

不同电力生产链的温室气体排放 评估差异

JOSEPH V. SPADARO, LUCILLE LANGLOIS 和 BRUCE HAMILTON

在过去 10 年中,因温室气体 (GHG) 的排放,世界范围内关于人类活动对全球气候系统的影响的大辩论越来越多。到目前为止,讨论一直主要集中在二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、一氧化二氮 (N₂O), 以及含氟、氯和溴的卤代化合物的人为排放上。这些气体的大气浓度自前工业时代以来已明显增加,对于甲烷来说实际上已提高一倍以上。

为了将这些气体的大气浓度稳定在能最大限度地降低全球气候发生重大改变的风险水平上,130 多个国家在 1992 年于巴西召开的“全球首脑会议”上批准了《联合国气候改变框架公约》(FCCC)。此后在京都举行的缔约国大会第 3 次会议 (1997 年 12 月) 继续为此作出努力,会上决策者就国别 GHG 排放量减少指标达成一致。

当前,工业化国家,即附件 I 国家,应对世界范围内大部分的 GHG 排放负责。将近 2/3 的 GHG 排放可归因

于与发电和运输部门有关的活动。因此,附件 I 国家要满足《京都议定书》的要求,就需要坚定承诺开发利用那些低碳排放的能源。当这些国家展望满足今后能源需求的时候,改进燃料至能量利用的转换工艺也将起重要的作用。由于发展中国家不受《京都议定书》的约束,而它们的能量消费又与日俱增,所以 GHG 的排放率会迅速提高,预计到 2025 年底发展中国家将在全球排放中占有主要份额。

鉴于发电部门是排放 GHG 的大户 (目前占全球总排放量的 1/3), 国际原子能机构 (IAEA), 对利用化石燃料、核动力和可再生能源进行电力生产的全部活动 (链) 所造成的 GHG 排放进行了审查,并作为其各种能源比较评估计划的一部分。IAEA 从 1994 年 10 月至 1998 年 6 月举办了一系列 6 次咨询组会议,内容包括以下燃料链:

两个方面。首先,与会者就完整的发电能源链提出了一套自洽的 GHG 排放系数。第二,他们指出了为促进履行 FCCC 的承诺而可以开发利用的燃料和工艺选择方法。本文介绍和讨论这些会议的成果和主要结论。

GHG 排放系数

通过各种研究分析了各种不同类型燃料的 GHG 排放系数的变化范围,其结果以克碳当量 (包括 CO₂、CH₄、N₂O 等) 每千瓦时电 (gC_{eq}/kWh) 表示。第 21 页上的图示出了现有电厂 (20 世纪 90 年代工艺) 的数据和预期将在中短期内投入运行的系统 (2005—2020 年工艺) 的排放系数。

这些估计值反映了在评估方法学、转化效率、燃料制备与随后运往电厂现场的做法上的差别,以及为满足与

作者均为 IAEA 核能司规划与经济研究科职员。本文全部参考资料可从作者处得到。

温室气体与能源开发

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)秘书处印发的一系列事实资料卡,着重说明人类活动如何产生 GHG。其要点包括:

- 大部分最重要的人类活动都排放 GHG,其中许多活动目前对全球经济是至关重要的。
- 燃烧化石燃料产生二氧化碳是人类活动中最大的 GHG 排放源。化石燃料的供应和使用约占人类活动排放的二氧化碳总量的 3/4。
- 化石燃料燃烧时产生与能量利用有关的大部分排放。石油、天然气和煤提供了用于生产电力、驱动汽车、房屋采暖和开开工厂的大部分能量。如果燃料完全燃烧,唯一含碳的副产物就是二氧化碳。然而燃烧常常是不完全的,所以也产生一氧化碳和其他碳氢化合物。因为燃料燃烧引起燃料或空气中的氮与空气中的氧化合,这样就产生了一氧化二氮和氮的其他氧化物。

提取、处理、运输和配送化石燃料也排放 GHG。

详细资料可查阅 UNFCCC 因特网址(www.unfccc.de)上的“气候变化信息包”。

电厂建造和设备制造有关的电力需要而假定的燃料构成之类的当地问题上的差别。未来排放率考虑了燃料至能量利用的转换工艺的改进,燃料提取和运输期间排放量的降低,以及电厂和设备建造期间更低的排放量。

对于化石燃料来说,总排放率是燃料燃烧期间的烟卤排放以及上游和下游活动(链)的排放之和。一般来说,电厂建造和退役时的 GHG 排放以及连接电厂和电网的动力线路的贡献小到可以忽略不计。例如,电厂建造和退役的贡献可能仅占 GHG 总

排放量的 1%。

对于水能、太阳能和风能工艺来说,电厂的规模和类型是分析中的关键因素。厂址的地理位置选择和当地建造法规等方面的考虑,对排放率有显著影响。图中示出这些因素对 GHG 排放率的影响。

IAEA 支持的各咨询组会议的结果一致表明,化石燃料工艺排放系数最高,天然气的排放系数约为煤或褐煤的一半,而燃料油的排放系数为煤 2/3。另一方面,核能和水能的 GHG 排放最低,为煤的 1/50 到 1/100(取决

于工艺)。太阳能的 GHG 排放居中,约为核能 10 倍。

分析方法

寿命循环评估(LCA)的目标是通过考虑流程每个步骤的质量流和能量流来计算与生产单位产品相应的环境负担。在电力生产的情况下,最终单位产品是 1kWh 的能量。

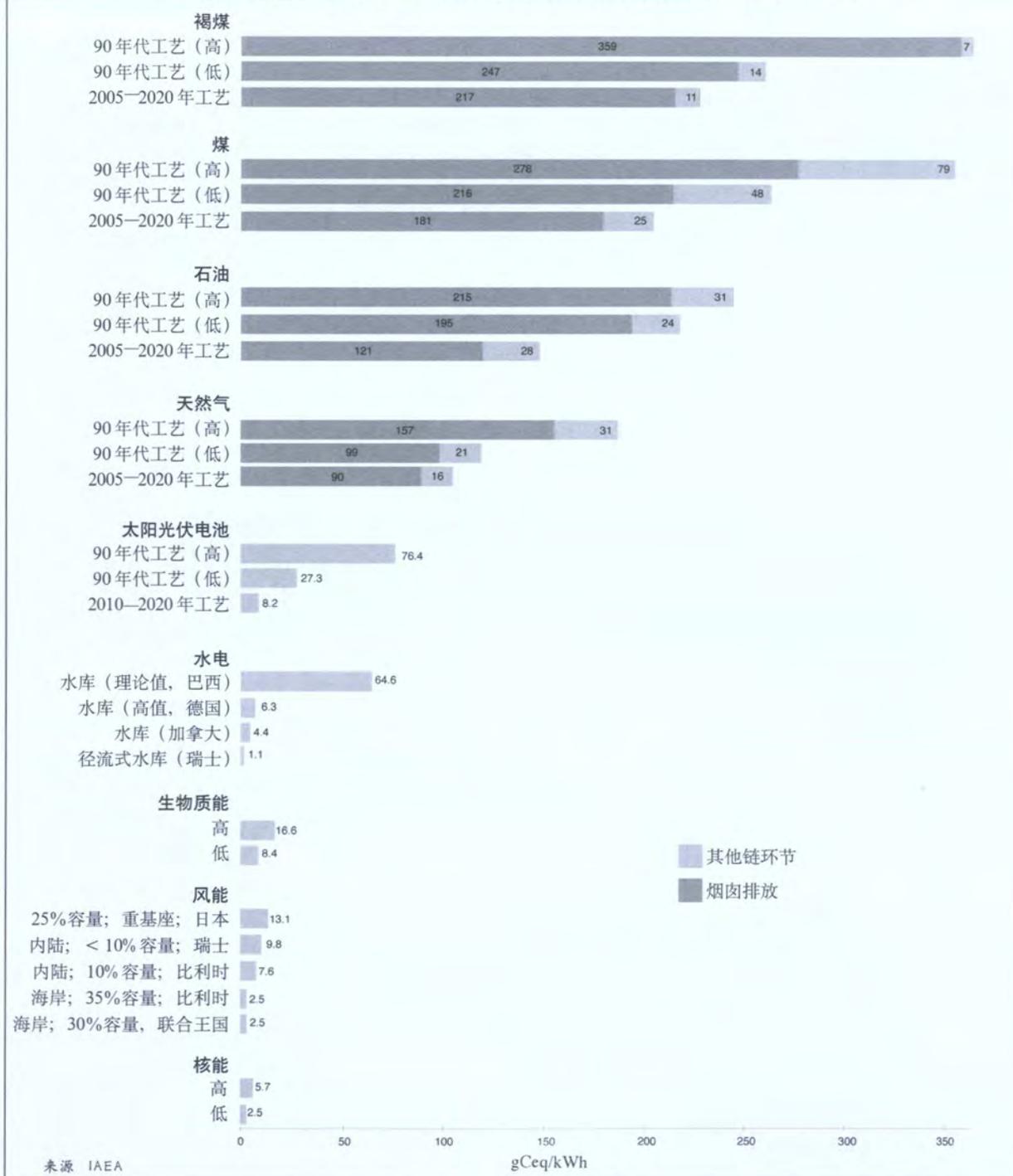
LCA 或是过程链分析(PCA)有时要由投入—产出分析(IOA)加以补充。这种分析考虑参与生产最终产品的不同经济部门所造成的间接排放,例如在处理过程、机械设计和劳动力方面所用的电力。

忽略这些投入,由于人为缩小了分析的系统边界,而导致低估环境后果。例如,用 IOA 计算的化石燃料温室气体排放率比用 PCA 得到的要高 30%。对于核动力来说,偏差可能更加显著,能相差一倍。

分析的系统边界

比较不同的能源系统时,选择系统边界至关重要。例如,忽略化石燃料循环上游和下游的活动,能使 GHG 总排放率低估 5%至 25%。对于核动力和可再生燃料来说,在发电这一环节没有

各种电力生产链温室气体总排放量的变化范围



GHG 排放,但是在燃料采
矿、制备和运输、电厂建造和
退役、设备制造和有机物腐

烂期间却存在着大气排放。
排放水平明显依赖于电厂
工艺和厂址的地理位置选择。

将“从头到尾”所有环节
考虑在内进行全能源链
(FENCH)计算,或许是比较

不同发电燃料和不同发电工艺的气候和环境负担的最公平的办法。分析能力和常识将最终决定系统边界的选择。排放强度最起码应包括燃料供应链和电力生产阶段,对于核能和可再生能源来说还应包括电厂建造和材料要求方面的贡献。一种更详细的分析可将系统边界一直扩展到能量的终端利用,即下延到电器这一层次。

对于在较低层次上的像风能、太阳能和水能之类的间歇发电工艺,存在所分析的系统是否应包括后备(第二)电源的问题。最好的办法是分别计算主系统和后备系统的排放。其优点有三。第一,根据给定工艺的利用情况,严格确定主系统的排放。第二,可以彻底弄清年可用率(每年运行时数)的影响。第三,允许对不同的后备方案进行比较。

全球趋暖势

全球趋暖势(GWP)是对大气中某种气体相对与一种参考气体(通常假定为二氧化碳)而言捕获地球表面辐射热的能力的一种度量。各种气体在大气中的寿命相差悬殊,因此结果要对不同

时间间隔进行积分。通常选取的时间段为100年。

下面给出的是各种全球趋暖势的最新估计值(100年时间段)。这些数据是国际气候改变委员会针对电力生产链排放的最常见的温室气体计算得到的:

- 二氧化碳(CO_2)=1;
- 甲烷(CH_4)=21;
- 一氧化二氮(N_2O)=310;
- 六氟化硫(SF_6)=23900;
- 四氟代甲烷(CF_4)=6500;
- 含氢氟烃(HFC): HFC-134a=1300;
- 含氯氟烃(ClFC): ClFC-114=9300;
- 含氢氯氟烃(HClFC): HClFC-22=1700。

转化效率

燃料到电力的转化效率和电厂负荷因子都对燃料燃烧时GHG的排放率有影响。在转化效率或负荷因子提高时,GHG排放系数降低。 CO_2 的排放取决于燃料的碳含量和转化效率; N_2O 的排放率主要由工艺因素决定;而甲烷的排放主要与化石燃料供应方法相联系。粗略地

说,排放率与转换效率成反比。在效率刚好为40%时,效率再提高1%,GHG排放率就减少2.5%。当效率更低时,排放率的减少更加明显;而当效率更高时,则会有相反的变化。热效率总是随负荷因子的降低而降低,并且这种变化高度依赖于工艺。

当前正在运行的系统的典型转换效率的变化范围如下:烧褐煤电厂,27%—40%;烧煤电厂,30%—45%;烧油电厂,34%—43%;烧天然气电厂,35%(峰荷供电)—55%。低效率电厂通常位于发展中国家。

从中期发展来看,对于可得到的最好工艺,预期转换效率的变化范围对烧煤电厂为50%—55%,对于烧气电厂为60%—65%。

对核燃料和可再生燃料而言,动力转换方面的改进将对环境排放产生较小的影响,因为没有烟囱排放,其他排放只与燃料供应、电厂建造和材料制造有关。实际上,随着更新的工艺产生更高的效率,燃料需要和总排放量将会不断减少。

未来发电系统

更新的和效率更高的工

影响排放率的诸多因素

GHG 排放率受诸多因素影响。下面概要给出每种燃料类型的主要参数。

化石燃料

- 燃料特性,如含碳量和热值;
- 矿山的类型和位置;
- 燃料提取方法(影响运输要求和甲烷排放);
- 天然气的输送损失;
- 转化效率;
- 满足燃料供应和电厂建造/退役相关的电力需要而选定的燃料构成。

水能

- 类型(径流或水库蓄水式);
- 电站位置(热带还是北方气候);
- 筑坝使用的能量;
- 电站建造(混凝土和钢)造成的排放,它决定了径流式和“阿尔卑斯式”(山间)水库的温室气体总排放量。对于表面一容积比高的(一般位于加拿大和芬兰等北方地区)和热带湿润地区(巴西)的大型水库来说,温室气体排放率受到在发大水时淹没的生物质的腐烂和地表沉积物的氧化(造成大量 CH_4 排放)的影响。对于“北方式”水库来说, CO_2 的排放率至少比 CH_4 的高 10 倍。

生物质能

- 原料性质(含水量和热值);
 - 用于满足原料需要(生长、收获和运输)的能量;
 - 作物种植技术。
- 生物质燃烧的二氧化碳排放系数是平衡的。这意味着生物质燃烧时排出的碳等于作物生长时为维持生命所摄取的碳。

核能(轻水反应堆)

- 燃料提取、转化、富集和建造/退役(加上材料)所使用的能量;
- 用气体扩散法富集燃料,这是一种高能耗工艺,其 GHG 排放比用离心法富集高一个数量级。
- 富集阶段造成的排放,取决于当地燃料构成,因国家而异,差别显著。
- 燃料后处理(铀的氧化物或混合氧化物),其排放可占核能总 GHG 负担的 10%—15%。

风能

- 风翼制造和装置(塔和基座)建造所使用的能量;
- 电力构成和建造法规,因国家和场址(例如是内陆装置还是海岸装置)不同而可能有很大差异;
- 每年的发电量或容量因子(取决于场址自然条件),它决定了装置的运行频度(可用率)。在估计发电间歇度时,平均风速是关键参数(风速提高 50%,年发电量约可增加一倍)。

太阳能电池(PV)

- 制造电池所用硅的数量和品级;
- 工艺类型(无定形材料还是结晶材料);
- 装置类型(屋脊式还是直立式);
- 为满足电力需要选定的燃料构成;
- 装置的年发电量和假定寿命,它们是在计算每 kWh 排放时的重要因素(对于风能也是如此)。太阳能和风能每 kW 的排放较低,但容量因子较低使其每 kWh 排放具有高值。

艺将不可避免地替代目前的系统,尽管在中短期(下一个 10—20 年)内预期在工业化

国家中电力生产工艺不会有全面彻底的改变,因为在能源工艺和基础结构方面已经

投入大量资金。对发展中国家来说,新能源系统的发展还不太清楚,因为这些

国家面临着与经济、社会、政策和环境问题有关的困难选择。

缓解环境问题的压力以及经济和政治因素,将推动改进工艺的采用以及生物质能、风能和太阳能等可再生能源的推广使用。

对于化石燃料系统,最大的改变将来自现有工艺转化效率的提高(例如联合循环运行)、天然气输送过程中甲烷泄漏率的降低、燃料开采中甲烷回收率的提高、对燃料化学性质的控制(例如通过洗煤提高煤的热值)以及电厂位置的优化(以尽量减少燃料运输造成的排放和电力输送损失)。专家估计,欧洲今后烧化石燃料系统的排放率可比目前的排放率低35%—50%。

对于核电来说,主要改进将涉及放弃能耗巨大的气体扩散工艺而改用离心法(或激光工艺)富集燃料、提高转化效率、扩大采用燃料后处理和核电工艺今后的进步(见第43页和51页相关文章)。

水轮机工艺的改进将影响来自水电的排放,而对间歇发电系统来说,材料和部件要求的降低以及转化效率的改变将使其实绩得到提

高。这一点反过来又将降低成本和排放率。水电站地理位置的选择以及装置的类型,将仍然是重要的问题。

结论

GHG 由于干扰了地球大气层与外层空间之间的自然热交换过程,有可能影响全球气候的改变。《京都议定书》的签署证明,降低大气中的 GHG 浓度已经成为一个需要优先处理的国际问题。议定书规定,在2008至2012年期间,工业化国家(附件I)承诺的排放量将比1990年的水平降低约5%。

为了达到所提出的降低目标,有多种技术方案可供实施。至于与电力生产有关的排放,近期最重要的因素或许是提高燃料循环所有阶段的能量利用效率,包括燃料的制备和运输、在电厂内燃料到电力的转化效率,以及在终端使用环节上的电力到特定能量形式的转化效率(这里未考虑此问题)。

降低在燃料开采和天然气输送时甲烷排放的策略关系重大。改用低含碳或低碳燃料,例如天然气、核能和可再生能源,在降低排放方面将起很大的作用。这些改变

利用当前的知识和经验在技术上是可行的,只要求消费者的生活方式稍有改变,且资金周转合理(天然气和核能带基荷发电,而可再生能源进入适当市场或带峰荷发电)。

本文介绍了用 FENCH 方法得到的不同燃料的 GHG 排放系数资料。这种方法试图量化电力生产“从头到尾”所有环节发生的环境排放。燃化石燃料的工艺排放系数最高,燃煤比燃天然气排放系数一般高一倍。

考虑到燃料到电力的转化工艺千差万别,可以说化石燃料发电的 GHG 排放系数比目前的太阳光伏电池系统的高一个数量级,比核能和水能高两个数量级。风能和生物质能链的 GHG 排放估计值在太阳能和核能相应值之间。

任何一种工艺,只要与能量供应和使用相联系,不管它是电力生产、运输还是其他,就不可能没有 GHG 排放问题。这个重要结论怎么强调也不过分。然而,对于不同的方案,排放系数可能有十分显著的变化。这一事实肯定会影响选择何种电厂进入今后国家能源系统的决策过程。 □