

生物质独特的负碳排放作用是碳减排的利器

程序

中国农业大学农学院, 中国农业大学生物质工程中心, 北京 100193

摘要 生物质能是全生命周期分析意义上的碳“零排放”能源, 然而其独特的负碳排放作用还鲜为人知。阐述了生物质负碳排放效应发生的机制, 全球和中国的理论潜力; 探讨了生物质负碳排放的几种切实可行途径, 特别是通过减排作为主要温室气体的生物源甲烷达到负碳排放的途径; 指出生物(性)碳存留远远优于地质碳封存且现实可行。国际气候变化界对包括负排放在内的生物质温室气体总体减排效应寄予很大的、甚至被称为控制全球温升 1.5°C 愿景“唯一”的希望。生物质对温室气体减排重大作用在中国被严重忽视的局面必须尽快改观。

关键词 生物质; 负碳排放; 生物甲烷; 生物性碳捕获和存留; 温室气体减排

2015年《巴黎协定》(The Paris Agreement)第四条提出, 要在21世纪下半叶, 在人为源的温室气体排放与汇的清除量之间取得平衡, 这一目标对应的就是净零排放。将全球温升稳定在一个给定的水平, 意味着全球“净”温室气体排放需要大致下降至零。即在进入大气的温室气体排放和吸收的汇之间达到平衡, 这一平衡通常被称为中和(neutrality)或净零排放(net-zero emissions)。由于目前人为温室气体排放的大部分是CO₂, 因此在各国提出的中和或净零排放目标中, 也常用碳来代指温室气体。除CO₂外, 温室气体还有甲烷(CH₄)和氮氧化

合物(N₂O), 其增温效应分别是CO₂的28倍和310倍。可以用CO₂当量(CO₂eq)来统一计量。

生物质能是全生命周期分析(LCA)意义上的碳“零排放”能源, 这一点已广为人知; 但迄今生物质独特的负碳排放(carbon-negative emission)作用在国内则几乎未被人们认识和谈及。事实上, 对于温室气体尤其CO₂高排放的团体(企业、地区或国家), 要想达到碳中和的宏伟目标, 除了要靠大幅度减少碳排放量, 也需要用负排放产生的减量, 来抵消相当一部分的排放量; 更进一步说, 国际气候变化界特别重视的是, 通过负碳排放将大气中已积累

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-03-21

作者简介: 程序, 教授, 研究方向为生物质能源, 可持续农业与农村发展, 电子信箱: chengxu@cau.edu.cn

引用格式: 程序. 生物质独特的负碳排放作用是碳减排的利器[J]. 科技导报, 2022, 40(7): 44-53; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.07.005

的CO₂“吸出”并加以固定,从而增大控制全球升温的可能性。生物质独特的负排放作用是迄今为止任何一种温室气体减排手段都不具备的,值得引起高度重视。

根据国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新发表的报告,如果要实现《巴黎协定》的“1.5℃温升愿景”,即到21世纪末,把全球因温室气体浓度升高而引发的温度升高值控制在1.5℃以下,负排放技术(negative emissions technologies, NETs)不可或缺,这些负排放技术也是实现碳中和和实现零排放的关键^[1]。

1 生物质独特的负碳排放作用的提出及其重要性

1.1 生物质负碳排放概念的提出

国际上负碳排放的概念大约是在21世纪初由一些学者提出的。早在2006年,美国学者Tilman在《Science》撰文指出^[2],通过在废弃和退化的农地上混播多年生牧草,不但可以收获用作生产乙醇的生物原料,还可因牧草的地上部茎叶、特别是大体量的地下根部生物量,获得CO₂净吸收并封存(于土壤)的负碳排放效应。每公顷每年可永久性地封存4.4 t的CO₂。

2006年,瑞典学者Bojesson发现^[3],用有机废弃物如秸秆、生活污水处理产生的剩余污泥和粪便等制取沼气并用作车用燃料,可获得非常显著的负碳排放效应。经计算,以每获得1 MJ的做功能量排放的CO₂量计,可达-65 g,而汽油、柴油则为75~80 g(图1)。

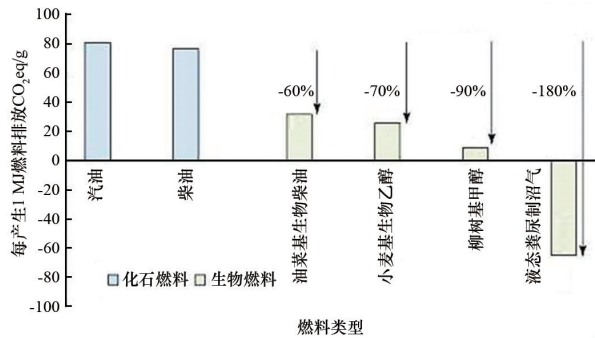


图1 生物基车用甲烷与化石燃油的CO₂排放量对比

2006年,英国学者在一份关于生物质发电的专门报告中^[4],对附加了捕获发电过程排放的CO₂、并加以地质封存(CCS)技术作了全面分析,得出生物质负碳排放效应十分显著的结论。例如以每发电1 kW·h计,用废弃锯末压缩成型的颗粒与煤耦合发电(对煤的替代率为95%),排放的CO₂ eq是-1204 g,用芒草和能源柳等种植的生物质直燃发电是8~50 g,而用煤则高达927 g(图2)。

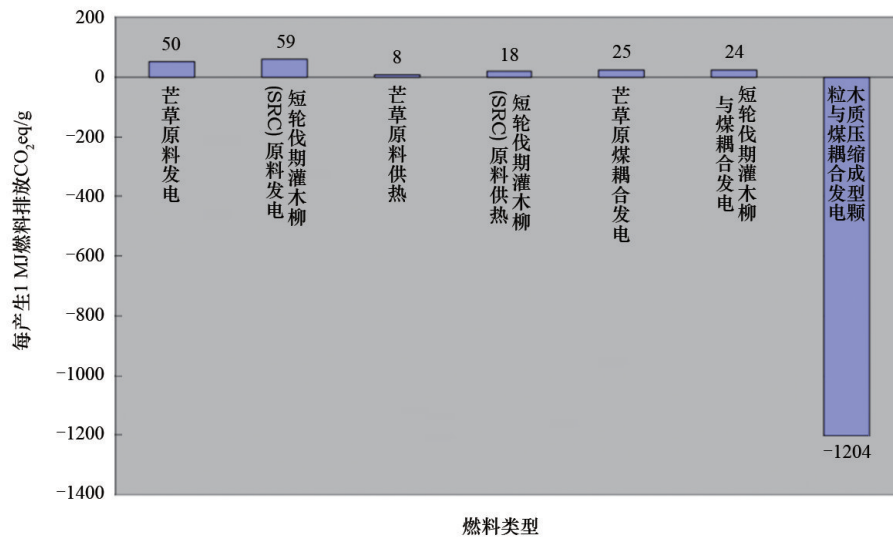


图2 生物质与煤耦合发电/供热温室气体排放率(CO₂ eq/kW·h)对比

2007年,欧洲的ECOFY集团对用沼气发电与其他发电能源的CO₂排放情况作对比^[5],发现以每获1 kW·h的电力计,用煤炭要排放800~1000 g的CO₂;即便风能和光伏也要排放60 g的CO₂;而如果用废弃生物质制成的沼气作燃料(热电联产),则产生-414 g CO₂eq的负排放量(图3)。原因一是替代掉800 g的CO₂,二是有414 g CO₂eq的负排放,合计约-1200 g的CO₂eq。

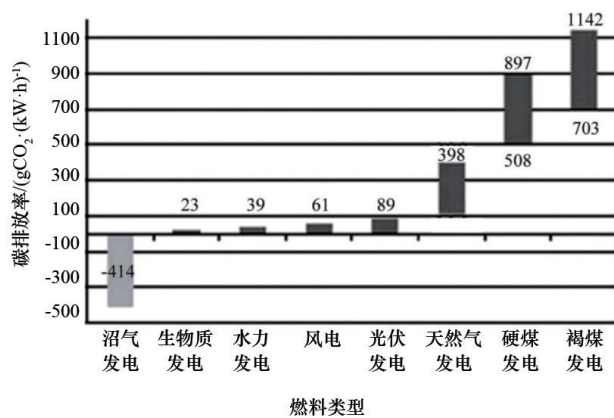


图3 沼气与其他能源发电温室气体排放量的全生命周期分析比较

1.2 生物质负碳排放的重要意义

国际气候变化界对生物质能和碳捕获/封存以及负碳排放寄予厚望。分析其原因,一是2019年全球大气中CO₂浓度已经达到体积分数为410.5×10⁻⁶。考虑到这些年来CO₂的体积分数一直在以年增约3×10⁻⁶的速率上升,对比本世纪末全球温升控制在2°C以下所对应的CO₂体积分数(需<470×10⁻⁶)可看出,仅靠减排碳是远远不够的。还必须有能够将大气中已有的CO₂永久移出的措施,即国际气候变化界非常看重的所谓“碳移除”(carbon dioxide removal, CDR)。这个过程的实质是碳的负排放而非减排。

生物质就具有这样的独特本领:通过植物和某些微生物吸收空气中的CO₂,而后生物残体进入土壤,碳即能以腐殖质形式长期保留于土层之中;也可以是能源利用排放的CO₂被捕获(收集)后,用于种植植物(CO₂施肥)和养殖藻类被吸收后,存在于生物质中;或以物理方式捕获后在地层中存留。这些生物存留做法的最终结果,是将大气中已存在的

碳“吸出”,而后长期(或永久)封存起来。这是任何非生物性碳减排措施所不具备的功能。

避免生物质分解释放沼气甲烷也具有温室气体负排放作用。国际能源署(IEA)新的分析表明,如果完全实现迄今为止的所有净零碳排放承诺,并且签约国履行“全球甲烷承诺”,可以让世界将全球变暖限制在1.8°C以内^[6]。

1.2.1 生物性碳捕获存留技术

生物性碳捕获存留(bioenergy with CO₂ capture and storage, BECCS)是一类典型的负碳排放技术。它可将CO₂从大气中“吸除”并存留起来,从而切实降低大气中CO₂的浓度,意味着温室气体的负排放。

IPCC在2013年的第五次评估报告(Fifth Assessment Report, AR5)中,高度评价BECCS是“极少有的、能将近几百年来被大气吸收积存的CO₂吸出/移走的技术”^[7]。IPCC在2011年关于可再生能源的特别报告(SRREN 2011)中,首次单列专门章节阐述BECCS重要性。在为将本世纪末全球CO₂浓度控制在0.043%~0.048%范围、以确保本世纪末全球温升控制在2°C乃至1.5°C而提出的116个设想情景(scenarios, 对策方案)中,绝大多数均要依靠BECCS等碳净负排放技术,才能实现在2100年前累计从大气中“移出”约616 Gt CO₂eq的目标。IPCC在2018年《全球升温1.5°C》特别报告中指出^[8],全球每10年升温(0.2±0.1)°C。按照这一趋势,仅2030年到2052年之间的升温就将达到1.5°C。为此,必须尽早使温室气体“零排放”,对策是实现“负排放”措施。报告模拟了4种温室气体减排的途径。目标都是到2100年累计减排10000亿t的CO₂eq。但唯有P4途径情景即大力推行BECCS等碳净负排放技术,才能够到2100年累计减排12180亿t CO₂eq。

1.2.2 生物质的负碳排放潜力

据国际气候变化界估测^[9],全球BECCS“吸/存”CO₂eq的能力可达80~100亿t/年。约相当于当今全球年CO₂排放总量的1/4。其中,非CO₂温室气体的年负排放量占到35亿t CO₂eq。

美国能源部专家分析认为^[10],中国要想实现

2060年碳中和这一目标,必须依靠大规模实施负碳排放,每年减少25亿t CO₂eq。加上通过碳直接捕获(direct air capture, DAC,包括生物质能应用、植树及碳捕获封存)每年减排15亿t CO₂eq。合计每年减少40亿t CO₂eq排放。

2 生物质负碳排放的机制和主要方式

2.1 生物质负碳排放的机制

应用生物质产生负碳排放效应,主要有2种机制。其一是避免或减少生物质在自然状态分解腐烂时形成的CH₄和CO₂并加以利用。任何生物质在被废弃或植物、动物和微生物死亡后,如果处于堆积或填埋造成的厌氧环境中,都会被厌氧微生物逐步分解,最终变成CH₄、CO₂和SO₂等气体。典型的如粪便沼气发酵,在产生的混合气体中,CH₄、CO₂、SO₂等气体分别约占体积的60%、35%、5%。图4^[4]显示了有机废弃物的分解过程中碳形态变化和CH₄、CO₂产生的数量比例。每100 kg(干重)生物质在自然(填埋/堆积)状态下腐烂分解,释出73.8 kg CO₂和18.3 kg CH₄。按CH₄的CO₂eq计算,相当于390.6 kg CO₂eq;合计释出464.4 kg CO₂eq。采取措施控制有机废弃物在自然状态下厌氧发酵,对所产生的甲烷加以利用以避免直接大气排放,就能收

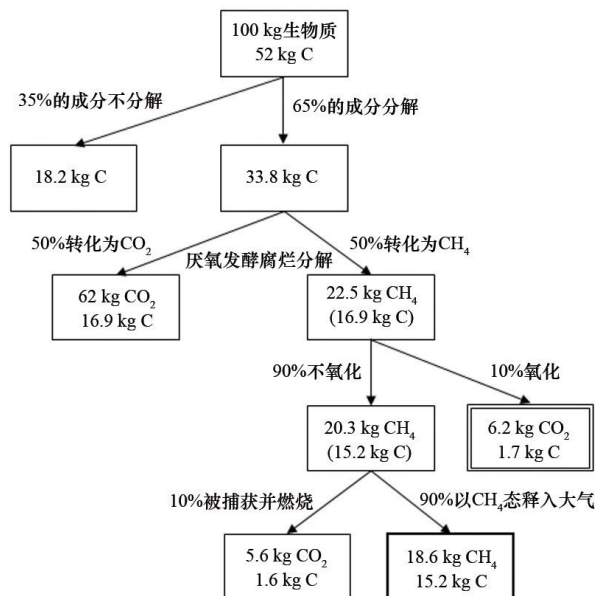


图4 有机废弃物的分解过程中碳形态变化

到负碳排放的效果。另一类负碳排放机制则是生物(质)碳存留。与当前热议中的物理方式碳地质封存(将捕获的CO₂高压打入数千米深的地下废矿井)完全不同,是通过植物光合作用从大气中吸收CO₂,以碳水化合物为主的形态贮存在植物体、动物体和某些微生物中,它们死亡后在土壤中转化为腐殖质或加工成为生物炭(bio-char)、以有机肥和土壤改良剂形态存在土壤中,可以保持数百上千年不分解。

2.2 生物质负碳排放——生物性碳存留的主要方式

2017年,IEA发布《能源技术展望2017:加速能源技术变革》报告^[11]。提出了以下8种负碳排放途径。(1) BECCS;(2) 造林;(3) 生物质制生物炭(biochar)并用作土壤改良剂;(4) 改良农业种植方式;(5) 通过工程措施从空气中直接从空气中捕捉CO₂后加以利用(CCUS),或封存在深层废矿井中;(6) 增强矿物碳化;(7) 向海洋施(铁)肥以增加海生生物活动多吸碳;(8) 通过向海洋中添加碱以从大气中吸收碳。可以看出,第1~4种属于生物质存留,而第5~8种则是地质性封存。

物理方式的CO₂捕获加地质封存是迄今讨论最多的。但由于成本过高和高能耗,加上体量有限,实际可行性很差。据美国能源部(DOE)国家能源技术实验室(NETL)^[12]的数据,全世界已提议或建立了300多个各种类型的CCUS项目。尽管得到了广泛的支持,这些项目在很大程度上还是失败了。在寻求将碳捕获和封存技术商业化的项目中,有80%的项目都以失败告终。

在国内,由于成本过高,CCS项目迄今还只神华集团煤制油厂一家^[13]。而且注入的CO₂总量也不过12万t左右,还不到该厂排放量的1%。

至于增强矿物碳化,向海洋施(铁)肥以及向海洋中添加碱等,更只停留在文章讨论中。因此,真正切实可行的,是以生物质加碳捕获封存为首、充分发挥生物质独特作用——生物性碳存留的4种途径。

2.3 BECCS

迄今为止,最为成熟的BECCS之一、也是负碳排放体量潜力最大的,是生物质直接/与煤耦合发

电、而后捕获发电过程产生的碳加以利用和存留。

在中国,燃煤发电和供热取暖,运输用油以及生物质分解排放 CH_4 是碳排放的4大源头。其中又以煤电为最,一个产业就占了全国 CO_2 年总排放量的52%!减排的首要重点应放在发电用燃煤的替代上。当前,虽然风电和光伏电发展迅速,但由于先天“不稳定”性质决定,装机量虽很大而实际发电量并不大。在相当时期内不可能成为发电的主力;而且还离不开火电(主要是煤电)的相应配套支撑。因此煤电的“压舱石”作用须臾不能缺少。提高能效、压低单位煤耗虽然能减排一定量的 CO_2 ,但作用是有限的。迄今为止,煤电大规模碳减排的唯一可行途径,是已被英国、芬兰和丹麦等国实践证明的生物质与煤耦合发电(生物质掺烧的比例可以从5%~100%)^[14-15]。

耦合发电用的生物质有2类:即用废弃农、林生物质(如锯末)加工的压缩颗粒和种植的能源植物如蒿柳(*Salix viminalis*)。前者能直接产生负碳排放效应;后者则只是“零碳排放”燃料。在计算掺烧比例和统计碳排放量时,取值是不同的。但即便是种植的生物质,只要是耦合发电后产生的 CO_2 是加以捕获和存留的,也会产生负碳排放效应。用废弃农、林生物质耦合煤发电加 CO_2 捕获和存留,会获得累加的负碳排放效应。如同前述英国学者在报告中给出的数字(-1204 g $\text{CO}_2\text{eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)。

据清华大学环境学院、美国哈佛大学及伯克利能源实验室等科学家组成的联合团队,2019年发表的对中国碳排放和大气污染的影响及其经济效益的研究报告,当往煤中掺混35%生物质量时,生物质耦合煤发电再加上碳捕获封存(CBECCS)系统,即可实现电力生产全生命周期的零碳排放。如果全面推行该系统,利用全国25%的农作物秸秆,可替代18.1%的总发电量,年减少8.8亿t CO_2eq ^[16]。

2.4 生物质制生物炭生物封存碳

生物质在某些特定的温度、氧含量和压力条件下,会转化为生物炭。例如在热解(炭化阶段 800°C ;缺氧)时形成生物炭。其特点是碳的状态极稳定,可以数百年不分解;由于生物炭携带大量有机碳通过有机肥或土壤改良剂形态进入土壤深层,

能将碳长期甚至永久固定,起到理想的生物碳存留作用。整个生产-利用过程呈典型的负碳排放特征。因此受到国际气候变化界的高度重视。

中国学者张齐生和周建斌等^[17]提出,采用热解技术,实行生物质“热、电、气、肥、炭”五联产,每1t生物质气化后可以发电约800 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (替代0.28t煤),减排 CO_2 0.63 t;得到的生物炭固定了约0.25t碳(CO_2 0.60 t),产生的可燃气发电并最终变成 CO_2 排放量0.55 t。因此,每1t生物质联产技术利用后的 CO_2 净排放为: $0.55\text{ t}-0.63\text{ t}-0.60\text{ t}=-0.68\text{ t}$ 。一座6 MW的生物质电厂,一年使用秸秆/竹片量约9万t,可减排 CO_2 6万余t。对比中国常规煤电的 CO_2 排放率约1000 g/($\text{kW}\cdot\text{h}$)计,合计每使用1t生物质,可减排 CO_2 0.65 t、并获得0.9 t负排放的 CO_2eq 。

2.5 植树和种植能源植物

植树是生物质固碳的重要方式,其负碳排放的作用在不同的环境下有差异。正如IEA在2017年《能源技术展望》报告的原注中指出:由于林木在生长期间吸收的 CO_2 在树木砍伐/死亡后又被分解释出。以及由于在不同气候条件下分解的速率和程度不同,植树(A/R)在寒带地区有明显的碳负排放效应;在温带效果差;在热带则基本无效。细致考察发现,原因是寒带的树木生长期所吸收的 CO_2 ,在树木凋亡后会以叶、枝、干和根的形式进入土层;在低温条件下,它们不易发生分解,而是会逐渐转化为难以分解的腐殖质或泥炭等,从而将碳长期封存起来。而在温带特别是热带地区,树木吸收固定大气中 CO_2 的效果是有限期的。除了残留的枝叶和根会很快分解外,树干部分及制成品在过了数年或数十年后,所吸存的 CO_2 也会随着木质的各种形式发生风化、分解,回到大气中去。

中国适宜种乔木树林的土地面积是有限的,主要的限制因子是降水量。在经过多年大规模植树造林之后,今后要继续扩大面积,主要应向“边际土地”(marginal land,指废弃和退化农地,不适宜种植粮、棉、油,但能种植能源植物的土地),包括沙化土地、沙地、荒漠和荒山等拓展。然而这些地区除了土壤十分贫瘠、难以形成高大植被外,最关键的限

制因子,是绝大部分年降水量低于 400 mm 这个乔木生长的阈值。20 世纪 90 年代“退耕”被提上议事日程后,主管部门曾一度只提“退耕还林”。但在应退耕面积很大的“三北”地区,多数地方的年降水量不足 400 mm,并不适宜种树。经科技人员力争后,方改为“退耕还林、草”。

20 余年来的实践证明,尤其是一些豆科的灌木和草类,如柠条、沙棘、刺槐、巨芒草等,由于具有强大的根系(有的根可扎入 3~4 m 深的土层),因而高度耐旱;而且根、蘖的再生能力很强;多年生的特性使其在北方频发的春旱条件下能照常萌发;属豆科的灌木和草类则能够自生固氮,克服土地贫瘠的制约。因而成为“退耕”的优选品种和主力。中国边际土地的总面积以十亿 hm^2 计,这就为大力发挥负碳排放对碳减排乃至碳中和的积极作用,提供了坚实的基础。

最后,对植树在国的固碳作用也要有客观、科学的估计,不宜夸大,更不能只讲植树,忽视其他方面的生物质固碳潜力。据国家林草局 2019 年出版的《中国森林资源普查报告》,中国森林碳汇为 4.34 亿 t/a ; 换算成 CO_2 也只有 12 亿 t/a 。而中国 2019 年全口径温室气体排放总量是 140 亿 t 。其中化石能源 CO_2 排放是 102 亿 t 。

2.6 废弃有机物和能源植物制沼气-生物天然气

沼气的主要成分是 CH_4 , 一般含量为 50%~65%, 其次是 CO_2 , 含量为 30% 左右。通过提纯, 可制得 CH_4 含量 90% 以上的生物天然气, 与常规天然气没有区别。

CH_4 是重要的温室气体, 其大气增温效应占全部温室气体的 20%~25%。除了稻田、牛消化和煤矿开采排放 CH_4 之外, 秸秆丢弃/焚烧、堆放/填埋有机质含量达 50%~60% (干基) 的生活垃圾、随便堆弃畜禽粪便和农、林产物加工废弃物、剩余污泥等, 都会在自然状态下厌氧发酵产生 CH_4 , 排放到大气中。

当前中国的各种有机废弃物的丢弃和随便堆埋的情况仍比较普遍。根据麦肯锡 (McKinsey & Company) 的最新报告《应对气候变化: 中国对策》^[18], 中国的温室气体排放量约占全球总量的 20%, 2016 年净排放量达 160 亿 $\text{t CO}_2\text{eq}$ 。其中, CO_2 排放占

62%, CH_4 几乎占 30%, 其他温室气体占 8%。

沼气-生物天然气在减排温室气体和负碳排放方面有着多重效应: (1) 利用有机废弃物制造的沼气, 可在很大程度上避免这些有机废弃物如果不处理利用、会在自然堆埋状态下发酵产生的 CH_4 ; (2) 有机废弃物厌氧发酵在生产沼气的同时, 还会产生相当量的沼液和沼渣。尤其是沼渣, 含有经微生物剧烈作用后形成的碳基木质素衍生物, 作为肥料进入土壤后, 可历经数十年或更长时间不分解, 从而把所含碳生物性存留于土壤中; (3) 规模化利用沼气作气、液体生物燃料, 必须对沼气作提纯, 分离出所含 30%~40% 的 CO_2 而成为生物天然气 (生物 CH_4)。这就为集中处理利用 CO_2 提供了前提条件, 特别是用于培植含油微藻类生产很有希望的第三代生物燃油; (4) 生物天然气不论是气态或液态 (Bio-LNG) 燃料利用, 均比汽、柴油大幅减少尾气的 CO_2 排放。国际可再生能源中心的 Bassam 在其生物能源专著中指出, 在所有的生物燃料中, 生物天然气具有最低的 CO_2 足迹。以 LCA 分析法计算, 每产生 1 MJ 的作功能量所排放的 CO_2 , 汽/柴油为 80 g, 沼气为 -60 g。

如果达到国家能源局中期规划指标, 即年产 200 亿 m^3 生物天然气 (相当于 330 亿 m^3 沼气), 可发电 860 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$; 按 1 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 产生 414 g 的 CO_2eq 负排放当量计, 可产生年 3650 万 $\text{t CO}_2\text{eq}$ 的负减排效应。若按中国生物天然气的年总潜力 4000~5000 亿 m^3 计, 年减排潜力可达 7.3 亿~9.1 亿 $\text{t CO}_2\text{eq}$ 。

3 充分发挥生物质在负碳排放上的独特作用

要充分发挥生物质在负碳排放上的独特作用, 需要在新的生物性碳存留观念指导下, 制定激励政策, 确保生物质原料经济、可靠的供给, 以有力地推动经实践验证的负碳排放工程在中国的示范推广。

3.1 挖掘生物性碳存留的巨大潜力

“生物圈”是个巨大的碳库 (碳汇)。全球陆地生态系统每年形成的生物质量高达约 1600 亿 t 。所携能量远远超过化石能源的年消耗量。植物生

长和凋亡依附的土壤是地球化学碳循环(geochemical carbon cycle)一大碳库。其数量之巨,达大气的3倍之多。因此生物性碳封存潜力巨大。

碳的生物存留是一种真正具有实用价值的碳封存途径。当今通常所说的地质碳封存,在中国试生产成本高达400~500元/t CO₂,而且高耗能。对比之下,生物(性)碳封存则不会额外产生成本,而且数量潜力巨大。因此,要远比近期内国内外气候变化界热议中的地质碳封存CCS(包括加以利用的CCUS)切实可行得多。

在内蒙古毛乌素沙地,灌丛植物沙柳(*Salix psammophila*)能有效地拦住流动沙丘。由生物学特性决定,沙柳每隔2~3年必须平茬(切除根部15 cm以上枝条)一次,获得大量枝条落叶。毛乌素生物电厂在沙荒地上种植沙柳,建起4万hm²能源灌木基地,以平茬的沙柳枝条供6×12 MW(一期2×12 MW)发电厂作原料。工厂与农民签订种植协议,企业提供沙柳灌木苗和肥料乃至机械,农民扩大沙柳的种植面积。并把每年平茬割下来的枝条卖给企业。实现了企业与农牧民,生态效益和经济效益两个“双赢”。仅2003—2013年间,该模式绿化了沙漠240 km²。灌木基地每年可以产生36万t生物质燃料。

生物质电厂2008年11月并网以来,年发电2.1亿kW·h。经联合国指定的独立第三方认证,该项目每年碳减排量为25.6万t。更重要的是,该厂将从发电厂烟道中捕获的CO₂用于大面积(大棚)养殖螺旋藻(*Spirulina platensis*),加工成营养保健品。养藻大棚面积达650 hm²,每年可捕集发电产生的CO₂ 15万t。加上沙柳地下部的固碳量,每年可实现CO₂吸收50万~60万t。这种集减碳、固碳和用碳于一身的“三碳经济模式”,获得2012年联合国环发大会“20年防沙治沙特别贡献奖”^[19]。

3.2 大力推广燃煤耦合生物质发电

从20世纪末起,英国为完成《京都议定书》的减排承诺,制定强有力的激励政策,探索出煤电生物质耦合发电的途径。经过20多年的煤电生物质耦合混烧燃煤发电的实践,最终使全国所有的大型燃煤电厂全部改造成为生物质混烧。最典型的

是英国装机容量最大的Drax电厂。该电厂先前共装有6台660 MW燃煤机组。从2003年在一台机组上试混烧5%的生物质开始,不断增加生物质混烧比;煤电机组均改造成生物质混烧;最终实现了全部机组100%燃烧生物质颗粒燃料。成为世界上最大的生物质燃料火电厂^[15]。

由于能源资源和基础条件等原因,加上风电和光伏电的快速发展也离不开煤电的调峰,燃煤发电在中国仍要在相当长时段内起到电力“压舱石”作用。然而当前燃煤发电的碳减排已进入“瓶颈”阶段,即除了提高能效、降低煤耗外,几乎没有其他可行的手段。而且经过多轮改造,包括采用超超临界技术,燃煤电厂的单位发电量煤耗率已降到接近顶点,潜力已不大。燃煤耦合生物质发电将推动煤电向可再生能源发电的过渡,还起到推动风光电的加速与可靠地发展的保障作用。需要制定相应政策,推动煤电在高效低煤耗基础上的耦合混烧生物质发电,成为煤电低碳转型的重要举措。

3.3 充分利用有机废弃物,扩大生物质的资源基础

发挥生物质的负碳排放作用,既可以从有机废弃物的利用着手,也可以通过种植植物(包括养殖微生物)实现。中国有机废弃物资源十分丰富、秸秆、畜禽粪便、剩余污泥、林业(抚育、砍伐和加工)“三剩物”和城镇生活垃圾,数量达每年数十亿t。但当前的利用率很低,需要找准原因,尽快解决。其次,有机废弃物种类多,需要科学地分类利用。

3.3.1 排除制约沼气产业发展的障碍

作为沼气的主要原料之一的农作物秸秆,年产出逾10亿t,但目前能源利用率不足3%。沼气企业普遍不景气,赔钱是主要原因。为避免大面积焚烧秸秆,目前农业行政部门提倡秸秆还田,只是不得已而为之的权宜之计。实践已证明,秸秆还田有包括影响整地和播种质量、加重病虫害等一系列弊病;特别是秸秆入土不久便会迅速分解,造成大量CO₂释放到大气中。畜禽粪便,剩余污泥和部分有机垃圾(餐厨/厨余垃圾)也是制造沼气的原料,但也都存在处理利用率低的问题。

沼气-生物天然气产业在中国发展受到多种因素制约。最关键的是缺乏真正落地政策的支持。

一方面,城市有机废弃物被归结为“市政垃圾”,有专项处置经费。而农村产生的有机废弃物则无部门负责。沼气企业不但得不到处置费,还得倒过来花钱购买。由于原料成本要占总成本的约六成,因此企业普遍亏损,无法吸引投资进入行业;另一方面,作为新兴产业,国家对沼气-生物天然气行业的财政补贴始终没有到位。

有机废弃物总体上可分为干、湿2大类。迄今为止处理湿态有机废弃物、发挥其负碳排放功能最经济有效的方式是厌氧发酵附产沼气和沼渣/剩余污泥,而干态有机废弃物的理想方式则是加工压缩成型后,用以与煤炭耦合发电,或替代锅炉散煤供热供暖。为了获得更大的负碳排放效应,除了利用干态有机废弃物外,还要通过种植灌木、草类和林木,扩大生物质的资源基础。

3.3.2 种植林、灌木和草类

实施100%烧生物质燃料的英国DRAX发电厂,4台660 MW机组,每年要消耗1000万t生物质压缩颗粒。除了在电厂周边自辟蒿柳种植基地,以及在半径50 km范围内收集木质、秸秆类废弃物之外;不足部分还从美国进口。为此,工厂在美国也开辟有能源林种植和颗粒加工和储运基地。

中国边际土地面积远大于耕地。对适宜种植能源植物(灌木、草类)的3类边际土地即灌木林、疏林地和低覆盖度草地面积作精确测算,结果是1.79亿 hm^2 。如果种植代表性的能源灌木柠条和芒草,以每公顷年平均7~10 t(干物重)的生物量单产计,可年产12.5亿~17.9亿t生物质原料。

3.4 加大纳入碳排放权交易的甲烷减排份额

人类活动的 CH_4 排放占总量的60%左右^[20],近些年约为3.65亿t。其中40%来自农业生产(其中的75%来自牲畜肠道发酵和粪便,25%来自水稻种植),20%来自有机垃圾(垃圾填埋场和固体垃圾)。可见农林废弃物和生活垃圾占很大的份额,减排的潜力很大。

碳排放权交易是国家以市场手段对企业的碳排放额度进行调配。既控制碳排放总量,又鼓励企业通过优化能源结构、提升能效等手段实现减排。2021年7月,全国性的碳排放权交易市场启动。覆

盖的年排放量超过40亿t。然而首批纳入碳排放交易系统的2225家履约企业,都是年综合能耗在1万t标准煤以上的火力发电企业,其他行业和领域没有涉及。虽然2021年9月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》,明确将林业、可再生能源、甲烷利用等领域的自愿减排量(Chinese Certified Emission Reduction, CCER)项目纳入全国碳市场。但这份《意见》只覆盖了很少几个试点省市,而且规定冲抵配额占碳排放配额的比重过低(5%),加之当前农业领域(主要是沼气)列入的项目过少,起不到应有的示范作用。

3.4.1 CH_4 减排受国际气候变化界高度重视

2021年的《联合国气候变化框架公约》第二十六次缔约方大会(COP26)对 CH_4 减排给予高度重视,100多个国家签署了“全球甲烷承诺”协定,旨在到2030年使 CH_4 排放水平较2020年降低30%。特别是中国在会上发布的《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的联合格拉斯哥宣言》中提出,将制定一项 CH_4 国家行动计划,“争取在21世纪20年代取得控制和减少甲烷排放的显著效果”。

CH_4 之所以成为各国重点关注的对象。原因之一是它的温室效应强度远超 CO_2 。根据IPCC AR6最新评估, CH_4 的20年全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)为 CO_2 的82.5倍,100年的GWP为29.8倍。因此减排的力度很大。其次,仅凭现有的技术措施,就可以免费或低成本地将人为 CH_4 排放量每年减少20%左右;再其次,如实施更广泛的措施——它们的成本远低于常规减排措施(折合每单位 CO_2eq 为20美元,目前欧盟碳价约为60欧元^[21]),可以将人为 CH_4 排放量再减少约45%。生物质源 CH_4 减排措施即属于效益显著、技术现成、成本低廉的范畴。值得通过采取加大纳入碳排放权交易的 CH_4 减排份额等政策措施加以推进。

3.4.2 沼气项目纳入碳排放交易案例

类似排放权交易的 CH_4 减排在中国早有先例。山东民和牧业公司以鸡粪为原料、年产2万 m^3 沼气用于发电的工程,2009年起并网发电。该项目是中国在联合国气候变化框架公约清洁发展机制执行董事会注册的第一个特大型沼气工程“清洁发展

机制”(Clean Development Mechanism, CDM)项目, 每年可处理鸡粪 18 万 t、生产沼气 1095 万 m³、减排温室气体 6.7 万 t CO₂eq; 此外, 生产有机肥 25 万 t、发电 2190 万 kW·h。这个沼气工程的 CDM 项目买方为世界银行, 购买期限 10 年, 排放权年收益达 630 万元。遗憾的是, 迄今它仍是农业领域仅有的 CDM 项目^[22]。

4 结论

在“双碳”目标已成为国策的背景下, 如何践行中国对国际社会的庄严承诺, 是个严肃的课题。需要更新观念, 探索各种切实、有效的温室气体减排的途径。负碳排放是受到国际气候变化界高度重视的途径, CH₄ 减排也已排上优先的议事日程。在中国, 生物质独特的碳中和特性和负碳排放功能, 以及生物质碳存留尚未被广泛认识, 需要上上下下更新观念, 吸取国际成功经验, 珍视国内仅有的成功案例, 确定适合国情的途径并制定相应的规划及激励政策, 建立示范基地, 使生物质在碳中和和负碳排放的伟大事业中大放异彩。

参考文献 (References)

- [1] IPCC 全球升温 1.5℃ 特别报告[D]. (2018-10-08). <http://www.it-times.com.cn/a/it/2018/1010/23909.html>.
- [2] Tilman D, Hill J, Lehman C. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass[J]. *Science*, 2006, 314(5805): 1598-1600.
- [3] Börjesson P, Mattiasson B. Biogas as a resource-efficient vehicle fuel[J]. *Trends in Biotechnology*, 2008, 26(1): 7-13.
- [4] Woods J, Tipper R, Brown G, et al. Evaluating the Sustainability of Co-firing in the UK[J]. Report URN, 2006, 6: 1960.
- [5] Fritsche U R. What is driving bioenergy's exceptional upswing?[J]. *Agriculture & Rural Development*, 2007, 14(2): 22-24.
- [6] 全球变暖预测首次低于 2 摄氏度[EB/OL]. (2021-11-09). https://news.online.sh.cn/news/gb/content/2021-11/09/content_9850577.htm.
- [7] Jefferson M. IPCC fifth assessment synthesis report: "Climate change 2014: Longer report": Critical analysis[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2015, 92: 362-363.
- [8] IPCC's special report for renewable energy[EB/OL]. (2011-05-01). http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ipcc33/SRREN_FD_SPM_final.pdf.
- [9] Koornneef J, van Breevoort P, Noothout P, et al. Global potential for biomethane production with carbon capture, transport and storage up to 2050[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 6043-6052.
- [10] General economics[D]. New York: Cornell University, 2020.
- [11] IEA. World energy outlook[EB/OL]. (2017-10-09). <https://www.china5e.com/news/news-996944-1.html>.
- [12] Abdulla A, Hanna R, Schell K R, et al. Explaining successful and failed investments in US carbon capture and storage using empirical and expert assessments[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 16(1): 014036.
- [13] 中国神华煤制油化工公司. 神华 CCS 示范项目概况及展望[EB/OL]. (2013-07-05). <https://www.docin.com/p-1967974300.html>.
- [14] 倪维斗, 毛健雄, 李定凯, 等. 生物质能在我国实现碳达峰与碳中和的巨大潜力[N]. *中国电力报*, 2021-10-09.
- [15] 全球最大的生物质耦合发电厂英国 Drax 电厂[EB/OL]. (2020-07-19). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=167255-9268700507573&wfr=spider&for=pc>.
- [16] Lu X, Cao L, Wang H, et al. Gasification of coal and biomass as a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(17): 8206-8213.
- [17] 周建斌, 周秉亮, 马欢欢, 等. 生物质气化多联产技术的集成创新与应用[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(2): 1-8.
- [18] 麦肯锡应对气候变化中国对策[EB/OL]. (2020-06-12). https://www.sohu.com/a/401525357_651625?_trans_=00-0014_bdss_dktfyw.
- [19] Su Z H. Three-carbon economy" industrial sand-benefit analysisMaowusu practical exploration of biomass generation[EB/OL]. (2011-11-10). http://www.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-LSZG201107007.htm.
- [20] 联合国环境规划署. 《2021 年排放差距报告》[EB/OL]. (2021-10-26). https://www.sohu.com/a/497722262_650-444.

[21] 国际气候大会(COP26)为什么会重点关注甲烷[EB/OL]. (2021-11-11). <https://new.qq.com/omn/20211111/2021-1111A0552N00.html>.

[22] 民和中国首个特大型沼气 CDM 项目成功并网发电[EB/OL]. (2009-11-10). <https://news.bjx.com.cn/html/20091-110/233066.shtml>.

Biomass's unique effect of carbon negative emission is a sharp weapon for carbon emission reduction

CHENG Xu

Center of Biomass Engineering, College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract Fossil energy is the prime culprit for huge GHGs emission, covering almost 90 percent of the total amount. There has been a great deal of discussion about reducing GHGs in China, however, the biomass energy which is of carbon zero-emission characteristic has not been paid much attention. Furthermore, biomass's unique function of carbon negative emission is far from being recognized. This paper describes the mechanism of biomass's carbon negative emission and its theoretical potentials to China and the world. Several real practical and feasible ways, particularly the way of reducing biomass-derived methane, for carbon negative emission are probed. It is discovered that biomass-derived carbon sequestration is far superior to geological CO₂ storage, and highly feasible as well. The world climate change circle pays much attention to the biomass's function of GHGs emission and to the effects of its unique carbon negative emission in particular. Someone even calls it the last prospect for realizing the global 1.5°C scenario. The situation of severely ignoring biomass's great effects on GHGs reduction should be shifted as soon as possible.

Keywords biomass; carbon negative emission; bio-methane; BECCS; GHGs emission reduction ●



(责任编辑 徐丽娇)