

火电碳排放核算方法优选与实证分析

——基于能源的“双向”视角

何永贵 李晓双¹

(华北电力大学(保定)经济管理学院, 河北 保定 071003)

【摘要】: 为探究适用于中国省际公平有效的碳排放核算科学方法, 基于 IPCC 碳排放系数法提出了一种基于比例分配原则的能源生产和消费“双向”视角的碳排放核算方法, 从火电生产和消费的跨省能源分流、主要排放源和排放因子数据等不同视角进行了定量分析。结果表明: 相比于生产视角, 消费视角更能体现中国各省份火电碳排放量由东向西逐步下降的趋势, 需要引起关注的是, 无论是生产视角还是消费视角, 内蒙古、山东、江苏、河北、广东火电碳排放量总居高不下。多数省份的主要碳排放来源于省内生产且用于本省消费, 能源排放因子对碳排放计算结果的精确性至关重要。

【关键词】: 碳排放 碳泄露 生产视角核算 消费视角核算

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)10-013-08

全球气候变暖是人类面临的又一重大挑战, 中国作为全球最大的发展中国家, 经济的发展对全球功不可没, 但碳排放量也不容忽视, 因此, 各国对中国的碳减排倍加关注。2015年, 中国与其他125个国家共同签订了《巴黎协定》, 并提出中国碳排放量在2030年要比25年前降低60%的减排目标。在中国, 各省份是国家与城市的纽带, 在二氧化碳减排达标过程中至关重要。首先, 各省份是全国CO₂排放分解的下一级单位, 这对于CO₂排放额度分解和CO₂减排政策的整体制定和实施具有重要意义。《控制温室气体排放第十三个五年计划》将全国CO₂排放强度目标分解为省级目标。其次, 省级碳排放需要有一个符合中国实际的统一方法。中国在2011年发布了《省级温室气体清单指南》后, 该指南已成为省级CO₂排放估算的主要方法。最后, 中国国家层面的统计系统也是基于各省份的, 省级的数据也力求比较完整, 以有利于对CO₂排放量的准确估算和比较。总体而言, 省级排放估算方法的相关研究构成了准确计算和分段配额分配的基础, 这对制定精准决策以有效实现减排目标具有重要意义。

1 文献综述

长期以来, 化石能源消耗和二氧化碳排放一直密切相关, 为了推进经济高质量发展, 人类的各种活动中的能源消费需求日益增加。据统计, 中国对煤炭的消费量约占世界总量的25%^[1]。Guo等^[2]研究了国内1995—2006年消费一次能源排放二氧化碳总量的总体趋势, 研究结果显示煤炭引起的二氧化碳排放量占全国总量的79%~85%。截至2017年年底, 中国排放的二氧化碳占全球能源相关排放量的28%, 其中76%来自煤炭的使用^[3]。2011年, 中国首先将电力行业纳入碳试点交易市场, 可见火电的碳排放在中国碳排放中占有举足轻重的地位, 2017年, 全国电力生产(包括热电联产发电)的二氧化碳排放量占总二氧化碳排放量的86%^[4], 未来一段时间内的二氧化碳排放仍可能以火电燃料燃烧释放为主。因此, 调整火电行业的能源结构并寻找合理的计算方法仍是中国的当务之急和关键所在。

作者简介: 何永贵, 博士, 教授, 研究方向为能源技术经济及管理。E-mail:hyg_1961@126.com

基金项目: 国家社会科学基金项目“多情景模拟下同意碳交易对中国出口竞争力的传导效应评估与政策研究”(17BGL252)

目前已有的二氧化碳核算方法主要是从两个方面入手，即生产角度和消费角度。生产角度顾名思义是指在生产地区产生的二氧化碳排放，包括出口。这种方法主要是根据生产量来计算碳排放，不考虑产品的消费者，具体参照二氧化碳排放清单使用政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的方法核算，包括对国家层面^[5-7]、区域层面^[8](省份^[9]和城市^[10-11])和行业层面(电力行业^[12]、钢铁行业^[13]、交通运输行业^[14])的研究。基于生产角度的碳排放核算方法有许多优点，比如计算简单、数据容易获得等^[7]，因此这种方法在温室气体核算中被广泛应用。

然而，多数研究表明，基于生产角度的碳排放核算为国家或地区的碳排放密集型产业转移提供了可能性，即存在“碳泄露”问题，所以其公平合理性受到质疑^[15-16]。例如，Peters等^[17]和Wiedmann等^[18]研究发现欧洲在碳减排工作上取得重大进展主要是因为其将国内的制造业转移到国外，并且伴随着中国等国进口欧洲产品大量增加。这里的碳泄露主要是指在国家或区域之间发生交易时产生的碳排放转移。以中国各省份为例，东西部地区的经济发展和能源禀赋有显著的差异，因此，就会形成经济发达省份将污染密集型产业转移到经济落后省份，经济落后省份或能源丰富地区加大生产，依靠对外省输出带动自身产业的发展，在此贸易往来中就出现了碳泄露问题。因此，兼顾碳泄露和公平减排目标，许多学者提出了基于消费角度的二氧化碳核算方法^[19-20]。

基于消费角度即不考虑生产地点，而是由产品或服务的消费者承担减排责任。目前，已经有大量学者运用各种方法基于消费视角计算碳排放量。国际层面，Cao等^[21]从最终消费的角度分别研究了2012年中国农村、城市、政府和国外出口四类消费群体的二氧化碳排放量及排放来源。区域层面，Mi等^[22]估计了2012年中国河北省11个城市的化石燃料燃烧和工业过程中的碳排放，Wang&Yang^[23]从居民消费角度研究了北京的碳排放特征和影响因素。行业层面，Zhang等^[24]建模研究了中国建筑行业的能源消耗和碳排放。

常用的碳排放核算方法主要有投入产出分析法^[15, 25-26]和生命周期评估法^[27-28]。生命周期评估是一种承担消费者全部责任的方法，它的分析视角是处于供应链最末端的消费者。然而生命周期评估主要是用来计算单一产品的生产过程中的碳排放，并且需要大量的经济和人力资源投入数据。相比之下，投入产出法更具成本效益且易于操作^[29]。投入产出分析的核心是投入产出表，目前有单区域投入产出模型和多区域投入产出模型，其主要特点是能够描述一个经济系统^[30]，是分析区域或区域间贸易来往的良好工具。然而区域间投入产出表的编制耗时耗力，这仍是一项复杂而艰巨的任务^[31]。因此，近年来不断有学者探究出新的准确度高且易于理解的碳排放核算方法，例如：Li&Yang^[32]提出基于能量流和消费者责任重新划分山东省所使用的能源以计算该省的碳排放；Shan等^[33]采用“表观能耗”方法重新核算了2000—2012年中国各省份的二氧化碳排放量，初步降低了中国碳排放的不确定性；付坤和齐绍洲^[34]将共担责任原则思想运用到碳排放核算方法中，进一步分析了中国各省份的电力行业碳排放责任。

针对全球碳减排环境，部分学者同时从生产和消费两个角度计算了各国的二氧化碳排放量：Fan等^[35]探讨了14个主要经济体基于生产和基于消费的二氧化碳排放特征，以深入了解主要排放者之间的排放存在的不公平程度。也有学者从多视角分析了中国二氧化碳排放量，Zhai等^[36]分别从生产视角、消费视角和收入视角分析中国各省份的能源消费和碳排放之间的关联度，其中的收入视角是一个创新点；Wang等^[28]基于生产和消费视角全面审查了中国各省份的碳排放情况。但是基于能源消耗并从两个视角对中国各省份火电碳排放量进行核算的研究还不多。鉴于此，本文依据2017年中国各省份的面板数据，从火电生产和消费两个视角分别计算碳排放，并且提出了一种基于比例视角的能源消耗核算方法，以深入研究各省份的火电耗能特征和碳排放量。其中，付坤和齐绍洲^[34]的研究思路为本文提供了很重要的参考意义。所用数据较新使本文更具研究价值。

2 研究方法 with 数据来源

本研究所用的计算方法参考 IPCC 给出的排放系数法，用能源消耗量 and 对应排放因子的乘积来表示中国各省份的火电二氧化碳排放量，其中包括各省份在火电生产时所涉及的全部化石能源。

2.1 基于生产视角的二氧化碳排放计算

根据碳的质量平衡原理，基于各省份能源消耗类型计算火电生产过程中化石燃料燃烧的二氧化碳排放量，见式(1)。

$$CE_{i,j} = AD_{i,j} \cdot EF_i \quad (1)$$

式中： $CE_{i,j}$ 代表 j 省内第 i 类化石能源消耗的二氧化碳排放量， $AD_{i,j}$ 代表 j 省内电力生产过程中 i 类化石能源的消耗量， EF_i 代表 i 类化石能源对应的排放因子，i 表示化石燃料的种类，j 代表各省份。

所以 j 省内火电生产直接排放的二氧化碳量等于所有种类的化石能源燃烧排放的二氧化碳排放总和，如式(2)所示：

$$CE_j^p = \sum_i CE_{i,j} \quad (2)$$

式中： CE_j^p 代表 j 省内火电生产排放的二氧化碳总量。

2.2 基于消费视角的二氧化碳排计算

考虑到中国大规模的跨区域电力传输，为了清晰地描述各省份的电力消费碳排放责任，避免碳排放被重复计算，本研究将基于消费视角的二氧化碳排放划为两个来源：一部分是省内生产且本省消费的电力碳排放量，记作 LPC。另一部分是其他省份生产但用于本省内消费的电力碳排放量，记作 OPC。因此，各省份基于消费视角的电力碳排放计算方法总结为式(3)：

$$CE_j^c = LPC_j + OPC_j \quad (3)$$

式中： CE_j^c 代表 j 省份的火电消耗碳排放总量。

2.2.1 LPC 计算方法

结合已有研究算法，本文考虑一个省内所生产的火电有 3 个去向，包括本省消费量、对外省输出量和损失量。由于中国地区能源平衡表中并没有对各省份的出口电力进行数据统计，所以本研究中不考虑各省份的电力出口。因此，本省内生产且本省内消费的火电总量的计算见式(4)：

$$LTC_j = LTP_j - OTP_j \cdot a - TL_j \cdot a \quad (4)$$

式中： LTC_j 代表 j 省内生产且用于本省内消费的火电总量； LTP_j 代表 j 省内生产的火电总量； OTP_j 代表 j 省对外省输出的电力总量； TL_j 代表 j 省在运输或储存过程中的损失量。a 为 j 省当年生产的火电总量占本省当年生产的全部电力总量的比重。这里需要注意的是，由于数据不充分我们只能得到本省对外省输出的总电量，为了使结果更加精确，我们通过一个比例因子 a 来计算本省对外输出的火电量和火电损失量。

参照地区能源平衡表，我们已知所有省份的火力发电总量以及火力发电所消耗的能源类型和数量，借助比例因子 b 可以得到省内生产且省内消费部分火电所消耗化石燃料的数量，然后用式(1)的方法最终计算出本省生产且本省消费部分的碳排放量。

具体计算过程见式(5)和(6)。

$$LPC_j = \sum_i AD_{i,j} \times EF_i \times b \quad (5)$$

$$b = \frac{LTC_j}{LPC_j} \quad (6)$$

式中： LPC_j 代表j省内生产且省内消费的火电碳排放量， b 表示j省用于省内消费的火电占省内生产的火电总量的比重。

2.2. 20PC 计算方法

对于跨省输入电力，不能简单地用其输入量乘以本省的电力碳排放因子或燃料燃烧因子，首先因为跨省调入的电力不一定是火电，其次，值得关注的是，不同省份生产等量火电时，消耗的化石燃料种类和数量可能相差很大，因此，所排放的二氧化碳量也不等。所以本研究使用调入省份的化石能源消耗量和排放因子，始终确保研究结果更具公平有效性。

$$OPC_j = \sum_n OPC_{j,n} = \sum OPC^1 + \sum OPC^2 \quad (7)$$

式中： $OPC_{j,n}$ 代表向j省调入电力的所有省份生产对应调度火电量所排放二氧化碳量； j 表示被输入电力省份； n 表示所有向j省输入电力的省份。然而，在《中国能源统计年鉴 2018》中的“地区能源平衡表”中，只统计了所有省份的电力跨省输入和输出数量，没有明确指出电力的来源省，因此，本文将输入j省的电力来源分为两种情况，即跨区输入和本区输入。

(1) 计算跨区输入的火电总量以及二氧化碳排放量。

图1显示的是2017年中国跨区电力调度的流向，首先，需要计算出各区域电网火电总量占全部总电量的比重，据此可以得到区域之间的火电调度总量。

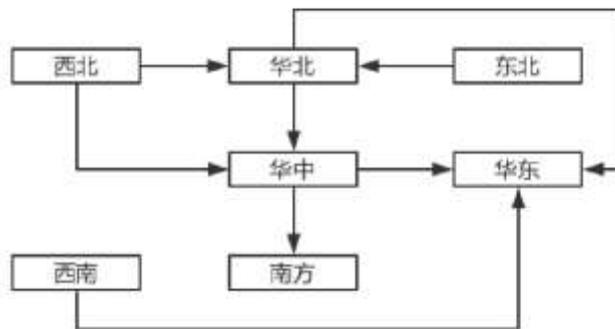


图1 2017年中国跨区电力调度

跨区域调出的火电总量在本区域之间存在电力输出的省份中分摊，所以对于某跨区调出省份来说，分摊比例为该省份的调出电力在本区域总调出电力中的比重，记作 c ，并且，该跨区调出省份向指定调入区域调入的电量要在调入区域内所有存在调入

电力的省份中分摊，每个调入省份的分摊比例为该省份的调入量占该区域的火电调入总量的比重，记作 d 。对于跨区调入省份来说，跨区域调入的火电总量等于所有对其跨区调出省份调入的火电总量之和。

跨区调出省份 n 的调出量见如式 (8)：

$$OT_n^e = \sum_n OT_n^e \times c \quad (8)$$

式中： OT_n^e 代表跨区调出省份 n 向被输入区域输入的总火电量； $\sum_n OT_n^e$ 代表 n 省所在区域向被输入区域输入的总火电数量。

跨区输入省份 j 的调入量见式 (9)、式 (10)：

$$OT_{j,n}^m = OT_n^e \times d \quad (9)$$

$$OPC^1 = \sum_n AD_{(j,n),i}^m \times EF_i \quad (10)$$

式 (9)、式 (10) 中： $OT_{j,n}^m$ 代表跨区输出省份 n 向被输入区域的输入省份 j 输入的火电量； OPC^1 表示被输入区域输入省 j 的跨区域输入的火电总量； $AD_{(j,n),i}^m$ 表示根据 j 省的能源消耗情况通过比例因子计算出的跨区输入火电量所消耗的各类化石能源数量，然后使用上文提到的各省份的化石能源消耗种类和相应的碳排放因子，计算出总的二氧化碳排放量。

(2) 本区其他省份 j' 向本省 j 输入的火电总量以及总碳排放量为：

$$IT_{j,j'}^m = \sum IT_{j,j'}^m \times f \quad (11)$$

$$OPC^2 = \sum_j AD_{(j,j'),i}^m \times EF_i \quad (12)$$

式中： OPC^2 代表本区域内输出省份 j' 向本输入省 j 调入的总火电量碳排放； $IT_{j,j'}^m$ 代表本区域输出省份 j' 向本区域输入省 j 输出的电量； $\sum IT_{j,j'}^m$ 代表本区域内输出省份 j' 其所在区域的其他省份输入的电力总量； $AD_{(j,j'),i}^m$ 代表本区域输出省 j' 向输入省份 j 输出的火电对应 j 省内化石燃料消耗数量； f 代表本区域输入省 j 的输入量占本区域所有输入省份的输入总量的比重。

2.3 数据来源

本文使用了 2017 年各省份 (不包含西藏和港澳台地区) 的统计数据，相比于数据陈旧的研究更有现实意义，其中主要涉及的数据的来源有：各省份的火电生产量、跨省电力流量以及损失量都来自《中国能源统计年鉴 2018》中的地区能源平衡表；各区域电网的跨区电力调度数据来自《电力工业统计资料汇编》，更新的二氧化碳排放因子来自中国碳核算数据库 (CEAD)。能源排放因子有多种统计来源，多数学者在研究中使用 IPCC 提供的数据，但是该数据是针对全球各国的综合情况定制的，不太适合中国的碳排放情况，导致结果不准确。此外，IPCC 和国家统计局所提供的数据都过多估计了中国的碳排放量，因此，本文采用 Liu 等^[37]的数据，但是由于其考虑的化石能源不全面，所以本文用本研究中一次化石能源的数据来更新已有化石能源的排放因子^[38]，使得计算结果更接近中国实际的碳排放量^[37]。

3 实证结果与分析

本节将从不同计算角度、能源分流、主要碳排放源和排放因子 4 个方面来研究分析全国的火电碳排放形势，不考虑其他不确定影响因素。

3.1 不同计算角度下各省份火电碳排放

按传统的生产视角的计算方法，30 个省份的火电碳排放量总数是 389127.79 万吨，而消费视角下的火电总碳排放量为 368590.47 万吨，可见消费视角碳排放核算更符合中国的碳排放实际。如图 2 所示，从火电生产和消费两个视角分别计算各省份二氧化碳排放量，使得排名发生了很大变化，然而对于排放大省，两个视角的计算结果只是略微改变了几个省份的相对位置，并未改变它们碳排放量突出的事实。例如，生产视角下火电碳排放量最大是内蒙古，是 42145.183 万吨，约占全国的火电总碳排放的 11%。这是由于内蒙古的资源禀赋带动本地电力行业的飞速发展。排放最多的前 5 个省份依次还包括山东、江苏、河北、广东，排放量分别为 37419.663 万吨、31951.336 万吨、24554.827 万吨、23317.52 万吨。火电碳排放最低的是北京，只有 202.65 万吨。

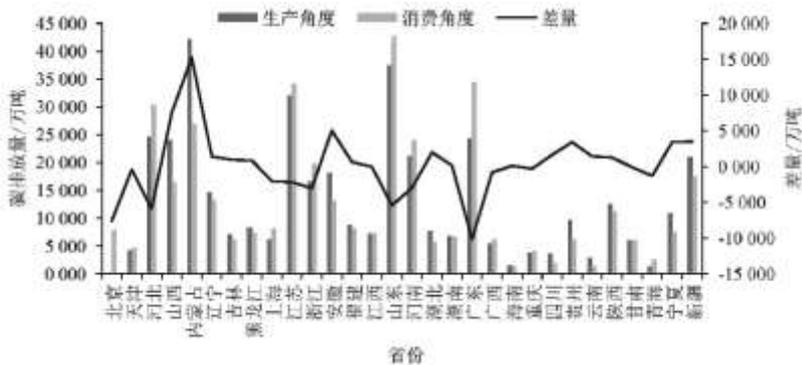


图 2 不同计算视角下各省份火电碳排放量

在消费视角下，火电碳排放最大的省份是山东，42847.36 万吨，占全国火电消费碳排总量的 12%。山东是中国的人口大省，也是能源消耗大省，火电碳排放居首也不足为奇。排放最多的前 5 个省份依次还包括广东、江苏、河北、内蒙古，排放量分别为 34415.376 万吨、34118.37 万吨、30397.82 万吨、26911.8 万吨。以上分析表明，国家应该对上述 5 个省份采取重点减排措施，这与舒娱琴等^[39]的研究结果保持一致。而碳排放量最低的是云南省，根据已有的统计资料显示，该省在 2017 年的水电生产量占总产量的 70%，这归功于其独特的地理位置优势。

值得注意的是，对各省份火电碳排放的生产视角和消费视角作差，需要进一步分析计算角度给各省份碳排放带来的差异，在能源效率视角下避免低估其实际的碳排放。分析图 2，总体来看，对比消费视角和生产视角的碳排放量，消费视角的碳排量高于生产视角的碳排放量的省份主要有北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、山东、河南和广东等，其中北京、天津、上海、江苏、浙江和广东都是东部地区的经济发达省份，着力于第三产业的发展并且控制碳密集型产业，不断加大对高污染火电企业的外包需求。而河北、山东和河南仍是典型的重工业发展地区，经济水平一般，可能还处于长期经济转型期，省内资源已经不足以支持经济发展，因此火电消费碳排放相当多。此外，这 3 个省份都是中国人口大省，它们不仅要保证自己内部的电力供应充足，还承担了对经济发达省份的电力供应者身份，体现了它们电力自给率较高但依然要依赖外省以促进自身经济发展的特点。然而，也有一些省份生产视角的火电碳排放大于消费视角的排放量，如山西、内蒙古、安徽、贵州和新疆等，多位于中国的中西部且经济相对薄弱地区，但由于特殊的地理位置和丰富的化石能源，它们担负了电力生产和输出的责任，既能满足东部地区的电力需求也能带动自身经济的发展。可以证明，消费视角的各省份碳排放和经济社会发展趋势保持一致。

显然，差量尤其突出的省份有北京、山西、内蒙古和广东。北京和广东的差量值最小，说明这两个省份火电消耗碳排放要远远大于火电生产碳排放，而山西和内蒙古的差量值最大，意味着两个省份的火电生产碳排放要远远大于火电消耗碳排放。这些省份对核算方法的依赖性很强，如果采取生产角度的核算方法，将会大大减弱北京和广东的碳减排责任，而加重山西和内蒙古的减排压力。这表明，碳核算方法的选取会对结果造成极大影响。消费视角的计算结果更能体现出中国碳流量从东部地区向西部地区逐渐下降的总体趋势，也证明了中国东部发达地区给中西部地区带来严重的碳泄露，进一步强调了东部地区的碳排放责任，这和 Wang 等^[28]的研究结论一致。因此，为实现国家减排目标，各省份需要相当重视计算方法的选取，实现公平、公正的原则。

3.2 能源消耗对二氧化碳排放量的影响

已有研究文献对能源消耗的分类主要有三种处理方式。一是合并物理量数据，二是将能量转换为标准煤后再合并，三是忽略掉不包括在考虑范围的能源使用量。当能源被划分种类较细致且消耗量相差不大时，合并计算不会给结果带来很大影响，但是局限性很大。当某些能源的排放因子缺失数据时，可以转换为标准煤利用标准煤的排放因子计算，但计算量很大。当忽略掉某几种能源时，显然会使碳排放量的计算结果偏低，而对于该类型能源消耗较多的省份来说更是低估了其实际的碳排放。本文考虑了各省份地区能源平衡表中火电生产所需要全部化石能源，可以更清晰地描述出各省份火电相关的能源消耗情况。表 1 分别计算了碳排放排名前 5 位省份的能源消耗。图中表明，原煤是中国火力发电的主力军，在内蒙古和江苏，消耗原煤的碳排放量约占总碳排放的 96%，山东和广东的原煤碳排放量占比都是 93%，河北是 85%，虽然低于其他 4 个省份，但是在省内相对于其他的能源也是巨大的消耗。山东和广东的火电能源消耗种类比较多，河北、内蒙古的能源消耗种类次之，江苏的能源消耗类型最少。

表 1 5 个省份的不同能源种类消耗量

能源种类(标煤/万吨)	河北	内蒙古	江苏	山东	广东
原煤	8747.99	21546.89	15759.23	18102.26	11324.03
其他洗煤	302.49	34.82	184.11	568.23	0
型煤	0	11.23	0	31.49	186.56
煤矸石	349.99	731.20	0	425.33	220.50
焦炉煤气	20.75	4.76	17.69	15.80	4.78
高炉煤气	778.67	75.39	278.54	265.56	75.49
转炉煤气	56.17	4.42	16.59	11.67	6.99
煤油	0	0.01	0	0	0
柴油	1.13	0.62	1.05	1.68	2.09
燃料油	0.05	0.09	0.14	0.49	1.81
石脑油	0	0	0	0	10.75
石油焦	0	0	0	11.24	27.50
炼厂干气	0.86	0	0.39	3.37	4.14

其他石油制品	0.91	0	0	0.38	0.17
天然气	0.08	0.19	113.29	0.46	69.16
液化天然气	0	0	0	0	218.67

从能源消耗的角度来考虑各省份的火电碳排放是很有必要的，即对能源消耗必须予以足够的重视，而不能简单地以发电量最多视同为碳排放量也最多。如图 3 以生产角度的碳排放为例显示：2017 年火力发电最多的前 3 个省份依次是山东、江苏和内蒙古，依次为 4913.85 亿千瓦时、4511.10 亿千瓦时和 3736.00 亿千瓦时，而火电碳排放最多的前 3 个省份依次是内蒙古、山东、江苏，分别为 42145.18 万吨、37419.66 万吨和 31951.34 万吨。相反，火力发电最少的前 3 个省份依次为青海、海南、云南，分别为 161.19 亿千瓦时、195.42 亿千瓦时、239.66 亿千瓦时，而火电碳排放最少的前 3 个省份依次为北京、青海和海南，排放量分别为 202.65 万吨、1315.78 万吨、1515.97 万吨。因此，从生产的角度来看，不同省份之间的火力发电量和火电碳排放量并不是完全一致的。这一点在山西和浙江尤为明显。山西和浙江的发电量十分接近，山西为 2503 亿千瓦时，浙江为 2554.51 亿千瓦时，山西发电量大约占浙江的 98%，但是其碳排放量约是浙江碳排放的 1.5 倍。因此，发电量最多不能代表碳排放量也最多，能源消耗必须予以足够的重视，避免因依据各省份的火力发电量来判断其碳排放量高低而带来不公平。

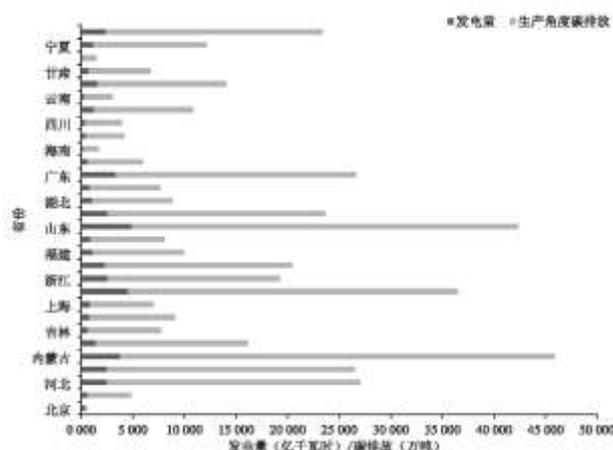


图 3 各省份发电量和火电生产碳排放

因此，有必要重点分析能源消耗对消费视角核算方法的必要性。因为生产相同数量的火电，而不同省份的碳排放量是不同的。本研究分别计算了各省份的火电输入量按本省内部的能源消耗情况对应的碳排放量，记作 NOPC，和在来源省的碳排放量 OPC 做了比较，如图 4 所示。很显然，除了重庆和四川以外，各省份的 NOPC 普遍都要低于 OPC，尤其是在经济发达的省份中尤为明显，如北京、上海、江苏、浙江和广东等。这表明，如果我们不考虑火电的来源，仅仅是按照被输入省份的能源消耗比例来计算调入部分的碳排放，就低估了各省份实际碳排放量，尤其是低估东部地区经济发达省份对环境的污染，减弱它们的减排责任，不利于中国实现公平减排目标。

3.3 各省份消费视角的碳排放构成

图 5 显示了各省份的消费视角的火电二氧化碳排放量构成。比较全国各省份的火电消费碳排放构成情况，可以发现，大部分省份的火电消费碳排放主要来自本省生产本省消费的部分，但生产与异地消费的“空间概念”被忽略。从图中看出，一些省份用于自身消费的火电排放几乎等于本省内火电总消费的碳排放，但来源其他省份的火电碳排放占比极少，比如内蒙古、黑龙江

江、安徽、福建、四川、贵州(完全相等)、云南、新疆等。贵州在 2017 年的外省电力输入为 0，是电力净输出省。这些省份位于拥有丰富煤炭和水电资源的中西部地区，属于不同的区域电网，并且在所属区域电网中输入电力所占比重最少，说明这些省份除了能满足自己的电力需求量，还是向其他省份输出电力的主要地。尤其是内蒙古，承受了大量来自北京、天津以及周边区域的外包电力碳排放。然而，比较各省份的火电输入碳排放，发现主要的电力买家有北京、河北、浙江、山东和广东。其中，河北、浙江、山东和广东在消费视角的总碳排放量中排名靠前，符合 4 省的能源消费大省形象。值得注意的是，北京的 OPC 部分远远超过了 LPC 部分，其在本地产生的碳排放量是 165.07 万吨，只有它在外省消费产生的碳排放量的 2%，这也意味着北京的消费严重依赖于其周边地区的生产^[40]，从而导致电力来源省份碳排放增加。因此，研究火电消费碳排放的构成有助于明确二次电力最终用户的减排责任。

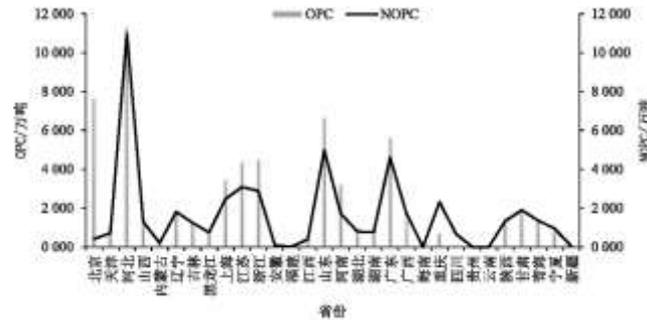


图 4 各省份 OPC 和 NOPC 的对比

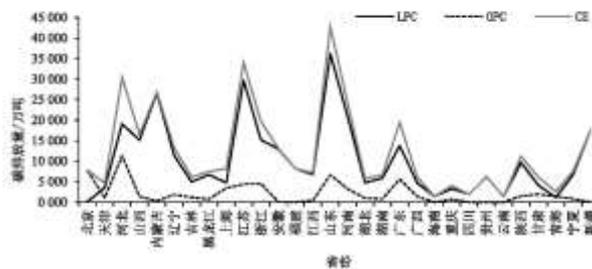


图 5 各省份火电消耗的碳排放构成

西部省份被认为是中国欠发达的省份，也是国内主要的能源供应地。沿海省份是经济实力较强、能源需求较高的省份。通过分析各省份火电碳排放构成，我们可以清楚地看到碳排放从东部到中西部的大致流向^[41]。上文所分析的跨省电力交易中的主要电力买家和卖家，与 Wang 等^[42]对中国 2013 年跨省电力交易的研究结果一致，说明这几年间中国的电力产业结构和跨省电力交易没有发生本质的改变，依然存在严重的碳泄露等不公平现象。西电东送是跨区域电力交易的总体趋势，与中国振兴西部经济的总体战略保持一致。为了满足这些经济发达地区的电力需求，大规模的电力输送使得欠发达的西部地区急需考虑二次电力生产所带来的污染和排放。从区域经济可持续与区域之间的协调发展“空间概念”角度来看，重新计算各省份火电消费的碳排放量，可以为中国可持续经济增长的能源政策提供更加有效的信息。

3.4 更新的排放因子

各省份能源消耗的火电碳排放因子明显存在着不确定性，有必要研究更新排放因子。正如蔡博峰等^[43]提出“不确定性应该与碳排放系数、活动数据和其他估算参数等组成部分相关”，活动数据和能源排放因子都是火电碳排放计算中不确定性的主要

来源。本文所使用的活动数据都来自相关的省级统计年鉴，具有可靠性和借鉴性，所以只考虑能源的碳排放因子。目前，对能源排放因子的计算统计主要包括国家水平和省际水平的数据，数据因来源不同而各异^[5]。在国家层面上，主要有 IPCC 和联合国提供的平均值数据，而且已经被研究者普遍使用，但是很多研究表明，这两种针对全球碳排放情况制定的数据高估了中国的实际碳排放量。在省际层面上，主要有国家统计局、国家发展和改革委员会以及部分学者的研究结果所提供的数据。

本文在结合 Jing 等^[38]的建议值基础上使用了 Liu 等^[37]更新后的排放因子。以各省份的火电生产视角为例，考察几种排放因子对碳排放量的影响。表 2 显示，不同的排放因子使火电碳排放量有很大差别。需要说明的是，以下几种数据来源中的排放因子的缺失值都转换成标准煤来计算，折标煤系数和标煤耗的排放因子来自《中国能源统计年鉴》和其他统计资料。结果证明，使用 IPCC 数据计算的火电碳排放总量最高，并且高出本文所得结果的 34%。联合国平均值和 Jing 等^[38]的研究数据计算出的碳排放量相差不大，但是也都略高于本文的研究结果。另外，本文用更新后的排放因子计算的碳排放量和 NBS 所提供数据计算结果十分接近，在一定程度上证明了本文的能源排放因子数据具有很高的科学性和很大的参考价值，为后续研究提供了更可靠的工具。

表 2 2017 年不同排放因子对应的碳排放总量

数据来源	IPCC	Jing 等 ^[38]	联合国平均值	国家统计局	本文
碳排放量/万吨	522062	426338.7	414423.8	382660.7	389127.8

4 结论与展望

2016 年中国提出“要通过一系列的措施在 2030 年左右实现碳排放达峰”的目标，需要大量省级的能源相关碳排放研究为其政策提供基础性及其关键主体的研究，尤其是针对中国能源结构占比 70%左右的火电行业的碳排放研究。鉴于此，本文在借鉴国内外研究的基础上，基于能源消耗从生产消费两个视角，针对中国各省份的火电碳排放进行了核算和实证研究。从碳排放结果来看，不同视角虽然没有改变主要排放省份排放量大的事实，但是能够为省际的碳排放份额提供更加精准的科学判据^[44]。例如，内蒙古火电生产碳排放占全国的 11%，但是火电消费碳排放只占全国总量的 9%，消费角度的碳排放结果可以给内蒙古争取更多的排放份额，因此，消费角度核算是生产角度核算的一个必要补充。进而进一步明确政策指向，即对于排放量大的省份，国家政策要鼓励火电产业科技创新，提高原煤利用水平，合理调整能源利用结构，减少重污染能源的使用，等等。

基于能源效率下能源消费所产生碳排放的核算方法、比较讨论消费视角下各省份火电碳排放构成和更新的排放因子对计算结果的影响这三方面的研究是本文的创新点，主要是考虑了各省份火电的跨省输入来源地和所消耗的全部能源类型两个关键因素，本着“共同但有区别”的原则采用比例化思想来计算各省份火电消费碳排放。由于可利用的统计数据划分不够细致，我们只能得到各省份明确的电力输出和输入总量，但无法明确跨省输送火电量或来源地，所以采用比例化思想来获取大概数据计算火电的调度也就难免会带来一些计算结果的误差。但是结果显示，本文采用基于比例分配原则的能源生产和消费“双向视角”的碳排放核算方法，除了极个别地区外，计算得出的多数省份火电碳排放符合中国实际的电力生产与能源消费的状况，也有助于避免碳泄露带来的影响，证明这种计算方法具备合理性和实用性。同时，有鉴于研究过程遇到的梗阻问题，建议未来的研究加强从提高火电跨省输送数据的精准性以及更符合中国实际的排放因子等方面来进一步探寻更科学准确的计算方法。因为清楚跨省输送的火电能源消耗情况是准确计算各省份火电碳排放的关键一步，加强相关部门进一步完善省际火电的生产与调出消费的统计口径和统计建设工作，将使优化碳排放计算方法的研究更具实践意义，进而为政策制定者提供科学判据。

参考文献:

[1] Lin B Q, Zhu J P. The role of renewable energy technological innovation on climate change: Empirical evidence

from China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659:1505-1512.

[2]Guo Y,Zheng J,Ge Q,et al.Primary energy-related carbon dioxide emissions in China[J].*Chinese Journal of Population Resources & Environment*, 2013(04):283-287.

[3]Zhou N,Price L,Dai Y D,et al.A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030[J].*Applied Energy*, 2019, 239:793-819.

[4]IEA.CO2 emission statistics[EB/OL]. (2020-07-01). <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>.

[5]Harris S,Weinzettel J,Bigano A,et al.Low carbon cities in 2050?GHG emissions of European cities using production-based and consumption-based emission accounting methods[J].*Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119-206.

[6]Fu J F,A R N,Wang M,et al. Analysis of China' s production-and consumption-based co2 emission inventories[J].*Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(4):293-303.

[7]Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories[J].*Ecological Economics*, 2008, 65(1):13-23.

[8]Li X. An Research on regional differences of China' s carbon dioxide emissions—Based on the IPCC carbon emissions accounting method[J].*Territory & Natural Resources Study*, 2013, 2:63-65.

[9]Wang Z H,Li Y M,Cai H L. Comparative analysis of regional carbon emissions accounting methods in China: Production-based versus consumption-based principles[J].*Journal of Cleaner Production*, 2018, 194:12-22.

[10]Lo K, Lu H Y. Energy-related carbon emissions of China' s model environmental cities[J].*Geography Journal*, 2014(3):1-7.

[11]Gu C L,Liu J X. Research on urban carbon emissions inventory and its application in planning[J].*China City Planning Review*, 2017, 26(2):39-50.

[12]Jiusto S. The differences that methods make:Cross-border power flows and accounting for carbon emissions from electricity use[J].*Energy Policy*, 2006, 34(17):2915-2928.

[13]Wei Y M,Liao H,Fan Y. An empirical analysis of energy efficiency in China' s iron and steel sector[J].*Energy*, 2007, 32(12):2262-2270.

[14]Zhang H J,Chen W Y,Huang W L. TIMES modelling of transport sector in China and USA:Comparisons from a decarbonization perspective[J].*Applied Energy*, 2016, 162:1505-1514.

[15]Su B,Ang B W. Input-output analysis of CO2 emissions embodied in trade:Competitive versus non-competitive imports[J].*Energy Policy*, 2013, 56:83-87.

-
- [16]Peters G P,Hertwich E G.CO2 embodied in international trade with implications for global climate policy[J]. Environ Science Technol, 2008, 42(5) :1401-1407.
- [17]Peters G P,Weber C L,Guan D, et al. China' s growing CO2 emissions—A race between increasing consumption and efficiency gains[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(17) :5939-5944.
- [18]Wiedmann T,Lenzen M,Turner K, et al. Examining the global environmental impact of regional consumption activities—part 2:Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade[J]. Ecological Economics, 2007, 61(1) :15-26.
- [19]Bows A,Barrett J. Cumulative emission scenarios using a consumption-based approach:A glimmer of hope?[J]. Carbon Management, 2010, 1(1) :161-175.
- [20]Karl S,Christian L,Susanne D, et al. Justice and cost effectiveness of consumption-based versus production-based approaches in the case of unilateral climate policies[J]. Global Environmental Change, 2013, 24:75-87.
- [21]Cao Q R,Kang W,Sajid M J, et al. Measuring China' s carbon emissions based on final consumption[J]. Energy Procedia, 2018, 152:853-862.
- [22]Mi Z F,Zheng J L,Meng J, et al. Carbon emissions of cities from a consumption-based perspective[J]. Applied Energy, 2019, 235(1) :509-518.
- [23]Wang Z H,Yang Y T. Features and influencing factors of carbon emissions indicators in the perspective of residential consumption:Evidence from Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 61(2) :634-645.
- [24]Zhang Y, Yan D, Hu S, et al. Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach[J]. Energy Policy, 2019, 134:110949.
- [25]Su B, Ang B W. Input-output analysis of CO2 emissions embodied in trade:A multi-region model for China[J]. Applied Energy, 2014, 114:377-384.
- [26]Machado G, Schaeffer R, Worrell E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil:An input-output approach[J]. Ecological Economics, 2001, 39(3) :409-424.
- [27]Long Y, Yoshida Y, Zhang R S, et al. Policy implications from revealing consumption-based carbon footprint of major economic sectors in Japan[J]. Energy Policy, 2018, 119:339-348.
- [28]Wang H K, Zhang Y X, Lu X, et al. Understanding China' s carbon dioxide emissions from both production and consumption perspectives[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 52:189-200.
- [29]Long Y, Yoshida Y, Liu Q L, et al. Comparison of city-level carbon footprint evaluation by applying single-and multi-regional input-output tables[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 260:110108.

-
- [30] Mongelli I, Tassielli G, Notarnicola B. Global warming agreements, international trade and energy/carbon embodiments: an input-output approach to the Italian case[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(1): 88-100.
- [31] Dong H J, Geng Y, Fujita T, et al. Three accounts for regional carbon emissions from both fossil energy consumption and industrial process[J]. *Energy*, 2014, 67(1): 276-283.
- [32] Li L Y, Yang J. A new method of energy-related carbon dioxide emissions estimation at the provincial-level: A case study of Shandong Province, China[J]. [2020-01-15]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971934375X>.
- [33] Shan Y, Guan D, Zheng H, et al. China CO2 emission accounts 1997-2015[J/OL]. [2018-01-16]. <https://www.x-mol.com/paper/527136>.
- [34] 付坤, 齐绍洲. 中国省级电力碳排放责任核算方法及应用[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014(4): 27-34.
- [35] Fan J L, Hou Y B, Wang Q, et al. Exploring the characteristics of production-based and consumption-based carbon emissions of major economies: A multiple-dimension comparison[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 790-799.
- [36] Zhai M Y, Huang G H, Liu H Z, et al. Three-perspective energy-carbon nexus analysis for developing China's policies of CO2-emission mitigation[J/OL]. [2020-02-25]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719358528>.
- [37] Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015, 524(7565): 335-338.
- [38] Jing Q N, Bai H T, Luo W, et al. A top-bottom method for city-scale energy-related CO2 emissions estimation: A case study of 41 Chinese cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 444-455.
- [39] 舒娱琴. 中国能源消费碳排放的时空特征[J]. *生态学报*, 2012(16): 4950-4960.
- [40] Feng K S, Hubacek K, Sun L X, et al. Consumption-based CO2 accounting of China's megacities: The case of Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 26-31.
- [41] 王安静, 冯宗宪, 孟渤. 中国 30 省份的碳排放测算以及碳转移研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2017(8): 89-104.
- [42] Wang F, Shackman J, Liu X. Carbon emission flow in the power industry and provincial CO2 emissions: Evidence from cross-provincial secondary energy trading in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159: 397-409.
- [43] 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(8): 1-11.
- [44] 宋杰鲲, 牛丹平, 曹子建, 等. 中国省域碳排放测算及配额分配[J]. *技术经济*, 2016(11): 79-87.