

城市温室气体清单评价研究

陈操操 ,刘春兰 ,田刚 ,王海华 ,李铮

(北京市环境保护科学研究院 ,北京 100037)

摘要:城市消费了大量的能源 ,是全球人类活动温室气体的最大排放源 ,在应对气候变化中起到关键作用 .城市温室气体清单评价成为重要的基础性工作 ,对于制定城市减排目标和计划、评估减排措施效果具有重要的意义 .然而 ,城市开放的空间系统结构导致城市温室气体清单核算面临许多困难和挑战 .本文对国内外城市温室气体清单方法和案例进行了回顾与展望 ,研究内容主要集中在比较城市清单和国家清单方法、联系和区别 ,分析清单编制的不确定性 ,在此基础上提出可借鉴的经验与启示 ,以期推动我国城市温室气体清单研究发展 .

关键词:城市;国家;温室气体清单;评估;存在问题和启示

中图分类号:X16 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)11-2780-08

Progress in Research of Urban Greenhouse Gas Emission Inventory

CHEN Cao-cao ,LIU Chun-lan ,TIAN Gang ,WANG Hai-hua ,LI Zheng

(Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection ,Beijing 100037 ,China)

Abstract: Urban areas carry main responsibility for consuming massive energy sources and make great contribution to global anthropogenic greenhouse gas emissions. City and local governments are seen to have a key role in climate mitigation. Hence ,one of the important work concerns accounting for city greenhouse gas (GHG) emissions ,because it plays significant role in setting reduction targets and evaluating success of local measures. However ,open system architectures like city face many challenges for greenhouse gas accounting. Based on the review in details the methodology and case study ,our study focuses on the difference and interconnection between country and city GHG accounts ,and uncertainty of accounts. Further ,we propose the valuable experience in order to improve domestic research on city GHG emission inventory.

Key words: city;country;greenhouse gas (GHG) emission inventory; evaluation; problems and experiences

以全球变暖为主要特征的气候变化已成为国际公认的事实 ,这种改变与人类不断向大气中排放并提高温室气体浓度有关 .2007 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告表明 ,过去的 100 多年来 ,全球平均气温上升了 0.74℃ ,与此同时 ,大气 CO₂ 浓度增加了 60% 左右 ,人类活动很有可能是大部分观测到增暖现象的主要原因^[1] .城市是全球温室气体排放的主要贡献者 ,地球上超过 50% 的人口居住在城市^[2] ,虽然城市地区只占地球总面积的 2.4%^[3] ,对人为温室气体排放贡献高达 67% ~ 80%^[4-6] .在全球城市化进程持续加快的背景下^[7] ,城市温室气体排放比重还将继续上升 ,城市能够在应对气候变化中起到关键和积极的作用^[8] .如何准确地评估城市温室气体排放情况成为重要的基础性研究工作 .这对于未来如何分配城市承担减排责任 ,开展减排贸易和减排谈判工作 ,衡量温室气体排放效率 ,制定城市减排目标、措施和探寻适应对策具有重要的意义 .目前 ,国外发达国家许多城市开展了温室气体核查和减排活动 ,伦敦、纽约、多伦多、巴塞罗那等建立了多年甚至时间序列城市温室气体清

单^[9-12] ,然而在国内城市还非常欠缺该方面的研究 .

城市温室气体核算目前面临着许多困难和挑战 .一方面 ,作为开放型的经济系统 ,城市消费的能源和资源主要依赖外部提供 ,这部分生产加工或转化过程间接排放温室气体数量很高 ,并且可能远离城市辖区范围 .同样 ,由城市生产但向城市外部提供的商品或服务 ,并不在城市内部消费或使用 ,这部分商品和服务蕴含的温室气体排放不应归入城市账户之中 .从排放责任的角度看 ,国家清单成熟和惯用的思路 ,即基于行政边界的生产排放 (on-site emission) 方法在城市层面并不适用 .城市温室气体排放不仅需要关注城市范围内的直接排放 ,同时也需要掌握进出口商品蕴含的间接排放^[13] .另一方面 ,城市温室气体核算的复杂之处还在于城市内部纷繁多样的构成和相互关系 .城市是人口、建筑、交通、工业、物

收稿日期:2009-12-30;修订日期:2010-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41001380);北京市科技计划课题研究项目(Z08000602620801)

作者简介:陈操操(1980~),男,博士,主要研究方向为气候变化与碳排放,E-mail:ecoduron@163.com

流的密集地区,城市内部之间、城市与城市外部不断发生大量的能源和物质流动,加大了评估的困难。概括而言,温室气体排放量评估是包含了多时空尺度、多分析角度的综合性研究,存在不同的计算模式与精度差异,增加了衡量与比较国家或区域温室气体排放难度^[14]。在国家层面,政府间气候变化专门委员会(IPCC)建立了针对国家账户的统一方法学指南^[15]。在城市层面,尽管许多城市已经开始进行温室气体排放评估工作,但是城市温室气体核算方法仍缺乏一致的标准,面临着边界模糊,范围不一,时间和空间可比性不强等的困境。本文主要比较城市清单和国家清单的联系和区别,分析清单编制的不确定性,在此基础上提出可借鉴的经验与启示,以期推动我国城市温室气体清单评价研究发展。

1 温室气体清单分析方法

温室气体清单分析经历了由宏观向微观的发展过程,由最初的国家温室气体清单核算逐渐发展到地方温室气体清单、企业温室气体清单甚至个人温室气体核算。在此分析和比较了国家温室气体清单和城市温室气体清单,清单评估的不确定性等方面内容。

1.1 国家温室气体清单

IPCC 是国家温室气体清单方法的主要编制机构。根据《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)的要求,公约附件 1 和非附件 1 国家需要提交温室气体清单或国家信息通报。IPCC 为各国提供了标准化的清单编制方法和格式,用于由人类活动导致的温室气体排放源和汇的量化工作。国家清单的编制是一个结合不同部门、不同层次、由上至下及由下至上的方法综合过程。最新公布的《IPCC2006 国家温室气体清单指南》将温室气体分为 4 大类部门^[15]:能源、工业过程及产品、农/林业及土地利用、废弃物管理等,在这 4 大类部门之下可划分出一级或多级子类部门,例如能源部门类别可深入到具体的企业或燃烧设备。通过适当方法核算各级子类部门排放并逐级汇总后,最终形成国家温室气体清单。按照《IPCC 清单指南》的要求,除了按部门划分、核算并汇总的自下而上方法,同时也需要依照国家对各种燃料使用的表观消费数据,采用自上而下方法对排放清单进行核算和印证。截止到 2009 年,UNFCCC 收集了 1990~2007 年公约附件 1 所列 41 个缔约国国家温室气体清单,148 个非公约附件 1 缔约国国家信息通报,大部分国家采用 IPCC 推荐方法^[16]。美国能源信息管理局(EIA)、国际能源署(IEA)、世界

资源研究所(WRI)等政府部门和研究机构在建立国际温室气体排放数据集时,也都主要利用了 IPCC 推荐的核算方法^[14]。

《IPCC 清单指南》广泛使用排放因子法评估排放量,定义温室气体排放量为各部门的活动水平数据与对应单位活动水平排放因子乘积。《IPCC 清单指南》的核心内容之一是提供了默认的排放因子,帮助各国更加容易地编制温室气体排放清单。但是,其默认排放因子更适用于发达国家,世界各国技术水平、用能设备等状况参差不齐,可能并不能直接引用 IPCC 默认排放因子,而排放因子的差异情况在发展中国家更加明显^[17]。因此《IPCC 清单指南》同时也推荐采用更精确的评估方法,例如通过实验或建立连续监测系统(CEMS),对 CO₂、N₂O 等气体进行实时监测,提高清单结果的准确性。IPCC 还鼓励各国将实际情况得出排放因子与默认值进行比较,分析原因,以减少排放核算的不确定性。

一些国家和机构也在积极开发基于本国或本地地区的温室气体清单核算方法。美国环境署(EPA)逐年公布该国温室气体排放清单,随之公布的还有最新的清单评估方法学^[18]。澳大利亚联邦温室气体署(AGO)编制了一系列温室气体排放工作手册,并以此评估澳大利亚年排放量^[19]。欧盟环境署(EEA)开发了大气污染物和温室气体排放清单指导手册(EMEP/EEA),其显著特点是提供了自然源和人为源温室气体排放评估方法(IPCC 清单指南只提供人为源排放评估方法)^[20]。欧洲和非洲一些国家采用 EMEP/EEA 方法编制温室气体清单,例如法国、爱尔兰、意大利、卢森堡和葡萄牙等国采用欧盟 EMEP/EEA 排放清单手册计算并汇总本国温室气体排放数据,并转换为气候公约秘书处所要求的 IPCC 格式。

1.2 城市温室气体清单

城市作为国家的下级行政单元,在现阶段不需要承担强制性的减排责任。许多地方政府正通过积极努力,掌握城市温室气体排放,预防或降低气候变化负面影响,措施包括开展自发性城市温室气体排放核算,衡量温室气体排放效率,制定城市减排目标,通过排放清单评估减排措施的有效性等。但是,城市温室气体排放清单还没有建立类似 IPCC 国家清单指南的一致和权威的方法学,城市清单评估的范围、层次和内容没有确定,城市复杂开放的系统结构给城市清单编制带来了巨大的挑战。

一些城市直接采用国家清单评估方法核算城市

排放量,如德里市采用 IPCC 国家清单指南和欧盟 EMEP/EEA 排放指导手册的排放因子核算了本地温室气体和大气污染物排放状况及变化趋势,核算部门齐全,包括电力、交通、居民、工业生产过程、农业和废弃物处理^[21]。还有一部分城市加入了自愿性的减排行动或计划,采用特定的指南和工具计算城市排放量。本地环境理事会组织(Local Governments for Sustainability,ICLEI)是组织和推动城市减排运动的典型代表,也是一个主要的建立城市清单方法和工具的非政府机构。1993年 ICLEI 发起了城市应对气候变化行动(Cities for Climate Protection Campaign,CCP),宗旨是减少城市温室气体排放,改善空气质量,增强城市的可持续发展能力。ICLEI 最新统计数据显示,目前全球有 33 个国家约 1 179 个地方政府参与到 CCP 行动中,这些城市排放温室气体数量超过全球排放总量的 15%,主要集中在北美、欧洲等发达国家^[22]。ICLEI 为所有参加行动的城市设计了“五里程碑式”的减排计划,包括计算城市温室气体排放量,制定减排目标,建立和实施减排计划,监测和报告行动进展过程^[23]。为了帮助城市完成减排计划,ICLEI 设计了温室气体评估和预测工具软件(clean air and climate protection,CACP)。CACP 软件评估的对象涵盖京都议定书中所有 6 种温室气体和一部分大气污染物,重点是城市温室气体排放关键部门评估,如电力、化石燃料燃烧和垃圾填埋等部门,在多伦多、纽约、丹佛等城市得到良好的应用^[11,24,25]。CACP 软件的优点在于提供了专门的城市层面温室气体排放评估工具,统一了排放源部门划分和排放因子,支持不同城市之间的评估结果相互比较。但是 CACP 软件主要基于 IPCC 国家温室气体清单方法学,由于城市和国家的排放特点差异,在城市地区并不完全适用。此外,CACP 软件只提供给加入城市 CCP 减排运动的城市,包括中国在内的大多数发展中国家的非会员城市无法使用。

有鉴于此,为了统一城市温室气体核算方法和标准,本地环境理事会组织(ICLEI)、加州空气资源局(CARB)、加州气候行动登记处(CCAR)、气候变化登记处(TCR)以及世界可持续发展工商理事会与世界资源研究所(WBCSD/WRI)纷纷开始着手制定城市温室气体排放指导议定书,尝试提供一致和专门的城市温室气体排放分析框架。其中,2008年 ICLEI 已经推出了首个面向国家级别以下行政区域(适用于城市、区县和州、省等)的温室气体排放方法学议定书(International Local Government GHG

Emissions Analysis Protocol)^[26]。

1.3 城市与国家清单比较分析

1.3.1 核算气体

国家清单和城市清单核算温室气体类型相近。然而,国家清单核算的温室气体种类多于城市,通常为《京都议定书》限定的需要强制减排的 6 种温室气体,包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)和六氟化硫(SF₆)。出于成本和关键排放源的考虑,大多数城市清单仅核算 CO₂、CH₄ 和 N₂O 这 3 种关键温室气体。由于各温室气体辐射特性和大气中生命周期各不相同,对全球气候系统产生的暖化影响也存在差异。IPCC 以一定时期内(通常为 100 年)CO₂ 辐射强迫为依据标准化换算和表现不同温室气体对变暖的影响程度,称为全球增温潜势(GWP)。2007 年 IPCC 最新发表的第四次评估报告对常见的温室气体增温潜势如下:CO₂ 为 1,CH₄ 为 25,N₂O 为 298。对于《京都议定书》限制排放的其他 3 种温室气体:氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)和六氟化硫(SF₆),以及《蒙特利尔议定书》限制排放的其他温室气体:氯氟碳化物(CFCs)、氢氯氟碳化物(HCFCs)等,虽然增温潜势很大,但由于其对城市温室气体排放总量的贡献小,产生气候影响很低,往往并不包含在城市清单核算范围之内。

1.3.2 评估方法

排放因子法是国家与城市清单主要采用的评估方法。获取能够反映城市特点的准确的排放因子成为一项重要的工作。相对而言,国家清单排放因子的综合程度更高,城市清单排放因子更加具体。城市清单排放因子的来源按照精确性降序排列,包括城市检测机构、行业协会进行部门调查或类似技术资料,城市所属国家或地区公开出版的相关文献等(表 1)。如果上述本地的具体资料无法获得,还可以参考国际机构开发的缺省排放因子库,如 IPCC 清单指南排放因子或 EMEP/EEA 清单排放指导手册默认排放因子等。

1.3.3 边界影响

国家与城市边界都是政权管辖范围的地理分界线。国家之间边界通过条约作书面上严格的规定,在主要的通商口岸设有海关、出入境及检疫设施,人口和货物不经授权不能自由穿越国家边界。在编制国家清单时,可以通过国家详细的边境进出口数据记录,掌握国内商品和能源使用情况,进而评估国家温室气体排放量,数据获取相对较为容易。

表 1 城市温室气体排放清单排放因子的来源^[15, 18, 20, 27, 28]

Table 1 Reference of city GHG emissions factors

文献类型	来源与出处	准确程度	备注
部门调查、技术标准或类似技术资料	当地检测机构和行业协会	高	具有很高的可靠性和代表性,更新较快
国别或区域排放因子数据	出版社和环境报告等	较高	可靠性较高
其他普查、调查测量数据	各大学和研究所	较高	可靠性较高,需确保测量代表性和使用标准方法
IPCC2006 清单指南	IPCC 网站	一般	提供国际认可的缺省因子,对地区的代表性不强.
EMEP/EEA 清单排放指导手册 2009	EEA 网站	一般	提供欧洲地区国家缺省值,适用于发达国家和地区,可用于检验,地区代表性不高
EPA 排放因子库(包括 EIP, AP-42)	EPA 网站	一般	提供美国缺省值,适用于发达国家,可用于检验,地区代表性不高

城市边界不同于国家,并没有封闭性的边界管理制度,人员与货物能够自由的在城市之间进出,由于缺乏相应的统计记录,增加城市温室气体评估的难度.如果城市温室气体清单核算基于城市的统计数据,存在低估的可能.为了解决这一问题,有的城市尝试在评估排放的基数上增加一定比例,作为活动数据欠缺的补偿,减少城市温室气体排放低估的风险^[12].

1.3.4 直接排放和间接排放

直接排放和间接排放是对排放的空间范围理解差异引发的 2 种计算思路.直接排放是指以生产口径为基准(Production-based Inventory)的排放账户,即所有排放过程位于区域行政管制边界之内.间接排放是指以消费为基准(Consumption-based Inventory)的排放账户,即区域内特定人口最终消费的产品和服务中蕴含的排放量.间接排放一般考虑了全生命周期内产品的生产、加工、运输、消费和废物处理排放量累加,因此间接排放的空间范围一般大于直接排放,间接排放量也高于直接排放.

根据 IPCC 清单指南,国家温室气体清单采用的是直接排放的核算方法,严格遵从国家空间范围内温室气体直接产生和排放基准^[15].直接排放账户不能刻画进口的二次能源中隐含的一次能源加工转换和运输导致的排放,例如电力和成品油.直接排放账户也不能体现进出口货物和商品中蕴含的温室气体排放.由于直接排放核算方法简便明朗,当前城市温室气体核算主要还是以直接排放为主^[12, 21, 24, 25].

然而直接排放核算思路在城市地区并不适用.城市是人口、建筑、交通、工业、物流的密集地区,城市造成环境效应的影响范围远大于城市行政边界^[29].作为开放型的经济系统,城市消费的能源和资源主要依赖外部进口,特别是对外购买的电力、热源等二次能源,这些二次能源的生产

过程排放了大量的温室气体,并且位于城市边界之外.从排放责任和排放量大小的角度出发,该部分由城市消费而不在城市本地直接生产和排放的隐含温室气体排放(embodied emissions)应该归属到城市账户中去.同理,间接排放还需考虑进出口货物和商品蕴含的温室气体排放^[30, 31].消费是排放的驱动因素,间接排放从消费的角度出发,破除了传统的“烟筒产生污染”的观念,在评估温室气体排放责任上更为公平.一项对英国温室气体排放的研究指出,虽然 1992~2004 年间英国温室气体排放量下降了 5%,但实际上如果考虑最终消费导致的间接温室气体排放,英国温室气体排放量反而上升了 18%^[32].也有研究指出,虽然中国温室气体总量超越美国,居世界第一,然而在排放总量的 23% 是制造产品为满足其他国家消费所需的间接的排放量^[33].近年来,研究者已经注意到温室气体间接排放研究的重要性,目前大部分主要集中在国家层面直接排放和间接排放比较上,关于城市的间接排放核算开展的研究依然较少.

1.3.5 排放源部门

由于国家和城市边界特点以及直接排放和间接排放的差异,导致国家和城市在排放源部门划分不同.国家清单排放源部门划分较为直接,根据 IPCC 清单指南,国家排放源部门按能源、工业过程及产品、农业林业及其他土地利用、废弃物向下进行子部门的逐级分类^[15].城市清单的排放源部门划分为 3 种范围(表 2),范围 1 指所有的城市行政边界内温室气体直接排放;范围 2 特指城市消费和购买的由外部二次能源产生的温室气体间接排放,如电力、热力和蒸汽等;范围 3 指除范围 2 之外的所有的间接排放,例如城市进出口商品蕴含温室气体排放^[26, 34].

表 2 城市温室气体排放清单范围划分及排放类型

Table 2 Sectors and scopes of city GHG emissions

排放类型	排放组成	范围 1	范围 2	范围 3
直接排放	城市组织/功能边界内直接排放,包括固定、移动燃烧源,工业生产过程,逃逸排放等	√		
间接排放	城市组织/功能边界之外,由于外购和消费电力、热力等产生的间接排放		√	
间接排放	除范围 2 的电力、供热之外的其他所有间接排放,如城市进出口商品蕴含温室气体排放			√

ICLEI 制定的核算与报告准则规定,不同范围所属温室气体排放量应分项列明,城市温室气体排放清单的最低要求为范围 1(直接排放)与范围 2(购买电力和热力间接排放),范围 3 排放(其他间接排放,如生命周期核算)可根据清单编制的不同要求决定是否报告^[26]。总体上,城市温室气体排放清单的范围 1 和范围 2 排放源活动数据容易获取,评估困难小,但是范围 3 涉及到城市消费能源、产品等多个领域,活动水平数据不容易获得,评估难度较大(表 3)。

表 3 国家与城市温室气体清单排放源部门比较^[15, 26]

Table 3 Comparative analysis of sectors between country and city GHG emissions

国家清单排放源类型 (IPCC)		城市清单排放源类型 (ICLEI)		
部门	子部门	范围 1	范围 2	范围 3
能源	固定燃烧源	边界内点源、面源燃烧排放; 单位或企业自供电排放	n/a ¹⁾	上/下游排放(如燃煤的开采和运输)
	电力/供热	n/a	点源、面源消费的外购电力/热力	上/下游排放(如燃煤的开采和运输)
	移动燃烧源	边界内机动车、火车、航运、飞行和非道路机动车排放	移动源消费的外购电力,如轻轨	上/下游排放(如燃油的开采和运输);来往于城市内外的通勤车辆
	其他能源利用	边界内部逸散排放	n/a	上/下游排放
工业过程及产品		边界内工业过程及产品排放,如水泥、钢铁	n/a	上/下游排放,如产品中蕴含排放
农业、林业及其他土地利用		边界内牲畜肠道反刍,土壤管理排放	n/a	化肥/杀虫剂相关的上下游排放
		边界内土地利用与林业碳汇	n/a	n/a
废弃物处置	固体废物处理	边界内垃圾填埋,垃圾焚烧等处置排放	n/a	上/下游排放(如运送垃圾)
	废水处理	边界内废水处置排放	n/a	上/下游排放(如运送污水厂污泥)

1) n/a 代表该范围内容不存在对应关系

1.3.6 不确定性分析

不确定性分析是温室气体排放清单的要素之一。不确定分析不仅能够研究清单评估的有效性,而且便于识别清单中不确定性的来源,进行优先排序,为选择核算方法和排放因子等方面提供参考依据,达到提高未来清单评估准确性的目的。国家和城市温室气体排放清单在不确定性分析上具有类似的特点。

温室气体排放清单既可以采用间接评估方法,也可以使用直接实测方法。利用能耗和排放因子数据对温室气体排放进行间接核算,是国家和城市温室气体排放清单最常使用的方法。方法较为简便,参数容易获取,例如某企业核算其能源燃烧排放 CO₂ 数量时,需要掌握的基本参数包括:燃料质量、燃料含碳率以及燃料的氧化率。而电厂等温室气体排放点源也可以采用直接实测方法,如采取连续排放监

测(CEMS)得到精确的 CO₂ 排放量。在 1995 年美国 EPA 开展的酸雨计划中,CEMS 系统为确定减排目标和建立排放交易制度提供了可靠的数据。CEMS 系统测量 CO₂ 操作方式与常规污染物一致,通过测量电厂烟囱中温室气体排放浓度,与烟气流量和年运行时间的乘积,得到年排放温室气体总量。直接实测法可信度高,但成本花费也很大。目前在大多数国家,CO₂ 仍不属于大气污染物,没有纳入常规测量范畴,除电厂外很少采用直接实测法计算温室气体排放量。

在国家和城市温室气体排放清单构成中,CO₂ 是最大的排放源,主要由化石燃料燃烧过程产生,采用间接估算法与直接实测法计算燃料燃烧排放 CO₂ 的结果相差不大。这是因为在燃烧过程中,燃料中的碳元素几乎全部转化为 CO₂,基于燃料消费和排放因子的间接核算已经能够取得很好的精度。但对于

非 CO₂ 面源或农业等小型温室气体排放源,由于排放份额小,影响排放的因素多,直接实测的代表性不强,实现成本高,实测法并不适用。针对此类排放评估,仍需要通过大量的试验技术和抽样调查,制定出代表性的排放因子,以间接估算法计算排放清单^[35]。

美国环保署对其国家温室气体排放清单的不确定性评估提供了借鉴^[36],当采用间接核算方法时,温室气体主要排放源——能源燃烧 CO₂ 排放核算的不确定程度最低 (<5%),排放量超过美国总温室气体总排放的 80%。其他非能源燃烧源释放温室气体的比重较低,尽管不确定性程度普遍偏高(例如,土壤管理 N₂O 排放估计误差甚至可能相差 10 倍),但整体上国家温室气体排放清单仍能保证良好的精度(图 1)。

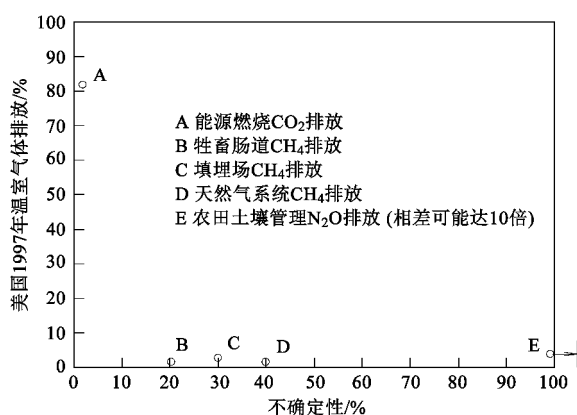


图 1 美国温室气体清单的不确定性评估

Fig. 1 Uncertainty in the estimates of US GHG emissions

2 国内外城市温室气体清单实例

2.1 国外城市温室气体清单研究

国外发达国家城市较早地开展了城市温室气体核查与研究工作,研究者从时间序列、生命周期、影响因素以及污染物协同账户等各个角度出发,分析城市温室气体排放情况。

Baldasano 根据 IPCC 国家清单指南以及自下而上的核算方法(Bottom-up),建立了西班牙城市巴塞罗那 1987~1996 年温室气体排放清单时间序列,其目的是揭示城市温室气体排放部门状况,并与其他城市人均排放量进行对比^[12]。巴塞罗那研究核算的温室气体为 CO₂ 和 CH₄,排放源部门划分包括交通、工业、商业、居民生活和垃圾填埋 5 部分。此外由于城市最终消费的产品在生产、加工、运输生命周期过程中隐含部分温室气体排放,研究者在计算的温

室气体排放总量基础上增加 10%,概算了这部分隐含在产品中间接排放量(范围 1、2、3)。

英国廷德尔研究中心(Tyndall Centre)分析了伦敦市温室气体排放情况^[10],以帮助城市制定未来减排目标和计划,核算基准年和预测年份分别为 2006 年和 2025 年,温室气体类型只含 CO₂ 一种,排放源包括居民、商业、工业及交通,评估范围为城市边界内的温室气体直接排放和外调电力排放,但不包括城市消费产品的间接排放(范围 1、2)。

纽约市在 2002 年加入 ICLEI 组织的“城市应对气候变化运动”,为了帮助城市尽快达成减排目标,核算了 2005 纽约市温室气体排放清单^[25]。纽约市清单采用的估算方法基于 ICLEI 开发的 CACP 软件,排放源部门有商业、工业、交通、居民和公共机构,评估范围涵盖城市温室气体直接排放和城市消费外调电、供暖的间接排放(范围 1、2)。温室气体清单报告包括 2 个部分,除了城市整体排放清单,还有政府公共部门温室气体排放清单。

丹佛市签署了地方城市之间的温室气体减排声明,并且由科罗拉多大学和丹佛城市环保健康署合作并完成了“丹佛市温室气体账户”报告,城市核算范围包括直接排放和间接排放两部分(范围 1、2、3),直接排放部分基于 ICLEI 提供的 CACP 软件,间接排放部分采用科罗拉多大学建立的生命周期模型^[37]。城市账户基准年为 1990 年和 2005 年,目的是最终建立 2012 年或更晚的减排计划。清单核算了 3 种温室气体:CO₂、CH₄ 和 N₂O,部门涵盖居民、工业、商业、交通、垃圾处理等排放源。

多伦多市在 20 世纪 90 年代初就已经加入 ICLEI 发起的城市温室气体减排运动,开展了城市温室气体排放清单核算有关工作,采用方法为 ICLEI 开发的 CACP 软件。2007 年多伦多扩大城市排放清单的评估范围,综合核算城市温室气体和大气标准污染物排放情况,寻求对两者减排都有效的协同措施^[11],其中温室气体账户核算采用 ICLEI 计算方法和生命周期模型,核算范围涵盖城市边界内直接排放以及边界外间接排放(范围 1、2、3)。

Dhakal 等^[38]对亚洲 4 个城市——北京、上海、首尔和东京能源利用和温室气体排放情况进行研究,核算范围为城市边界内与能源利用有关的直接排放(范围 1),核算气体为 CO₂,参考方法为 IPCC 清单指南,该研究偏重于对四城市总量和人均量的对比,以及影响因素解释。文献^[38]详细分析了印度德里市 1990~2000 年城市空气污染物及温室气

体排放情况和变化趋势,采用方法为排放因子法,按电厂、交通、居民、工业等排放部门进行划分,所用因子源于 IPCC 和 EMEP/CORINAIR 等清单指南,属直接排放(范围 1)。

2.2 国内城市温室气体研究

中国温室气体排放量估算始于 20 世纪 90 年代初,在有关国际组织和资金技术的支持下,由国家科学技术部和原国家环保总局等部门牵头组织国内有关专家,完成国家层面多项有关气候变化方面研究^[39]。然而在城市尺度上的研究较少,研究内容覆盖不全、研究深度不足,多直接采用了国外排放因子和系数,属简单的应用型研究。王昕等^[40]采用 IPCC 国家温室气体指南,对上海能源消耗活动中温室气体排放进行研究,并提出相应的减排措施。钱杰等^[41]对上海市化石燃料排放二氧化碳贡献量进行核算,采用 ORNL 提出的计算方法计算 1994~2005 年上海二氧化碳排放量,研究假设期间碳排放系数不发生改变。1994 年中加气候变化合作项目对北京市温室气体排放账户和减排对策进行研究,其中在对工业锅炉、小煤炉等排放源进行了排放因子本地化工作。2008 年北京市再次对基准年(2005 年)温室气体清单进行更新和计算,在固定燃烧源、土地利用变化、森林碳汇等更多排放源进行了大量数据采样、排放因子分析工作,获取了更加精细的城市排放清单^[42]。可见,目前国内城市温室气体排放清单仅在北京、上海等大城市开展,其他城市还缺乏同类研究。

3 研究启示及未来研究方向

3.1 研究应注意的问题

(1)明确排放清单的编制目的。必须首先确定编制城市温室气体排放清单的目的和用途。它决定了核算选取的评估范围、使用方法以及准确程度等。例如,以减排承诺为目的城市温室气体排放清单要求远高于科研报告性质的城市清单。

(2)明确城市清单的核算范围。行政边界的直接排放和终端消费的间接排放拥有不同的核算范围。间接排放进一步还可以分为消费外部二次能源的间接排放(范围 2),以及消费或提供上下游商品隐含的碳排放(范围 3)。核算前需要明确核算的范围和层次。

(3)增加清单报告的灵活性和可比性。由于城市清单核算的方法学不统一,并且不同地域特点、清单编制目的和核算范围不同,城市温室气体评估结

果在相互之间通常不具可比性。例如中国城市人口密度高,行政范围覆盖农村和郊区,拥有工业生产、农林业生产等完整的经济体系,温室气体账户核算类型要多于西方发达国家城市,甚至国内一些大城市排放绝对水平也可能比西方城市高。因此在报告时,有必要采用国际规范的部门划分和范围界定,在报告时按主要类型分项列明,并加入人均碳排放等指标,增加清单报告的灵活性和可比性。

3.2 未来研究重点

(1)在时间尺度上,加强城市温室气体排放时间序列研究,揭示主要排放源及排放部门的排放变化特征,以及温室气体排放与区域经济、人口等发展演化内在互动机制和耦合关系。

(2)在空间尺度上,加大对东西方城市、大中小城市、城镇、省级和国家温室气体清单实证比较研究,分析温室气体排放的结构层次性、空间形态、叠加性以及空间扩散性等,研究城市形态变化对排放的影响,探讨碳排放外溢与转移的空间分割尺度与程度。

(3)在研究内容上,加强城市温室气体与大气污染物协同减排与相互调控关系研究^[11,43],加强城市温室气体排放不同时空尺度比较,直接排放和间接排放的比较,基于生命周期的碳足迹研究,城市生态经济系统碳循环研究。另外开展不同消费模式、消费水平、消费文化背景下碳排放与区域可持续发展的关系研究,由贸易引起城市碳排放区际转移与扩散,以及城市范围内能源、交通、建筑、工业、生活等特定行业与部门碳排放细化研究等。

(4)在研究方法上,加强城市温室气体排放计算中数据、方法和报告格式等方面的标准化工作,如排放因子本地化、活动水平数据获取流程和方式、质量控制等方面的内容完善,建立基于温室气体排放的指标体系和分析框架,帮助城市开展温室气体减排活动和可持续发展。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 1-989.
- [2] UNFPA. State of World Population 2007: Unleashing the Potential of Urban Growth [R]. New York: UNFPA, 2008. 41-57.
- [3] Potere D, Schneider A. A critical look at representations of urban areas in global maps [J]. Geojournal, 2007, 69(1): 55-80.
- [4] O'Meara M, Peterson J A. Reinventing cities for people and the planet [M]. Washington: Worldwatch Institute, 1999. 12-31.
- [5] IEA. World Energy Outlook [R]. Paris: France, 2008. 1-42.

- [6] Satterthwaite D. Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions [J]. *Environment and Urbanization* 2008, **20**(2): 539-549.
- [7] UN. World Urbanization Prospects: the 2006 Revision [R]. New York: United Nations, 2005. 33-54.
- [8] Betsill M M, Bulkeley H. Cities and the multilevel governance of global climate change [J]. *Global Governance: A Review of Multilateralism and International Organizations*, 2006, **12**(2): 141-159.
- [9] Bloomberg M M R. Inventory of New York city greenhouse gas emissions 2005 [EB/OL]. 2007, http://home2.nyc.gov/html/planyc2030/downloads/pdf/greenhousegas_2009.pdf.
- [10] GLACH. Greater London authority city hall, action today to protect tomorrow the Mayor's climate change action plan [EB/OL]. 2007, <http://www.london.gov.uk/londonissues/environment.jsp>.
- [11] ICF-International. Greenhouse gases and air pollutants in the city of Toronto-Toward a harmonized strategy for reducing emission [EB/OL]. 2007, http://www.toronto.ca/taf/pdf/ghginventory_jun07.pdf.
- [12] Baldasano J M, Soriano C, Boada L. Emission inventory for greenhouse gases in the city of Barcelona, 1987-1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(10): 3765-3775.
- [13] Schulz N B. Delving into the carbon footprints of Singapore-comparing direct and indirect greenhouse gas emissions of a small and open economic system [EB/OL]. *Energy Policy*, 2009. doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.066
- [14] 曲建升, 曾静静, 张志强. 国际主要温室气体排放数据集比较分析研究 [J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(1): 47-54.
- [15] Eggleston S, Buendia L, Miwa K, et al. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories 2006 [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [16] UNFCCC. Greenhouse gas inventory data [EB/OL]. 2009, http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php.
- [17] 国家气候变化对策协调小组办公室, 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国温室气体清单研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. 1-353.
- [18] EPA. Climate Change-2009 US greenhouse gas inventory report [EB/OL]. 2009, <http://epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>.
- [19] AGO. Australian methodology for the estimation of greenhouse gas emissions and sinks 2006 [R]. AU: Australian Greenhouse Office, 2009.
- [20] EEA. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009 [EB/OL]. 2009, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.
- [21] Gurjar B R, Van Aardenne J A, Lelieveld J, et al. Emission estimates and trends (1990-2000) for megacity Delhi and implications [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(33): 5663-5681.
- [22] ICLEI. Cities for climate protection (CCP) [EB/OL]. 2008, <http://www.iclei.org/index.php?id=800>.
- [23] ICLEI. Cities for climate protection: An international campaign to reduce urban emissions of greenhouse Gases [EB/OL]. 2008, <http://www.iclei.org/index.php?id=1651>.
- [24] Ramaswami A. Greenhouse gas inventory for the city and county of Denver [EB/OL]. 2007, http://www.greenprintdenver.org/docs/DenverClimateActionPlan_P2.pdf.
- [25] ICLEI. Inventory of New York city greenhouse gas emissions 2007 [EB/OL]. 2009, www.nyc.gov/html/om/pdf/ccp_report041007.pdf.
- [26] ICLEI. International local government GHG emissions analysis protocol [R]. 2008. 1-57.
- [27] EPA. Emission inventory improvement program technical report series [EB/OL]. 2009, <http://www.epa.gov/ttn/chiep/techreport/>.
- [28] EPA. Emissions factors & AP 42 [EB/OL]. 2009, <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>.
- [29] Decker E H, Elliott S, Smith F A et al. Energy and material flow through the urban ecosystem [J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, **25**(1): 685-740.
- [30] Ahmad N, Wyckoff A. Carbon dioxide embodied in international trade of goods [A]. In: *Technology and Industry Working Paper* [C]. Paris: OECD Publishing, 2004. 1-66.
- [31] Peters G P, Hertwich E G. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption [J]. *Climatic Change*, 2008, **86**(1): 51-66.
- [32] Wiedmann T, Wood R, Lenzen M, et al. Development of an embedded carbon emissions indicator [R]. Sydney: Stockholm Environment Institute, 2008.
- [33] Wang T, Watson J. Who owns China's carbon emissions [A]. In: *Proceedings of the Tyndall Centre for climate change research* [C]. UK: Sussex, 2007. 1-7.
- [34] WBCSD/WRI. The greenhouse gas protocol [EB/OL]. 2009, <http://www.ghgprotocol.org/files/ghg-protocol-revised.pdf>.
- [35] 李迎春, 林而达, 甄晓林. 农业温室气体清单方法研究最新进展 [J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(10): 1076-1080.
- [36] EPA. Inventory of U. S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-1997 [EB/OL]. 1999, <http://www.epa.gov/climatechange/emissions/downloads06/99CR.pdf>.
- [37] Ramaswami A, Hillman T, Janson B, et al. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city-scale greenhouse gas inventories [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(17): 6455-6461.
- [38] Dhakal S, Kaneko S, Imura H. CO₂ Emissions from energy use in east Asian mega-cities: driving factors, challenges and strategies [M]. Honolulu Hawaii: East West Center 2004. 1-200.
- [39] 周泽兴, 林子瑜, 洁宁. 中国温室气体排放清单编制工作手册 [M]. 北京: 中国石油化工出版社, 1999. 1-121.
- [40] 王昕, 姜虹. 上海市能源消耗活动中温室气体排放 [J]. *上海环境科学*, 1996, **15**(12): 15-17.
- [41] 钱杰, 俞立中. 上海市化石燃料排放二氧化碳贡献量的研究 [J]. *上海环境科学*, 2003, **22**(11): 836-839.
- [42] 蔡博峰, 刘春兰, 陈操操, 等. 北京市温室气体排放研究 (2005) [R]. 北京: 北京市环境保护科学研究所, 2008. 1-183.
- [43] West J J, Osnaya P, Laguna I, et al. Co-control of urban air pollutants and greenhouse gases in Mexico city [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(13): 3474-3481.