

# 基于 GPC 方法的碳排放核算和减排对策研究

——以河北省为例

赵芮熙<sup>1</sup>, 高小峰<sup>2</sup>, 李欣豫<sup>1</sup>, 刘羿鹭<sup>1</sup>, 邹晓龙<sup>3</sup>

(1. 河北师范大学 商学院, 石家庄 050024; 2. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044;  
3. 吉林大学 公共外交学院, 长春 130012)

**摘要:** 碳排放核算对评估城市碳排放量和制定减排目标有重要作用。为开发完整、及时的城市级清单, 通过自下而上的方法, 运用城市碳排放核算工具指南(GPC), 同时结合国内和国际参数, 以河北省为例, 开展包含范围一、范围二、范围三的核算研究。结果表明: 根据现有数据核算河北省 2019 年的碳排放量为 175 073 万 t CO<sub>2</sub>-eq, 范围一达到 128 802 万 t CO<sub>2</sub>-eq。与相邻省份相比, 河北省碳排放强度最高(4.99 t CO<sub>2</sub>-eq/(万元 GDP)), 人均 CO<sub>2</sub> 排放量仅次于内蒙古自治区, 达到每年 23.06 t CO<sub>2</sub>-eq。基于以上核算与对比, 对清单测算及减排提出如下建议: 统一数据分类方案、澄清统计边界原则、丰富统计数据类别、建立企业碳排放报告制度。

**关键词:** 碳排放核算; GPC; 能源消耗; 减排对策

**中图分类号:** X322

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-2367(2024)05-0074-10

碳排放清单在减排方面发挥着至关重要的作用, 特别是对协助城市决策和评估减排成效有深远影响。目前, 包括国际组织、各国政府在内的研究人员都对城市清单进行了研究<sup>[1-3]</sup>。中国力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和<sup>[4]</sup>。碳排放、技术进步、低碳措施对达峰时间和经济将产生深远影响<sup>[5]</sup>, 因此碳排放量核算和清单也受到高度重视。

碳排放统计核算方法大致分为 3 类。第一类是生命周期法, 如应用在测算建筑全生命周期的碳排放量<sup>[6]</sup>、绿地的碳排放量等<sup>[7]</sup>。第二类是 intergovernmental panel on climate change(IPCC) 国际标准方法, 例如韩梦瑶等<sup>[8]</sup>利用 IPCC 给出的各碳排放比值核算了唐山市的碳排放; 童飞等<sup>[9]</sup>通过 IPCC 方法对浙江省工业排放强度进行了测定, 并预测了未来 5 年的排放强度。第三类是建立数学模型进行核算, 如将对数平均迪氏指数模型(logarithmic mean divisia index, LMDI)应用于核算河北省能源消费碳排放<sup>[10]</sup>, 使用可拓展的随机性的环境影响评估模型(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology, STIR-PAT)定量分析长江经济带能源消费碳排放及各驱动因素的影响机制<sup>[11]</sup>。

在减排清单当中, 省级排放清单至关重要。由于部分省市未公布温室气体(GHG)排放报告, 学者们已通过各种方法进行测算。例如, 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的方法已被用于估算云南省和京津冀地区城市生活垃圾的碳排放量<sup>[12-13]</sup>。此外, 也有学者将多种碳排放核算方法结合, 提出交通系统的量化分

**收稿日期:** 2023-12-01; **修回日期:** 2024-01-21。

**基金项目:** 河北省社会科学基金(HB21 YJ052)。

**作者简介:** 赵芮熙(1990—), 女, 河北石家庄人, 河北师范大学副教授, 主要从事环境能源、碳经济、双碳技术应用的相关研究, E-mail: ruixizhao@hebtu.edu.cn。

**通信作者:** 高小峰(1988—), 男, 重庆人, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事环境系统工程、产业生态学、城市生态系统动力学、固体废物管理与资源化等方面的研究, E-mail: gaoxiaofeng@cqu.edu.cn。

**引用本文:** 赵芮熙, 高小峰, 李欣豫, 等. 基于 GPC 方法的碳排放核算和减排对策研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 74-83. (Zhao Ruixi, Gao Xiaofeng, Li Xinyu, et al. Research on carbon emissions accounting of Hebei Province and its carbon reduction based on GPC method[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2024, 52(5): 74-83. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.12.01.0004.)

析框架<sup>[14]</sup>。目前,中国城市碳排放存在核算边界不清晰<sup>[15]</sup>、数据缺失和整理不规范、企业缺乏参与碳排放核算积极性、企业内部核查工作的统筹规划与持续跟进欠缺等问题<sup>[16]</sup>。在固体废物处理方面,我国的参数取值不准确导致了碳排放量核算不准确等问题<sup>[17]</sup>。

河北省是国内的工业大省和高碳排放省份<sup>[18]</sup>,碳排放量的统计对制定减排目标和规划、能源消耗量的测算等尤为重要,但河北省碳排放统计存在如下问题:(1)排放量核算时间较为滞后,此方面的研究较少;(2)覆盖气体的类别不完整,特别是范围一、二等方面涉及较少。河北省近 20 年经济增长较为依赖能源要素<sup>[19]</sup>,转型升级迫在眉睫<sup>[20]</sup>。虽然河北省产业结构的调整,2015—2020 年单位 GDP 能耗下降了约 18%<sup>[21]</sup>,但绿色循环低碳发展的实现等仍任重道远<sup>[22]</sup>。

鉴于此,本研究旨在开发完整、及时的城市级清单,通过自下而上的方法并从范围一、二、三的角度,运用混合研究方法,即结合城市碳排放核算工具指南(GPC)方法、国内和国际参数以及文献调研法<sup>[23]</sup>开展研究。此外,本文以河北省为例对我国省级单位碳排放进行核算,并提出改进河北省碳排放核算方法和 GPC 清单报告的相关建议,为中国其他省市的碳排放核算提供借鉴,并为制定减排目标和政策提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 清单和统计方法

根据《京都议定书》和 IPCC 报告,城市应核算 6 种气体的碳排放,包括二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)、氢氟碳化合物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)和六氟化硫(SF<sub>6</sub>)。GHG 核算通常是将该年不同部门的碳排放量进行加和。总体来讲,GHG 清单核算方法,可归纳为 2 类。第一类是专注核算的直接排放量,如 IPCC 提供的清单指南,这是 GHG 清单核算的第一个国际标准<sup>[24]</sup>。第二类是同时核算直接排放和间接排放,直接排放是在城市地理边界内排放;间接排放则发生在边界外,二者均由公民活动引起。碳素流<sup>[25]</sup>、碳足迹<sup>[26]</sup>和 GPC<sup>[27]</sup>均属该类别。主要碳排放核算方法见表 1。

表 1 主要碳排放核算方法

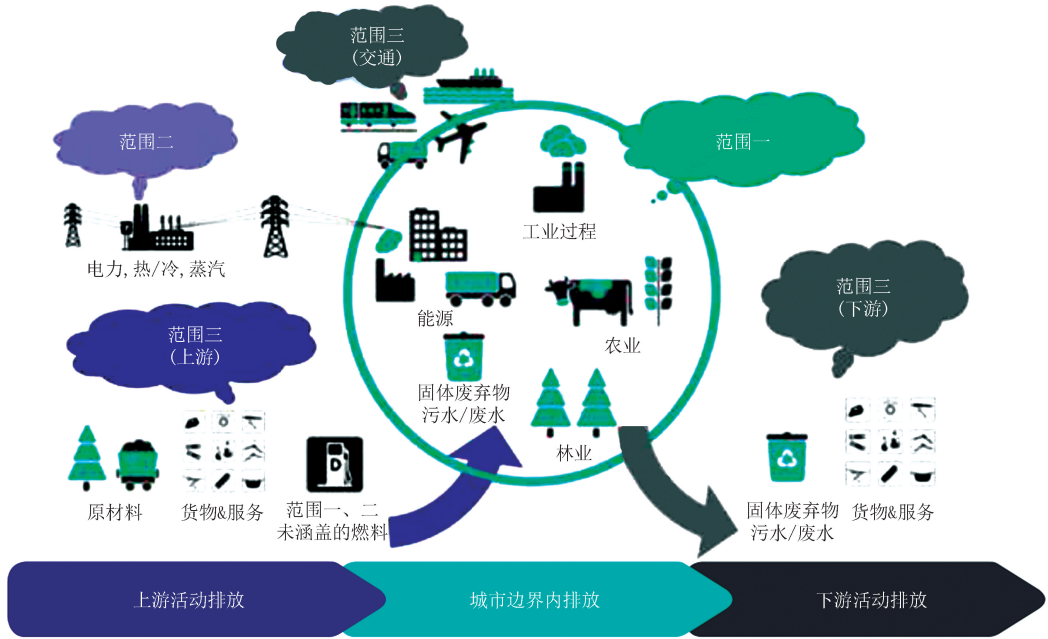
Tab. 1 Main carbon emission calculation method

| 方法                                   | 核算方法(及其具体内容)   | 范围概念 | 应用城市  | 优点                                    | 缺点                            |
|--------------------------------------|--|------|---|---------------------------------------|-------------------------------|
| 碳素流 <sup>[25]</sup>                  | 1.城市与外部系统之间的碳素流;2.城市系统内部不同子系统之间的碳素流;3.城乡体系之间碳素流。   | 是    | 南京(中国)                                      | 1.体现城市效率和可持续发展;2.制定城市低碳、可持续能源政策。      | 1.对数据需求较多且不易获得;2.碳成本核算的准确性有限。 |
| 碳足迹 <sup>[26]</sup>                  | 1.本地生产供本地消费;2.外地生产供当地消费(碳排放发生在外部)。   | 是    | 德里(印度),马尼拉(菲律宾),伦敦(英国),首尔(韩国),北京(中国),东京(日本) | 1.找出消费用户并分配责任;2.个人排放评估(全民评估)。         | 1.缺乏统一标准;2.数据准确性较差。           |
| DPSC<br>(直接加供应链排放核算方法)               | 1.城市内的直接排放;2.间接排放包括电网供电、供热和/或制冷、跨境旅行等;3.供应链由城外消费生产的关键商品和服务构成。                            | 是    | 伦敦(英国)                                      | 间接纳入有助于分析区域跨尺度和跨部门的基础设施效率。            | 计算过程复杂,需纳入考虑范围的中间过程较多。        |
| 直接排放                                 | 1.当地生产;2.当地消费。   | 是    | 《京都议定书》(日本、墨西哥、巴西)                          | 1.方法比较简便、易于计算;2.数据可用,与 GDP 一致         | 未核算间接排放,与真实值存在误差。             |
| GPC <sup>[27]</sup><br>(城市碳排放核算工具指南) | 1.本地生产供本地消费;2.本地生产用于边界外消费(排放发生在本地);3.为本地消费的外边界生产(排放发生在外);4.运输排放发生在生产(边界外生产和边界外消费)进行的过程中。 | 是    | 北京(中国)                                      | 充分反映碳排放驱动因素,从范围一、二、三的角度为政府制定减排目标提供参考。 | 对数据的可得性要求高。                   |

### 1.2 核算边界和范围

基于对当前国际城市清单的分析,本文选择了《城市碳排放核算工具指南(GPC)1.0 版》进行河北省碳

排放清单核算.主要有以下原因:首先,GPC 协议通过提供 Excel 工具和中文指南,为中国城市清单提供了一个完整而稳健的清单框架;其次,提出了活动数据收集和相關因素的指导,提高了研究的效率和准确性;此外,GPC 在方法和边界(地理和范围)上具有高度一致性,可在国际城市之间进行比较;最后,GPC 清单更新速度快,可提供及时的清单制定和反馈.根据 GPC 的核算标准和评估边界,本研究旨在从 3 个范围提出一个更系统的河北省排放核算方法.如图 1 所示,范围一涵盖了河北省境内所有来源的碳排放;范围二包括河北省境内使用电网供电、供暖或制冷而产生的所有碳排放;范围三包括由于城市边界内活动而发生在城市边界外的所有其他碳排放.



上游活动和下游活动都可能包括跨境交通.例如,上游活动包括原材料的运动,下游活动包括产品的运输等,也有部分交通活动无法区分是上游活动或下游活动,如公司员工差旅等<sup>[28]</sup>.

图1 碳排放排放源及“范围”示意图

Fig.1 Word cloud of consumers

该核算涵盖 6 个部门,即固定能源、交通运输、废物、工业过程和产品使用(industrial process and product use,IPPU)、农林和其他土地使用(agriculture, forest and other land use,AFOLU)和其他间接排放.根据 GPC 原则,一些部门将涵盖 3 个范围,而一些部门只涵盖某一两个范围,如表 2 所示.具体核算见公式 1.

表 2 河北省碳排放统计内容

Tab. 2 Carbon emission calculation contents of Hebei province

| 活动类别 | N <sub>2</sub> O | HFC | PFC | SF <sub>6</sub> | 范围一 | 范围二 | 范围三 |
|------|------------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|
| 能源活动 | ○                | ○   | ○   | ×               | ×   | ×   | ×   |
| 工业过程 | ○                | ×   | ×   | ×               | ×   | ×   | ×   |
| 废物管理 | ○                | ○   | ○   | ×               | ×   | ×   | ×   |
| 农业活动 | ×                | ○   | ○   | ×               | ×   | ×   | ×   |
| 林业活动 | ○                | ×   | ×   | △               | △   | △   | △   |

注:○,经核算已排放气体.×,经核算未排放气体.△,无须计算或不涉及.

$$C_t = \sum_{i=1}^N C_i = \sum_{i=1}^N E_i \times \beta_i \times \frac{44}{12}, \quad (1)$$

其中, $C_t$  表示  $t$  年消费的所有能源的 CO<sub>2</sub> 排放量, $C_i$  表示第  $i$  种能源的 CO<sub>2</sub> 排放量, $E_i$  为能源消费量, $\beta_i$  为该种能源的碳排放系数.其中,式(1)中能源的碳排放系数  $\beta_i$  是参考 IPCC 2019 中的各种能源 CO<sub>2</sub> 排放系

数,根据我国热值调整得到的 IPCC 收录的各种燃料 CO<sub>2</sub> 排放系数表中的数值。

### 1.3 核算方法

本研究主要采用 GPC 与国际方法结合的方法,其中运用 GPC 方法(约占总计算方法的 80%),因其具有核算相对全面的特点,其余约 10%来自日本和文献调研(用于钢铁行业)的系数和方法作为补充。此外,本研究的核算过程,遵循 4 个步骤:1)确定核算边界;2)收集活动数据;3)选择系数;4)核算排放量。活动数据主要收集自河北省统计年鉴<sup>[29]</sup>、中国能源统计年鉴<sup>[30]</sup>、中国汽车市场统计年鉴<sup>[31]</sup>、河北省自然资源厅<sup>[32]</sup>和河北省人民政府<sup>[33]</sup>、国家林业和草原局<sup>[34]</sup>。

能源排放量的核算使用活动数据乘以因子法,其中活动数据来源于《河北省统计年鉴 2019》中的《能源平衡表》,因子取自 GPC 指南。工业生产过程的碳排放,本文结合 GPC 指南并采用排放因子系数法,同时参考相关文献,如禹湘等<sup>[35]</sup>基于中国工业经济-碳排放评估模型(China industry economy-carbon emission assessment model, CIE-CEAM)进行了中国工业“双碳”路径模拟。此外,使用来自于《河北省统计年鉴》的水泥数据,采取排放因子系数法进行水泥行业的碳排放核算。其中,废弃物处理的碳排放核算,参照 GPC 指南将废弃物处理的排放量计算分为 4 个类别:废物填埋、废物燃烧、生活水处理、工业水处理,详见式(2)。其中, $E$  为 CO<sub>2</sub> 排放量; $i$  表示不同类别的废弃物:生活垃圾、危险废物; $W_i$  为废弃物燃烧量; $RW_i$  为碳含量  $i$  中的矿物碳含量; $R_i$  为煤在燃烧过程中的氧化量; $\rho_{\text{CO}_2\text{-C}}$  为二氧化碳转化为碳的速率(44/12),

$$E = \sum W_i \times RW_i \times R_i \times \rho_{\text{CO}_2\text{-C}}. \quad (2)$$

在农业活动方面,参考了张颂心等<sup>[36]</sup>利用 IPCC 构建的系数法来测算研究碳排放量。河北省的农业活动排放包括两个部门,即农田和畜牧业的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放,利用式(3)进行河北省农业活动碳排放总量的核算,具体参照公式 3<sup>[37]</sup>。其中, $E$  为农业碳排放总量; $E_i$  为第  $i$  类碳源引起的排放量; $T_i$  为第  $i$  类碳源的消耗量; $\sigma_i$  为第  $i$  类碳源的排放系数,

$$E = \sum E_i = \sum T_i \times \sigma_i. \quad (3)$$

关于林业和其他土地利用变化,GPC 指南要求林业活动的排放、碳汇(林业碳吸收)、土地利用引起的燃烧和分解。但由于数据可得性的限制,本文核算内容仅为林业活动排放量。参考许恩银等<sup>[38]</sup>的中国林业碳贡献区域分布及潜力预测,将排放和碳汇结合起来作为林业活动的最终结果。其中,碳汇是负数,因其有助于排放的吸收。该方法分为两部分,见式(4)和(5),

$$C_S = S_{\text{stock}} \times GW \times AW \times BC \times CC \times \rho_{\text{CO}_2\text{-C}}, \quad (4)$$

其中, $C_S$  为碳汇(carbon sink); $S_{\text{stock}}$  为活木材生长量; $GW$  为活立木蓄积量生长率; $AW$  为基本木材密度加权平均值; $BC$  为生物质转换; $CC$  为碳含量(carbon content); $\rho_{\text{CO}_2\text{-C}}$  为二氧化碳与碳的转换密度(44/12),

$$C_S = S_{\text{stock}} \times WC \times AW \times BC \times CC \times \rho_{\text{CO}_2\text{-C}}, \quad (5)$$

其中, $C_S$  为碳汇; $S_{\text{stock}}$  为活木材生长量; $WC$  为活立木蓄积量消耗率; $AW$  为基本木材密度加权平均值; $BC$  为生物质转换; $CC$  为碳含量; $\rho_{\text{CO}_2\text{-C}}$  为二氧化碳与碳的转换密度(44/12)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 整体核算结果

本研究发现,河北省 2019 年二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>-eq)为  $1.75 \times 10^9$  t。在所核算的气体中,CO<sub>2</sub> 排放量最高,为 92.37%,其次是 CH<sub>4</sub>(7.10%)、N<sub>2</sub>O(0.53%)。此外,在所涵盖的 6 个行业中,固定能源行业的排放量最多,占 86.15%,其余产业合计占 13.85%。与此同时,林业活动部门的碳排放量为  $-1.26 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>-eq,为该省的减排做出了贡献,详见图 2 和表 3。

### 2.2 各部门核算结果

在能源活动方面,按照 GPC 中国指南,并结合河北省实际的数据情况,本研究计算出各种化石燃料燃烧的碳排放总量为 1.51 亿 t CO<sub>2</sub>-eq。表 4 按照范围、气体划分,详细计算了各个化石燃料燃烧的碳排放量。

工业方面,本研究核算了钢铁和铝行业的碳排放,由于钢铁行业白云石和石灰石等溶剂消耗量的数据不



易检索,本研究主要核算了炼钢降碳过程中产生的碳排放量<sup>[39]</sup>,具体产量以及核算数据见附录表 S1.

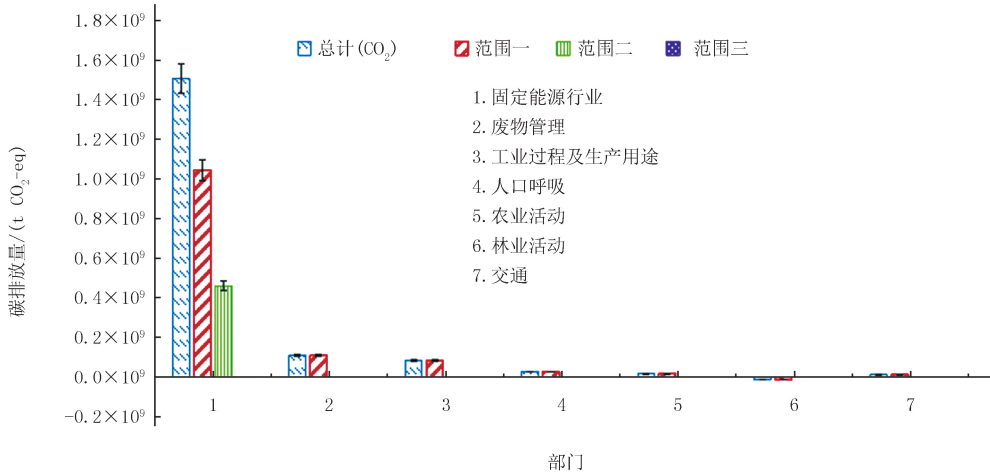


图2 2019年河北省排放分范围概况

Fig.2 Carbon emission situation of Hebei province in 2019

表3 2019年河北省排放概况

Tab. 3 Carbon emission situation of Hebei province in 2019

| 部门          | 排放量                     |                        |                        |                         |
|-------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
|             | CO <sub>2</sub>         | CH <sub>4</sub>        | N <sub>2</sub> O       | CO <sub>2</sub> -eq     |
| 1.固定能源行业    | 1.50 × 10 <sup>9</sup>  | 1.99 × 10 <sup>5</sup> | 1.04 × 10 <sup>4</sup> | 1.51 × 10 <sup>9</sup>  |
| 2.工业过程及生产用途 | 8.52 × 10 <sup>7</sup>  | —                      | —                      | 8.52 × 10 <sup>7</sup>  |
| 3.农业活动      | —                       | 4.74 × 10 <sup>5</sup> | 1.44 × 10 <sup>4</sup> | 1.63 × 10 <sup>7</sup>  |
| 4.林业活动      | -1.26 × 10 <sup>7</sup> | —                      | —                      | -1.26 × 10 <sup>7</sup> |
| 5.废物管理      | 9.09 × 10 <sup>5</sup>  | 4.30 × 10 <sup>6</sup> | 5.00 × 10 <sup>3</sup> | 1.10 × 10 <sup>8</sup>  |
| 6.呼吸        | 3.86 × 10 <sup>7</sup>  | —                      | —                      | 3.86 × 10 <sup>7</sup>  |
| 7.交通        | 5.04 × 10 <sup>6</sup>  | 1.22 × 10 <sup>2</sup> | 5.90 × 10 <sup>1</sup> | 5.06 × 10 <sup>6</sup>  |
| 总合计二氧化碳当量   | 1.62 × 10 <sup>9</sup>  | 1.24 × 10 <sup>8</sup> | 9.26 × 10 <sup>6</sup> | 1.75 × 10 <sup>9</sup>  |
| 人均 GHG 排放   | 23.06                   |                        |                        |                         |
| 万元 GDP 碳排放  | 4.99                    |                        |                        |                         |

注:“—”表示无数据,下文同.

表4 河北省2019年能源行业碳排放

Tab. 4 Carbon emissions from stationary energy sector of Hebei province in 2019

| 类别  | CO <sub>2</sub>        | CH <sub>4</sub>        | N <sub>2</sub> O       | CO <sub>2</sub> -eq    | 类别         | CO <sub>2</sub>        | CH <sub>4</sub>        | N <sub>2</sub> O       | CO <sub>2</sub> -eq    |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 范围一 | 1.04 × 10 <sup>9</sup> | 1.99 × 10 <sup>5</sup> | 1.04 × 10 <sup>4</sup> | 1.05 × 10 <sup>9</sup> | 范围三        | NC                     | NC                     | NC                     | NC                     |
| 范围二 | 4.59 × 10 <sup>8</sup> | 4.75 × 10 <sup>3</sup> | 6.88 × 10 <sup>3</sup> | 4.61 × 10 <sup>8</sup> | 总计(化石燃料燃烧) | 1.50 × 10 <sup>9</sup> | 2.04 × 10 <sup>5</sup> | 1.73 × 10 <sup>4</sup> | 1.51 × 10 <sup>9</sup> |

注:NC为因数据不可得,未计算.

在废弃物处理方面,本文核算的总排放量为  $1.10 \times 10^8$  t CO<sub>2</sub>-eq,其中废物填埋排放了  $4.29 \times 10^6$  t CH<sub>4</sub>-eq,即  $1.07 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>-eq,占废弃物处理排放量的 97.55%、废物燃烧占 0.83%、生活水处理占 1.62%,具体情况见附录表 S2.其中,对于家庭垃圾、危险废物的 2 种不同的焚烧方式,即垃圾焚烧和露天焚烧的核算,详见附录表 S3;关于生活用水(CH<sub>4</sub>)、工业废水(CH<sub>4</sub>)见附录表 S4.

农业活动的总碳排放量为  $1.63 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>-eq, 其中牲畜粪便发酵占比 59.45%, 牲畜粪便管理占比为 30.15%, 施肥排放占比 8.20%, 废弃作物燃烧占 2.20%, 详细信息见附录表 S5~S7.

经核算, 林业活动的碳排放总量为  $-1.26 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>-eq, 其中碳汇为  $-0.013\ 62$  t CO<sub>2</sub>-eq; 乔木吸收量为  $3.85 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>-eq, 排放量为  $2.60 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>-eq; 森林吸收量为  $1.96 \times 10^5$  t CO<sub>2</sub>-eq, 排放量为  $1.32 \times 10^5$  t CO<sub>2</sub>-eq, 具体细节见附录表 S8.

### 2.3 数据可得性

总体而言, 本研究河北省清单的数据可用性为 69%, 这是通过数据可用的项目和不在河北生产的项目的数量估计的, 然后除以总所需的数据数量, 判断和分析依据见表 5. 在方法方面, GPC 的方法使用率为 90.32%, 日本方法和文献研究方法分别占 6.45% 和 3.23%.

表 5 数据可用性和方法应用

Tab. 5 Data availability and applications of the developed method

| 数据收集分析 | 数据总量         | 可用数据        | 不可用数据       | GPC 方法 | 其他国际方法 | 文献研究方法 |
|--------|--------------|-------------|-------------|--------|--------|--------|
| 项目     | 45           | 31          | 14          | 28     | 2      | 1      |
| 占总额份额  | 100% (45/45) | 69% (31/45) | 31% (14/45) | 90.32% | 6.45%  | 3.23%  |

### 2.4 讨论

本研究将河北省 2019 年的排放量与相邻省区(河南省、山东省、安徽省、内蒙古自治区)进行对比(其数据来自 CEAD<sup>[40]</sup>). 第一, 从人均碳排放排放量看, 内蒙古自治区最高, 约 31.28 t CO<sub>2</sub>-eq, 河北省其次, 约 23.06 t CO<sub>2</sub>-eq, 与河南省(4.21 t CO<sub>2</sub>-eq)和安徽省(6.41 t CO<sub>2</sub>-eq)差距显著. 第二, 从碳排放强度来看, 河北省和内蒙古自治区的排放强度较大, 详见图 3. 河北省、山东省、内蒙古自治区 3 省份的人均排放量相对较高, 这与其能源结构和产业结构有关. 山东省和河北省作为 2 个能源消耗大省, 第二产业比重大, 能源消耗总量大、强度高, 消耗结构以煤炭和石油为主, 环境污染严重<sup>[41]</sup>. 内蒙古 2019 年总发电量、煤炭、能源均居前 2 名, 高能耗产业未能积极寻求转型升级, 发展相对落后, 对 GHG 的贡献位居全国第一, 导致碳排放强度大且节能减排效果不佳, 需要重点在能源效率方面进行产业的转型升级. 河南省人均碳排放量在对比省份中最低, 这与其实施严格排放限值标准、发展循环经济等政策密切相关.

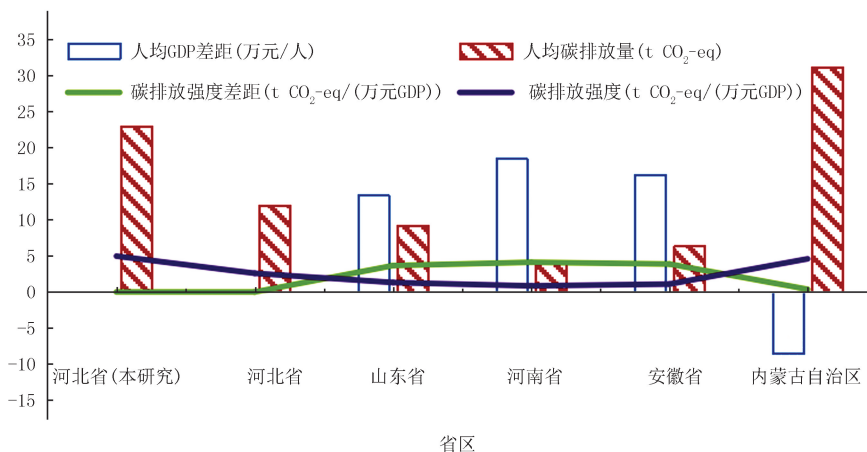


图3 相邻省区人均碳排放量和人均国内生产总值比较

Fig. 3 Comparison of per capita carbon emissions and per capita GDP with other provinces

此外, 与前人核算数据对比, 如表 6 所示, 发现本研究的总排放量高于其他研究, 主要是因为本研究不仅核算了河北省化石能源, 同时也核算了该省非化石能源的排放量. 其次, 其他文献只核算了煤炭、天然气等几种主要化石能源的碳排放量, 而本文核算了能源平衡表中所有能源燃烧的碳排放量(表 7), 因此, 相较其他文献结果偏大.

### 3 结论与建议

河北省 2019 年的碳排放量为 175 073 万 t CO<sub>2</sub>-eq,其中化石燃料燃烧占比达到 86.15%,范围一达到 128 802 万 t CO<sub>2</sub>-eq,碳排放强度最高达到 4.99 t CO<sub>2</sub>-eq/(万元 GDP),人均 CO<sub>2</sub> 排放量达到 23.06 t CO<sub>2</sub>-eq/y.因此,河北省应优化产业结构,推进低碳技术创新研发,产业绿色转型.第一,持续优化能源结构降低碳排放量.河北省第二产业占比 40.49%,第三产业占比 49.54%,与北京、上海等城市相比,第三次产业结构层次偏低,处于产业链低端.因此发展服务业并改变工业的主导地位,改变化石燃料使用的比例是关键.特别是推进单位 GDP 碳排放强度小的行业,如批发和零售业、住宿和餐饮业、金融业房地产业等.第二,推进低碳技术创新方面,建议加大河北省绿色专利支持力度,特别是在适合该省大力发展的太阳能绿色专利技术、风能和生物质能方面,提供更多资金和政策扶持.第三,建议河北省发挥区位优势和协同效应,加强与北京、天津等地的合作,不断升级和转型其产业,淘汰能源密集型工业的落后产能,大力推进绿色转型.

表 6 碳排放量核算对比

Tab. 6 Comparison with other articles on carbon accounting

| 数据出处                 | 化石能源碳排放(万 t CO <sub>2</sub> -eq) | 总排放量(万 t CO <sub>2</sub> -eq) | 核算年份 |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------------|------|
| 本文数据                 | 1.50×10 <sup>4</sup>             | 1.75×10 <sup>4</sup>          | 2019 |
| 数据 1 <sup>[42]</sup> | 7.91×10 <sup>3</sup>             | 9.89×10 <sup>3</sup>          | 2019 |
| 数据 2 <sup>[43]</sup> | 7.18×10 <sup>3</sup>             | 8.97×10 <sup>3</sup>          | 2019 |
| 数据 3 <sup>[40]</sup> | 9.14×10 <sup>4</sup>             | 1.14×10 <sup>4</sup>          | 2019 |
| 数据 4 <sup>[44]</sup> | 6.08×10 <sup>3</sup>             | 7.60×10 <sup>3</sup>          | 2019 |

表 7 河北省 2019 年化石燃料燃烧的碳排放量

Tab. 7 Carbon emissions from stationary energy sector of Hebei province in 2019

| 分类   | CO <sub>2</sub>      | CH <sub>4</sub>       | N <sub>2</sub> O      | 分类                                | CO <sub>2</sub>      | CH <sub>4</sub>       | N <sub>2</sub> O      |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 原煤   | 3.56×10 <sup>8</sup> | 8.13×10 <sup>4</sup>  | 5.63×10 <sup>3</sup>  | 石脑油                               | 1.50×10 <sup>6</sup> | 1.37×10 <sup>2</sup>  | 2.37×10 <sup>1</sup>  |
| 洗精煤  | 0.00×10 <sup>0</sup> | 0.00×10 <sup>0</sup>  | 0.00×10 <sup>0</sup>  | 润滑油                               | 2.46×10 <sup>5</sup> | 2.59×10 <sup>1</sup>  | 3.89×10 <sup>0</sup>  |
| 型煤   | 6.57×10 <sup>6</sup> | 1.38×10 <sup>4</sup>  | 8.89×10 <sup>1</sup>  | 石蜡                                | 2.15×10 <sup>5</sup> | 1.69×10 <sup>1</sup>  | 3.41×10 <sup>0</sup>  |
| 焦炭   | 2.69×10 <sup>8</sup> | 2.66×10 <sup>4</sup>  | 4.02×10 <sup>3</sup>  | 溶剂油                               | 5.70×10 <sup>3</sup> | 3.44×10 <sup>-1</sup> | 9.02×10 <sup>-2</sup> |
| 焦炉煤气 | 9.37×10 <sup>6</sup> | 1.90×10 <sup>2</sup>  | 1.90×10 <sup>1</sup>  | 石油沥青                              | 1.86×10 <sup>6</sup> | 1.27×10 <sup>2</sup>  | 2.94×10 <sup>1</sup>  |
| 高炉煤气 | 3.22×10 <sup>8</sup> | 1.24×10 <sup>3</sup>  | 1.24×10 <sup>2</sup>  | 石油焦                               | 1.03×10 <sup>6</sup> | 0.00×10 <sup>0</sup>  | 1.63×10 <sup>1</sup>  |
| 其他煤气 | 3.99×10 <sup>4</sup> | 8.09×10 <sup>-1</sup> | 8.09×10 <sup>-2</sup> | 液化石油气                             | 3.30×10 <sup>5</sup> | 1.55×10 <sup>3</sup>  | 5.34×10 <sup>1</sup>  |
| 原油   | 4.21×10 <sup>5</sup> | 7.07×10 <sup>4</sup>  | 3.50×10 <sup>0</sup>  | 炼厂干气                              | 2.00×10 <sup>6</sup> | 2.77×10 <sup>1</sup>  | 3.06×10 <sup>0</sup>  |
| 汽油   | 1.24×10 <sup>7</sup> | 1.35×10 <sup>3</sup>  | 1.09×10 <sup>2</sup>  | 其他石油制品                            | 2.34×10 <sup>6</sup> | 6.67×10 <sup>1</sup>  | 1.95×10 <sup>1</sup>  |
| 煤油   | 9.76×10 <sup>5</sup> | 4.26×10 <sup>-1</sup> | 8.31×10 <sup>0</sup>  | 天然气                               | 3.39×10 <sup>7</sup> | 1.53×10 <sup>3</sup>  | 6.10×10 <sup>1</sup>  |
| 柴油   | 1.44×10 <sup>7</sup> | 2.81×10 <sup>2</sup>  | 1.19×10 <sup>2</sup>  | 总计(折合<br>为 t CO <sub>2</sub> -eq) |                      | 1.05×10 <sup>9</sup>  |                       |
| 燃料油  | 3.06×10 <sup>6</sup> | 8.09×10 <sup>0</sup>  | 2.42×10 <sup>1</sup>  |                                   |                      |                       |                       |

基于以上核算,本研究发现省级碳排放存在如下问题:统计边界和范围不清晰和缺乏活动数据、企业数据不健全、核算方法与活动数据统计类别不一致等问题.由此,本研究对 GPC、市统计局、政府、企业和国际清单原则提出相应建议:(1)统一数据分类方案,澄清统计边界原则.对于 GPC 和河北省统计局而言,核算固定能源(化石燃料、甲烷等)与工业过程和产品使用(IPPU)部门清单数据类别不一致,因此需要建立健全统一的数据分类方法;对于国际和国内统计原则,固定能源中范围三在资产负债表,但对于河北省分社统计(BSY)却在废物管理部门,因此统计边界的清晰度有待提高.(2)丰富统计数据.目前已公布的活动数据较少,如固定能源数据、能源逸散和生物质燃料燃烧数据、废物管理部门填埋和燃烧数据、林业部门要求土地利用和分解引起的燃烧数据等有不完善的问题,建议及时完善和丰富数据类别并推动相应活动数据建立和披

露的完整性。(3)完善企业碳排放报告制度。有关企业的信息也存在缺漏,如消耗臭氧物质的替代品部门,信息极度缺乏给核算造成困难,需要协同政府和企业,建立健全企业碳排放报告制度、确立减排目标和成果的核查检验,促进减排目标的实现。

在全球可持续发展的大背景下,深入核算省级各个产业的碳排放量,开发完整、及时的城市排放清单,有利于推进其进行积极的能源转型,对于环境保护、自然资源管理和可持续发展具有重要的意义。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.12.01.0004)。

## 参 考 文 献

- [1] 杨罕玲,赵一炜.美国油气行业国家温室气体清单和报送体系[J].油气田环境保护,2022,32(1):1-8.  
YANG H L,ZHAO Y W.National greenhouse gas inventory and reporting system for U.S.oil and gas industry[J].Environmental Protection of Oil & Gas Fields,2022,32(1):1-8.
- [2] 蔡博峰,朱松丽,于胜民,等.《IPCC2006年国家温室气体清单指南2019修订版》解读[J].环境工程,2019,37(8):1-11.  
CAI B F,ZHU S L,YU S M,et al.The interpretation of 2019 refinement to the 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventory [J].Environmental Engineering,2019,37(8):1-11.
- [3] 李晓亮,齐海云,安涛,等.中小城市温室气体清单编制实践研究[J].科技管理研究,2016,36(3):230-234.  
LI X L,QI H Y,AN T,et al.Compilation practice of small and mid-sized Cities'Greenhouse gas inventory[J].Science and Technology Management Research,2016,36(3):230-234.
- [4] 张丽峰,刘思萌.碳中和目标下京津冀地区碳排放影响因素研究:基于分位数回归和VAR模型的实证分析[J].资源开发与市场,2021,37(9):1025-1031.  
ZHANG L F,LIU S M.Research on influencing factors of Beijing-Tianjin-Hebei carbon emissions under carbon neutral target—empirical analysis based on quantile regression and VAR model[J].Resource Development & Market,2021,37(9):1025-1031.
- [5] 臧萌萌,吴娟.碳排放影响因素解析:基于改进的拉氏指数分解模型[J].科技管理研究,2021,41(6):179-184.  
ZANG M M,WU J.Decomposition of carbon emissions influence factors;based on improved laspeyres decomposition model[J].Science and Technology Management Research,2021,41(6):179-184.
- [6] 郭春梅,刘清华,李胜英.基于绿色建筑评价体系的绿色建筑全生命周期碳排放核算模型构建与实例分析[J].绿色建筑,2019,11(5):13-18.  
GUO C M,LIU Q H,LI S Y.Green building life cycle carbon emission accounting modelling and case analysis based on green building evaluation system[J].Green Building,2019,11(5):13-18.
- [7] 张颖.基于生命周期法的城市绿地优势种碳收支研究[D].天津:天津师范大学,2022.  
ZHANG Y.Study on carbon expenditure of urban green space dominant species based on life cycle method[D].Tianjin:Tianjin Normal University,2022.
- [8] 韩梦瑶,蒋川,刘思远.资源型重工业城市的多尺度碳排放关联研究:以河北省唐山市为例[J].城市与环境研究,2020,(4):77-96.  
HAN M Y,JIANG C,LIU S Y.Multi-scale carbon emission correlation study in resource-based heavy industrial cities: Take Tangshan city, Hebei Province as an example[J].Urban and Environmental Research,2020,(4):77-96.
- [9] 童飞,赵兴文,俞滨.浙江省工业碳排放强度现状及预测[J].现代工业经济和信息化,2023,13(1):9-10.  
TONG F,ZHAO X W,YU B.Current situation and forecast of industrial carbon emission intensity in Zhejiang Province[J].Modern Industrial Economy and Informationization,2023,13(1):9-10.
- [10] 王彩明,李健.基于LMDI的河北省能源消费碳排放核算及影响因素实证分析[J].科技管理研究,2017,37(10):258-266.  
WANG C M,LI J.Empirical analysis of carbon emission accounting and influencing factors of energy consumption in Hebei Province based on LMDI model[J].Science and Technology Management Research,2017,37(10):258-266.
- [11] 邢红.长江经济带能源消费碳排放的多变量驱动因素研究:基于扩展STIRPAT模型[J].资源开发与市场,2020,36(4):337-343.  
XING H.Examining driving factors of energy consumption related carbon emissions in Changjiang River economic zone;based on extended STIRPAT model[J].Resource Development & Market,2020,36(4):337-343.
- [12] 邹琼,付君哲,杨丽琼,等.云南省城市生活垃圾处理温室气体排放特征[J].资源开发与市场,2021,37(2):141-145.  
ZOU Q,FU J Z,YANG L Q,et al.Profile of greenhouse gases emissions from urban domestic solid waste disposal in Yunnan Province[J].Resource Development & Market,2021,37(2):141-145.
- [13] 袁砚方.京津冀地区温室气体排放与转移研究[D].北京:中国地质大学,2019.  
YUAN F Y.Study on the emissions and transfer of greenhouse gases in Jing-Jin-Ji area[D].Beijing:China University of Geosciences,2019.
- [14] 何青,李晔,张鑫.道路系统全生命周期碳排放量化分析框架:基于国际标准[J].城市交通,2022,20(1):102-109.



- HE Q, LI Y, ZHANG X. Quantitative analysis framework of road system life-cycle carbon emissions under international standards[J]. *Urban Transport of China*, 2022, 20(1): 102-109.
- [15] 叶瑞克, 李亦唯, 高壮飞, 等. 城市建筑群碳排放核算模型构建与实证研究[J]. *资源开发与市场*, 2017, 33(11): 1295-1299.  
YE R K, LI Y W, GAO Z F, et al. Urban building group carbon emission accounting model construct and empirical research[J]. *Resource Development & Market*, 2017, 33(11): 1295-1299.
- [16] 邢静. 广东省温室气体核查工作的探讨与建议[J]. *节能与环保*, 2017(10): 56-59.
- [17] 郭恰. IPCC 污泥碳排放核算模型中 DOC 取值的不足与修正[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(16): 49-53.  
GUO Q. Lack and correction of DOC value in IPCC calculation model of sludge carbon emission[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(16): 49-53.
- [18] 李慧敏. 河北省温室气体减排政策环境经济影响分析[J]. *营销界*, 2019, (51): 3-5.  
LI H M. Analysis on the environmental and economic impact of greenhouse gas emission reduction policy in Hebei Province[J]. *Marketing Circles*, 2019, (51): 3-5.
- [19] 陆佳丽. 河北省低碳转型对经济增长的影响研究[D]. 保定: 河北大学, 2019.  
LU J L. Study on the Impact of Low-carbon Transformation on Economic Growth in Hebei Province[D]. Baoding: Hebei University, 2019.
- [20] 周洁. 全球性低碳经济的不断发展对国际贸易的影响[J]. *河北企业*, 2020(11): 73-74.
- [21] 武义青, 赵亚南. 河北省碳排放与能源消费和经济增长[J]. *河北经贸大学学报*, 2015, 36(1): 123-128.  
WU Y Q, ZHAO Y N. Carbon emissions and energy consumption and economic growth in Hebei Province[J]. *Journal of Hebei University of Economics and Business*, 2015, 36(1): 123-128.
- [22] 张璞. 河北省“十四五”发展形势与环境分析[J]. *河北金融*, 2020(6): 4-9.
- [23] 程宁熹. 基于 LEAP 模型的上海市工业部门能源消费与碳排放研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.  
CHENG N X. Research on Energy Consumption and Carbon Emission of Shanghai Industrial Sector Based on LEAP Model[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [24] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. (2019-05-01)[2023-11-01]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [25] 张彩平, 郭溯源. 谈基于“碳素流—价值流”的碳成本核算[J]. *财会月刊*, 2019(23): 8-14.
- [26] FRY, JACOB, LENZEN, MANFRED, JIN, YUTONG, et al. Assessing carbon footprints of cities under limited information[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 176(1): 1254-1270.
- [27] 王波, 张海霞. 广州市低碳交通发展策略研究[J]. *城市交通*, 2018, 16(4): 74-80.  
WANG B, ZHANG H X. Development strategies of low carbon transportation in Guangzhou[J]. *Urban Transport of China*, 2018, 16(4): 74-80.
- [28] WRI, CAAS, WWF, ISC. 中国城市温室气体核算工具[EB/OL]. (2012-05-01)[2023-11-11]. <https://ghgprotocol.org>.
- [29] 河北统计局. 河北统计年鉴-2020[EB/OL]. (2022-03-01)[2023-11-30]. <http://tjj.hebei.gov.cn/hetj/tjnj/2020/zk/indexch.htm>.
- [30] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴-2020[EB/OL]. (2021-01-30)[2023-11-30]. <https://m.waitang.com/report/345692.html/>.
- [31] 中国汽车流通协会. 中国汽车市场统计年鉴-2020[EB/OL]. (2020-11-01)[2023-11-30]. <https://kns.cnki.net/knavi/yearbook/s/YQCSC/detail?uniplatform=NZKPT>.
- [32] 河北省自然资源厅. 2019 年河北省土地资源概况[EB/OL]. (2021-12-30)[2023-11-30]. <https://zrzy.hebei.gov.cn/heb/wap/>.
- [33] 河北省人民政府. 关于印发河北省“十四五”公共机构节约能源资源工作规划的通知[EB/OL]. (2021-08-01)[2023-11-30]. <http://www.hebei.gov.cn/>.
- [34] 国家林业和草原局. 国家林业局关于公布北京等 6 省(区、市)2016 年森林资源清查主要结果的通知[EB/OL]. (2016-12-30)[2023-11-30]. <https://www.forestry.gov.cn/>.
- [35] 禹湘, 娄峰, 谭畅. 基于 CIE-CEAM 模型的中国工业“双碳”路径模拟[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(7): 49-56.  
YU X, LOU F, TAN C. A simulation study of the pathway of achieving the dual carbon goals in China's industrial sectors based on the CIE-CEAM Model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(7): 49-56.
- [36] 张颂心, 王辉, 徐如浓. 科技进步、绿色全要素生产率与农业碳排放关系分析: 基于泛长三角 26 个城市面板数据[J]. *科技管理研究*, 2021, 41(2): 211-218.  
ZHANG S X, WANG H, XU R N. Analysis on the relationship between science and technology progress, green total factor productivity and agricultural carbon emission: based on pan Yangtze River Delta 26 city panel data[J]. *Science and Technology Management Research*, 2021, 41(2): 211-218.
- [37] 方苗, 贺义雄, 余晓洋. 农业碳排放研究: 空间格局、脱钩效应与驱动因素: 以浙江省为例[J]. *资源开发与市场*, 2022, 38(12): 1461-1467.
- [38] 许恩银, 王维枫, 聂影, 等. 中国林业碳贡献区域分布及潜力预测[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(5): 36-45.  
XU E Y, WANG W F, NIE Y, et al. Regional distribution and potential forecast of China's forestry carbon contributions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 36-45.

- [39] 张蕊娇.中国应对全球绿色碳博弈之破立有道:构建中国碳交易市场机制与建立碳盘查体系研究[C].上海:东华大学,2013.
- [40] CEADs.2019年30个省份排放清单[N/OL].(2021-12-30)[2023-11-30].<https://www.ceads.net/user/login.php?lang=cn>.
- [41] 黄沛璇.我国能源消费端碳排放特征与碳峰值预测研究[D].广州:广州大学,2023.  
HUANG P X.China's energy consumption carbon emissions characteristics and carbon peak prediction research[D].Guangzhou:Guangzhou University,2023.
- [42] 韩楠,罗新宇.多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J].自然资源学报,2022,37(5):1277-1288.  
HAN N,LUO X Y.Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios[J].Journal of Natural Resources,2022,37(5):1277-1288.
- [43] 肖金成,魏孟举,刘钊.碳达峰碳中和背景下河北省能源结构优化调整的对策[J].中国电力企业管理,2021(34):60-62.  
XIAO J C,WEI M J,LIU Z.Countermeasures for Optimizing and Adjusting Energy Structure in Hebei Province under the Background of Carbon Neutralization in peak carbon dioxide emissions[J].China Power Enterprise Management,2021(34):60-62.
- [44] 李文文.我国产业生态经济系统跨区域协同优化研究[D].南京:东南大学,2018.  
LI W W.Study on Cross-regional Collaborative Optimization of China's Industrial Eco-economic System[D].Nanjing:Southeast University,2018.

## Research on carbon emissions accounting of Hebei Province and its carbon reduction based on GPC method

Zhao Ruixi<sup>1</sup>, Gao Xiaofeng<sup>2</sup>, Li Xinyu<sup>1</sup>, Liu Yilu<sup>1</sup>, Zou Xiaolong<sup>3</sup>

(1. School of Business, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of International and Public Affairs, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Carbon emission accounting plays an important role in assessing urban carbon emissions and setting emission reduction targets. The aim of this study is to develop a complete and timely list of reporting cities, using a bottom-up approach using the Guidelines for Urban Carbon Emissions Accounting Tools(GPC), and incorporating international parameters to carry out an accounting study covering Scope I, Scope II and Scope III in Hebei Province. The results show that, according to the existing data, the latest carbon emissions in 2019 of Hebei Province were 1 750.73 million t CO<sub>2</sub>-eq, of which fossil fuel combustion accounted for 86.15%, and the range reached 1, 288 million t CO<sub>2</sub>. Compared with neighboring provinces, Hebei Province has the highest carbon emission intensity(4.99 t CO<sub>2</sub>-eq/(10 000 yuan GDP)) and per capita CO<sub>2</sub> emission of 23.06 t CO<sub>2</sub>-eq/y. Based on assessments and analysis, suggestions for inventory calculation and emission reduction in this paper include: unifying data classification scheme, clarifying statistical boundary principles, enriching statistical data categories, and establishing enterprise carbon emission reporting system.

**Keywords:** carbon emission accounting; GPC; energy consumption; emission reduction measures

[责任编辑 刘洋 杨浦]

附 录

表 S1 河北省 2019 年水泥、钢铁以及铝行业碳排放

Tab. S1 Carbon emission of cement, steel and aluminum industry of Hebei province in 2019

t

| 项目 | 水泥<br>产量             | 粗钢<br>产量             | 钢材<br>产量             | 铝产<br>量              | CO <sub>2</sub><br>因子 | CO <sub>2</sub><br>排放 | CF <sub>4</sub><br>因子 | CF <sub>4</sub><br>排放 | C <sub>2</sub> F <sub>6</sub><br>因子 | C <sub>2</sub> F <sub>6</sub><br>排放 | 总计二氧<br>化碳当量         |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 水泥 | 1.02×10 <sup>8</sup> | /                    | /                    | /                    | 5.38×10 <sup>-1</sup> | 5.50×10 <sup>7</sup>  | /                     | /                     | /                                   | /                                   |                      |
| 钢铁 | /                    | 5.50×10 <sup>7</sup> | 2.84×10 <sup>8</sup> | /                    | /                     | 3.02×10 <sup>7</sup>  | /                     | /                     | /                                   | /                                   | 8.52×10 <sup>7</sup> |
| 铝  | /                    | /                    | /                    | 5.64×10 <sup>5</sup> | /                     | /                     | 8.88×10 <sup>-2</sup> | 5.01×10 <sup>4</sup>  | 1.14×10 <sup>-2</sup>               | 6.43×10 <sup>3</sup>                |                      |

注：“/”表示不涉及。

表 S2 河北省 2019 年废弃物处理计算内容

Tab. S2 Carbon emission of waste management sector of Hebei province in 2019

t

| 废物管理            | CO <sub>2</sub>      | CH <sub>4</sub>      | N <sub>2</sub> O     | 占比/%  |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|
| 废弃物填埋           | —                    | 4.29×10 <sup>6</sup> | —                    | 97.55 |
| 垃圾焚烧和露天焚烧       | 9.09×10 <sup>5</sup> | —                    | —                    | 0.83  |
| 废水处理            | —                    | 9.23×10 <sup>3</sup> | 5.00×10 <sup>3</sup> | 1.62  |
| 废弃物部门总量(二氧化碳当量) |                      | 1.10×10 <sup>8</sup> |                      | 100   |

注：“—”表示无数据，下同。

表 S3 河北省 2019 年垃圾焚烧和露天焚烧的碳排放

Tab. S3 Carbon emission of incineration waste of Hebei province in 2019

| 类别   | 燃烧量/t                   | 因子/t | 废物中的碳比例/% | 无机碳比例/% | 煤的析出比例/% | 排放/t                 |
|------|-------------------------|------|-----------|---------|----------|----------------------|
| 生活垃圾 | 1.23×10 <sup>7</sup> *  | 0.27 | 20        | 39      | 95       | 9.05×10 <sup>5</sup> |
| 危险废物 | 3.65×10 <sup>6</sup> ** | 0.03 | 1         | 90      | 97       | 3.50×10 <sup>3</sup> |

注：\* 2020 年城乡建设统计年鉴(<https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>)，

\*\* 2020 年河北省统计年鉴(<http://tj.hebei.gov.cn/hetj/tjnj/2020/zk/indexch.htm>)。

表 S4 河北省 2019 年生活污水及工业废水处理碳排放情况

Tab. S4 Carbon emission of waste water of Hebei province in 2019

| 类别   | COD/kg               | N/kg                 | 因素(N <sub>2</sub> O 与<br>N 比例)/% | N <sub>2</sub> O—N 转换<br>比例(44/28)/% | BOD/COD<br>转换比例/% | CH <sub>4</sub> 与 BOD<br>比例/% | CO <sub>2</sub> /t | CH <sub>4</sub> /t | N <sub>2</sub> O/t |
|------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 生活污水 | 2.00×10 <sup>8</sup> | 6.37×10 <sup>8</sup> | 0.005                            | 1.57                                 | 0.45              | 0.099                         | 8 925.90           | —                  | 5 004.30           |
| 工业废水 | 1.65×10 <sup>7</sup> | 6.37×10 <sup>8</sup> | 0.005                            | 1.57                                 | 0.45              | 0.041                         | —                  | 307.20             |                    |

表 S5 2019 年河北省农业活动排放概况

Tab. S5 Carbon emission of agriculture sector of Hebei province in 2019

t

| 类别                        | 排放量/t                |                      |                      | 比例/%  |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|
|                           | CH <sub>4</sub>      | N <sub>2</sub> O     | CO <sub>2</sub> -eq  |       |
| 废弃作物燃烧                    | 9.67×10 <sup>3</sup> | 3.82×10 <sup>2</sup> | 3.60×10 <sup>5</sup> | 2.20  |
| 作物施肥                      | —                    | 4.32×10 <sup>3</sup> | 1.34×10 <sup>6</sup> | 8.20  |
| 牲畜粪便发酵                    | 3.89×10 <sup>5</sup> | —                    | 9.71×10 <sup>6</sup> | 59.45 |
| 牲畜粪便管理                    | 7.62×10 <sup>4</sup> | 9.74×10 <sup>3</sup> | 4.93×10 <sup>6</sup> | 30.15 |
| 总排放量(CO <sub>2</sub> -eq) | 1.63×10 <sup>7</sup> |                      |                      |       |

表 S6 河北省 2019 年施肥碳排放量

Tab. S6 Carbon emission from fertilization of Hebei Province in 2019

| 类别                        | 播种面积/hm <sup>2</sup> | 总产量/t                | O 排放因素/(t·hm <sup>-2</sup> ) | N <sub>2</sub> O 排放/t | 比例/%  |
|---------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|-------|
| 蔬菜                        | 7.88×10 <sup>5</sup> | 5.15×10 <sup>7</sup> | 2.10×10 <sup>-3</sup>        | 1.65×10 <sup>3</sup>  | 38.29 |
| 马铃薯                       | 2.26×10 <sup>5</sup> | 1.48×10 <sup>6</sup> | 1.20×10 <sup>-3</sup>        | 2.71×10 <sup>2</sup>  | 6.28  |
| 小麦                        | 2.36×10 <sup>6</sup> | 1.45×10 <sup>7</sup> | 1.00×10 <sup>-3</sup>        | 2.36×10 <sup>3</sup>  | 54.57 |
| 大豆                        | 1.16×10 <sup>5</sup> | 2.12×10 <sup>5</sup> | 3.00×10 <sup>-4</sup>        | 3.48×10 <sup>1</sup>  | 0.81  |
| 烟叶                        | 1.35×10 <sup>3</sup> | —                    | 1.50×10 <sup>-3</sup>        | 2.03×10 <sup>0</sup>  | 0.05  |
| 总排放量(CO <sub>2</sub> -eq) | 1.34×10 <sup>6</sup> |                      |                              |                       |       |

表 S7 2019 年河北省农田以及禽畜碳排放情况

Tab. S7 Carbon emission from farm land and livestock of Hebei province in 2019

t

| 类别           | CH <sub>4</sub> 排放量  | N <sub>2</sub> O     | 类别                          | CH <sub>4</sub> 排放量  | N <sub>2</sub> O     |
|--------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 排放量农田类废弃作物燃烧 | 9.67×10 <sup>3</sup> | 3.82×10 <sup>2</sup> | 农田类和禽畜类总计                   | 4.74×10 <sup>5</sup> | 1.44×10 <sup>4</sup> |
| 施肥           | —                    | 4.32×10 <sup>3</sup> | 二氧化碳当量(CO <sub>2</sub> -eq) | 1.19×10 <sup>7</sup> | 4.48×10 <sup>6</sup> |
| 禽畜类禽畜发酵      | 3.89×10 <sup>5</sup> | —                    | 碳排量总量(CO <sub>2</sub> -eq)  | 1.63×10 <sup>7</sup> |                      |
| 畜禽粪便管理       | 7.62×10 <sup>4</sup> | 9.74×10 <sup>3</sup> |                             |                      |                      |

表 S8 河北省 2019 年林业活动算法概述

Tab. S8 Carbon emission from wood and forest activities of Hebei province in 2019

| 种类 | 蓄积量/m <sup>3</sup>    | 活立木蓄积量生长率/% | 基本木材密度加权平均值/(t·m <sup>-3</sup> ) | 生物量转换系数(全林) | 生物量转换系数(地上) | 生物量含碳率/% | 活立木蓄积量消耗率/% | CO <sub>2</sub> -C/% | CO <sub>2</sub> 吸收量/t | CO <sub>2</sub> 排放量/t |
|----|-----------------------|-------------|----------------------------------|-------------|-------------|----------|-------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 乔木 | 2.69×10 <sup>10</sup> | 6.39        | 0.484                            | 1.771       | 1.427       | 50.00    | 4.31        | 3.67                 | 3.85×10 <sup>7</sup>  | 2.60×10 <sup>7</sup>  |
| 森林 | 1.37×10 <sup>8</sup>  | 6.39        | 0.484                            | 1.771       | 1.427       | 50.00    | 4.31        | 3.67                 | 1.96×10 <sup>5</sup>  | 1.32×10 <sup>5</sup>  |