

适用于可持续认证的生物质能温室气体排放核算方法

付萌^{1,2}, 常世彦^{2,3*}

1. 清华大学低碳能源实验室, 北京 100084

2. 清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心, 北京 100084

3. 清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084

摘要 能源领域可持续认证标准要有温室气体(greenhouse gas, GHG)排放核算方法作为支撑。中国尚未开发适用于生物质能可持续认证的GHG排放核算方法。本文梳理了GHG排放核算的一般方法, 基于国外生物质能可持续政策要求与认证标准的相关方法学, 识别出核算方法的关键要素。在对中国研究层面生物质能生命周期GHG排放核算不同认识进行梳理和讨论的基础上, 提出了适合于中国可持续认证的核算方法的建议。

关键词 生物质能; 温室气体; 排放核算方法

生物质能作为低碳、可再生资源, 可以减少化石燃料需求和温室气体(greenhouse gas, GHG)排放。发展生物质能已成为世界各国重要的能源战略。2017年全球生物质能消费量约为13.29亿吨油当量, 约占全球能源消费量的9.5%^[1]。

在生物质能规模化发展的同时, 生物质能产业可能引发的生态环境问题引起了广泛关注^[2]。例如, 巴西甘蔗的大规模种植是否会破坏亚马逊热带雨林的生态环境^[3-4], 生物质产品的加工过程是否

会造成水污染等问题^[5]。为促进生物质能产业以可持续方式发展, 一些国家和地区出台措施对生物质能开发利用的可持续性进行规范和管理^[6-8], 生物质能可持续性认证体系是广泛采用的一种方式。例如, 欧盟委员会2009年制定了《可再生能源指令(EU Renewable Energy Directive 2009/28/EC, RED)》, 对用于交通运输、电力和供暖领域的生物燃料提出了可持续性要求^[9], 并且自2011年7月起陆续批准15个生物燃料可持续性认证计划^[10]。

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2020-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0211903); 国家自然科学基金项目(71673165, 71690244, 51711520318)

作者简介: 付萌, 工程师, 研究方向为能源系统分析与政策, 电子信箱: fumeng@mail.tsinghua.edu.cn; 常世彦(通信作者), 副研究员, 研究方向为能源系统分析与政策, 电子信箱: changshiyan@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 付萌, 常世彦. 适用于可持续认证的生物质能温室气体排放核算方法[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 51-59; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.006

在生物质能可持续政策要求和认证标准中, GHG 排放是其核心内容之一。中国于 2018 年正式发布了《生物质能可持续性认证要求(RB/T175—2018)》, 这一标准是中国能源领域第一部可持续性认证标准, 涵盖了环境、社会和经济 3 个维度的可持续性指标, 对生物质能 GHG 排放有明确的要求^[11]。但是, 目前这一标准中缺乏配套的生物质能 GHG 排放核算方法作为支撑, 因此本研究即围绕生物质能 GHG 排放核算方法展开, 梳理常用 GHG 排放核算方法, 以国际生物质能可持续政策和认证标准的相关方法学为基础, 识别出生物质能 GHG 排放核算方法的关键要素, 对目前中国研究层面的不同认识进行讨论基础上, 提出核算方法开发的主要建议。

1 GHG 排放核算方法

根据核算边界的不同, GHG 排放核算方法可以分为 3 类: 国家(区域)层面、企业层面以及项目(产品系统)层面的核算方法^[12-13]。

1.1 国家(区域)层面的 GHG 排放核算方法

国家(区域)层面的核算方法通常以地理或行政边界为核算边界, 核算这一层面的 GHG 排放总量和结构, 可用于识别 GHG 减排的重点领域, 为制定国家(区域)层面 GHG 减排目标和实施途径提供支持。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)编写了《国家温室气体清单指南》, 从能源、工业过程和产品使用, 农业、林业和其他土地利用, 废弃物以及其他几个部门核算国家 GHG 排放^[14]。

1.2 企业层面的 GHG 排放核算方法

企业层面的 GHG 排放核算方法一般以企业法人或视同法人的独立核算单位为边界, 核算边界内生产系统的 GHG 排放, 可以帮助企业进行 GHG 排放核算, 制定排放控制计划。中国已发布发电、钢铁、化工等 24 个重点行业企业的 GHG 排放核算方法与报告指南, 以及 12 个重点行业企业的 GHG 排放核算与报告要求标准, 为建立企业 GHG 排放报告制度、完善 GHG 排放核算体系和开展碳排放权

交易等工作提供了支撑。

1.3 项目(产品系统)层面的 GHG 排放核算方法

项目(产品系统)层面 GHG 排放核算方法主要有清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)方法学和生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法学等。CDM 方法学由 CDM 执行理事会批准, 用于预估项目的 GHG 减排量。LCA 方法学由国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)等提出, 强调对产品系统生命周期全过程的 GHG 排放进行量化描述。LCA 强调贯穿产品生命周期全过程, 从获取原材料、生产、使用直至最终处置, 因此 LCA 方法会跨越企业边界, 甚至是国家(区域)边界。

2 生物质能全生命周期 GHG 排放核算方法的关键要素

LCA 是生物质能产品环境影响评价最有效的方法之一^[15-16]。全球生物质能认证体系基本是以 LCA 为主要核算方法。但是, 以 LCA 为基本方法的生物质能 GHG 排放核算中, 不同政策和认证标准在具体方法学的设置上有一定差异, 会对 GHG 排放评价结果产生较大影响。例如, 2012 年, Khatiwada 等利用美国加利福尼亚州《低碳燃料标准(Low Carbon Fuel Standard, LCFS)》和欧盟 RED 核算方法, 对采用完全相同的种植模式和生产工艺的巴西甘蔗乙醇进行了评价, 结果差异很大, GHG 排放分别为 66.4 和 23.97 gCO_{2eq}/MJ^[17]。主要原因是作者基于 LCFS 方法考虑了土地利用变化对甘蔗乙醇 GHG 排放的影响, 而在利用 RED 方法核算时并没有计算土地利用变化产生的排放。即使在同一个方法体系下, 对特定环节的界定也有待明确。例如, Whittaker 等基于 RED 方法对英国小麦乙醇 GHG 排放进行核算, 结果为 37.6 和 63.3 gCO_{2eq}/MJ^[18]。评价结果的差异主要源于对乙醇加工过程中产生的酒糟蛋白饲料(distiller's dried grains with solubles, DDGS)的不同考虑。如果将 DDGS 视为加工过程的副产品, 采用能量分配法对副产品进行分配, 分配后的小麦乙醇 GHG 排放为 37.6

gCO_{2eq}/MJ;如果将DDGS视为剩余物,按照RED规则,剩余物无需分摊GHG排放,那么小麦乙醇的GHG排放为63.3 gCO_{2eq}/MJ。

可以发现,生物质能生命周期GHG核算方法中有一些关键要素,这些关键要素对评价结果影响较大。以下基于全球主要生物质能可持续政策和认证标准的调研,对关键要素加以识别和梳理。

2.1 系统边界

生物质能生命周期GHG排放核算,一般会选取从原料获取到其终端利用的全过程作为研究边界。但是,由于生命周期链条复杂,为了研究的简便,很多核算方法都会假设其中部分GHG排放可以忽略。仿照成本核算的分类,Graboski将全生命周期中能源投入分为可变能源投入和资本能源投入两类。可变能源投入代表能源投入与实际的产出之间直接相关的部分,而资本能源投入主要是指基础设施、设备等投入中的能源投入^[19]。可以忽略的能源投入主要体现为资本能源投入。

通过调研RED、LCFS、国际可持续性碳认证(International Sustainability and Carbon Certifica-

tion, ISCC)、可再生交通燃料规范(Renewable Transport Fuel Obligation, RTFO)和可持续生物质圆桌倡议组织(Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB)的方法发现,除RSB外,多数方法认为基础设施建设或农业机械、生产设备、运输工具等设备制造过程产生的GHG排放占总排放的比例较小,可以不将其纳入系统边界^[20-25]。RSB开发的适用于全球认证的核算方法中提出需要考虑基础设施,但在其开发的适用于欧盟RED认证的核算方法中明确不考虑基础设施。

2.2 分配方法

分配是指将过程或产品系统中的输入和输出流划分到所研究的产品系统以及1个或更多的其他产品系统中^[26]。在生物质能生命周期GHG排放核算中,需要根据一定的分配方法将生命周期单元过程的物质流、能量流以及相应的GHG排放分配到副产品中。常用的副产品分配方法包括质量分配法、能量分配法、市场价值分配法和替代法等^[27-28](表1)。

表1 生物质能副产品分配方法的比较

分配方法	定义	缺点
质量分配法	根据质量在生物质能产品及其副产品之间进行分配	当副产品的产量较高时,会导致副产品分配较高的GHG排放量。如在生产燃料丁醇的过程中,副产品丙酮占丁醇产量的50%以上 ^[29]
能量分配法	基于能量含量对生物质能产品和副产品之间进行分配	对于非燃料产品,例如食物,其能量通常用于表征其营养价值,与燃料热值有一定差别 ^[30]
市场价值分配法	利用生物质能产品及其副产品的相对市场价值进行分配	会受市场价格波动的影响 ^[31]
替代法	根据与副产品功能相当的替代产品全生命周期的化石能耗来进行分配	替代法具有不确定性和复杂性,副产品的利用方式不同,副产品所替代的产品也会不同 ^[32-33]

不同认证体系对分配方法的选取会有所不同。RED建议对所有生物燃料都采用能量分配法。与RED相同,RTFO方法学采用能量分配法对副产品进行分配。而LCFS采用替代法作为副产品分配方法。不同认证体系也会根据区域政策要求灵活调整分配方法,例如,RSB开发的适用于欧盟

RED的方法学就采用能量分配法,而对其他区域亦可采用市场价值分配法。

副产品是同一单元过程或产品系统中产出的非主产品的产品。在考虑副产品GHG排放分配方法时,还有一个技术难点是如何界定副产品与剩余物(或废弃物)。LCA方法中通常会默认剩余物(或

废弃物)可以不参与GHG排放分配,但是对如何区分副产品和剩余物(或废弃物)并没有明确规定。例如,对乙醇加工过程中产生的DDGS应按照副产品还是按照剩余物加以考虑,就没有明确的界定。对于以秸秆等农林业剩余物为生物质能的原料,其在农作物种植阶段所排放的GHG是否需要纳入全生命周期GHG排放核算在各种方法学里有一定差异。RED、RTFO、ISCC和RSB方法学都将秸秆视为农作物种植阶段的剩余物(或废弃物),未考虑其GHG排放分摊。而LCFS方法学将秸秆视为副产品,考虑了秸秆在种植阶段的GHG排放。

2.3 土地利用变化

如何刻画土地利用变化的影响是目前生物质能GHG排放核算的一个难点问题,存在较大的不确定性。一般而言,土地利用变化包括直接土地利用变化和间接土地利用变化。直接土地利用变化是指由于种植能源植物而导致土地用途直接改变所产生的排放,例如将草地用于种植能源植物所导致的GHG排放;而间接土地利用变化则主要指农林业植物用途变更为能源植物后所间接导致的GHG排放,例如,原本作为粮食的玉米转而用于生产生物燃料,则需开发其他土地用于种植粮食来加以补充,从而导致的间接土地利用变化^[34]。Searchinger等对美国玉米乙醇的全生命周期GHG排放进行了评价,他们于2008年发表在《Science》的研究结果显示,考虑了土地利用变化的玉米燃料乙醇GHG排放为177 g CO_{2eq}/MJ,远远高于没有考虑土地利用变化的GHG排放(74 g CO_{2eq}/MJ)^[35]。

一些可持续政策要求和标准认证体系已将土地利用变化引起的GHG排放纳入到核算边界。但是,间接土地利用变化导致的GHG排放具有较大不确定,一般都较晚才纳入。欧盟在2009年发布的标准中没有给出土地利用变化产生的GHG排放默认值,但是考虑了直接土地利用变化产生GHG排放,并给出计算公式,在2018年的修订标准中增加了由间接土地利用变化产生GHG排放的默认值^[20]。加利福尼亚州LCFS标准给出间接土地利用变化产生的玉米燃料乙醇GHG排放量默认值为

30 g CO_{2eq}/MJ,约占加利福尼亚州玉米乙醇总排放的24%~40%^[36]。

2.4 默认值

默认值是核算方法的重要组成部分,一般包括3种类型:1)不同生物质能生命周期GHG排放默认值;2)生物质能生命周期GHG排放核算过程中重要参数的默认值;3)与生物质能相比较的参考产品系统的GHG排放默认值。

1) 生物质能产品GHG排放默认值。

生物质能产品GHG排放默认值是企业没有能力开展实测或不需要开展实测时所默认采取的排放值。RED提供了24种交通用生物燃料全生命周期的GHG排放默认值,LCFS方法提供了20种。

2) 关键参数的默认值。

GHG排放核算中涉及大量参数,一些关键参数对核算结果影响较大,包括燃料热值、GHG排放因子和转化效率等。ISCC对生命周期投入能源的排放因子和热值等参数的设置出自Biograce和Ecoinvent数据库。LCFS计算过程中的关键参数主要来自美国阿岗国家实验室在GREET(greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation)模型基础上开发的CA-GREET。

3) 参考产品系统的排放默认值。

生物质能生命周期GHG排放核算的参考产品系统通常为化石燃料。国外可持续政策要求或认证标准中一般会给出化石燃料参考系统的默认值,用以核算生物质能相对应的减排量。例如,生物液体燃料通常以汽油或柴油作为参考产品系统。LCFS和RED方法下给出的汽油生命周期GHG排放量分别为95.85和83.8 g CO_{2eq}/MJ,两者相差约12 g CO_{2eq}/MJ。产生差异的原因是LCFS按照美国加利福尼亚州平均水平核算,而RED是按照欧盟平均水平进行核算。

综合来看,系统边界、副产品分配方法、土地利用变化和默认值设定等关键要素对生物质能GHG排放具有较大影响。表2对比分析了国外可持续生物质能标准关于GHG排放的主要关键要素^[2]。

表2 国外可持续生物质能政策或标准中GHG排放核算的关键要素

政策/标准	适用地域范围	GHG排放核算方法	功能单位	替代化石燃料GHG排放/g CO _{2eq} ·MJ ⁻¹	系统边界	副产品分配方法	土地利用排放均摊年限/年	土地利用变化的基准日期	直接土地利用变化	间接土地利用变化	GHG最低减排强度
低碳燃料标准 LCFS ^[21]	加利福尼亚州	CA-GREET	g CO _{2eq} /MJ	95.85 [*] 94.71 ^{**}	不考虑基础设施建设/设备制造过程的排放	替代法	30	—	考虑	考虑	10%
可再生能源指令 RED ^[20]	欧盟	RED GHG	g CO _{2eq} /MJ	83.8 [*] 83.8 ^{**}	不考虑基础设施建设/设备制造过程的排放	能量分配法	20	2008.1	考虑	考虑	35%(2017年之前); 50%(2017年以后); 60%(2018年新建)
可再生交通燃料规范 RTFO ^[23]	英国	RED GHG	g CO _{2eq} /MJ	83.8 [*] 83.8 ^{**}	不考虑基础设施建设/设备制造过程的排放	能量分配法	20	2008.1	考虑	考虑	同RED
国际可持续性碳认证 ISCC ^{***[22]}	全球	ISCC GHG	g CO _{2eq} /MJ	83.8 [*] 83.8 ^{**}	不考虑基础设施建设/设备制造过程的排放	能量分配法	20	2008.1	考虑	未考虑	同RED
可持续生物质圆桌倡议组织 RSB ^{***[24]}	欧洲	RSB GHG	g CO _{2eq} /MJ	83.8 [*] 83.8 ^{**}	不考虑基础设施建设/设备制造过程的排放	能量分配法	20	2008.1	考虑	未考虑	同RED

注: *汽油作为参考产品系统; **柴油作为参考产品系统; ***ISCC 和RSB会根据不同区域的政策要求开发不同的方法学,这里主要指专用于欧盟 RED认证的核算方法。

3 适合于中国可持续认证的生物质能GHG核算方法的关键要素

3.1 中国可持续认证中生物质能GHG核算方法开发面临的主要问题

中国《生物质能可持续性认证要求(RB/T175—2018)》中要求生物质能生命周期温室气体排放应低于所替代的化石能源的生命周期温室气

体排放,并且给出了GHG排放核算的参考标准为《ISO/TS 14067 温室气体产品碳足迹量化与信息交流的要求与指南》。但是,由于缺乏具体的生物质能GHG核算方法标准,目前可持续性认证要求在GHG排放核算方面尚不具备可操作性。

开发适用于中国可持续认证的生物质能GHG排放核算方法,需要考虑中国国情和生物质能行业发展情况,也要考虑国际生物质能GHG排放核算

的一般原则和方法。国外主要生物质能可持续政策和认证标准中的关键要素对中国核算方法学的开发也相当重要,需要对系统边界、副产品分配方法、土地利用变化和默认值等进行明确设定。

当前中国生物质能生命周期 GHG 排放核算仅限于研究层面,不同研究在生物质能 LCA 核算方法上存在较大差异。因此,如何在关键要素的设定上做到兼具科学性和普适性,在中国生物质能产业、政府和消费者等利益相关者间达成一定共识,是适合于中国可持续认证生物质能 GHG 排放核算方法开发面临的主要问题。以下对中国生物质能 LCA 核算相关研究中涉及的关键要素进一步展开讨论。

3.2 关键要素的讨论

1) 系统边界。

对于基础设施建设和设备制造过程的 GHG 排放如何核算,中国学者的研究有一定差异。大部分研究认为这部分排放对于 LCA 总排放影响较小,可以排除在系统边界之外^[37-40]。也有学者对这部分排放加以考虑。例如,田望等考虑了乙醇工厂建设的排放,估算基础设施建设过程产生的 GHG 排放约占纤维素乙醇总排放的 10%^[41]。郭敏晓考虑了农机、运输工具等设备制造过程的排放,结果显示这部分排放约占生物质直燃发电总排放的 2%^[42]。

此外,对生命周期不同阶段能耗和 GHG 排放占比较低的其他环节,也有一些不同考虑。例如,高慧等在甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放的研究中,考虑了甜高粱种植过程中化肥投入部分能源投入和 GHG 排放,但并未考虑生产甜高粱乙醇所必需的添加剂和催化剂在其本身生产过程中所产生的 GHG 排放^[43]。

综合看,是否将基础设施、设备制造等环节纳入生命周期 GHG 排放核算,本文认为应该遵循 LCA 的取舍准则(cut-off criteria),可以根据物质质量占比,能量占比或环境影响重要性来加以取舍。是否纳入某一环节的 GHG 排放,与评价对象的具体特征有关。可以将不纳入基础设施和设备制造作

为一般方法加以设定,同时对特定技术路线可以进行特别规定。

2) 分配方法。

在生物质能产品生产过程中,将 GHG 排放部分地分配给其副产品,可以在一定程度上降低生物质能产品的排放水平,从而提高相对于化石能源参考系统的减排绩效。对于是否应该考虑副产品分配,以及不同分配方法对 GHG 排放的影响,中国学者开展了大量研究。目前,中国学者普遍认同副产品加以分配的思路,并且对分配前和分配后的 GHG 排放绩效进行了量化对比。例如,戴杜等对玉米乙醇的副产品植物油和 DDGS 采用市场价值法进行分配,分配后的乙醇相对于不进行副产品分配时,排放下降 36.7%^[44-45]。侯坚将生物柴油生产过程 GHG 排放放在生物柴油和副产品甘油之间进行能量分配,分配后的 GHG 排放降低 4.4%^[46]。但是,采用哪种分配方法,目前尚未形成一致性认识。

对于是否考虑秸秆的 GHG 排放,中国学者的研究也有一定差异。一些学者并未考虑秸秆 GHG 排放。例如,赵兰等利用玉米秸秆为原料,分别进行了秸秆沼气集中供气和秸秆成型燃料的 LCA 评价,都未考虑秸秆排放^[47-49]。一些学者将秸秆在种植阶段排放的 GHG 纳入到核算边界内。例如,霍丽丽等对玉米秸秆成型燃料的 LCA 排放进行了分析,考虑了秸秆在种植阶段的排放,结果显示,秸秆的排放占原料种植阶段排放的 30%^[50]。林琳等在秸秆直燃发电 LCA 评价中,考虑了秸秆在原料种植阶段的 GHG 排放,约占原料种植阶段的 39%^[51]。

可以看出,副产品分配方法的选取对排放结果存在较大差异。综合考虑国际可持续政策和认证标准,推荐将能量分配法作为一般方法加以设定,同时对特定技术路线可以进行特别规定。

3) 土地利用变化。

土地利用变化对 GHG 排放的影响是一个较为复杂的体系,中国在土地利用变化的量化上具有基础数据缺乏和标准化方法学缺失等诸多不确定因素。因此,现阶段建议仅考虑直接土地利用变化对生物质能 GHG 排放的影响。间接土地利用变化可

在加强研究的基础上,逐步纳入。

4) 默认值。

默认值是构建生物质能 GHG 排放核算方法的重要内容。中国生物质能生命周期 GHG 排放核算需要针对生物质能产品全生命周期 GHG 排放默认值、核算过程中主要参数的默认值以及参考产品系统的 GHG 排放默认值开展深入系统研究。

4 结论与建议

为促进生物质能的可持续发展,中国已经出台《RB/T175—2018 生物质能可持续性认证要求》,应当尽快开发标准化的生物质能 GHG 排放核算方法学。

本文梳理了常用 GHG 排放核算方法,明确了 LCA 是适用于生物质能 GHG 排放核算的主要方法,以国际生物质能可持续政策和认证标准的相关方法学为基础,识别出生物质能生命周期 GHG 排放核算方法的关键要素。最后,分析了中国生物质能生命周期 GHG 排放核算的主要问题,对目前中国研究层面的不同认识进行了梳理和讨论,给出以下建议。

1) 在系统边界的设定上,应遵循 LCA 的取舍准则,可以将不纳入基础设施和设备制造作为一般方法加以设定,同时可以对特定技术路线进行特别规定。

2) 在分配方法的选取上,推荐将能量分配法作为一般方法加以设定,同时可以对特定技术路线进行特别规定。

3) 在土地利用变化的核算上,建议现阶段仅考虑直接土地利用变化,在加强研究的基础上,将间接土地利用变化逐步纳入。

4) 建议着重开展默认值体系的构建,包括中国生物质能产品全生命周期 GHG 排放默认值、GHG 排放核算过程中主要参数的默认值以及参考产品系统的 GHG 排放默认值。

参考文献(References)

[1] IEA. Renewables information (2019 edition)[R]. Paris: In-

ternational Energy Agency, 2019.

[2] 常世彦, 康利平. 国际生物质能可持续发展政策及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2017(11): 9-18.

[3] Goldemberg J, Guardabassi P. Are biofuels a feasible option[J]. Energy Policy, 2009, 37(1): 10-14.

[4] Gao Y, Skutsch M, Drigo R, et al. Assessing deforestation from biofuels: Methodological challenges[J]. Applied Geography, 2011, 31(2): 518.

[5] Martinelli L A, Filoso S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: Environmental and social challenges [J]. Ecological Applications, 2008, 18(4): 885-898.

[6] Scarlat N, Dallemand J F. Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview[J]. Energy Policy, 2011, 39(3): 1630-1646.

[7] 康利平, Robert E, 安峰, 等. 国际生物燃料可持续标准与政策背景报告[R]. 北京: 能源与交通创新中心, 2013.

[8] Dam J V, Junginger M, André F, et al. Overview of recent developments in sustainable biomass certification[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(8): 749-780.

[9] European Parliament, Council of the European Union. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC[S]. European Union: Official Journal of the European Union, 2009.

[10] European Commission. Document of overview table on updates for recognized voluntary schemes[EB/OL]. (2019-07-09)[2019-09-18]. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/voluntary_schemes_overview_july_2019.pdf.

[11] 中国国家认证认可监督管理委员会. RB/T 175—2018 生物质能可持续性认证要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[12] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.

[13] 陈红敏. 国际碳核算体系发展及其评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9): 111-116.

[14] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013: 25-29.

[15] Muench S, Guenther E. A systematic review of bioenergy life cycle assessments[J]. Applied Energy, 2013(112): 257-273.

[16] Cherubini F, Birg N D, Cowie A, et al. Energy- and greenhouse gas- based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations[J]. Resour Con-

- servation and Recycling, 2009(53): 434–447.
- [17] Khatiwada D, Seabra J, Silveira S, et al. Accounting greenhouse gas emissions in the lifecycle of Brazilian sugarcane bioethanol: Methodological references in European and American regulations[J]. Energy Policy, 2012 (47): 384–397.
- [18] Whittaker C, Mcmanus M C, Hammond G P. Greenhouse gas reporting for biofuels: A comparison between the RED, RTFO and PAS2050 methodologies[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 5950–5960.
- [19] Graboski M S. Fossil energy use in the manufacture of corn ethanol[R]. Washington D. C.: National Corn Growers Association, 2002.
- [20] European Parliament, Council of the European Union. Directive 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources[S]. European Union: Official Journal of the European Union, 2018.
- [21] California Air Resources Board. Low carbon fuel standard[S]. California: California Air Resources Board, 2010.
- [22] International Sustainability Carbon Certification. ISCC 205 greenhouse gas emissions[S]. Germany: International Sustainability Carbon Certification System GmbH, 2016.
- [23] Department for Transport. Renewable transport fuel obligation guidance part two carbon and sustainability[S]. United Kingdom: Department for Transport, 2020.
- [24] Roundtable on Sustainable Biomaterials. RSB GHG calculation methodology[S]. Switzerland: Roundtable on Sustainable Biomaterials, 2017.
- [25] Roundtable on Sustainable Biomaterials. RSB standard for EU market access[S]. Switzerland: Roundtable on Sustainable Biomaterials, 2018.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24044—2008/ISO 14044: 2006 环境管理 生命周期评价 要求与指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [27] Shapouri H, Duffield J A, Graboski M S. Estimating the net energy balance of corn ethanol[R]. Washington D. C.: US Department of Agriculture, 1995.
- [28] Gnansounou E, Dauriat A, Villegas J, et al. Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 4919–4930.
- [29] Wu M, Wang M, Liu J, et al. Life-cycle assessment of corn-based butanol as a potential transportation fuel[R]. US: Argonne National Laboratory, 2007.
- [30] Liu H Y, Qiu T. Comparative study on LCA co-product allocation method of bioethanol production in the development from sweet sorghum stem[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2018(44): 1765–1770.
- [31] Yu S R, Tao J. Energy efficiency assessment by life cycle simulation of cassava-based fuel ethanol for automotive use in Chinese Guangxi context[J]. Energy, 2009, 34 (1): 22–31.
- [32] Kim S, Dale B E. Allocation procedure in ethanol production system from corn grain: I. System expansion[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(4): 237–243.
- [33] 高慧, 胡山鹰, 李有润, 等. 甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 186–191.
- [34] Berndes G, Bird N, Cowie A. Bioenergy, land use change and climate change mitigation[R]. Paris: IEA Bioenergy Exco, 2011.
- [35] Searchinger T, Heimlich R, Houghton R A, et al. Use of US Croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change[J]. Science, 2008, 319(5867): 1238–1240.
- [36] Andress D, Nguyen T D, Das S. Low-carbon fuel standard—Status and analytic issues[J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 580–591.
- [37] 柴智勇. 基于GREET模型的车用生物质燃料能耗及排放研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [38] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 等. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 102–106.
- [39] 谢小天. 生物质固体成型燃料技术路线生命周期环境影响评价[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- [40] 肖锋. 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期评价[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [41] 田望, 廖翠萍, 李莉, 等. 玉米秸秆基纤维素乙醇生命周期能耗与温室气体排放分析[J]. 生物工程学报, 2011, 27(3): 516–525.
- [42] 郭敏晓. 风力、光伏及生物质发电的生命周期CO₂排放核算[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [43] 高慧, 胡山鹰, 李有润, 等. 甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 186–191.
- [44] 戴杜, 刘荣厚, 浦耿强, 等. 中国生物质燃料乙醇项目能量生产效率评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 121–123.

- [45] Dai D, Hu Z Y, Pu G Q, et al. Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(13): 1686–1699.
- [46] 侯坚. 化学法生产生物柴油的能耗与温室气体排放评价——以餐饮废油为原料[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [47] 赵兰, 冷云伟, 任恒星, 等. 大型秸秆沼气集中供气工程生命周期评价[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(34): 19462–19464.
- [48] 朱金陵, 王志伟, 师新广, 等. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 262–266.
- [49] 林成先. 煤与秸秆成型燃料的复合生命周期对比评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [50] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(12): 1875–1880.
- [51] 林琳, 赵黛青, 魏国平, 等. 生物质直燃发电系统的生命周期评价[J]. *水利电力机械*, 2006, 28(12): 18–23.

Calculation of greenhouse gas emission in bioenergy sustainability certification

FU Meng^{1,2}, CHANG Shiyang^{2,3*}

1. Low Carbon Energy Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Rio Tinto Research Center for Resource, Energy and Sustainable Development, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The calculation of the Greenhouse Gas (GHG) emissions is an important component in the sustainability certification of the energy product, but so far without an adequate methodology consistent with the certification requirements of the bioenergy sustainability in China. This paper presents the key elements involved in the GHG emission calculation for the bioenergy sustainable certification. Firstly, the general method of the GHG calculation is briefly presented. Then, based on the review of the methodologies of the bioenergy sustainability standards developed by the institutions in the world, the key elements of the calculation methodology are identified and analyzed. Finally, the paper analyzes different understandings in the current LCA analysis in China and makes preliminary suggestions on developing the GHG calculation methodology of the bioenergy for the sustainability certification in China.

Keywords bioenergy; greenhouse gas; calculation methodology ●



(责任编辑 傅雪)