

Life-Cycle Fossil Energy and GHG Emission Intensities of Coal-Based Vehicle Fuels in China

Xunmin Ou^{1,2}, Xiliang Zhang^{1,2}

1. Institute of Energy, Environment and Economy (3E), Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China

2. China Automotive Energy Research Center (CAERC), Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China

ouxm@tsinghua.edu.cn (Dr. X.M. Ou); zhang_xl@tsinghua.edu.cn (Prof. X.L. Zhang)

Abstract: Coal is dominating the context of energy supply and demand, and is also considered as one important option to be converted to liquid and gaseous fuels for vehicle use in future in China. Tsinghua-CA3EM model is employed to calculate the life-cycle fossil energy and GHG emission intensity of the four major pathways of coal-based vehicle fuel in China. The results show that: 1) both the two aspects of intensities of the studied coal-based methanol, coal-based dimethyl ether, direct coal-to-liquid and indirect coal-to-liquid are all about one time higher than conventional gasoline and diesel for vehicle pathways; 2) with the technology development in future, the above situation can be improved; 3) the development of coal-based fuels will substitute the petroleum in China effectively; and 4) Carbon Dioxide capture and storage technology is an effective option to study for low-carbon coal utilization.

Key words: coal-based fuel; life-cycle analysis; energy consumption; GHG; China

中国煤基车用燃料全生命周期能源和碳强度分析

欧训民^{1,2}, 张希良^{1,2}

1.清华大学 能源环境经济研究所, 北京, 中国, 100084

2.清华大学 中国车用能源研究中心, 北京, 中国, 100084

ouxm@tsinghua.edu.cn (欧博士); zhang_xl@tsinghua.edu.cn (张教授)

摘要: 煤炭在中国能源供需结构中处于主体地位, 并正被考虑作为未来车用液体燃料的重要原料。本文运用 Tsinghua-CA3EM 模型, 计算出中国主要四种煤基车用燃料的全生命周期化石能源和碳排放强度。结果表明, 煤基甲醇、煤基二甲醚、直接法煤制油和间接法煤制油路线的上述两种强度均高出传统车用汽柴油路线一倍以上; 所有路线将随着未来技术发展而减能降碳; 煤基燃料的发展将有效替代石油; 碳捕获储存技术是实现低碳利用煤炭的有效备选手段之一。

关键词: 煤基燃料; 全生命周期分析; 能源消费; 温室气体排放; 中国

1 引言

1.1 煤炭是中国的主体能源

中国煤炭已探明的可采储量为 1145.00 亿吨, 合 573 亿吨标油(ton oil equivalent, toe), 占世界总量的 13.9%, 而已探明的石油和天然气可采储量仅为煤炭的 7.46%^[1]。中国目前是世界能源第一大生产国和第二大消费国^[2], 2009 年中国煤炭消费量为 15.37 亿 toe, 远高于其他国家, 占世界消费总量的 46.9%^[1]。按电热当量计算, 煤炭在中国一次能源消费总量中占比为 77.2%^[2], 高于世界能源消费总量中石油和天然气占比 (65.6%)^[1]。煤炭这一相对丰富能源资源, 在中国能

源供需中将长期发挥重要作用, 但其利用需要实现高效和清洁化。

1.2 中国交通部门能源需求迅速增长

交通运输部门已经成为中国能源需求 (特别是石油需求) 和温室气体(Green House Gas, GHG)排放增长最迅速的部门之一。根据文献[3]计算, 中国交通部门的能源需求量以 7.0% 年均增长率, 从 1980 年的 2520 万 toe 达到 2007 年的 1.91 亿 toe。2008 年中国是全球汽车第三大生产国和第二大消费国^[4], 由于中国对汽车购买的财政补贴刺激, 和日本、美国汽车市场相对萎缩, 2009 年中国成为全球汽车第一大生产国。

汽车保有量的增长,进一步刺激了国内石油产品的需求。而国产石油供应缓慢增长,对进口石油的依赖加剧,到2008年中国石油进口依存度达到53.8%^[2]。

国际能源署 IEA 预测,如果没有积极的政策和措施以减少石油需求,2030年中国石油需求将达到每年8.08亿吨,其中道路运输消耗将占其中43%^[5]。中国未来汽车保有量增长也非常惊人,从2009年的6200万辆可增长为2050年的约5亿辆,相应的每年能源需求和温室气体排放量,将分别达到5.64亿toe和16.36亿吨二氧化碳当量(CO_{2,e})^[6]。

1.3 煤基燃料成为车用替代能源重要备选方案

为了遏制石油需求,中国政府正在大力发展车用替代燃料。和德国和美国等煤炭储量相对丰富的国家类似,中国对通过发展煤基液体燃料(coal-based fuel, CBF)以满足车用需求寄予厚望^{[6][7][8][9][10]}。主要几种CBF的技术途径分别处于技术示范或者商业化运行阶段:中国已经每年约有200多万吨煤制甲醇(coal-based methanol, CBM)用于调和运输燃料;煤基二甲醚(coal-based DME, CBDME)车用技术也处于示范当中;直接法煤制油(direct coal-to-liquid, DCTL)和间接法煤制油(indirect coal-to-liquid, IDCTL)技术路线均有项目实现试运行,另有不少项目处于报批或者施工建设过程中^[11]。对CBF未来的发展,业界予以重视,据分析到2050年中国CBF可替代15亿吨石油^[6]。

1.4 煤基燃料全生命周期分析日趋重要

能耗及GHG排放的全生命周期分析(life-cycle analysis, LCA)成为能源政策实施是否恰当的必要分析步骤和重要决策依据。许多研究对CBF进行过LCA工作,但对中国的最新情况分析较少^{[12][13][14]}。总的来说,由于煤炭高含碳量特性,CBF全生命周期GHG排放较高,碳捕获与封存技术(CO₂ capture and storage, CCS)作为一项重要GHG减排技术措施,正被研究以削弱CBF高碳排放的劣势^{[15][16]}。

2 研究方法

2.1 研究模型及边界

沿袭国际上成熟的车用燃料能源使用和GHG排放LCA微观分析^[17],采用Tsinghua-CA3EM模型,研究主要涵盖燃料上游生产阶段,包括资源开采、资源运输、燃料生产、燃料运输、分配和储存,以及燃

料加注过程。系统边界扩展到相关工艺燃料和交通燃料的直接使用及其相应的LCA能耗和GHG排放,但不考虑工厂基建和交通工具制造等活动导致的间接能耗。模型运算中会出现循环引用,此处通过利用EXCEL软件中的内嵌循环计算(即迭代运算)功能实现准确测算^{[7][14][18]}。

2.2 全生命周期能源强度和碳强度定义

CBF全生命周期化石能源强度(EF_{LCA})定义为单位能量CBF获取过程中包括原料投入的一次化石能源(煤炭、石油和天然气)总消耗量(MJ/MJ);全生命周期碳排放强度(GHG_{LCA})定义为单位能量CBF获取和利用过程中导致的GHG排放量(g CO_{2,e}/MJ)。在 GHG_{LCA} 计算过程中,主要考虑CO₂、CH₄和N₂O,并且按照全球增温潜力系数统一折算为CO_{2,e}^[19]。

2.3 计算方法及主要参数

能源强度 EF_{LCA} 是两部分分别导致的全生命周期能耗之和:煤化工用于化工和自备电厂发电所耗精煤、运输配送煤基液体燃料所耗汽柴油等运输用能;碳强度 GHG_{LCA} 是CO₂、CH₄和N₂O强度的折算之和。CO₂、CH₄和N₂O强度的分别计算中,是对 EF_{LCA} 计算过程中得到的各种直接消耗能源的上游排放强度和直接排放进行求和得到:如对煤化工消耗的精煤而言,既考虑其从资源开采到加工完毕的整个上游阶段的排放,也考虑在化工厂使用时候的直接排放;对运输用能而言,也同样是始于资源开采的整个全生命周期的排放。相关具体计算公式可参见文献^[18]和^[20]。

因此需要获取三类参数:(1)煤化工中已考虑自备电厂用能的总体转化效率参数;(2)CBF运输过程的能耗情况;(3)各类工艺燃料(对化工厂耗能和运输用能的统称)的全生命周期能源和碳排放强度数据。

3 主要数据及假设

3.1 CBF转化效率参数

CBF工厂效率高不仅与技术路线相关,也因工厂规模和投产时间不同而有所变化,通过文献调研和专家访谈,对主要CBF目前(以2008代表)和未来(以2020年代表)的能源效率进行区间估计,参见表1(此处能源效率综合考虑了自备电厂煤炭投入)。

Table 1. Energy efficiency of CBF factory (%)
表 1. CBF 工厂能源效率(%)

种类	年份	生产效率	数据来源
CBM	2008	30-45	[21]、[22]和[23]现状调研
	2020	50-60	[22]、[24]和[25]预计或模拟
CBDME	2008	38-44	[21]和[22]的现状调研
	2020	42-54	[22]和[24]预计
DCTL	2008	45-55	[22]调研并参考工艺模拟
	2020	55-60	[22]和[23]预计
ICTL	2008	40-44	[21]、[22]和[23]的现状调研
	2020	42-52	[22]和[23]预计

3.2 运输能耗数据

我们假定 CBM 和 CBDME 均为就近消费，通过短途公路运输就可完成从工厂到用户的运输配送，平均运距为 100 km；而 DCTL 和 ICTL 则与传统汽柴油现有运输情形相似：在货运量中，铁路运输方式占比 50%，平均运距为 900 km；水路运输方式为 50%，平均运距 1200 km；短途公路运输方式占比 10%，平均运距为 50 km^[18]。因存在接力现象，所有运输模式占比之和可以超过 100%。

通过调研总结，各种运输模式的能源强度及燃料构成结果如表 2 所示；在查阅被运输的 CBF 低热值 (MJ/kg)后，可测算出其运输配送阶段的能源效率和所用运输燃料构成^[18]。

Table 2. Energy intensity and fuel mix for transport
表 2. 交通能源强度及燃料结构计算结果

交通模式	能源强度(kJ/ton km)	燃料种类及结构
铁路	240	柴油(55%), 电力(45%)
水运	148	燃料油(100%)
短途公路	1362	柴油(68%),汽油(32%)
长途公路	1200	柴油(68%),汽油(32%)

3.3 工艺燃料全生命周期强度数据

相关工艺燃料的全生命周期能源强度数据参考文献[18]，参见表 3，如对于用于化工生产的 1 MJ 精煤，对涵盖整个原煤开采、处理并输送至使用地的全过程，需要投入 1.06 MJ 原煤、可忽略的 NG 和 0.11 MJ 原油。

Table 3. Life-cycle primary energy intensity for process fuel
表 3. 工艺燃料全生命周期一次化石能源

项目	化石能耗	煤炭能耗	天然气能耗	石油能耗
单位	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ
精煤	1.172	1.061	0.001	0.110

柴油	1.319	0.156	0.027	1.119
汽油	1.331	0.164	0.049	1.130
燃料油	1.220	0.139	0.026	1.055
电力	2.924	2.572	0.021	0.330

相关工艺燃料的上游阶段及直接使用的 GHG 强度数据参考文献[18]，参见表 4，如对于作为工业燃料使用的 1 MJ 柴油，在包括原有开采、处理、运输和石油提炼、柴油输送到用户的整个上游阶段将排放 27.87 g CO₂、0.08 g CH₄ 和 0.44 mg N₂O；而 1 MJ 柴油作为交通燃料使用时候，将直接排放 72.6 g CO₂、0.04 g CH₄ 和 0.002 mg N₂O。表中 CH₄ 排放因子参考文献[26]，N₂O 排放因子则参考[17]和[19]的默认值。

Table 4. Upstream and direct emission factors for process fuel
表 4. 工艺燃料全生命周期上游阶段及直接排放系数

	上游阶段			直接排放		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	g/MJ	g/MJ	mg/MJ	g/MJ	g/MJ	mg/MJ
精煤	5.73	0.43	0.17	81.6	0.001	0.001
柴油	27.87	0.08	0.44	72.6	0.004	0.002
汽油	28.83	0.09	0.47	67.9	0.080	0.002
燃料油	25.33	0.07	0.41	75.8	0.002	0
电力	265.22	1.01	3.92	0	0	0

4. 研究结果与讨论

4.1 研究结果

根据 2.3 节所示计算方法，可以求算出 CBF 的全生命周期化石能源及碳排放强度，如表 5 所示。尽管各技术路线的计算结果存在较大的不确定区间，但可以看出全生命周期化石能源的平均强度从现状的 2.37~3.26 MJ/MJ 将降至未来的 2.04~2.52 MJ/MJ；相应的碳排放的平均强度将从 197.11~232.98 g CO_{2e}/MJ 降到 170.07~209.92 g CO_{2e}/MJ；降幅在 9.80%~33.91%之间。

4.2 比较研究

与传统车用汽柴油路线的 1.331、1.319 MJ/MJ 和 98.86、102.4 g CO_{2e}/MJ^[18]相比，所有 CBF 的全生命周期化石能源及碳排放强度均高出一倍以上。

如表 6 所示对国内相关研究进行比较研究(此处

为制取单位能量 CBF 的上游阶段的能耗和碳排放,即不计入 CBF 本身热值以及其燃烧时候的 GHG 直接排放),可以发现所有 CBF 路线将随着时间推移、技术得到发展而逐步实现能耗减少和碳排放降低。

4.3 以煤代油效果分析

如表 7 分析所示, CBF 的发展将有效替代石油,即使是全生命周期能耗及碳排放均较高的 CBM 路线,其全生命周期的石油消耗也仅为传统柴油油的 27.97%。CBF 的发展符合中国“缺油少气、相对有煤”的国情^[31]。

Table 5. Life-cycle energy and GHG intensity of CBF
表 5. CBF 全生命周期化石能源和碳排放强度

	化石能源强度(MJ/MJ)							
	现状(2008)			未来(2020)			改善(2008-2020)	
	高效率	低效率	平均值	高效率	低效率	平均值	绝对值	百分比
	高效率	低效率	高效率	低效率	低效率	高效率	绝对值	百分比
CBM	3.91	2.61	3.26	2.35	1.96	2.15	1.11	33.90%
CBDME	2.93	2.67	2.80	2.79	2.18	2.49	0.32	11.28%
DCTL	2.61	2.13	2.37	2.13	1.96	2.04	0.33	13.72%
ICTL	2.93	2.66	2.80	2.79	2.26	2.52	0.27	9.80%
	碳排放强度(g CO _{2,e} /MJ)							
	现状(2008)			未来(2020)			改善(2008-2020)	
	高效率	低效率	平均值	高效率	低效率	平均值	绝对值	百分比
	高效率	低效率	高效率	低效率	低效率	高效率	绝对值	百分比
CBM	325.16	217.01	271.08	195.38	162.93	179.15	91.93	33.91%
CBDME	244.04	221.92	232.98	232.46	180.96	206.71	26.28	11.28%
DCTL	216.77	177.44	197.11	177.44	162.70	170.07	27.04	13.72%
ICTL	243.81	221.69	232.75	232.22	187.65	209.94	22.81	9.80%

Table 6. Comparison for CBF energy use and GHG emission LCA results
表 6. 煤基液体燃料的全生命周期能耗和碳排放对比

文献来源	[27]	[13]	[28]	[29]	本研究(平均值)	[30]	[23]	[27]	本研究(平均值)
适用年份	2005	2007	2007	2007	2008	2009	2010	2020	2020
全生命周期能耗(MJ/MJ)									
CBM	1.80-3.00				2.26	1.04	1.40-1.55	0.80-2.00	1.15
CBDME	1.80-3.60	1.35	1.14-1.40		1.80	1.18	1.60-1.70	0.95-2.10	1.49
DCTL					1.37	1.23	0.80-0.90	0.80-1.40	1.04
ICTL					1.80	1.41	1.70-1.80	1.00-2.40	1.52
全生命周期上游阶段碳排放(g CO _{2,e} /MJ)									
CBM	210-359			176	201	158	180-210	120-240	109.15
CBDME	240-392	136			165	167	210-250	130-250	139.21
DCTL					123	86	120-155	90-120	95.87
ICTL					159	254	215-255	130-267	135.74

Table 7. CBF and gasoline/diesel LCA comparison (MJ/MJ)
表 7. CBF 与汽柴油的全生命周期能耗对比分析(MJ/MJ)

	煤炭	天然气	石油
汽柴油	0.18	0.03	1.12
CBM(现状平均)	2.95	0.00	0.31
CBDME(现状平均)	2.53	0.00	0.27
DCTL(现状平均)	2.14	0.00	0.22
ICTL(现状平均)	2.53	0.00	0.26
相对汽柴油的百分比			
CBM	1636.49%	0.69%	27.97%

CBDME	1405.99%	0.69%	24.13%
DCTL	1191.37%	0.28%	20.06%
ICTL	1407.00%	0.28%	23.65%

4.4 CCS 技术应用的影响

参考文献[12]和[32])研究成果,对煤化工产生大量的 CO₂ 可应用 CCS 技术,虽然需要增加电力消耗(如压缩和处理 1 吨 CO₂ 需额外消耗电力 80~160 kWh),降低了整体能源效率,但减少 CO₂ 的排放。

以 DCTL 路线为例,2020 年应用 CCS 技术后其

全生命周期化石能源强度仍为 2.1 MJ/MJ 左右, 而碳排放强度则降至约 100 g CO_{2,e}/MJ。因而虽然应用 CCS 后该路线能耗有所增加, 不过仅增至和 CBM、CBDME 和 ICTL 路线的能耗相近, 却能与未使用 CCS 时候相比减少 GHG 排放约 50%。从而在 CBF 路线中, CCS 技术是实现煤炭低碳清洁利用的有效备选手段之一。

5 研究结论

(1) CBM、CBDME、DCTL 和 ICTL 路线的全生命周期化石能耗和碳排放强度较大, 均高出传统车用汽柴油路线一倍以上;

(2) 所有 CBF 路线将随着未来技术发展而减能降碳, 且潜力较大;

(3) CBF 发展符合中国“以煤代油”的能源策略;

(4) 在 CBF 路线中, CCS 技术是实现煤炭低碳利用的有效备选手段。

致 谢

本项目由国家社会科学基金重大项目(09&ZD029), 教育部人文社会科学重点研究基地项目(2009JJD790029), 北京市科委软科学论文资助(zz200923), 国家能源局、通用汽车/上汽集团资助项目(CAERC)和清华大学骨干人才支持计划共同支持。

References (参考文献)

- [1] BP (British Petroleum). BP Statistical Review of World Energy 2010 [EB/OL]. <http://bp.com/statisticalreview>, 2010.
- [2] NSBC (National Statistic Bureau of China). China energy statistic yearbook 2009 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2010 (Ch).
国家统计局.中国能源统计年鉴 2009 [M]. 北京:中国统计出版社, 2010.
- [3] Wang, Q.Y. China's energy end use and efficiency in 2007 [J]. Energy Saving and Environment Protection, 2009 (02), P14-17 (Ch).
王庆一. 中国 2007 年终端能源消费和能源效率[J]. 节能与环保, 2009 ,(02), P14-17.
- [4] NSBC (National Statistic Bureau of China). China statistic abstract 2010 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2010 (Ch).
国家统计局.中国统计摘要 2010 [M]. 北京:中国统计出版社, 2010.
- [5] IEA (International Energy Agency). World Energy Outlook 2008 [M]. Paris: OECD/IEA, 2008.
- [6] Ou, X.M., Zhang, X.L., Chang, S.Y. Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: Life cycle energy demand and GHG emissions [J]. Energy Policy, 2010,38 (10), P3943-3956.
- [7] Ou X M, Chang S Y, Zhang X L. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations [J]. Energy Policy, 2010, 38(1), P 406-418.
- [8] Van Vliet, O.P., Faaij, A.P.C., Turkenburg, W.C. Fischer-Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50, P855-876.
- [9] Vallentin D. Driving forces and barriers in the development and implementation of coal-to-liquids (CtL) technologies in Germany [J]. Energy Policy, 2008, 36, P2030-2043.
- [10] Vallentin D. Policy drivers and barriers for coal-to-liquids (CtL) technologies in the United States [J]. Energy Policy, 2008, 36, P3198-3211.
- [11] Zhang, G.B. Report on China's Energy Development for 2009 [M]. Beijing: Economic Science Press, 2009 (Ch).
张国宝. 中国能源发展报告 2009[M]. 北京: 经济科学出版社, 2009.
- [12] Jaramillo, P., Griffin, W.M., Matthews, H. S. Comparative analysis of the production costs and life-cycle GHG emissions of FT-liquid fuels from coal and natural gas [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42, P7559-7565.
- [13] Zhang, L., Huang, Z. Life cycle study of coal-based dimethyl ether as vehicle fuel for urban bus in China [J]. Energy, 2007, 32, P1896-1904.
- [14] Ou X M, Zhang X L, Chang S Y, Guo Q F. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in China [J]. Applied Energy, 2009, 86(S), P197-208.
- [15] China-UK NZEC Initiative. China-UK Near Zero Emissions Coal Initiative (Summary Report) [R]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [16] Chen W.Y., Liu J., Ma L.W., et al. Role for carbon capture and storage in China [J]. Energy Procedia, 2009, 1, P4209-4216.
- [17] Wang, M.Q. Operating Manual for GREET Version 1.7 [EB/OL]. <http://greet.anl.gov/publications.html>, 2007.
- [18] X.M. Ou. Life cycle energy consumption for and GHG emissions from transportation sector in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.6 (Ch).
欧训民. 中国道路交通部门能源消费和 GHG 排放全生命周期分析[D]. 北京: 清华大学, 2010.6.
- [19] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Paris: IPCC, 2006.
- [20] Ou Xunmin, Yan Xiaoyu, Zhang Xiliang. Using coal for transportation in China: Life-cycle GHG of coal-based fuel and electric vehicle, and policy implications [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(4), P878-887.
- [21] AERT (Alternative Energy Research Team of NDRC, China). China alternative energy research report [R]. Beijing: NDRC, China, 2006 (Ch).
国家发改委替代能源研究项目组. 中国替代能源研究报告[R]. 北京: 国家发改委, 2006.
- [22] Zhang A L, Shen W, Han W J, Chai Q H. Life cycle analysis of automotive alternative energy [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008 (Ch).
张阿玲, 申威, 韩维建, 柴沁虎. 车用替代燃料生命周期分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008-10.
- [23] CATARC (China Automotive Technology and Research Center) and GM (General Motors). Well-to-Wheels analysis of energy consumption and GHG emissions of multi vehicle fuel pathway in future China [R]. Beijing: CATARC, 2007
- [24] Zhang, L., Huang, Z. Life cycle study of coal-based dimethyl ether as vehicle fuel for urban bus in China [J]. Energy, 2007, 32, P1896-1904.
- [25] Ma L.W.. System research on methanol and electricity co-production based on coal gasification [R]. Beijing: Tsinghua University, 2003 (Ch).
麻林巍. 以煤气化为核心的甲醇、电多联产系统研究[R]. 北京: 清华大学, 2003.
- [26] China Climate Change Research Group. China climate change study [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.52-107 (Ch).
中国气候变化国别研究组. 中国气候变化国别研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 52-107.
- [27] Shen Wei. Life cycle energy, GHG and cost analysis for vehicle fuel in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007 (Ch).

- 申威. 中国未来车用燃料生命周期能源、GHG 排放和成本研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [28] Zhang Han, Well-to-wheels analysis of coal-based fuel [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. 5 (Ch).
张寒. 煤制合成燃料从矿井到油箱的生命周期评价[D]. 北京: 清华大学, 2005.5.
- [29] Wei Y.C., Peng, S.P., Jiang, Y.F., Qian, X.R. Analysis on life cycle GHGs emission of coal based methanol [J]. *Clean Coal Technology*, 2008, 14, P10-12.
- [30] Li, Z., Ma, L.W., Fu, F., et al. Coal-based fuel pathway in China 2009 [R]. Beijing: China Automotive Energy Research Center, Tsinghua University, 2009.
- [31] Z.M. Jiang. Reflections on energy issues in China [J]. *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, 2008, 42, P 345-359(Ch).
江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, P345-359.
- [32] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Carbon dioxide Capture and Storage [R]. Paris: IPCC, 2005.