

DOI: 10.5846/stxb201306091508

齐静, 陈彬. 产业园区温室气体排放清单. 生态学报, 2015, 35(8): 2750-2760.

Qi J, Chen B. Greenhouse Gas Inventory of industrial parks in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2750-2760.

产业园区温室气体排放清单

齐 静, 陈 彬*

北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 温室气体排放所导致的全球气候变化是国际社会长期关注的热点问题, 它严重限制了人类社会的发展并威胁着人类的生存。产业园区通常集中了一个区域主要的生产要素与生产能力, 也代表着特定产业在该区域的发展水平, 理应作为发展低碳经济的基础单元和减少温室气体排放的重要控制点, 也可以成为解决区域资源、环境问题的突破口。明确了产业园区温室气体排放的系统边界和内部结构, 梳理了产业园区全生命周期温室气体排放行为, 综合考虑产业园区能源消耗、工业生产、物质材料消耗、仪器设备投入、废弃物处理处置、景观绿化等过程, 建立产业园区温室气体排放核算方法, 并对案例园区进行了清单分析。结果表明: 案例园区整个生命周期的温室气体排放量为 1872177 t CO₂-eq, 其中运行管理阶段占全生命周期排放的比例最高, 为 95.35%。建设阶段的温室气体排放总量中建筑材料消耗引起的排放占到 96.95%, 主要集中在建筑工程、内部装修工程和外部装饰工程 3 个环节。运行管理阶段电力消耗、热力消耗和污水处理过程的排放量占到总量的 98.69%。根据核算及分析结果提出了案例园区在建设和运行管理阶段实现温室气体减排的建议。

关键词: 温室气体; 产业园区; 清单研究; 低碳

Greenhouse Gas Inventory of industrial parks in China

QI Jing, CHEN Bin*

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Global climate change caused by greenhouse gas (GHG) emissions, has severely limited the development of human society and threatened the survival of humanity. Gathering the primary production factors and capacity of the region, an industrial park represents the development level of specific industries in the region. Therefore, the industrial park should be regarded as the base unit for developing a low-carbon economy and reducing GHG emissions, and also a breakthrough in allocating regional resource and overcoming environmental problems. Low-carbon mode has become a trend of development in industrial parks. Researches about GHG emissions from industrial parks make suggestions on the critical points for controlling GHG emissions and provide guidance for the construction or reform projects of low-carbon industrial parks, as well as providing references for entry thresholds and emission standards of low-carbon industrial parks. This study selects the high-end industrial parks as research object, defines the boundary of GHG inventories, and clarifies the structure of the carbon sources. In this study, a GHG inventory is set up to analyze the life-cycle GHG emissions from industrial parks, which includes 6 types of GHG emission sources, namely energy consumption, industrial production, materials consumption, equipments investment, waste disposal and landscaping. The above method was used for one high-end low carbon industrial park in Beijing as a case study. The results were as follows: (1) the overall GHG emission of the whole life-cycle is 1872177 t CO₂-eq. The construction stage takes up 4.546% which means 85105.82 t CO₂-eq GHG emission with an intensity of 801.69 kg CO₂-eq/m²; while the operation stage contributes the great majority of GHG emission, which

基金项目: 国家自然科学基金 (91325302, 41271543); 国家科技支撑计划课题 (2012BAK30B03); 国家基金委创新研究群体科学基金 (51121003); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20130003110027)

收稿日期: 2013-06-09; **网络出版日期:** 2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

achieves a proportion of 95.352%. The GHG emission of operation stage is 37717.18 t CO₂-eq, and the intensity is 355.29 kg CO₂-eq / m². (2) During the construction stage of the case industrial park, the top 3 emission sources are S (59.71%), ID (20.33%) and OD (11.40%), followed by L (3.74%), V (1.78%) and R (1.09%). The other 6 steps only take up the proportion of less than 1%. (3) More attention should be given to the processes of sewage treatment, heat energy consumption and electricity consumption, as they contribute 98.69% of the stage emission. Finally, based on the analysis of the results, suggestions for GHG reduction are proposed to guide the low-carbon development of the high-end industrial park, such as making use of the local materials to reduce the amount of fuel consumption and greenhouse gas emissions due to the long-range transport, using the low carbon and regeneration construction materials instead of the traditional ones to reduce the GHG emission from the upstream production process and downstream disposal, scientifically arranging the construction progress to promote a safe and low carbon form of construction work, applying advanced management methods and strengthening the propaganda of energy conservation and emissions reduction.

Key Words: greenhouse gas; industrial parks; inventory; low-carbon

人类社会的可持续发展正面临着能源短缺与气候变暖的双重威胁,世界各国纷纷采取措施积极应对这一全球性问题。中国一直以来都高度重视气候变化问题,积极参与国际社会应对气候变化的进程。国家“十二五”规划纲要明确提出“十二五”期间单位国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)能耗下降 16%、二氧化碳排放降低 17%的目标,并将指标分解到地区与行业执行^[1]。在低碳经济快速兴起的大背景下,全国各地纷纷展开低碳示范园区的建设工作,低碳化已成为产业园区的发展趋势。系统的产业园区温室气体核算,可以找出控制园区温室气体排放的关键节点,有针对性的指导低碳园区建设和产业园区低碳化改造项目的实施,同时为制定低碳园区准入制度和排放标准提供一定的参考。本文明确了产业园区温室气体排放的系统边界和内部结构,梳理了产业园区全生命周期温室气体排放行为,制定了包括产业园区能源消耗、工业生产、物质材料消耗、仪器设备投入、废弃物处理处置、景观绿化等过程在内的产业园区温室气体排放清单,并选取了位于北京市的一处低碳高端产业园区进行了案例分析,针对该园区的温室气体排放情况提出减排建议。

1 研究方法

1.1 产业园区温室气体排放核算

由定义可以知道,产业园区在经济发展和生产行为上同时具备区域与行业两方面的性质。首先,一个产业园区集中了某一类或若干类主要产业部门的温室气体排放行为,它的排放水平很大程度上受到园区主导产业和主要产品的影响。同时,产业园区自身又是基于一定地理空间范围的有机整体,它通过自身的建设运行行为入驻企业提供各种支持与服务,这一过程也会产生温室气体的排放。虽然“低碳园区”的概念逐渐得到世界各地决策制定者的认可,以低碳为核心的产业园区建设也陆续展开,但现有的以产业园区为对象的理论研究大多着眼于园区的产业布局对园区资源循环、能源利用和废弃物排放的影响,目的是通过优化园区内部的产业布局来减少资源能源的消耗和污染物的产生,从而间接实现园区的“生态”与“低碳”^[2-6]。直接针对产业园区温室气体排放的核算研究较少。北京大学工学院气候热力学课题组提出了一套中国低碳园区系统测算技术与评估体系,应用生态投入产出方法建立国际、中国、当地三个尺度的体现碳排放密度数据库,对案例园区全生命周期的温室气体排放做出测算与评估^[7]。鉴于产业园区的区域与行业特性,本文尝试从产业部门以及城市两个尺度的温室气体排放核算方法寻求借鉴。

产业部门的温室气体排放核算呈现出不断深入的发展趋势。最初的部门排放核算只关注化石燃料的消费所产生的直接的温室气体排放,全生命周期思想的引入使核算涉及了间接能源消耗产生的排放和生产过程产生的排放。而部门整个生命周期过程排放的温室气体总量可以称为该部门的碳足迹。陈红敏^[8]利用投入产出方法计算隐含碳排放的框架进行了扩展,将能源消耗产生的碳排放和工业生产过程产生的碳排放同时纳

入核算范围,分析了 2002 年中国各产业部门隐含碳的排放情况。为了更好的指导具体的产业部门或企业对温室气体排放行为进行管理,Matthews 等^[9]基于投入产出生命周期评价(Input Output Life-Cycle Assessment, IO-LCA)方法提出了三层次碳足迹核算模型。将产业部门的温室气体排放行为划分为:(1)核算对象的直接能源排放,包括煤炭、天然气与石油等一次能源的燃烧,(2)核算对象的间接能源排放,包括所购买的电力与水暖等生产阶段的排放,(3)核算对象整个生产链涉及的所有排放。此后这一模型被 Matthews 的团队应用于美国出版门、发电、电子制造与计算机服务等部门的温室气体排放核算^[10-11]。鞠丽萍^[12]对重庆市产业部门三个层次的温室气体排放进行核算和比较研究,结果显示一、二层次的温室气体排放量平均仅占总量的 27.8%,说明传统的只考虑前两个层次的核算方法很大程度上低估了产业部门温室气体排放水平。类似地,世界资源研究所(World Resources Institute, WRI)和世界可持续发展工商理事会(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)于 2011 年底发布的《企业价值链(范围三)标准》提供了一种测量企业价值链和产品温室气体排放的方法^[13],该方法将企业的温室气体排放方式划分为三个范围:(1)企业价值链燃烧过程和化学生产过程产生的直接排放,(2)企业购买的电力、蒸汽、供暖或制冷产生的间接排放,(3)范围 2 之外的企业价值链产生的一切间接排放,包括企业所购买的产品的上游排放、运输排放、使用之后的下游排放。

城市是一个“自然—经济—社会”的复合系统,它的温室气体排放行为较多的受到人类活动的影响。按照核算的角度可以分为以生产为中心的核算、以消费为中心的核算以及介于二者之间的混合核算。从生产角度考虑,城市温室气体排放是垂直方向的,由在城市行政边界内所有实际排放到大气中的温室气体组成。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)分别于 1996 年和 2006 年出版的《国家温室气体清单指南》成为从生产角度展开城市温室气体排放核算的主要依据。该指南明确了能源、工业过程及产品、农业林业及其他土地利用、废弃物四大类排放源以及相应的温室气体排放估算方法。加拿大地方环境行动国际委员会(International Council for Local Environmental Initiative, ICLEI)开展了城市编制气候行动计划^[14],开发了包括政府管理和社区管理两个层面的城市温室气体清单。国内学者根据中国城市管辖范围和统计数据方面不同于国外的特征,对上述核算方法进行了改进,并应用于北京、上海、重庆等城市^[15-19]。核算涉及的过程也在最初的仅包含能源消费、工业生产和森林碳汇的基础上增加了废弃物处置、农牧业、湿地以及碳捕捉等方面。从消费角度考虑,为了维持自身的生存与发展,城市系统与外界存在着巨大的物质与能量交换,这种交换同时伴随着隐含的温室气体排放在水平方向上的迁移。对这一部分排放进行核算有助于了解消费行为与产品温室气体排放之间的关系,以便于政策制定者更加有针对性的引导消费者,同时还可以更清晰的反映出城市间高碳产业转移等问题^[20-21]。Kennedy 等^[22]将全生命周期的理念引入 IPCC 核算方法,建立了一种同时考虑生产和消费角度的包含 6 个排放过程和 3 个排放层次的混合核算方法。并将该方法应用于洛杉矶等 10 个城市和地区的比较研究。

温室气体排放清单分析是指以国家、城市或企业等为单位,梳理其中一切与温室气体排放有关的过程或行为,估算并分析各个过程或行为直接和间接排放的温室气体。现有的温室气体排放清单分析主要涉及国家、城市和企业层面,国际上还没有建立统一的清单制定方法,且不同国家和地区之间存在一定的差异^[10]。目前得到广泛使用的清单编制方法有 IPCC 方法^[23]、ICLEI 方法^[24]和 WRI/WBCSD 方法^[25]。通过编制温室气体排放清单,可以清晰的了解清单主体的温室气体排放结构、组分和排放量,掌握识别清单主体的温室气体排放特征及水平,描绘温室气体排放变化趋势,模拟温室气体排放和减排情景。进而以此为依据,合理的制定减排目标、分配减排任务、提出减排措施、实施减排方案。

1.2 核算方法

在现有温室气体排放核算方法的基础上,本文将产业园区的生命周期划分为园区建设、园区运行管理、园区拆除处置三个阶段,所核算的产业园区温室气体排放行为既包括一次能源消耗、工业生产过程的直接排放,又包括二次能源消耗的间接排放,还包括产业园区消耗和使用的能源、材料与设备在各自生命周期产生的排放。核算的气体包括 CO_2 , CH_4 , N_2O 三种。

1.2.1 能源消耗

能源消耗是温室气体排放的重要来源,本研究中涉及的产业园区能源消耗过程主要包括化石燃料的固定源燃烧、电力和热能生产、交通运输移动源。上述过程的温室气体排放量估算主要参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[23] 的推荐方法。

化石燃料固定源燃烧产生的温室气体排放属于产业园区的直接排放。《2006 年指南》提供了三种估算化石燃料燃烧排放的方法,依据实际的数据收集情况和通用决策树,本研究最终选择了方法 1。

$$E_{\text{GHG},i}^c = Q_i^c \times EF_{\text{GHG},i}^c \quad (1)$$

式中, $E_{\text{GHG},i}^c$ 为某种化石燃料燃烧产生的某种温室气体的排放量(kg); Q_i^c 为该种化石燃料的燃料量(TJ); $EF_{\text{GHG},i}^c$ 为该种燃料的该种温室气体排放因子(kg/TJ)。

电力和热能生产的温室气体排放可以分两种情况讨论:如果产业园区消耗的电力和热能全部园区外输入,那么生产这一部分电力和热能产生的温室气体排放属于园区的间接排放,可以根据所在地区电力、热力生产供应业的平均水平来估算;如果产业园区内设有电力和热能生产单位,为园区直接供给电力和热能,这一部分电力和热能的消耗视为不产生排放,以避免与“化石燃料的固定源燃烧”部分的重复计算。

对于园区外部输入的电力,本研究仅核算其中煤电部分的温室气体排放。

$$E_{\text{GHG}}^e = Q^e \times EF_{\text{GHG}}^e \quad (2)$$

式中, E_{GHG}^e 为园区消耗电力中煤电部分生产过程的某种温室气体排放量(kg); Q^e 为园区消耗的煤电量(kWh); EF_{GHG}^e 为火电行业碳排放强度(kg kW⁻¹ h⁻¹)。

对于园区外部输入热能,本研究仅核算其中燃煤、燃油、燃气和电力锅炉产热部分的温室气体排放,具体估算方法与公式 1、公式 2 类似。

交通运输移动源排放部分,本文主要考虑能源资源、物质材料、仪器设备等从产地到园区的运输过程,这一部分的温室气体排放视作园区的间接排放。运输方式包括公路、铁路、水运和空运四类。公路运输的温室气体排放可以从燃料消耗和运输行为(包括交通工具类型与行驶距离)两个角度来估算。根据 IPCC 的研究结果,燃料消耗角度适用于 CO₂ 的估算,运输行为角度适用于 CH₄ 和 N₂O 的估算。

燃料消耗角度计算如公式 3 所示:

$$E_{\text{CO}_2}^f = \sum_i (Q_i^f \times EF_{\text{CO}_2,i}^f) \quad (3)$$

式中, $E_{\text{CO}_2}^f$ 为某种运输方式产生的 CO₂ 的排放量(kg); Q_i^f 为该种运输方式中某种燃料的消耗量(TJ); $EF_{\text{CO}_2,i}^f$ 为该种燃料的 CO₂ 排放因子(kg/TJ)。

运输行为角度计算如公式 4 所示:

$$E_{\text{NH}_4, \text{N}_2\text{O}}^f = \sum_{a,b,c,d} (L_{a,b,c,d} \times EF_{a,b,c,d}^f) + \sum_{a,b,c,d} C_{a,b,c,d} \quad (4)$$

式中, $E_{\text{NH}_4, \text{N}_2\text{O}}^f$ 为某种运输行为产生的 CH₄ 或 N₂O 排放量(kg); $L_{a,b,c,d}$ 为某一移动源在热稳定引擎运行阶段所行驶的距离(km); $EF_{a,b,c,d}^f$ 为特定条件下 CH₄ 或 N₂O 的排放因子(kg/km); $C_{a,b,c,d}$ 为热启动阶段的 CH₄ 或 N₂O 排放量(kg); a 代表燃料类型, b 代表交通工具类型, c 代表排放控制技术, d 代表交通工具运行条件。

1.2.2 工业生产

这一部分的温室气体排放是指工业生产过程中非化石燃料燃烧产生的排放,主要来自某些特定行业产品生产过程的化学反应,属于产业园区的直接排放。对于产业园区而言,不同主导产业类型之间温室气体排放类型和总量的差别较大,核算方法也不尽相同,进行核算时,可以根据园区实际情况进行数据收集和方法选择。此处不对各类型工业产业的生产过程温室气体排放核算模型一一阐述。总体来说,根据可以获得的活动数据的详细程度以及排放因子的适用范围,核算可以从行业和产品两个角度入手。行业角度展开的估算比较粗略,活动数据可以是研究对象的经济规模(如 GDP)或者主要产品的产量,排放因子可以是 IPCC 推荐的缺省排放因子或者特定国家或地区的排放因子。产品角度展开的估算较为精确,是基于特定研究对象(如工厂

或企业)的生产流程和工艺水平,甚至具体到生产装置及工作条件。此处不对各类型工业产业的生产过程温室气体排放核算模型一一阐述。

1.2.3 物质材料消耗

与电力和热能部分的情况类似,物质材料消耗产生的温室气体排放也要避免重复计算问题。根据产业园区的发展趋势,越来越多的园区会在内部以物流能流传递方式形成产业共生组合,一家企业的产品、副产品或废弃物成为另一家企业的生产原料或能源。本研究在这一部分仅对从园区外部输入的物质材料在上游生产环节产生的温室气体排放进行核算,即“摇篮到大门”的温室气体排放量,是园区间接排放的一部分。估算方法如下:

$$E_{\text{GHG},i}^m = Q_i^m \times EF_{\text{GHG},i}^m \quad (5)$$

式中, $E_{\text{GHG},i}^m$ 为某种物质材料在上游生产环节的某种温室气体的排放量(kg); Q_i^m 为该种物质材料的消耗量(kg); $EF_{\text{GHG},i}^m$ 为该种物质材料在上游生产环节的该种温室气体的排放因子(kg/kg)。

1.2.4 仪器设备投入

产业园区需要投入大量的仪器设备,一类生产相关的仪器设备直接用于入驻企业进行工业生产活动,比如钢铁产业使用的高炉、转炉等炼钢设备,另一类建筑相关的仪器设备用于维持园区的日常运行,比如水泵、通风机等。仪器设备投入产生的直接温室气体排放放在能源消耗和工业生产过程两部分已经计算过,这一部分仅指仪器设备在上游的生产和运输环节产生的间接温室气体排放,具体估算方法参考物质材料消耗部分。需要说明的是,仪器设备投入的温室气体排放因子主要有两种表达方式:一种是基于仪器设备生产部门的投入产出关系求得的单位货币的温室气体排放量,如参考文献^[26]和^[27];另一种是分析特定的仪器设备基本材料用量和加工能耗得出的单位数量仪器设备的温室气体排放量,如参考文献^[28-30]。

1.2.5 废弃物处理处置

这一部分应考虑产业园区产生的生活固体废弃物、工业固体废弃物、生活污水以及工业废水的处理处置过程。

本研究对产业园区生活固体废弃物填埋处置 CH_4 排放量的估算采用《2006 年指南》推荐的一阶衰减方法。工业固体废弃物可以细分为一般工业固体废弃物和危险废物,由于它们的具体成分以及相应的前处理方式与生活固体废弃物存在较大不同,需要根据园区企业前期处理和最终处置的实际情况进行数据收集和方法选择,如果无法获得足够的数据库,可以参考生活固体废弃物处理过程温室气体排放估算的方法,但会引入较大的误差。

固体废弃物的常规处理方式有填埋、堆肥和焚烧等,其中填埋和堆肥方式产生的温室气体以 CH_4 为主,焚烧方式以产生 CO_2 为主。填埋是目前我国城市固体废弃物处置普遍采用的方法,固体废弃物填埋气体回收技术也在近年来得到了快速的发展与推广。本研究对产业园区生活固体废弃物填埋处置 CH_4 排放量的估算采用《2006 年指南》推荐的一阶衰减方法。

$$E_{\text{CH}_4}^s = \left(\sum_x E_{\text{CH}_4,x,T}^s - R_T \right) \times (1 - OX_T) \quad (6)$$

式中, T 为清单年份; $E_{\text{CH}_4}^s$ 为 T 年城市固体废弃物处置排放的 CH_4 量(kg); $E_{\text{CH}_4,x,T}^s$ 为 T 年某种固体废弃物处置排放的 CH_4 量(kg); R_T 为 T 年应用填埋气体回收技术回收的 CH_4 量(kg); OX_T 为 T 年的氧化因子,百分比形式。其中:

$$E_{\text{CH}_4,T}^s = \text{DDOC}_{m,\text{decomp}_T} \times F \times \frac{16}{12} \quad (7)$$

式中, $\text{DDOC}_{m,\text{decomp}_T}$ 为 T 年分解的有机碳质量(kg); F 为废弃物填埋气体中 CH_4 的体积分数; $16/12$ 为 CH_4/C 分子量比率。

$$\text{DDOC}_m = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF}^s \quad (8)$$

式中, DDOC_m 为沉积年份的可分解有机碳质量(kg); W 为沉积年份的废弃物的质量(kg); DOC 为沉积年份的

废弃物中可降解有机碳的比例; DOC_f 为可降解有机碳中可分解的比例; MCF^s 为沉积年份有氧分解的 CH_4 修正因子。

$$DOC = \sum_i (DOC_i \times W_i) \quad (9)$$

式中, DOC_i 为某种类型废弃物中可降解有机碳的比例; W_i 为所有废弃物中该种废弃物所占的比例。

常见的生活污水厌氧处理方式排放的温室气体主要为 CH_4 和 N_2O ,这两种气体的产生分别取决于生活污水中的可降解有机组分及含氮组分,核算方法主要根据《2006 年指南》推荐的方法一。园区企业排放的工业废水可能在园区内进行现场处理,也可能排入生活污水系统作为生活污水处理。后一种情况在估算温室气体排放时可以将工业废水按照生活污水处理。而前一种情况下,可以根据园区企业现场处理的实际情况进行数据收集和方法选择,如果无法获得足够的数据,可以参考生活污水处理过程温室气体排放估算的方法,以 COD 代替 BOD_5 ,以工业废水的缺省因子代替生活污水的缺省因子。

常见的生活污水厌氧处理方式排放的温室气体主要为 CH_4 和 N_2O ,这两种气体的产生分别取决于生活污水中的可降解有机组分及含氮组分。采用估算方法如下:

$$E_{CH_4}^w = TOW \times EF_{CH_4}^w - R \quad (10)$$

式中, $E_{CH_4}^w$ 为生活污水处理过程 CH_4 排放量(kg);TOW 为污水中可降解有机组分(通常为 BOD_5)含量(kg); $EF_{CH_4}^w$ 为生活污水 CH_4 排放因子(kg/kg); R 为 CH_4 的回收量。其中:

$$EF_{CH_4}^w = B_0 \times MCF^w \quad (11)$$

式中, B_0 为生活污水最大 CH_4 产生能力(kg/kg); MCF^w 为生活污水的 CH_4 修正因子。

$$E_{N_2O}^w = N^w \times EF_{N_2O}^w \times \frac{44}{28} \quad (12)$$

式中, $E_{N_2O}^w$ 为生活污水处理过程 N_2O 排放量(kg); N^w 为生活污水中的 N 含量(kg); $EF_{N_2O}^w$ 为生活污水的 N_2O 排放因子(kg/kg);44/28 为 N_2O /N 分子量比率。

1.2.6 景观绿化碳汇

本文以产业园区的景观绿化碳汇作为核算对象。

对于林地碳汇,仅考虑在园区建设阶段其它土地使用类型转换为林地的碳汇变化,以及园区运行管理阶段生物量增长引起的碳汇增加。

对于使用类型发生改变的土地,其碳汇能力变化见公式 13。

$$\Delta C_i = \sum_i [(B_i - B_{i0}) \times \Delta A_{ii}] \times CF \quad (13)$$

式中, ΔC_i 为转化为其他利用类型土地生物量中的初始碳库变化,以碳含量表示(t/a); B_i 为转变后的 i 类土地的生物量库,以干物质质量表示(t/hm²); B_{i0} 为转化前 i 类土地上的生物量库,以干物质质量表示(t/hm²); ΔA_{ii} 为土地利用类别由 i 转化为另一种利用类别的土地面积(hm²/a); CF 为干物质的碳比例,以每吨干物质的含碳量来表示(t/t)。

对于园区原有林地碳汇增加量估算公式如公式 14。

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} A_{i,j} \times G_{i,j} \times CF_{i,j} \quad (14)$$

式中, ΔC_G 为保持相同土地利用类别的土地中,由生物量生长引起的碳库年增加量,以碳含量表示(t/a); $A_{i,j}$ 为保持相同土地利用类别的土地面积(hm²); $CF_{i,j}$ 为干物质的碳比例,以每吨干物质的含碳量来表示,单位 t/t,取值 0.44; $G_{i,j}$ 为平均年增长生物量,包括地下和地上生物年增长量之和,以干物质质量表示(t/hm²)。

此外,本文还考虑园区建设阶段土地从其它利用类型转变为草地,造成的生物量和土壤的净排放或净摄取温室气体。其核算方法如公式 13, CF 取值 0.47。

2 案例分析

2.1 数据准备

案例园区位于北京市西南部,占地面积 11.9 万 m^2 ,容积率 0.77,绿化率 41%。该园区是北京市具有代表性的低碳高端产业园区,主要集聚产业链上游的智力型、研发型、设计型产业和总部类企业,由 43 栋 3—4 层独栋写字楼组成。

本文所采用的碳源活动数据均来自于对案例园区的实地调研,排放因子数据来源如下:

(1) 能源消耗。

一次能源消耗过程单位热量的排放因子采用 IPCC 提供的缺省排放因子,化石燃料由质量到热量的换算系数则采用《中国能源统计年鉴 2010》^[31] 提供的我国平均低位发热量。电力与热能的排放因子应基于园区所在地区电力和热能实际生产过程一次能源的投入量进行估算而得到。其中,中案例园区所在的北京市属于我国华北区域电网,参考国家发展改革委员会应对气候变化司研究发布的 2010 年中国区域电网的基准线排放因子研究结果^[32];热能排放因子根据《北京市统计年鉴 2011》^[33] 中北京市热能生产过程中各化石能源的消耗量估算得到。

(2) 物质材料消耗与仪器设备投入。

案例园区主要聚集了产业链上游的智力型、研发型、设计型产业和总部类企业,生产的不是狭义的实物形态的产品,而主要是提供广义的产品——服务。与其他以工业生产企业为主导的园区相比,案例园区大部分的物质材料消耗发生在园区建设阶段,以建筑材料为主。本研究核算的物质材料消耗产生的温室气体排放是指它们在上游生产环节产生的排放,采用的排放因子主要来源于国内外众多的产品生命周期能源消耗和/或温室气体排放清单研究^[34-55]。具体的获取方式有以下三种,以第一、二种为主:

第一种对于生命周期温室气体排放相关研究较多的产品,在对不同研究的生命周期边界和产品生产环节进行比较后,选取与案例园区消耗的情况最接近的研究结果作为该产品的排放因子;

第二种对于生命周期温室气体排放相关研究较少或几乎没有的产品,可以基于第一种方法获取的排放因子,根据该产品生产环节能源消耗和原材料投入的情况进行温室气体排放量的估算,以获得该产品的排放因子;

第三种由于文献和数据匮乏而前两种方法不适用的产品,选择与该产品生产过程相近、生产部门相同或者原材料相同、功能相近的产品的排放因子作为替代。

与案例园区物质材料投入出于同样的原因,案例园区大部分的仪器设备投入在园区建设阶段已经完成,主要为建设过程使用的卡车、起重机、挖掘机等机械以及园区运行所必须的电气设备、给排水设备、消防报警设备、采暖设备、通风设备。本研究中案例园区仪器设备排放因子的获取方式基本与物质材料排放因子相同,但因为与物质材料相比,仪器设备生产环节更加复杂,产品规格和类型更加多样,生命周期能源消耗或温室气体排放方面的研究不如物质材料的充分^[28-30,50],因此较多的使用了第二种方式,增加了核算结果的不确定性。

(3) 废弃物处理处置。

案例园区产生的污水统一汇入所在地区的市政污水系统,本文假定园区污水处理过程的温室气体排放水平与北京城市污水处理系统相一致。参照 IPCC 推荐的缺省值, B_0 (污水最大 CH_4 产生能力) 取值 0.25 $\text{kg CH}_4/\text{kg COD}$, MCF^* (CH_4 修正因子) 取值 0.8。此外,污水处理过程存在电力消耗会产生间接温室气体排放^[56-58],因此综合考虑污水处理过程的直接排放和间接排放,本研究采用的污水处理排放因子为: CO_2 排放因子 5.61 $\text{g CO}_2/\text{kg 水}$, N_2O 排放因子 0.0889 $\text{mg N}_2\text{O}/\text{kg 水}$, CH_4 排放因子 15.9 $\text{g CH}_4/\text{kg 水}$ 。

案例园区产生的固体废弃物直接进入北京市固体废弃物处理系统,进行填埋处理。参考 IPCC 推荐的缺省值以及杜吴鹏的研究结果, MCF^* (CH_4 修正因子) 取值 1.0, DOC (可降解有机碳比例) 取值 6.5%, DOC_f (可降解有机碳中被降解的比例) 取值 0.5, F (废弃物填埋气体中 CH_4 的体积分数) 取值 0.5, R_T (CH_4 回收量) 取值

0, OX_T (氧化因子)取值 0.1^[59-60]。

为了便于比较,本文案例分析中的所有温室气体均按 IPCC 在 2007 年的第四次评估报告中给出的 100 年全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)转换为 CO₂当量(CO₂-eq)。

2.2 结果分析

根据本文 1.2 所述核算方法及 2.1 所列排放因子数据,计算得到案例园区生命周期各阶段温室气体排放量。案例园区整个生命周期的温室气体排放量为 1872177 t CO₂-eq。其中,建设阶段产生温室气体总量为 85105.82 t CO₂-eq,排放密度为 801.69 kg CO₂-eq / m²。运行管理阶段每年的温室气体排放总量为 37717.18 t CO₂-eq,排放密度为 355.29 kg CO₂-eq / m²,整个运行管理阶段占全生命周期排放的比例为 95.35% (图 1)。拆除处置阶段的温室气体排放总量约为 1917.3 t CO₂-eq,排放密度为 18.06 kg CO₂-eq / m²。

案例园区的建设阶段主要包括主体建筑(即 43 栋低层写字楼)、主体建筑的附属市政设施以及公共区域和园林景观的建设过程。整个建设阶段根据建设内容和实际施工情况被细化为建筑、内部装修、外部装饰、建筑电气、建筑给排水、采暖、通风空调、消防、道路、市政电气、市政给排水、园林绿化 12 个环节。案例园区建设阶段的温室气体排放总量中建筑材料消耗引起的排放占到 96.95%。根据核算的结果,案例园区建设阶段物质材料消耗产生的温室气体排放总量为 82509 t CO₂-eq,排放密度为 0.78 t CO₂-eq / m²,产生的温室气体排放分布在 12 个建设环节的分布如图 2。排放量最大的 3 个环节为建筑工程(59.71%)、内部装修工程(20.33%)和外部装饰工程(11.40%),其次是园林绿化工程(3.74%)、通风空调工程(1.78%)和道路工程(1.09%),其余 6 项工程所占比例均不足 1%。

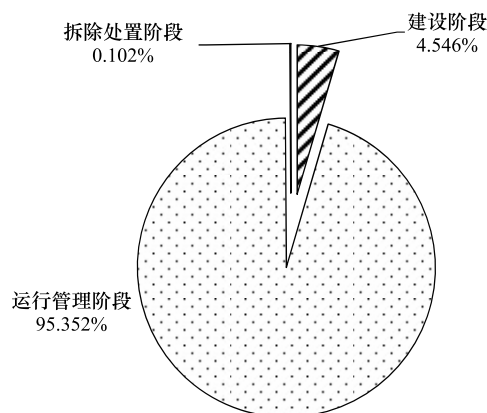


图 1 案例园区生命周期温室气体排放构成

Fig.1 Life cycle GHG emission composition of the concerned industrial park

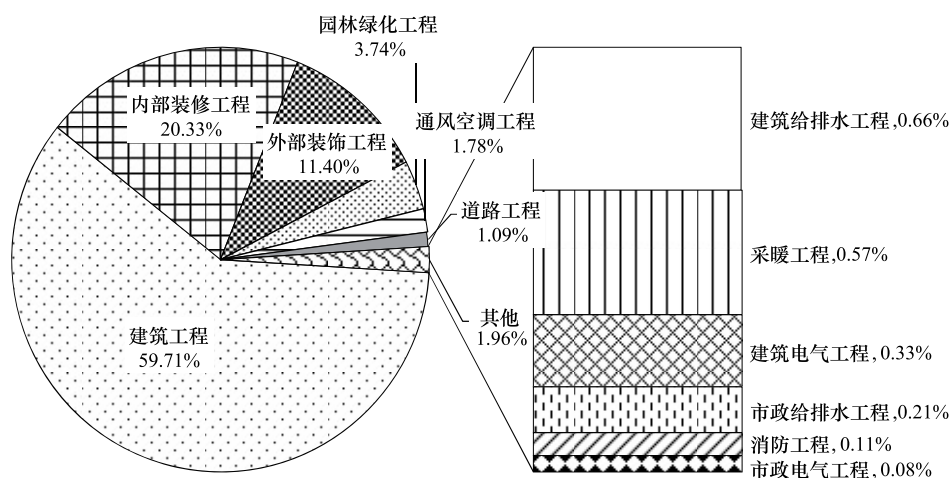


图 2 案例园区建设阶段建筑材料消耗温室气体排放结构

Fig.2 GHG emission composition of construction materials in the construction stage of the concerned industrial park

案例园区运行管理阶段温室气体排放分布在各过程的分布情况见图 3,其中电力消耗、热力消耗和污水处理过程的排放量占到总量的 98.69%,应作为园区运行管理阶段温室气体减排工作的重点。

2.3 结论及建议

根据本文案例园区温室气体排放核算结果,产业园区建设阶段的温室气体排放行为比较集中,且密度和

强度较大,在较短的时间内对环境产生着巨大的影响,应该引起园区建设和管理者的重视。建筑阶段的温室气体排放主要来源于建筑材料和仪器设备的上游生产环节、运输环节,以及施工现场的电力、水资源消耗。由此,可以从以下几方面来控制园区建设阶段的温室气体排放:

(1) 就地取材,减少建筑材料运输过程的排放。建筑材料,尤其是构成建筑物主体的建筑材料具有用量多、体积大的特点,采用长距离和短距离运输方式所产生的温室气体排放量的差距相当可观。尽量选取园区所在地区常见的易得的建筑材料,既可以减少运输费用和运输耗时,又可以减少相应过程产生的温室气体排放,实现经济和环境的双重效益。

(2) 增加低碳建材/再生建材的使用比例,减少建筑材料上游生产过程的排放。在综合考虑建材性能和经济成本之后,决策者在建筑材料的选择上可以倾向于低碳建材或者再生建材。通常情况下,低碳建材和再生建材意味着在生产环节所投入的资源 and 能源较普通建材少,但技术含量有所增加,所以具有优良性能和低廉价格的双重优势。

(3) 合理安排施工进度,提倡安全低耗的施工方式。在进行工程招标时,应对于园区建设工程的施工进度和实施机制进行严格把关,一方面可以通过合理安排施工进度保证工程的按时完成,杜绝后期赶工导致的质量和安全隐患,另一方面应尽量减少夜间施工,避免造成不必要的电力资源消耗和噪声污染。

产业园区运行管理阶段产生的温室气体排放占在园区的整个生命周期中占有绝对性的比重,尤其以电力消耗、热力消耗和污水处理过程最为突出。因此,对于园区管理部门,应该将低消耗低排放的理念渗透到园区运行的日常活动中去,具体可以从以下几方面展开,

(1) 建立完善入驻企业低碳准入制度。园区管理者除了依据国家和地方的法律法规、产业政策制定并实施企业入园管理制度之外,还应依据园区运行特点对入驻企业日常生产活动中的能源资源消耗和温室气体排放行为进行规定,如企业需具备利于园区低碳减排的生产结构、产业链条和减排机制设计等。以保证入驻企业在经过严格的准入制度进入园区后仍然保持着必要的低消耗与低排放状态,杜绝“伪低碳,真高排”现象的发生。

(2) 加强公共区域节能减排力度。对产业园区的公共区域进行管理和维护是园区管理者的主要职责,管理者可以通过合理控制园区公共区域能源资源消耗、加强主体建筑和公共区域维护来直接减少园区运行管理阶段的温室气体排放。例如,从能源消耗减量化和能源再利用及资源化两方面建筑节能,有效控制园区采暖制冷系统的能源转换效率,减少园区运行阶段采暖制冷系统的能源浪费,对采用集中采暖或集中空调系统的园区考虑设置能量回收系统;除了要在园区建设阶段的基础设施布置中优化水资源系统的布置之外,还需要在园区运行阶段注意市政水资源的综合利用和污水及其他水源的资源化,有效地减少园区运行过程中的温室气体排放。

参考文献 (References):

- [1] 中国新闻网. 十二五规划: 中国将大幅度降低能源消耗强度. 2011. <http://www.chinanews.com/ny/2011/03-05/2886184.shtml>.
- [2] Liwarska-Bizukojc E, Bizukojc M, Marcinkowski A, Doniec A. The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(8): 732-741.
- [3] Kantor I, Fowler M, Elkamel A. Optimized production of hydrogen in an eco-park network accounting for life-cycle emissions and profit.

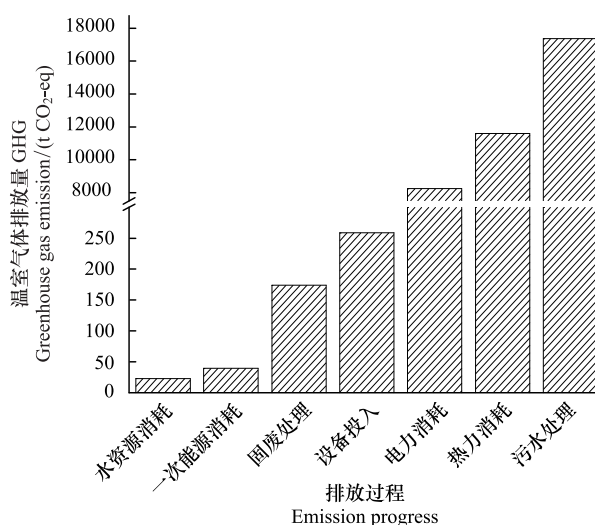


图3 案例园区运行管理阶段温室气体排放

Fig.3 GHG emissions in the operation stage of the concerned industrial park

- International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 5347-5359.
- [4] Maes T, Van Eerfelde G, De Ras E, Block C, Pisman A, Verhofstede A, Vandendriessche F, Vandeveld L. Energy management on industrial parks in Flanders. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 1988-2005.
- [5] Taskhiri M S, Tan R R, Chiu A S F. Emergy-based fuzzy optimization approach for water reuse in an eco-industrial park. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(7): 730-737.
- [6] Roberts B H. The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: an Australian case study. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(8/10): 997-1010.
- [7] 北京大学工学院气候变化热力学课题组, 北京经开投资开发股份有限公司发展研究中心. 中国低碳园区的系统测算技术与评估体系(讨论稿).
- [8] 陈红敏. 包含工业生产过程碳排放的产业部门隐含碳研究. 中国人口 资源与环境, 2009, 19(3): 25-30.
- [9] 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.
- [10] Huang Y A, Weber C L, Matthews H S. Categorization of scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting. Environmental Science and Technology, 2009, 43(22): 8509-8515.
- [11] Huang Y A, Weber C L, Matthews H S. Carbon footprinting upstream supply chain for electronics manufacturing and computer services // Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. Phoenix, AZ: IEEE, 2009: 1-6.
- [12] 鞠丽萍. 城市温室气体排放评价与预测—以重庆市为例 [D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
- [13] World Resources Institute(WRI) & World Business Council for Sustainable Development(WBCSD). Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. USA, 2011.
- [14] ICLEI. International Local Government GHG Emissions Analysis Protocol. <http://archive.iclei.org/index.php?id=ghgprotocol>.
- [15] 李凤亭, 郭茹, 蒋大和, Mahesh P. 上海市应对气候变化碳减排研究. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 朱世龙. 北京市温室气体排放现状及减排对策研究. 中国软科学, 2009, (9): 93-106.
- [17] 袁晓辉, 顾朝林. 北京城市温室气体排放清单基础研究. 城市环境与城市生态, 2011, 24(1): 5-8.
- [18] 徐思源. 重庆市二氧化碳排放基准初步测算研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [19] 郭运功, 汪东东, 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.
- [20] Feng J J. Allocating the responsibility of CO₂ over-emissions from the perspectives of benefit principle and ecological deficit. Ecological Economics, 2003, 46(1): 121-141.
- [21] Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories. Ecological Economics, 2008, 65(1): 13-23.
- [22] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havránek 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.
- [23] 政府间气候变化委员会. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南. 日本: 全球环境战略研究所, 2006.
- [24] ICLEI. International Local Government GHG Emissions Analysis Protocol, 2008.
- [25] 世界资源研究所, 世界可持续发展工商理事会. 温室气体议定书企业核算与报告准则(修订本). 2004.
- [26] Guillaume FABRE. LCB Method 3. 0. 2011. <http://www.lcbmethod.com/>.
- [27] 陈国谦. 建筑碳排放系统计量方法. 北京: 新华出版社, 2010.
- [28] 谷立静. 基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [29] 李兆坚. 我国城镇住宅空调生命周期能耗与资源消耗研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [30] 刘彦宾, 王晓涛, 林波荣, 彭渤. 建筑部品及设备生命周期能耗数据研究进展. 建筑科学, 2011, 27(2): 255-262.
- [31] 中国统计局. 中国能源统计年鉴 2010. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [32] 国家发展改革委员会应对气候变化司. 2010 中国区域电网基准线排放因子. 2010-12-20.
- [33] 北京市统计局. 北京市统计年鉴 2011. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [34] Hammond G, Jones C. Inventory of Carbon & Energy 2. 0. UK: University of Bath, 2011.
- [35] 王智慧, 李强, 蒋健敏, 贺定勇, 栗卓新. 药芯焊丝生命周期评价. 北京工业大学学报, 2007, 33(11): 1212-1217.
- [36] 刘睿劼, 张智慧, 周璐. 防水材料生命周期环境影响的比较研究. 环境污染与防治, 2011, 33(12): 103-106.
- [37] 罗楠. 中国烧结砖制造过程环境负荷研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [38] 马岩, 曹磊, 周才华, 李明博, 岳文涂, 刘尊文. 典型化工产品生命周期环境影响评价研究——以水性涂料产品为例. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 189-193.
- [39] 何琴, 王洪涛, 朱永光, 王志慧, 黄娜, 范辞冬. 涂料生命周期评价的研究及开发. 涂料工业, 2011, 41(5): 1-5, 14-14.
- [40] 李小冬, 孔祥勤, 张智慧, 韩畅. 混凝土板生命周期环境影响的比较研究. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(9): 1449-1451.

- [41] 李晓鹏. 我国卫生陶瓷生命周期影响评价研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [42] 李雪娇 韦保仁. 装修材料的生命周期评价研究进展. 中国建材科技, 2011, (2): 63-67.
- [43] 伍跃辉, 陈爱燕, 王震. 聚氯乙烯生产过程生命周期评价. 环境科学与技术, 2010, 33(5): 202-205.
- [44] 周晓霞, 宋子岭. 两种混凝土的生命周期评价. 环境工程, 2009, 27(S1): 472-475.
- [45] 薛拥军, 向仕龙, 刘文金. 中密度纤维板产品的生命周期评价. 林业科技, 2006, 31(6): 47-49.
- [46] 燕鹏飞, 杨军. 木结构产品物化环境影响的定量评价. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(9): 1395-1398.
- [47] 陈庆文, 马晓茜. 建筑陶瓷的生命周期评价. 中国陶瓷, 2008, 44(7): 35-39.
- [48] Concrete Pipeline Systems Association. Cradle-to-Gate Analysis for Concrete Pipeline, Manhole Ring, and Cover Slabs, 2010.
- [49] Quarry Products Association. Sustainable Development Report, 2008. http://www.mineralproducts.org/documents/QPA%20_SD%20_08%20_Rep.pdf.
- [50] Department for Environment Food and Rural Affairs/Department of Energy & Climate Change. Guidelines to Defra/DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emissions Factors. 2010. <http://archive.defra.gov.uk/environment/business/reporting/pdf/101006-guidelines-ghg-conversion-factors-method-paper.pdf>.
- [51] Waste Resources Action Program. Life Cycle Assessment of Plasterboard, 2007. http://www.ct.gov/deep/lib/deep/waste_management_and_disposal/solid_waste_management_plan/gypsumwallboard/jan2010/wrap_-_comprehensive_life-cycle_analysis_of_plasterboard_may_2008.pdf.
- [52] McGill M. Carbon Footprint Analysis of Textile Reuse and Recycling. UK: Imperial College London, 2008.
- [53] Murphy R J, Norton A. Life Cycle Assessment of Natural Fiber Insulation Materials, 2008. http://www.eiha.org/attach/372/lca_fibre.pdf.
- [54] Wilson J B. Life cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. Wood and Fibre Science, 2010, 42: 90-106.
- [55] Natural Stone Council. Limestone Quarrying and Processing: A Life Cycle Inventory. 2008. http://www.naturalstonecouncil.org/content/file/LCI%20Reports/Limestone_LCIv1_October2008.pdf.
- [56] 马欣. 中国城镇生活污水处理厂温室气体排放研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [57] 郭莉娜, 王伯铎, 郭蓉, 贺亮. 污水处理中温室气体的排放与控制. 地下水, 2011, 33(6): 70-72.
- [58] 张辰, 陈嫣, 谭学军, 孙晓. 城市污水系统温室气体排放与对策研究. 给水排水, 2010, 36(9): 29-33.
- [59] 杜吴鹏. 城市固体废弃物(MSW)填埋处理温室气体——甲烷排放研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [60] 高庆先, 杜吴鹏, 卢士庆, 张志刚, 张恩深, 吴建国, 任阵海. 中国城市固体废弃物甲烷排放研究. 气候变化研究进展, 2006, 2(6): 269-272.