如推广超临界和超超临界发电技术，高压和超高压输电技术。

五、结语

通过以上分析，本文得出如下结论。

(1) 从生命周期的角度，新型煤化工的工艺排放占产业链总排放的 54%~63%，上下游产业链碳排放约占 37%~46%，所以应从生命周期的角度认识煤化工发展带来的碳排放潜力，而非仅从煤转化过程角度。

(2) 新型煤化工的发展意愿呈现出过热势头，5 种主要新型煤化工中期煤耗和生命周期 CO_{2eq} 排放将为现状的 10 倍，将给我国的碳减排目标带来一定的压力，而远期煤耗和生命周期 CO_{2eq} 排放潜

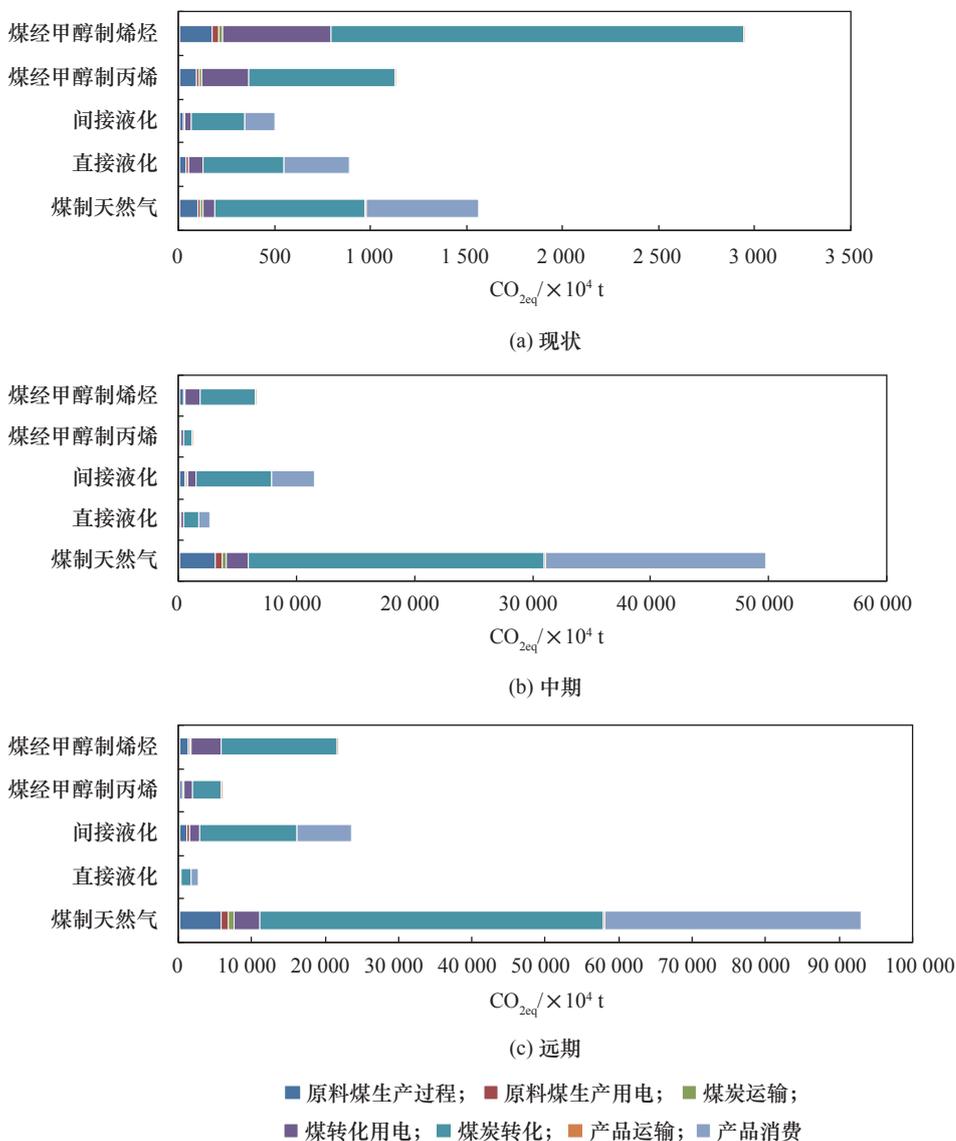


图 3 新型煤化工生命周期各环节 CO_{2eq} 排放趋势

力甚至达到现状的近 21 倍，这一压力将是不容忽视的。其中尤以煤制天然气、煤经甲醇制烯烃和间接液化发展潜力较大。

(3) 煤气化过程是碳捕集、利用和封存的理想 CO₂ 来源，通过碳捕集、利用和封存可以降低新型煤化工产业链 CO₂ 排放的 45%~54%。此外，用电导致的间接 CO₂ 排放占新型煤化工产业链总排放的 7%~15%，可通过推广超临界、超超临界发电技术和高压、超高压输电技术实现减排。

参考文献

[1] International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2014[R]. Paris: IEA, 2014.
[2] 中华人民共和国驻奥地利经商参处. 2013年中国人均CO₂排放

量首次超过欧盟[EB/OL]. [2014-09-22]. <http://at.mofcom.gov.cn/article/jmxw/201409/20140900739703.shtml>.
[3] 国家发展改革委. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京: 国家发展改革委, 2011.
[4] HJ 446—2008. 中华人民共和国环境保护行业标准之清洁生产标准煤炭采选行业[S].
[5] 贺玉龙, 杨立中. 铁路在综合交通运输体系中的比较优势[J]. 铁路运输与经济, 2007, 29(12): 13.
[6] 新华网. 铁道部谋划“西移”煤运布局[EB/OL]. [2015-10-18]. http://news.xinhuanet.com/energy/2011-08/17/c_121872417.htm.
[7] 葛启明, 杜彦学, 袁善录, 等. 煤化工工艺过程CO₂排放分析及减排技术[J]. 煤化工, 2010, 6: 25-26.
[8] 张扬. 我国交通运输业发展现状及能源消费趋势分析(下)[J]. 节能与环保, 2012(02): 50.
[9] 中电联规划与统计信息部. 2014年电力工业运行简况[EB/OL]. [2015-02-02]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/gongxufenxi/dianliyunxingjiankuang/2015-02-02/133565.html>.