

DOI: 10.5846/stxb201109251408

林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 于洋, 赵胜男. 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(12): 3782–3794.

Lin J Y, Meng F X, Cui S H, Yu Y, Zhao S N. Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3782–3794.

城市能源利用碳足迹分析 ——以厦门市为例

林剑艺¹, 孟凡鑫^{1,2}, 崔胜辉^{1,*}, 于洋^{1,2}, 赵胜男^{1,2}

(1. 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:城市能源利用碳足迹分析综合考虑直接与间接碳排放, 对于深度分析碳排放的本质过程、制定科学全面的碳减排计划具有重要意义。以厦门市为研究案例, 应用碳足迹的混合分析方法, 对厦门市 2009 年能源利用碳足迹进行了分析, 除了包括传统研究中的城市能源终端利用产生的直接碳排放, 还计算了跨界交通和城市主要消耗物质的内含能引起的间接碳排放。研究结果表明: (1) 城市边界内的工业、交通、商业等部门的能源消耗产生的直接碳排放(即层次 1 和层次 2) 只占到总碳足迹的 64%, 而一直被忽略的跨界交通和城市主要消耗物质的内含能引起的间接碳排放(层次 3) 占到 36%; (2) 在直接碳排放中, 工业部门的碳排放贡献率最大, 占到直接碳排放的 55%, 其中化工行业带来的碳排放占到工业部门的 25%; (3) 在间接碳排放中, 跨界交通引起的碳排放占间接碳排放的 27%, 其中长途道路运输贡献率最大, 占跨界交通碳排放的 38%; 主要材料内含能碳排放占间接碳排放的 73%, 其中燃料的内含能碳排放占总内含能的份额最大, 达 51%; (4) 从人均碳足迹角度比较, 厦门市人均碳足迹和丹佛市的人均直接碳排放(层次 1+层次 2) 分别为 5.74 t CO₂e/人、18.9 t CO₂e/人, 包含 3 个层次的人均碳足迹分别为 9.01 t CO₂e/人、25.3 t CO₂e/人, 其中跨界交通引起的碳排放均占总碳足迹的 10% 左右, 主要材料的内含能引起的碳排放分别占到总碳足迹的 26%、15%; 通过国内外典型城市不同层次碳足迹比较可见厦门还是相对低碳的, 但有个显著的特点是主要消耗物质的内含碳排放比例较高, 这在一定程度上说明了发展中国家城市消耗更多的基础材料, 进一步证明了传统核算中忽略的第 3 层次碳排放核算与管理的重要性。

关键词: 能源利用; 碳足迹; 混合分析法; EIO-LCA; 厦门

Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China

LIN Jianyi¹, MENG Fanxin^{1,2}, CUI Shenghui^{1,*}, YU Yang^{1,2}, ZHAO Shengnan^{1,2}

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Because of increasing concern about global climate change, there has been a growing research interest in carbon footprint analysis recent years. Carbon footprint analysis on urban energy use takes both direct carbon emissions and indirect emissions into account, so it has great significance for the in-depth analysis on nature process of carbon emissions and scientific formulation on carbon reduction plan. Taking Xiamen as a study area, the hybrid analysis method of carbon footprint was used to access the carbon footprint on the energy use of Xiamen city in 2009. Besides the direct carbon emissions from the urban energy end-use in traditional research, the indirect carbon emissions from the cross-boundary traffic and the embodied energy of key urban materials were also included. The direct emissions include emissions from

基金项目: 国家自然科学基金项目(71003090); 环保公益项目(201009055); 国际合作项目(2009DFB90120)

收稿日期: 2011-09-25; 修订日期: 2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shcui@iue.ac.cn

direct energy use in industrial sector , commercial sector , household sector , transport sector and so on , which often called scope 1 by WRI/WBCSD. The direct emissions also include emissions due to electricity and steam purchases for the sector in the city , often called scope 2 emissions. And indirect carbon emissions , which called scope 3 , incorporate the surface , sailing and airline travel's emissions across cities and the embodied energy of key urban materials: food , water , fuel , and concrete. Research result showed that: (1) Direct carbon emissions from the energy use on the sectors inside the city boundary including industry , transport , commerce and so on , namely scope 1 and scope 2 , only take up 64% of the total city carbon footprint. However , the indirect emissions from the cross-boundary traffic and embodied energy of key urban materials account for 36% , which has usually been ignored as scope 3. (2) In the direct emissions , the carbon emissions of industry contributed the largest share , which counts for 55% . And the emissions from the chemical industry account for 25% of the whole industry sector. (3) In the indirect emissions , the shares of emissions from cross-boundary traffic and embodied energy of key urban materials were 27% and 73% respectively. The carbon emissions of long-distance road transport take the largest proportion of cross-boundary traffic , which accounted for 38% . And the embodied energy emissions from the fuel were the most important part of embodied energy emissions , accounting for 51% of embodied emissions. (4) From the perspective of per capital carbon footprint , the per capital direct carbon emissions of Xiamen and Denver were 5.74 t CO₂e/cap and 18.9 t CO₂e/cap respectively. And the per capital carbon footprint of Xiamen and Denver , including direct and indirect emissions caused by the energy use , were 9.01 t CO₂e/cap and 25.3 t CO₂e/cap. In the total carbon footprint by Xiamen and Denver , the emissions from the cross-boundary transport all took up 10% , and the emissions caused by embodied energy of key urban materials were 26% and 15% respectively. The embodied emissions by Xiamen were relatively higher than Denver because the urbanization and industrialization consumed more materials in Xiamen. Comparing the per capital carbon emission excluding embodied emissions with typical cities in the worldwide , Denver took the first place with 21.5 t CO₂e/cap , and Los Angeles , New York City , London , Bangkok , Cape Town and big city like Shanghai , Tianjin and Beijing in China were more than 10 t CO₂e/cap averagely. That of Xiamen was 6.63 t CO₂e/cap , which was far less than most cities.

Key Words: energy use; carbon footprint; hybrid analysis method; EIO-LCA; Xiamen

城市能源利用产生的碳排放是温室气体排放中最重要的部分 ,已成为国内外研究的重点与热点^[1-4]。对于城市能源利用产生的碳排放研究国内大部分停留在直接碳排放研究上^[5-7] ,国外的研究已经将其拓展到综合考虑直接碳排放与间接碳排放上——碳足迹^[8-10]。碳足迹分析方法从生命周期的视角分析碳排放的整个过程 ,将活动主体(包括个人、组织、部门等)在某一活动过程中直接和间接的碳排放总量纳入考虑 ,对于全面分析碳排放以及制定科学的减排对策具有重要意义^[11-12]。Ramaswami^[9]对丹佛进行温室气体核算的结果显示 ,城市内部能源利用产生的直接碳排放只占到总碳足迹的 75% ,由跨界交通和城市主要材料内含能引起的间接碳排放占到总碳足迹的 25%。Hillman^[8]对美国八个城市的碳足迹研究表明 ,城市跨界间接碳排放占到城市内部直接碳排放的 47%。

目前国外碳足迹应用研究的尺度涵盖了个人/产品、家庭、组织机构、城市以及国家^[13-15] ,研究的产业部门包括了工业、交通、建筑、供水、医疗等^[16-17]。总体来说国外的碳足迹研究仍处于起步发展阶段 ,研究更多集中在微观的产品、个人、家庭以及某个产业部门上;而国内的研究尚处于萌芽阶段 ,各种研究成果并不多见^[12]。从碳足迹的研究方法上看 ,目前主要有三类^[18]:过程分析法、投入产出法以及混合分析法。过程分析法是“自下而上”的分析方法 ,应用最为广泛 ,适用于系统过程明确的产品或部门分析 ,对数据的要求较高^[19-20];投入产出法是“自上而下”的分析方法 ,比较适合于宏观的部门和产业分析 ,但无法获得单一产品的碳足迹^[21-22];混合分析方法综合了过程分析和投入产出分析的优点 ,既有自上而下方法的系统性 ,又不失自下而上方法的细腻性 ,具有更广泛的应用范围^[9]。

本文运用碳足迹的混合分析法 对厦门市的能源利用碳排放进行全面分析 ,不仅包括了城市能源终端利用产生的直接碳排放 ,还计算了跨界交通的间接碳排放与城市主要消耗物质的内含碳排放。在国内首次探索了城市尺度的碳足迹评估方法 ,为城市的能源利用碳排放分析提供方法借鉴 ,为低碳城市建设提供科学基础和决策依据。

1 计算方法

1.1 总体研究思路

根据世界资源委员会(WRI) 以及世界可持续发展工商理事会(WBCSD) 的推荐^[23] ,城市碳足迹可分为 3 个层次: 层次 1 ,城市各部门的直接碳排放 ,主要是指发生在城市边界内的温室气体排放; 层次 2 ,外调电力的上游生产引起的间接碳排放; 层次 3 ,未被层次 2 包括的所有间接碳排放 ,主要是指跨界交通的温室气体排放 (如道路长途运输、航空、航海等) ,以及城市从外部输入的主要物质(燃料、建材、食物、水等) 的上游生产和运输过程产生的温室气体排放。本研究采用混合分析方法计算城市碳足迹 ,综合分析各层次的碳排放 ,将城市碳足迹计算主要分为 3 部分: ①城市内工业、交通、商业等部门的终端能源消耗引起的碳排放 ,属于层次 1 和层次 2; ②跨界交通引起的碳排放 ,包括地面、海上和空中运输的排放 ,用空间分配跨界界的此类运输的排放 ,属于层次 3; ③城市消耗的主要物质(如食物、水、燃料和水泥) 的内含碳排放 ,属于层次 3。对于第①、②部分碳排放的计算采用“自下而上”的过程分析法 ,对于第③部分的碳排放采用“自上而下”的投入产出分析法 (EIO-LCA) ,最后综合两种方法的计算结果得出城市总体的碳足迹(图 1) 。

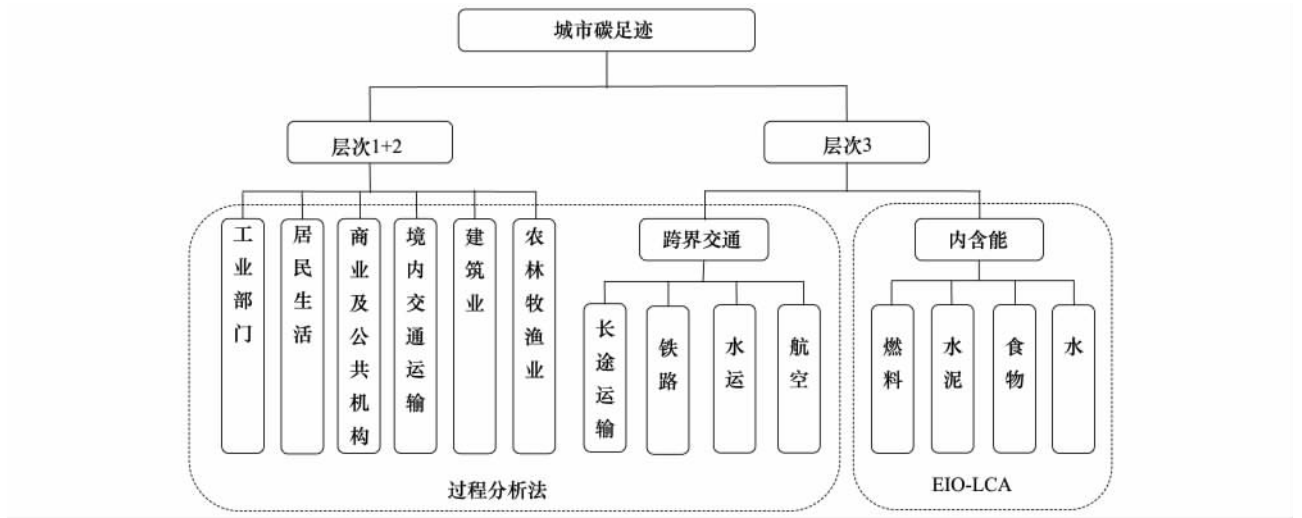


图1 城市碳足迹混合分析方法

Fig.1 Hybird analysis method on the urban carbon footprint

1.2 城市内各部门碳排放

城市内各部门的碳排放主要来源 3 个部分: (1) 化石燃料燃烧的直接碳排放(不包括能源加工转换过程中的化石燃料燃烧); (2) 电力的间接碳排放; (3) 热力的间接碳排放。

1.2.1 化石燃料的燃烧

参照 IPCC 计算方法 ,化石燃料燃烧的直接碳排放中又分为固定源和移动源两个部分分别计算。碳排放计算主要涵盖 3 种温室气体 CO₂、CH₄、N₂O 通过全球变暖潜能值(GWP) 来反映各种温室气体对全球变暖的贡献大小(CO₂ 的值为 1 ,CH₄ 为 21 ,N₂O 为 310) ,最终以二氧化碳当量(carbon dioxide equivalent ,CO₂e) 表示。

(1) 固定源

固定源化石燃料燃烧产生的温室气体排放量计算公式如下:

$$GHG_{Fuel} = \sum_i \sum_j AC_{ij} \times NCV_j \times (EF_{CO_2} + EF_{CH_4} \times 21 + EF_{N_2O} \times 310) \tag{1}$$

式中, GHG_{Fuel} 指固定源产生的温室气体排放量(t CO₂e); i 指不同部门; j 指燃料品种; AC 指消费的化石燃料实物量(万 t 或亿 m³); NCV 指各燃料低位发热值(MJ/t · km³) (表 1); EF_{CO_2} 指固定源化石燃料燃烧过程中 CO₂ 的排放因子(kg/TJ) , 计算过程见公式(2); EF_{CH_4} 、 EF_{N_2O} 分别指固定源化石燃料燃烧过程中 CH₄、N₂O 的排放因子(kg/TJ) (表 2) , 其中 CO₂ 的排放因子 EF_{CO_2} 计算公式如下:

$$EF_{CO_2} = CC \times O \times 44 / 12$$

(2)

式中, EF_{CO_2} 指 CO₂ 的排放因子(kg/TJ); CC 指燃料含碳量(tC/TJ) (表 1); O 指氧化率, 本研究采用 IPCC 默认值 100%; 44/12 为 C 转换为 CO₂ 的系数。

(2) 移动源

移动源化石燃料燃烧产生的温室气体排放量计算公式如下:

$$GHG'_{Fuel} = \sum_i \sum_j AC_{ij} \times NCV_j \times (EF'_{CO_2} + EF'_{CH_4} \times 21 + EF'_{N_2O} \times 310)$$

(3)

式中, GHG'_{Fuel} 指移动源产生的温室气体排放量(t CO₂e); i 指不同交通部门, 如道路运输、水运等; j 指燃料品种, 如汽油、柴油等; AC 指消费的燃料实物量(万 t 或亿 m³); NCV 指各燃料低位发热值(MJ/t · km³) (表 1) , 其中航空煤油的 NCV 取值 44100 kJ/kg; EF'_{CO_2} 、 EF'_{CH_4} 以及 EF'_{N_2O} 分别指移动源化石燃料燃烧过程中产生的 CO₂、CH₄ 以及 N₂O 排放因子(kg/TJ) (表 3) 。

表 1 化石燃料的 CO₂ 排放计算参数

Table 1 Calculation parameters of CO₂ emissions from fuel combustion

燃料分类 Fule type	含碳量 ^a	碳氧化率 ^a	平均低位发热量 ^b	折标煤系数 ^b
	Carbon content tC/TJ	Carbon oxidation rate /%	Calorific value kJ/kg	Standard coal coefficient kgce/kg
原煤 Crude coal	26.8	100	20 908	0.7143
洗精煤 Cleaned coal	25.8	100	26 344	0.9000
其它洗煤 Other washed coal	25.8	100	8 363	—
型煤 moulded coal	26.6	100	20 908	—
焦炭 Coke	29.2	100	28 435	—
焦炉煤气 Coke oven gas	12.1	100	16 726	0.5928
其它煤气 Other gas	12.1	100	5 227	0.5929
原油 Crude oil	20.0	100	41 816	1.4286
汽油 Gasoline	18.9	100	43 070	1.4714
柴油 Disel	20.2	100	42 652	1.4571
燃料油 Fuel oil	21.1	100	41 816	1.4286
液化石油气 LPG	17.2	100	50 179	1.7143
炼厂干气 Refinery dry gas	15.7	100	46 055	1.5714
天然气 Nature gas	15.3	100	38 931	1.3300
其它石油制品 Other petroleum products	20.0	100	41 816	—

a: 选自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》; b: 选自《综合能耗计算通则》(GB/T-2589—2008)

表 2 固定源化石燃料的 CH₄ 和 N₂O 排放因子^a(kg/TJ)

Table 2 CH₄ and N₂O emission facors of stationary fuel

燃料分类 Fule type	能源工业 Energy industry		制造工业和建筑业 Manufacturing and construction		商业/机构 Commercial / institutional	
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
原煤 Crude coal	1	1.5	10	1.5	10	1.5
洗精煤 Cleaned coal	—	—	—	—	—	—
其它洗煤 Other washed coal	—	—	—	—	—	—
型煤 moulded coal	—	—	—	—	—	—
焦炭 Coke	1	1.5	10	1.5	10	1.5

燃料分类 Fule type	能源工业		制造业和建筑业		商业/机构	
	Energy industry		Manufacturing and construction		Commercial / institutional	
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
焦炉煤气 Coke oven gas	1	0.1	1	0.1	1	0.1
其它煤气 Other gas	1	0.1	1	0.1	1	0.1
原油 Crude oil	3	0.6	3	0.6	3	0.6
汽油 Gasoline	3	0.6	3	0.6	10	0.6
柴油 Disel	3	0.6	3	0.6	10	0.6
燃料油 Fuel oil	3	0.6	3	0.6	10	0.6
液化石油气 LPG	1	0.1	1	0.1	5	0.1
炼厂干气 Refinery dry gas	1	0.1	1	0.1	1	0.1
天然气 Nature gas	1	0.1	1	0.1	5	0.1
其它石油制品 Other petroleum products	3	0.6	3	0.6	10	0.6

《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》

表 3 移动源主要温室气体排放因子^a(kg/TJ)
Table 3 GHG emission factors of mobile combustion

类别 Category	燃料类型 Fuel type	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
道路运输 Road transport	汽油 Gasoline	74100	3.9	3.9
	柴油 Disel	74100	3.9	3.9
	天然气 Nature gas	56100	92.0	3.0
水运 Water transport	汽油 Gasoline	74100	7.0	2.0
	柴油 Disel	74100	7.0	2.0
	燃料油 Fuel oil	77400	7.0	2.0
航空 Aviation	航空煤油 Jet fuel	71500	0.5	2.0
铁路 Railway	柴油 Disel	74100	4.15	28.6

《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》

1.2.2 电力

城市各部门的电力使用产生的温室气体计算公式如下:

$$GHG_{Electricity} = \sum_i C_{Electricity_i} \times L \times EF_{Grid}$$
 (4)

式中 ,GHG_{Electricity} 表示电力消耗产生的温室气体排放量(t CO₂e) ; *i* 指不同部门; C_{Electricity *i*} 表示 *i* 部门的电力消耗量(万 kWh) ; *L* 表示电力输配电过程中的损失因子 ,由《厦门市能源平衡表》得 2009 年的输配电损失为 7.25% ,本研究中 *L* 取 1.0725。EF_{Grid} 表示电网平均碳排放因子(t CO₂e/万 kWh) ,计算过程见公式(5) 。

电力碳排放因子 EF_{Grid} 的计算如下:

$$EF_{Grid} = \sum_m (C'_m \times EF_m) / \sum_m C'_m$$
 (5)

式中 ,EF_{Grid} 表示电网平均碳排放因子(t CO₂e/万 kWh) ; C'_{*m*} 表示 *i* 发电类型的发电量(万 kWh) ; *m* 表示发电类型 ,如火力发电、水力发电、风力发电以及外调电力等; EF 表示发电类型的平均碳排放因子(t CO₂e/万 kWh) 。为了确保结果的准确性与可靠性 ,本研究中使用厦门市当地电网的平均碳排放因子 ,根据厦门市当地的电力结构(包括外调电力) 计算得到。

厦门市的外调电力 ,指的是从福建省电网调入的电力 ,福建省电网的电力平均碳排放因子计算依据公式(5) 由福建省发电结构计算得到(根据《中国能源统计年鉴》,未考虑福建电力调入) 。具体参数见表 4。

1.2.3 热力

城市热力消耗产生的温室气体排放量计算公式如下:

$$GHG_{Heating} = \sum_i C_{Heating_i} \times EF_{Heating}$$
 (6)

式中, GHG_{Heating} 表示热力消耗产生的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$); i 指不同部门; $C_{\text{Heating } i}$ 表示 i 部门的热力消耗量(百万千焦(GJ)); EF_{Heating} 表示供热系统的平均碳排放因子($\text{t CO}_2\text{e}/\text{GJ}$), 由《厦门市能源平衡表》中供热过程能耗数据得 2009 年 I_{Heating} 为 $0.10 \text{ t CO}_2\text{e}/\text{GJ}$, 具体计算过程参照公式(1) 。

表 4 福建省和厦门市的电力结构以及排放因子

Table 4 Electric power structure and emission factor of Xiamen City and Fujian province

发电类型 Power type	福建省 Fujian Province		厦门市 Xiamen City	
	占比 Ratio /%	排放因子 Emission factor /($\text{t CO}_2\text{e}/\text{万 kWh}$)	占比 Ratio /%	排放因子 Emission factor /($\text{t CO}_2\text{e}/\text{万 kWh}$)
火力发电(包括天然气发电) Thermal power (including natural gas)	75	8.5851	87	6.8896
风电、水电、核电等 Wind power , hydropower , nuclear power et al.	25	0.0000	1	0.0000
外调电 Disturbance power	0	0.0000	12	6.4695
总计 Total	100	6.4695	100	6.6262

1.2.4 城市各部门的能源利用碳排放

城市各部门能源利用碳排放 按交通部门和非交通部门分别进行统计 , 计算公式如下:

$$GHG = GHG_{\text{trans}} + GHG_{\text{non-trans}} \tag{7}$$

式中, GHG 表示城市各部门能源利用产生的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$); $GHG_{\text{non-trans}}$ 指城市内非交通部门的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$) , 计算过程见公式(8) ; GHG_{trans} 指城市内交通部门的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$) , 计算过程见公式(9) 。

城市内非交通部门的温室气体计算公式如下:

$$GHG_{\text{non-trans}} = \sum_i GHG_{\text{Fuel } i} + GHG_{\text{Electricity } i} + GHG_{\text{Heating } i} \tag{8}$$

式中, $GHG_{\text{non-trans}}$ 指城市内非交通部门的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$); $GHG_{\text{Fuel } i}$ 、 $GHG_{\text{Electricity } i}$ 以及 $GHG_{\text{Heating } i}$ 分别表示城市各非交通部门的化石燃料燃烧、电力消耗以及热力消耗产生的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$) 。

城市内交通部门的温室气体计算公式如下:

$$GHG_{\text{trans}} = \sum_i GHG'_{\text{Fuel } i} \tag{9}$$

式中, GHG_{trans} 指城市内交通部门的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$); $GHG'_{\text{Fuel } i}$ 表示城市内不同交通部门的化石燃料燃烧产生的温室气体排放量($\text{t CO}_2\text{e}$) 。

1.3 跨界交通碳排放

跨界交通属于层次 3 , 跨界交通碳排放的具体计算过程与公式如 2.2(1) 中的移动源所示。同时 , 由于跨界交通部分碳排放产生在城市边界之外 , 所以此处涉及到碳排放责任分配的问题 , 下面将就长途客货运与航空水运分别讨论:

对于长途客、货运的地表跨界交通 , Ramaswami 等学者 , 采用车辆行驶里程(VMT) 方法 , 对于从区域内其他城市到达丹佛市的 VMT 和从丹佛市出发到达区域内其他城市的 VMT , 各取一半的分配原则^[9]。本研究中基于数据可获得性问题 , 在分配长途客、货运的碳排责任时 , 假设从厦门出发和抵达厦门的 VMT 大致相等 , 因此只计算厦门始发的长途客、货运的燃油消耗产生的温室气体排放量。

对于航空跨界交通 , 不同学者有着不同的处理方式: Carney 等^[24] 只计算国内航线和国际航线的着陆/起飞(LTO) 阶段的碳排放; 伦敦^[25]、纽约市^[26]、丹佛^[9] 根据城市内的机场的加油量计算碳排放 , 包括了所有国内和国际航线; Kennedy 等^[10] 在编制城市温室气体排放清单中 , 曼谷、巴塞罗那、开普敦、日内瓦、伦敦、洛杉矶、纽约市、布拉格、多伦多等城市将机场的加油量产生的碳排放全部都计算到该城市范畴内 , 对于城市机场设在城市边界之外的丹佛市 , 在碳排放责任分配时 , 计算公式如下:

$$\text{GHG}_{\text{Aviation}} = \sum_{\text{Regional Airport}} I_{\text{fuel}} \times C_{\text{fuel}} \times n_{\text{city}} / n_{\text{region}} \quad (10)$$

式中 I_{fuel} 表示航空煤油的温室气体排放因子 (kg/TJ); C_{fuel} 表示飞机的加油量 (L); n_{city} 表示从该城市到机场的地面交通年均出行次数; n_{region} 表示从该区域其他城市到机场的地面交通年均出行总次数。

对于水运、铁路等跨界交通的碳排放责任分配原理,与航空的处理一致。综上所述,目前国际上不管是长途客、货运或者航空、水运都还没有统一的分配标准,丹佛市的处理方式在航空碳排放责任分配方式上比较合理,该研究中计算结果也表明城市驶出和进入的里程近似相等^[9]。基于现有数据情况,参考 Kennedy 等^[10]的碳足迹核算方法,本研究中厦门市航空和水运的碳排放计算,根据在厦门市内的加油量来计算。

1.4 城市主要消耗物质的内含能碳排放

城市主要消耗物质的内含能碳排放指本地消费的主要物质在城市边界之外的上游生产、加工、运输等过程的碳排放。这部分碳排放根据城市的实际情况选取,一般包括的主要城市消费物质如下:燃料、水泥、水和食物等^[27]。对于这部分内含能碳排放计算,本研究采用经济投入产出生命周期评价(EIO-LCA)模型^[28],该模型是20世纪70年代由 Leontief 研究开发的,综合了生命周期评价方法和经济投入产出两种方法,用于分析产品或服务生产链中的环境影响^[29]。EIO-LCA 方法用于计算内含碳排放的计算公式如(11)~(13)所示^[11]。

基本的投入产出模型可表示为:

$$x = (I + A \times A + A \times A \times A + \cdots) y = (I - A)^{-1} y \quad (11)$$

式中,列向量 x 为生产链总各部门产品的产出量,包括直接和间接; I 为单位矩阵; A 为直接消耗系数矩阵; 列向量 y 为对各部门产品的最终需求; $A \times y$ 为部门的直接产出; $A \times A \times y$ 为部门的间接产出,以此类推; $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵。

生产链中各部门的温室气体排放量如下:

$$b = Rx \quad (12)$$

式中 b 表示为了满足最终需求 y 各部门在生产中排放的温室气体量; R 是对角矩阵,对角元素为各部门单位货币产出所直接排放的温室气体量,元素值由式(11)得到:

$$R_i = c_i / x_i \quad (13)$$

式中,对角元素 R_i 为部门 i 的直接排放系数; c_i 为该部门的直接温室气体排放量; x_i 为该部门的总产出。

2 计算案例

2.1 研究区概况与数据来源

厦门市是我国首批实行对外开放的5个经济特区之一,定位为现代化国际性港口风景旅游城市和海峡两岸重要中心城市。2009年末,厦门市常住人口为252万人,其中城镇人口为142万人。2009年全市实现地区生产总值1737.23亿元,三次产业结构为1.2:47.3:51.6。随着经济的快速发展,2009年能源消费总量达1005.86万t标煤,单位GDP能耗为0.578t标煤/万元。2010年国家发展改革委发出《关于开展低碳省区和低碳城市试点工作的通知》,将厦门市列入了“五省八市”的首批试点城市之一,因此厦门市是进行城市能源利用碳足迹研究的良好区域。

本研究使用的数据来源于三个方面:统计年鉴、文献资料以及部门调研。参考的年鉴有《厦门经济特区年鉴2010》、《中国能源统计年鉴2010》、《福建省统计年鉴2010》、《中国城市统计年鉴2010》以及《厦门市能源平衡表2009》等。各部门各种能源类型的消费量(电力、煤、汽油、柴油、燃料油、LPG、天然气、LNG以及原油消费量)通过政府部门调研完成,调研的部门包括厦门市电业局、经济发展局、发展改革委员会、建设与管理局、统计局、交通局、规划局、公安交通管理局指挥中心以及市政园林局等。

本研究中的活动数据主要是依托厦门市能源平衡表,同时参照政府部门的实地调研以及官方统计年鉴,通过分部门分品种统一校核得到终端消费部门的数据。其中,外调电力排放因子根据《中国能源统计年鉴》推算,福建省只有调出没有调入电力。由于计算部门碳排放量时采用终端原则分配法,因此本文中工业部门不包括能源加工与转换行业,即电力、热力的生产和供应业;交通部门能源消耗划分为跨界交通与境内交通两

部分独立计算。

2.2 计算边界

碳足迹计算首先要划定系统的边界,本研究的厦门碳足迹只计算能源利用所引起的温室气体排放,不计其它因素引起的碳排放,温室气体包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮,通过“全球温升潜能值”(GWP)来综合计算出CO₂等价排放量。对于城市主要考虑在行政边界上,非建成区概念上城市,这涉及到研究数据的可得性(现有统计资料大多以行政边界上为准)。

对于城市各部门碳排放、跨界交通碳排放以及主要消费物质内含能碳排放主要考虑如下(1)本研究的城市内部门划分为6个部门:工业部门、居民生活、商业及公共机构、境内交通运输部门建筑业部门以及农林牧渔业部门。其中,境内交通包括私家车、摩托车、公交车、出租车、中小巴以及轮渡。商业及公共机构部门、又包括信息传输、计算机服务和软件业,交通运输、仓储和邮政业,商业、住宿和餐饮业,金融、房地产、商务及居民服务业,公共事业及管理组织。建筑业部门主要指建筑施工过程。为了避免重复计算,工业部门不包括电力、热力的生产和供应业。此外本研究还考虑了外调电力隐含的碳排放,电力产生的间接碳排放是根据电力消耗的终端原则,分配到各个部门。(2)跨界交通部分包括地面长途客货运、航空、铁路、水运。(3)城市主要消费物质的内含能碳排放,根据国际经验以及厦门的实际情况,主要考虑燃料、水泥、水和食物。

2.3 计算结果

根据以上的计算方法和系统边界划分,本文利用混合分析法计算得到2009年厦门市全社会的能源利用产生的碳足迹为22710.97 kt CO₂e。各部分的碳排放及占比为:①城市边界内的工业、交通、商业等部门的能源消耗产生的碳排放为14463.48 kt CO₂e,占64%;②跨界交通引起的碳排放为2245.97 kt CO₂e,占碳足迹的10%,占间接碳排放的27%;③城市主要消耗物质的内含能引起的碳排放为6001.50 kt CO₂e,占碳足迹的26%,占间接碳排放的73%。具体计算结果如表5所示。

表5 厦门市2009年能源利用碳足迹清单
Table 5 Energy-use carbon footprint Inventory of Xiamen City in 2009

部门 Sectors	子部门 Subdivision	碳排放 Carbon emissions/kt CO ₂ e	碳排放 Carbon emissions/kt CO ₂ e
境内部门 In-boundary sectors	工业部门	7973.28	14463.48
	居民生活	2070.48	
	商业及公共机构	2192.53	
	交通运输部门	962.45	
	建筑业部门	1106.03	
	农林牧渔业	158.71	
跨界交通 Cross-boundary transport	航空	775.71	2245.97
	水运	532.00	
	长途道路运输	856.00	
	铁路	82.26	
内含能 Embodied energy	燃料	3086.72	6001.52
	水泥	2442.90	
	食物	278.30	
	水	193.60	

按照WRI与WBCSD推荐的不同层次来分析:其中第①部分包括了城市尺度碳足迹计算中的层次1和层次2,其中扣除外调电力碳排放后层次1的碳排放为13377.79kt CO₂e,占59%,而隶属层次2的外调电力产生的碳排放为1085.69 kt CO₂e,占到总碳足迹的5%;而②③部分属于间接碳排放,属于层次3,合计8247.49 kt CO₂e,占到了城市能源利用总碳足迹的36%,详见图2。此外,厦门市全社会用电量中外调电力占到12.21%,而总用电量产生的碳排放为9109.20 kt CO₂e,其中外调电力产生的间接碳排放量只占到11.92%。

3 计算结果分析

3.1 城市内各部门碳足迹

图3显示了厦门城市内各部门的碳足迹计算结果,以2009年为例,城市内各部门的碳足迹总量为14463.48 kt CO₂e,其中工业部门2009年能源利用产生了7973.28 kt CO₂e,占到直接碳排放的55%;其次是商业及公共机构的能源利用,产生碳排放量为2192.53 kt CO₂e,占到15%;居民生活的能源利用产生的碳排放位居第三,量为2070.48 kt CO₂e,占到14%;建筑业、境内交通运输部门以及农林牧渔业的碳排放分别占到直接碳排放的8%、7%以及1%。

境内交通运输部门,主要有私家车、摩托车、出租车、常规公交、BRT、社会中小巴以及轮渡。其中私家车占境内交通碳排放的46%,其次为出租车20%,常规公交15%,摩托车、中小巴、BRT分别占到12%、4%、2%,轮渡主要是厦门-鼓浪屿一条航线,其产生的碳排放占境内交通的仅为1%。

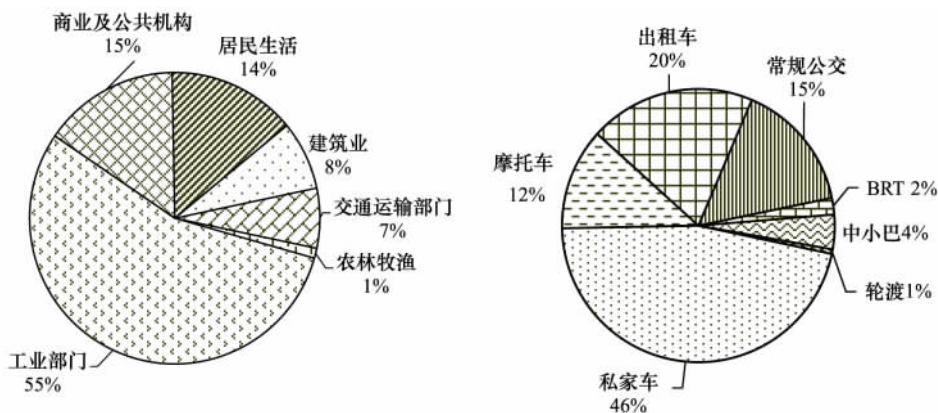


图3 厦门市2009年城市内部各部门碳足迹/(CO₂e)

Fig. 3 Carbon footprint of in-boundary sectors in Xiamen City, 2009

为了避免重复计算,厦门市工业部门没有包括电力、热力的生产和供应业中能源加工转换过程中化石燃料燃烧产生的碳排放,而这部分的碳排放根据电力和热力的终端消耗分配到了各个部门。图4显示了厦门市工业部门中碳排放超过100 kt CO₂e的行业排名,其中化学原料及化学制品制造业在工业部门中的碳排放贡献最大,占到25%,1934.77 kt CO₂e;其次是非金属矿物制品业、橡胶制品业,均占到10%左右,碳排放分别为624.52 kt CO₂e、612.44 kt CO₂e。

3.2 跨界交通碳足迹

跨界交通的方式主要有道路运输中的长途客货运、航空、水路客货运以及火车。2009年厦门市跨界交通的碳足迹总共为2245.97 kt CO₂e,占到厦门市全社会能源利用产生碳足迹的10%。图5显示了2009年厦门市跨界交通碳足迹计算结果,其中长途道路运输引起的碳足迹最大,856.00 kt CO₂e,占到38%;其次是航空775.71 kt CO₂e,占34%,位列第三的是水路运输532.00 kt CO₂e,占到24%;最后是铁路运输最小,82.26 kt CO₂e,只占4%比例。

3.3 城市主要材料内含能碳足迹

厦门市2009年从外部购买的主要城市材料的内含能碳足迹为6001.52 kt CO₂e,占到厦门市全社会能源利用产生碳足迹的27%。由图6可以看出,其中,外购燃料、水泥、食物、水的上流生产、运输过程产生的碳足迹依次为3086.72、2442.90、278.30、193.60 kt CO₂e,分别约为51%、41%、5%以及3%。

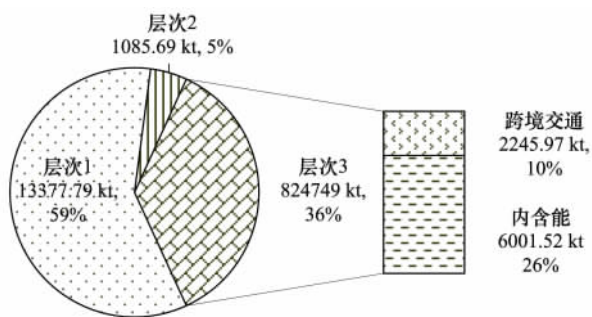


图2 厦门市2009年城市能源利用引起的碳足迹(CO₂e)

Fig. 2 Energy-use carbon footprint of Xiamen City in 2009

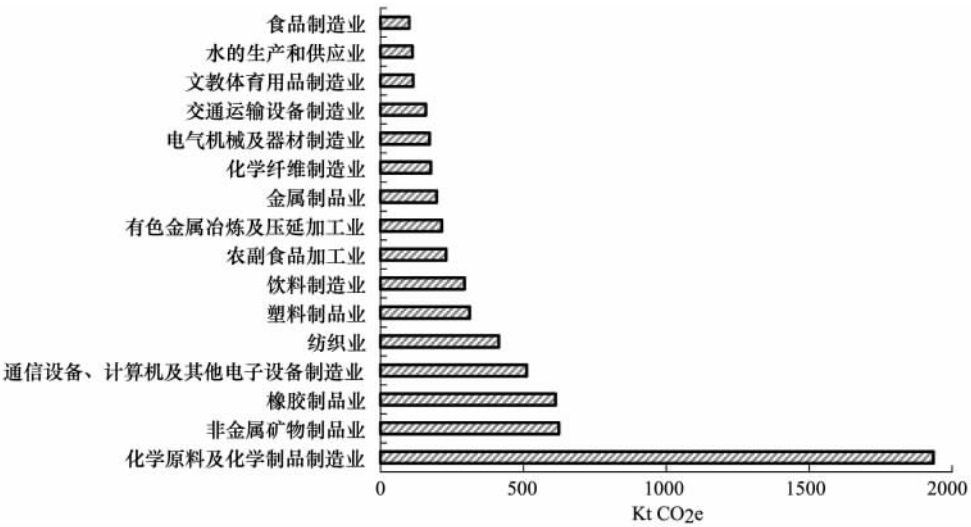


图 4 厦门市 2009 年工业部门中行业的碳足迹

Fig. 4 Sub-industrial carbon footprint of Xiamen City , 2009

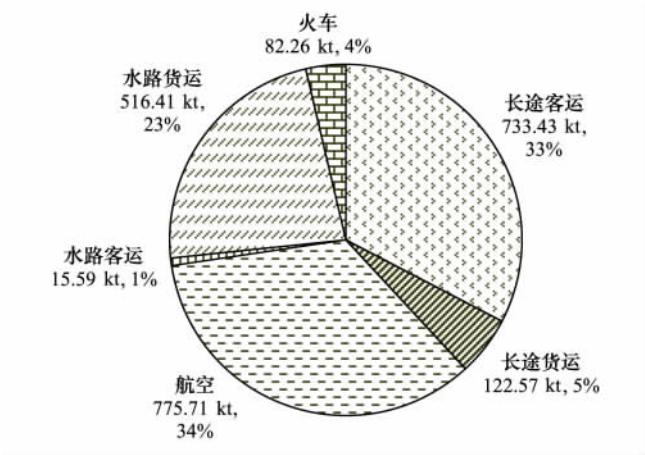


图 5 厦门市 2009 年跨界交通碳足迹(CO₂e)

Fig. 5 Cross-boundary carbon footprint of Xiamen City , 2009 (CO₂e)

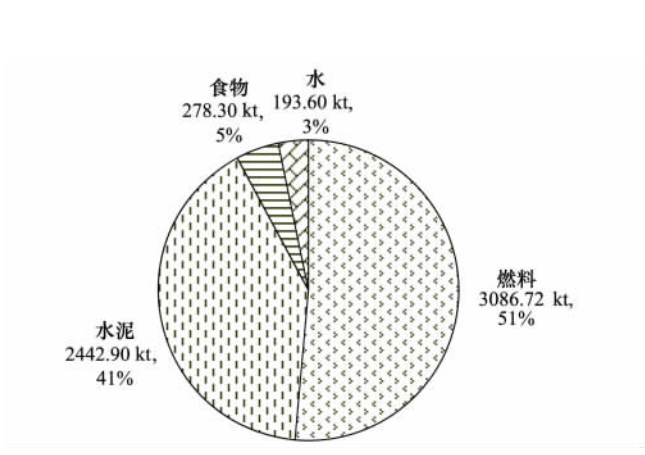


图 6 厦门市 2009 年城市主要材料内含能碳足迹(CO₂e)

Fig. 6 Embodied energy carbon footprint of key urban materials in Xiamen City , 2009 (CO₂e)

3.4 国内外城市的人均碳足迹比较

目前国内外的研究包含 3 个层次碳排放的研究仍较少 ,从碳足迹的角度本文选取了丹佛市和厦门市做比较 ,具体如表 6 所示。从列表中可以看出 ,厦门市的人均碳足迹远低于丹佛市 ,仅是丹佛市人均碳足迹的 1 / 3。从各层次的结构来看 ,厦门和丹佛人均直接碳排放分别占到 64% 和 75% ,跨界交通引起的碳排放都是占总碳足迹 10% ,而主要材料的内含能引起的碳排放分别占到总碳足迹的 26% 、15% ;从比例上来看 ,厦门在人均直接碳排放上比丹佛少了 11% ,而又在主要材料内含能上多了 11% 。在第 3 层次上的碳排放 ,厦门和丹佛分别是 36% 和 25% ,厦门比丹佛多了 11% ,这在一定层面上说明发展中国家的城市由于工业化和城市化进程 ,消耗了相对较多的水泥、食物等主要物质 ,同时也进一步表明了发展中国家第 3 层碳排放管理的重要性。

根据世界银行对国际典型城市碳排放结果的汇总数据^[30] ,进一步比较国内外典型城市在包括了航空和航海的城市碳排放(不包括城市主要材料内含能引起的碳排放) 情况 ,详情如图 7 所示。从图中可以看出 ,美国丹佛以 21.5 t CO₂e 的人均碳排放最高 ,人均碳排放均超过 10 t CO₂e/ 人的有洛杉矶、上海、天津、北京、曼谷等城市 ,厦门从国内外的比较来看是相对低碳的城市;从区域的角度来看 ,美国城市人均碳排放最高 ,中国大

城市的人均排放也相对较高 相对地欧洲和日本等国家的排放较低。

表 6 基于混合分析法的城市人均能源利用碳足迹的比较

Table 6 Comparison of per capital urban carbon emissions from energy use based on the hybrid analysis method		
项目 Item	丹佛市 Denver(2005)	厦门市 Xiamen(2009)
人均直接碳排放(Scope1+2) /(t CO ₂ e/人)		
Direct energy use with city including Scope 1+2	18.9	5.74
人均碳排放(包括 Scope1+2 以及 Scope3 中的跨界交通) /(t CO ₂ e/人)		
Direct energy use plus cross-boundary transport of Scope 3	21.5	6.63
人均碳足迹(包括 Scope1+2+3) /(t CO ₂ e/人)		
Direct energy use plus cross-boundary transport and embodied energy of Scope 3	25.3	9.01

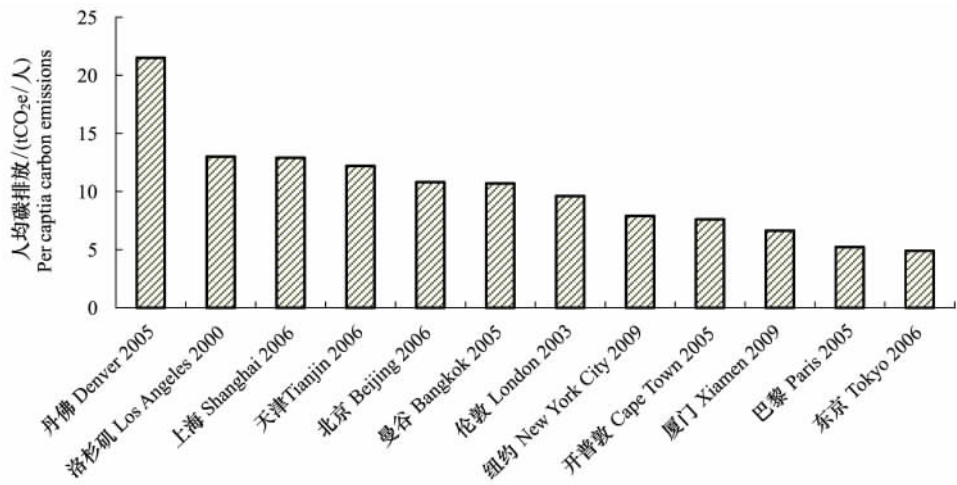


图 7 国内外典型城市的人均碳排放比较

Fig. 7 Comparison of per capital carbon emissions of typical cities

4 结论与讨论

本文是碳足迹分析方法在国内城市碳排放分析中的首次探索研究 ,从全新视角计算与评估城市碳排放 ,对正确而全面的评估温室气体效应具有十分重要的现实意义。首先阐述了城市碳足迹混合分析方法的基本原理 ,在此基础上以厦门市为研究案例 ,对厦门市能源利用进行碳足迹分析研究。研究表明: (1) 2009 年厦门市全社会的能源利用产生的碳足迹为 22710.97 kt CO₂e ,其中城市边界内的工业、交通、商业等部门的能源消耗产生的直接碳排放(即层次 1 和层次 2) 为 14463.48 kt CO₂e ,只占到总碳足迹的 64% ,而一直被忽略的跨界交通和城市主要消耗物质的内含能引起的间接碳排放(层次 3) 为 8247.49 kt CO₂e ,占到 36%; (2) 在直接碳排放中 ,工业部门的碳排放贡献率最大 ,占到直接碳排放的 55% ,其中化工行业带来的碳排放占到工业部门的 25%; (3) 在间接碳排放中 ,跨界交通引起的碳排放为 2245.97 kt CO₂e ,占间接碳排放的 27% ,其中长途道路运输贡献率最大 ,占跨界交通碳排放的 38%; 主要材料内含能碳排放为 6001.50 kt CO₂e ,占间接碳排的 73% ,其中燃料的内含能碳排放占的份额最大 ,达 51% 。 (4) 从人均碳足迹角度考虑 ,厦门市和丹佛市的人均直接碳排(即层次 1 和层次 2) 分别为 5.74 kt CO₂e/人、18.9 kt CO₂e/人 ,包含 3 个层次的人均碳足迹分别为 9.01 t CO₂e/人、25.3 t CO₂e/人 ,其中仅跨界交通引起的碳排均占城市能源利用总碳足迹的 10% 左右 ,主要材料的内含能引起的碳排放分别占到总碳足迹的 26%、15% ；就国内外典型城市在传统层次上(包括航海和航空引起的碳排放) 的人均碳排放比较 ,厦门市的人均碳排 6.63 t CO₂e/人 ,远小于国内外的大部分城市 ,只略高于法国的巴黎、日本的东京。

本研究利用碳足迹混合分析法 ,将层次 3 碳足迹纳入城市温室气体分析的范围 ,对于更加全面的碳减排有着积极意义 ,可以将城市许多举措产生减排纳入城市减排中 ,例如航线碳补偿计划^[31] ,城市建筑采用绿

色水泥^[32]或低碳材料,可再生能源的利用以及节约用水,居民选择绿色和低碳产品等,都会很大程度降低城市层次3的碳排放。因此,城市碳足迹分析方法更系统深入地评估城市能源利用直接和间接碳排放,揭示城市能源利用碳排放的内在过程,有利于探索更有针对性和更有效的城市能源利用的低碳对策。然而,碳足迹分析方法中仍有一些需要进一步探讨和完善的,比如计算边界、数据甄选、参数选择等,尤其是有关化石燃料燃烧的碳氧化率、全生命周期碳排放因子等参数大多数参考国外文献取默认值,与厦门市本地情况有些差异,导致计算结果有所偏差。今后的研究中应侧重在碳足迹模型计算参数的选取,尽量选用符合厦门实地情况的参数,使评价结果更加客观准确。

References:

- [1] The-Climate-Group. China's Low Carbon Leadership in Cities, 2009. [2010-06-30]. http://www.theclimategroup.org.cn/publications/2009-01-China_Low-Carbon_Leadership_Cities.
- [2] Quadrelli R, Peterson S. The energy-climate challenge: recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion. *Energy Policy*, 2007, 35(11): 5938-5952.
- [3] Gu C L, Tan Z B, Han C Q. Climate Change and Low Carbon City Planning. Nanjing: Southeast University Press, 2009.
- [4] Cao B, Lin J Y, Cui S H, Tang L N. Scenario analysis of reduction potentials of energy demand and GHG emissions based on LEAP model in Xiamen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3358-3367.
- [5] Xie S C, Chen C H, Li L, Huang C, Chen Z, Dai P, Lu J. The energy related carbon dioxide emission inventory and carbon flow chart in Shanghai City. *China Environmental Science*, 2009, 29(11): 1215-1220.
- [6] Wang X, Jiang H, Xu X H. Greenhouse gas emission of energy consumption in Shanghai. *Shanghai Environmental Sciences*, 1996, 15(12): 15-17.
- [7] Guo Y G, Wang D D, Lin F C. Carbon footprint of energy use in Shanghai. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(2): 103-108.
- [8] Hillman T, Ramaswami A. Greenhouse gas emission footprints and energy use benchmarks for eight U. S. cities. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(6): 1902-1910.
- [9] Ramaswami A, Hillman T, Janson B, Reiner M, Thomas G. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city-scale greenhouse gas inventories. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(17): 6455-6461.
- [10] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havrůnek M, Pataki D, Phdungsilp A, Ramaswami A, Mendez G V. Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4828-4837.
- [11] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [12] Wang W, Lin J Y, Cui S H, Lin T. An overview of carbon footprint analysis. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(7): 71-78.
- [13] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(1): 1-6.
- [14] Brown M A, Southworth F, Sarzynski A. The geography of metropolitan carbon footprints. *Policy and Society*, 2009, 27(4): 285-304.
- [15] Burnham A, Wang M, Wu Y. Development and Applications of GREET 2.7 -The Transportation Vehicle-Cycle Model. Chicago: Argonne National Laboratory, 2006.
- [16] Cole A. More treatment in surgeries and at home will help cut NHS carbon footprint. *British Medical Journal*, 2009, 338: b345-b345.
- [17] POST. Carbon footprint of electricity generation. Parliamentary Office of Science and Technology, London, UK, 2006, [2010-09-01]. <http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf>.
- [18] Wiedmann T, Minx J. A definition of "carbon footprint". ISA^{UK} Research Report 07-01. [2010-09-10]. <http://www.isa-research.co.uk>.
- [19] Coolcalifornia. Carbon calculator. [2010-07-01]. <http://www.coolcalifornia.org/chinese/calculator.html>
- [20] Landscape Conservation Center. Personal carbon footprint calculation method. [2010-07-01]. http://www.hinature.cn/Nature/what_we_are/001/carbon_tree/Main.shtml.
- [21] Weber C L, Matthews H S. Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint. *Ecological Economics*, 2008, 66(2/3): 379-391.
- [22] Druckman A, Jackson T. The carbon footprint of UK households 1990—2004: a socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input-output model. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2066-2077.

- [23] Ranganathan J, Moorcroft D, Koch J. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard: Revised Edition. World Business Council for Sustainable Development, World Resource Institute. [2010-09-10]. <http://www.ghgprotocol.org/>.
- [24] Carney S, Green R, Wood R. Greenhouse Gas Emissions Inventories for Eighteen European Regions, EU CO₂ 80/50 Project Stage 1: Inventory Formation. The Greenhouse Gas Regional Inventory Protocol (GRIP), Centre for Urban and Regional Ecology, School of Environment and Development, The University of Manchester, Manchester, 2009.
- [25] Greater London Authority. Action Today to Protect Tomorrow: The Major's Climate Change Action Plan, 2007. [2010-08-30]. http://www.london.gov.uk/mayor/environment/climate-change/docs/ccap_fullreport.pdf.
- [26] Dickinson J. Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions, Mayor's Office of Operations, Office of Long-term Planning and Sustainability, 2007. [2010-08-25]. <http://www.nyc.gov/plany2030>.
- [27] Norman J, Charpentier A D, Maclean H L. Economic input-output life-cycle assessment of trade between Canada and the United States. Environmental Science and Technology, 2007, 41(5): 1523-1532.
- [28] Carnegie Mellon University Green Design Institute. Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA), US 1997 Industry Benchmark model, 2008. [2010-05-30]. <http://www.eiolca.net>.
- [29] Leontief W. Quantitative Input and output relations in the economic systems of The United States. The Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [30] UNEP. Representative GHG Baselines for Cities and their Respective Countries. 2011. [2012-3-13]. http://www.unep.org/urban_environment/PDFs/Representative-GHGBaselines.pdf
- [31] Zhao W Z, Yang W W. Study on Algorithm of CO₂ Compensation for Flight Passenger. Journal of Civil Aviation University of China. 2010, (1): 38-40.
- [32] Han Y Q. Discussion on the Development of Green Cement Industry in China-A Thinking on Changing Development Mode to Promote the Development of Green Cement Industry. Development Guide to Building Materials, 2010, (2): 23-26.

参考文献:

- [3] 顾朝林, 谭纵波, 韩春强. 气候变化与低碳城市规划. 南京: 东南大学出版社, 2009.
- [4] 曹斌, 林剑艺, 崔胜辉, 唐立娜. 基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析. 生态学报, 2010, 30(12): 3358-3367.
- [5] 谢士晨, 陈长虹, 李莉, 黄成, 程真, 戴璞, 鲁君. 上海市能源消费 CO₂ 排放清单与碳流通图. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1215-1220.
- [6] 王昕, 姜虹, 徐新华. 上海市能源消耗活动中温室气体排放. 上海环境科学, 1996, 15(12): 15-17.
- [7] 郭运功, 汪冬冬, 林逢春. 上海市能源利用碳排放足迹研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(2): 103-108.
- [12] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 吝涛. 碳足迹分析方法研究综述. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-78.
- [20] 山水自然保护中心. 个人碳足迹算法. [2010-07-01]. http://www.hinature.cn/Nature/what_we_are/001/carbon_tree/Main.shtml.
- [31] 赵文智 杨卫卫. 航班旅客的二氧化碳补偿算法研究. 中国民航大学学报, 2010, (1): 38-40.
- [32] 韩永奇. 我国绿色水泥产业发展之我见——关于转变发展方式推动绿色水泥发展的思考. 建材发展导向, 2010, (2): 23-26.