

CO₂-DMC 产业链碳足迹分析

于 涵¹, 蒋庆哲¹, 宋昭峥^{1*}, 袁 波²

(1. 中国石油大学重质油国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油集团安全环保技术研究院, 北京 102206)

摘要: 基于全生命周期法(LCA)对 CO₂-DMC(碳酸二甲酯)产业链碳足迹进行了分析, 分别以常规反应塔工艺、膜反应塔工艺和反应精馏塔工艺为对象, 考察了各工艺在不同能源供应情景下产业链的碳足迹情况, 对原料的获取、原料的运输、燃料的使用、燃料的运输以及产品的配送等环节进行了碳足迹分析。结果表明: 3 种工艺中反应精馏塔工艺能耗、碳足迹最小, 常规反应塔工艺最大; 以渣油为燃料常规反应塔工艺单位产品碳足迹最大, 碳足迹为 1.67 t CO₂/t DMC, 以天然气为燃料的反应精馏塔工艺碳足迹最小, 单位产品碳足迹为 0.70 t CO₂/t DMC; 燃料消耗碳足迹在总碳足迹中占比最大, 其次为原料上游排放。

关键词: 全生命周期法; CO₂; 碳酸二甲酯; 产业链; 碳足迹

中图分类号: X802.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)03-0009-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.03.003

Carbon footprint analysis of CO₂-DMC industrial chain

YU Han¹, JIANG Qing-zhe¹, SONG Zhao-zheng^{1*}, YUAN Bo²

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing 102206, China)

Abstract: The carbon footprints of CO₂-DMC industrial chain are calculated based on Life Cycle Assessment (LCA). Carbon emissions of conventional reactor process, membrane reactor process and reactive distillation process of different fuel consumption scenarios are analyzed. The carbon footprints are divided into five sections including raw material production, raw material transportation, fuel consumption, fuel transportation and DMC distribution. The studies of CO₂ emissions are carried out. The results show that the reactive distillation process has the lowest energy consumption and the lowest carbon footprint. By contrast, the conventional reactor has the largest carbon footprint with the carbon footprint of 1.67 t CO₂/t DMC. The carbon footprint of the reactive distillation process with natural gas as fuel is the smallest and the carbon footprint per unit product is 0.70 t CO₂/t DMC. The fuel consumption carbon footprint is the largest in the total carbon footprint, followed by the feedstock upstream.

Key words: life cycle assessment; CO₂ utilization; dimethyl carbonate; carbon footprint

大气中的 CO₂ 是引起气候变暖的主要原因之一, 其主要来自于人类活动所导致的化石燃料的使用^[1]。据估计, 与能源消耗相关的 CO₂ 排放量(碳排放)每年以 2.1% 的速率增长^[2]。石化领域中如原油加工、天然气脱硫、合成氨等工艺每年碳排放达到 1 460 Mt; 而每年作为原料用于合成尿素、碳酸二甲酯(DMC)等化工产品的 CO₂ 消耗量仅约 178 Mt^[3], 将 CO₂ 作为资源加以利用具有极大发展潜力。其中, 从技术可行性及产品性能等方面比较, CO₂-DMC 产业链被认为是最佳的 CO₂ 化工利用方案^[4]。DMC 是一种重要的羰基/甲基化试剂, 被广泛用于药物合成、杀虫剂、复合材料、涂料等行

业^[5], 被称为 21 世纪有机合成领域的“新基石”^[6]。近年来, 诸多学者对于该产业链的研究局限于催化剂、动力学等微观层面^[7-9], 对于 CO₂-DMC 产业链能量需求、碳足迹等方面的研究较少。笔者以 CO₂ 为原料, 先后经过尿素合成、尿素醇解得到 DMC 产品, 基于全生命周期法, 对比分析了不同工艺及能源消耗情景下 DMC 产品碳足迹分布情况。

1 产业链工艺流程

CO₂-DMC 工艺采用尿素醇解法工艺^[10], 分为尿素合成和 DMC 合成两部分, 尿素合成部分采用高压法^[11]工艺, DMC 合成部分分别对常规反应塔、膜

收稿日期: 2016-09-23

基金项目: 中国石油天然气集团公司重大科技专项(016E-1209)

作者简介: 于涵(1989-), 男, 博士研究生, 从事碳减排、回收、利用及能源发展战略等研究, 13811726653, yuhanluckydog@126.com; 宋昭峥(1972-), 男, 副教授, 从事油田化学、碳减排及能源发展战略等研究, 通讯联系人, 18911226098, song@cup.edu.cn

反应塔和反应精馏塔三种不同工艺进行了分析。

1.1 常规反应塔工艺

工艺流程如图 1 示:原料 CO_2 和 NH_3 经过压缩、预热进入尿素合成塔 R-1 后,产物流经过分离器 V-1、V-2 分离出未反应的原料气用于循环,分离器 V-3 将产物流中的尿素产品除水提纯后与甲醇原料混合进入 DMC 合成塔 R-2。DMC 产物流经过 V-4 分离出酯交换反应生成的 NH_3 经过提纯后循环使用,V-5 将产物流中未反应的尿素回收循环使用,最后经过 V-6 进一步分离出未反应的甲醇后得到 DMC 产品^[12]。

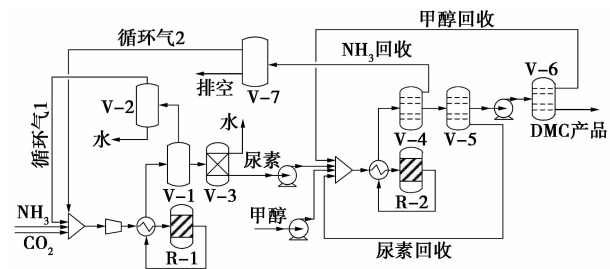


图 1 CO_2 -DMC 常规反应塔工艺流程

1.2 膜反应塔工艺

该工艺尿素合成部分与常规反应塔工艺相同,在 DMC 合成部分选用膜反应塔 R-2,在 DMC 合成

过程中产生的 NH_3 由塔顶排出用于循环,塔底产品进入 V-4 后回收尿素,再经过 V-5 分离出未反应的甲醇后得 DMC 产品^[13]。工艺流程如图 2 所示。

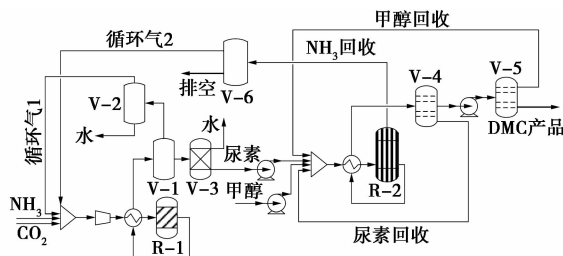


图 2 CO_2 -DMC 膜反应塔工艺流程

1.3 反应精馏塔工艺

该工艺尿素合成部分与常规反应塔工艺相同,

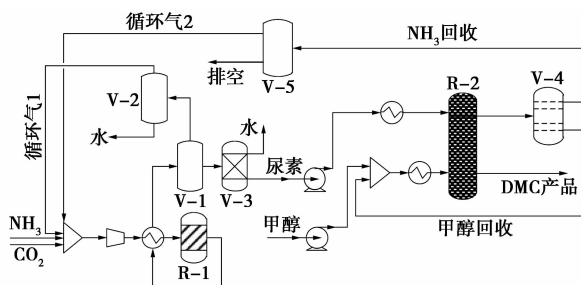


图 3 CO_2 -DMC 反应精馏塔工艺流程

(上接第 8 页)

申请人在中国市场占据竞争优势地位,而中国申请人中,大学或科研机构排名较靠前,拥有较强的技术竞争实力。

表 5 中国专利申请人 Top10 情况

排名	申请人	申请量
1	Novozymes A/S	98
2	E. I. Du Pont de Nemours & Company	79
3	Tianjin University	40
4	Koninklijke DSM NV	39
5	Shandong University	33
6	Xyleco Inc	32
7	Iogen Energy Corp	31
8	China Petroleum & Chemical Corp.	30
9	Jinan Shengquan Group Shareholdings Co., Ltd.	29
10	Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences	27

3 结语

专利资源是丰富的技术宝库,专利战略是企业长期健康发展的生命线。国外纤维素乙醇技术经过多年发展,包括帝斯曼、诺维信等大型跨国集团已经形成了较为成熟的核心专利及配套技术布局,并建

立了全球专利保护网络。国内该技术在整体上与国外还存在一定差距,缺少核心技术保护,也遇到了不少科研难题,且尚未建立全面的专利保护机制。因此,国内研究者应在关键性技术方面进行研发突破,一方面,可以借鉴已失效专利技术的研发思路以寻求技术突破;另一方面,通过技术合作或技术转让等获得重要技术,并进行外围研究和专利布局,以提高竞争力。

参考文献

- [1] 杜风光,冯文生. 秸秆生产乙醇示范工程进展[J]. 现代化工, 2009, 29(1): 16-19.
- [2] 张继泉,孙玉英,关凤梅,等. 玉米秸秆稀硫酸预处理条件的初步研究[J]. 纤维素科学与技术, 2012, 10(2): 32-36.
- [3] 冯玮,宋鹏,向文良. 秸秆发酵生产燃料乙醇关键技术的发展方向研究[J]. 现代农业科学, 2008, 15(10): 116-117.
- [4] Mosier N, Wyman C, Dale B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(6): 673-686.
- [5] Kumar P, Barrett D M, Delwiche M J, et al. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2009, 48(8): 3713-3729. ■

DMC 合成单元采用反应精馏塔,如图 3 所示。原料尿素、甲醇经过压缩、加热后,分别由塔顶和塔底进入反应精馏塔 R-2,DMC 产物由塔底直接流出,塔顶物流经过 V-4 分离出甲醇、NH₃ 循环使用^[14]。

以上 3 种工艺物耗、能耗数据及原料上游排放因子^[15]如表 1 所示。

表 1 3 种反应塔工艺物耗能耗

DMC 产能/ (t·a ⁻¹)	物耗/(t·a ⁻¹)			能耗/(GJ·a ⁻¹)			
	CO ₂	NH ₃	甲醇	尿素合 成部分	DMC 合 成部分	总能耗	
常规反应塔	43718	24732	917	31063	171836	452482	624318
膜反应塔	42653	24732	894	30302	171661	319505	491166
反应精馏塔	44328	24732	930	31841	171661	235783	407444

2 全生命周期碳足迹分析

2.1 项目边界

生命周期法按边界范围可分为“从摇篮到坟墓”和“从摇篮到大门”2 种方法^[16-17],由于 DMC 大多用于其他化学品的合成,因此选用“从摇篮到大门”确定项目边界,如图 4 所示。虚线区域内为项目边界,边界包括生产原料的运输、燃料的运输、使用以及产品的配送等环节。

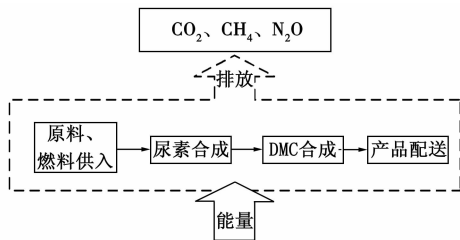


图 4 全生命周期法边界

2.2 生命周期清单数据

产品生产中原料输入主要为 CO₂、NH₃ 和甲醇,其中 NH₃、甲醇的上游碳排放因子来源于 IPCC 排放因子缺省值^[18],排放因子分别为 1.694 t CO₂/t NH₃、0.67 t CO₂/t CH₃OH; CO₂ 原料为炼厂尾气经过 MEA 溶液吸收解吸等提纯工艺处理后所得,其碳排放因子根据上游处理工艺能耗数据计算所得,其值为 0.198 t CO₂/t CO₂^[19]。

化工生产工艺的能耗来源广泛,本文对以煤、燃料油、天然气 3 种能源供应情景下工艺的碳排放进行对比分析,各排放因子见表 2^[20]。

表 2 各种燃料排放因子

	上游排放/(g·MJ ⁻¹)			使用排放/(g·MJ ⁻¹)			总排放因子/ (g·MJ ⁻¹) CO ₂ 当量
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
煤	5.73	0.43	0.017	81.6	0.001	0.0001	97.27
柴油	27.87	0.08	0.044	72.6	0.004	0.0002	102.46
汽油	28.83	0.09	0.047	67.9	0.080	0.0002	100.70
渣油	25.33	0.07	0.041	75.8	0.002	0	102.79
电	265.22	1.01	0.392	0	0	0	288.45

本文中考察了 CO₂、CH₄、N₂O 3 种温室气体的排放情况,总排放因子根据各气体的升温潜势值折算成 CO₂ 排放当量计算^[21],时间跨度选择 100 年,CO₂ 的升温潜势值为 1,CH₄ 为 23,N₂O 为 296,燃料使用排放计算如式(1)所示。

$$E_{\text{fuel}} = EC \times EF_{\text{total}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, E_{fuel} 为某燃料使用总排放,t/a; EC 为工艺能耗,GJ/a; EF_{total} 为某燃料总排放因子,g/MJ。

边界内原料的运输、燃料的运输以及产品的配送过程都会产生排放,运输方式、距离的不同其相应的碳排放也不同^[22]。本次研究中原料及燃料油、DMC 产品配送采用公路运输,燃料煤采用铁路运输,天然气采用管道运输,能源消耗强度及排放因子如表 3 所示^[23-24]。

表 3 不同运输过程及能源密集度

运输物料	运输方式	运输距离/km	能源密集度/(kJ·(t·km) ⁻¹)
原料运输			
NH ₃	短距离陆运	500	1328(柴油 68%,汽油 32%)
甲醇			
燃料运输			
燃煤	铁路运输	500	240(柴油 55%,电力 45%)
燃料油	短距离陆运	500	1328(柴油 68%,汽油 32%)
天然气	管道运输	500	372(天然气 99%,电力 1%)
产品配送			
DMC	短距离陆运	500	1328(柴油 68%,汽油 32%)

不同的运输方式能源密集度不同且能源消耗结构也不同,计算时需结合表 1、2、3 按比例折算排放量,计算公式如式 2。

$$E_{\text{trans}} = W \times D \times I \times \alpha \times EF_{\text{total-A}} + W \times D \times I \times (1 - \alpha) \times EF_{\text{total-B}} \quad (2)$$

式中, E_{trans} 表示运输过程碳排放量,t/a; W 为运输量,t/a; D 为运输距离,km; I 为运输能源密集度,

$\text{kJ}/(\text{t}\cdot\text{km})$; α 为能源消耗比例, %; $EF_{\text{total-A}}$ 、 $EF_{\text{total-B}}$ 分别代表燃料 A、B 的总排放因子, g/MJ ; 运输碳排放计算中假设所有物流运输距离为 500 km。

3 碳足迹分析

3.1 总碳足迹分析

由式 1~2 及表 1~3 数据计算出不同工艺总排放, 结果如表 4 所示。

表 4 不同能源情景下不同反应塔工艺碳足迹情况

	常规 工艺	膜反应 工艺	反应精 馏工艺
工艺总耗能/ $(\text{GJ}\cdot\text{a}^{-1})$	624318.0	491166.0	407444.0
DMC 产量/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	43718.0	42653.0	44328.0
DMC 单位能耗/ $(\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1})$	14.3	11.5	9.2
原料来源相关排放/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$			
运输	2163.8	2110.7	2217.3
上游	27262.5	26713.7	27805.8
生产过程能源供给			
情景 1 排放/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$			
运输	686.9	540.4	448.3
使用	60729.0	47777.0	39633.1
情景 2 排放/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$			
运输	1051.0	826.9	685.9
使用	64171.2	50485.0	41879.5
情景 3 排放/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$			
运输	108.4	85.3	70.8
使用	35057.1	27580.3	22879.0
DMC 产品配送过程排放/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	2958.0	2885.9	2999.2
CO_2 利用量/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	24732.0	24732.0	24732.0
情景 1 总碳足迹/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	93800.2	80027.7	73103.8
情景 2 总碳足迹/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	97606.4	83022.2	75587.8
情景 3 总碳足迹/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	67549.8	59375.9	55972.1
情景 1 净排放(总碳足迹- CO_2 利用量)/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	69068.2	55295.7	48371.8
情景 2 净排放(总碳足迹- CO_2 利用量)/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	72874.4	58290.2	50855.8
情景 3 净排放(总碳足迹- CO_2 利用量)/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	42817.8	34643.9	31240.1
情景 1 碳足迹($\text{t CO}_2/\text{t DMC}$)	1.58	1.30	1.09
情景 2 碳足迹($\text{t CO}_2/\text{t DMC}$)	1.67	1.37	1.15
情景 3 碳足迹($\text{t CO}_2/\text{t DMC}$)	0.98	0.81	0.70

注: 情景 1 中生产过程能耗全部由煤炭提供; 情景 2 中生产过程能耗全部由燃料油提供; 情景 3 中生产过程能耗全部由天然气提供。

由表 4 可知, 不同工艺相同能源情景下, 常规反应塔工艺产品单位耗能及碳足迹总量最高, 由于反应精馏塔工艺 DMC 合成与产品提纯在精馏塔中同时完成, 减少了操作单元, 因此能耗大大降低; 以情景 1 为例, 常规反应塔工艺总能耗为 624 318.0 GJ/a, 碳足迹为 93 800.2 t CO_2/a , 与其相比反应精馏塔工艺能耗为 407 444.0 GJ/a, 碳足迹为 73 103.8 t CO_2/a , 能耗减少了 34.7%, 碳足迹减少了 22.2%。相同工艺不同能源情景下, 以天然气为燃料的碳足迹量最小, 由于燃料油的上游加工过程复杂, 因此其上游排放系数较大从而导致总碳足迹最大。

通过对比不同情景下不同工艺的单位产品碳足迹可以看出, 情景 1 和情景 2 单位产品碳足迹大小相近, 情景 3 下各工艺碳足迹大小明显小于其他值。情景 2 下的常规反应塔工艺其单位产品碳足迹最大, 数值为 1.67 t $\text{CO}_2/\text{t DMC}$, 单位产品碳足迹最小的是情景 3 下反应精馏塔工艺, 碳足迹为 0.70 t $\text{CO}_2/\text{t DMC}$, 比最大值小 58.1%。

3.2 碳足迹分布

根据表 4 计算结果可知各环节碳足迹占比情况, 本节以情景 1 下膜反应塔工艺为例对产品碳足迹分布进行分析, 如表 5 所示。

表 5 产品碳足迹分布

碳足迹 种类分布	原料 运输	原料 上游	燃料 运输	燃料 使用	产品 配送	总量
占比/%	2.64	33.38	0.68	59.70	3.60	100

由表 5 可得, 燃料燃烧导致的碳足迹比率最大, 占 59.70%; 其次是原料上游碳足迹, 占 33.38%, 两者占总碳足迹的 93.08%; 其余为运输产生的排放, 包括原料、燃料的运输及产品的配送, 共占比 6.92%。与原料相关的碳足迹(原料上游及运输)占 36.02%, 与燃料相关碳足迹(燃料运输及使用)占 60.38%, 共占 96.40%, 产品的配送碳足迹占总量的 3.60%。

4 结论

本文以 CO_2 -DMC 产业链为对象, 基于全生命周期法对 CO_2 -DMC 产业链碳足迹进行了计算分析, 考察了不同能源供应情景下不同反应塔工艺能耗及碳足迹, 结论如下。

(1) 相同能源情景下不同反应塔工艺中常规反

应塔工艺能耗最高,相应碳排放及单位产品碳足迹也最大,反应精馏塔工艺能耗最低,单位产品碳足迹最小,膜反应塔介于两者之间。由于本文未考虑工艺经济性,因此在经济条件允许的情况下应当优先选择反应精馏塔工艺。

(2)在各情景下,以天然气为燃料的反应精馏塔工艺碳足迹最小,其单位产品碳足迹为 0.70 t CO₂/t DMC,以渣油为燃料的常规反应塔工艺碳足迹最大,单位产品碳足迹达 1.67 t CO₂/t DMC。3种能源情景中,碳排放强度最小的是天然气,渣油的碳排放强度最大,从清洁生产的角度考虑能耗来源应当选择天然气。

(3)项目边界内产品碳足迹被分解成原料运输、原料上游、燃料运输、燃料使用及产品配送5个部分,其中燃料的使用碳足迹占比最大,占59.70%;其次为原料上游碳足迹,占33.38%;与燃料相关碳足迹占60.38%,与原料相关碳足迹占36.02%,产品配送占3.60%。因此减少产品碳足迹应从工艺能耗优化着手,选用更清洁的燃料,以及碳足迹更小的化工原料。

参考文献

[1] 程叶青,王哲野,张守志,等.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J].地理学报,2013,10:1418-1431.

[2] Yixiang Xu, Loren Isom, Milford A Hanna. Adding value to carbon dioxide from ethanol fermentations [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:3311-3319.

[3] Michele Aresta, Angela Dibenedetto, Antonella Angelini. The changing paradigm in CO₂ utilization [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2013, (3/4):65-73.

[4] M M Faruque Hasan, Eric L. First, Fani Boukouvala, et al. A multi-scale framework for CO₂ capture, utilization, and sequestration; CCUS and CCU [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2015, 81:2-21.

[5] 孙晓牧. 碳酸二甲酯的生产现状及发展分析 [J]. *精细与专用化学品*, 2007, 06:32-35.

[6] Iwal Omae. Recent development in carbon dioxide utilization for the production of organic chemicals [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2012, 256:1384-1405.

[7] 刘洪玮,石红瑞,张蓓蕾.基于LMBP神经网络的催化精馏合成碳酸二甲酯的研究 [J]. *石油化工自动化*, 2009, 05:44-47.

[8] Guoqiang Zhang, Zhong Li, Huayan Zheng, et al. Influence of surface oxygenated groups on the formation of active Cu species and the catalytic activity of Cu/AC catalyst for the synthesis of dimethyl carbonate [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 390:68-77.

[9] 张四芳,刘建春,王振国,等. CuO-ZnO/PF 催化剂合成碳酸二甲酯的研究 [J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2013, 01:91-94.

[10] Jianjun Sun, Bolun Yang, Xiaoping Wang, et al. Synthesis of dimethyl carbonate from urea and methanol using polyphosphoric acid as catalyst [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2005, 239:82-86.

[11] Xiangping Zhang, Suojiang Zhang, Pingjing Yao, et al. Modeling and simulation of high-pressure urea synthesis loop [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2005, 29(5):983-992.

[12] Kongpanna P, Pavarajarn V, Gani R, et al. Techno-economic evaluation of different CO₂-based processes for dimethyl carbonate production [J]. *Chem Eng Res Des*, 2015, 93:496-510.

[13] Zhiqiang Hou, Ligang Luo, Kun Liu, et al. High-yield synthesis of dimethyl carbonate from urea and methanol using a catalytic distillation process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 236:415-418.

[14] Feng Wang, Ning Zhao, Fukui Xiao, et al. Distillation-Advances from Modeling to Applications [M]. Austria: Sina Zereshki, 2012:3.

[15] Pichayapan Kongpanna, Deenesh K Babi, Varong Pavarajarn, et al. Systematic methods and tools for design of sustainable chemical processes for CO₂ utilization [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2016, 87:125-144.

[16] Garcia R, Freire F. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG protocol, PAS 2050 and climate declaration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66:199-209.

[17] Stefania Proietti, Umberto Desideri, Paolo Sdringola, et al. Carbon footprint of a reflective foil and comparison with other solutions for thermal insulation in building envelope [J]. *Applied Energy*, 2013, 112:843-855.

[18] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006.

[19] Li Kangkang, Leigh Wardhaugh, Feron Paul, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO₂ capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements [J]. *Applied Energy*, 2016, 165:648-659.

[20] Xunmin Ou, Xiliang Zhang, Shiyan Chang. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations [J]. *Energy Policy*, 2009, 38:406-418.

[21] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC fourth assessment report: climate change 2007. 2007.

[22] Dong Xiang, Siyu Yang, Xiuxi Li, et al. Life cycle assessment of energy consumption and GHG emissions of olefins production from alternative resources in China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 90:12-20.

[23] V Patil, V Shastri, M Himabindu, et al. Life-cycle analysis of energy consumption, GHG emissions and regulated pollutants emissions of automotive fuel pathways in China [J]. *Energy*, 2016, 96:699-712.

[24] Xunmin Ou, Yan Xiaoyu, Xiliang Zhang. Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China [J]. *Applied Energy*, 2011, 88:289-297. ■