

◆ 生物科学 ◆

有碳中和功能的水热炭复合肥技术路线^{*}龙思宇¹, 洗学权¹, 唐培朵¹, 曾军¹, 钱永球², 王磊³, 陈海珊³, 杜奇石^{1**}

(1. 广西科学院, 国家非粮生物质能源工程技术研究中心, 非粮生物质酶解国家重点实验室, 广西生物炼制重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 南通科源新材料有限公司, 江苏南通 226333; 3. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006)

摘要:本文提出了一种水热炭复合肥(Hydrothermal Carbon Compound Fertilizer, HCCF)技术路线,以农作物秸秆等农林废弃物为原料,采用水热法把生物质转化为富含腐殖酸的水热炭(褐煤),将其作为底物与氮、磷、钾等肥料成分复合,生产长效、缓释的水热炭复合肥。将该肥料施用于农田,可提高土壤肥力,改善土壤的团粒结构。水热炭复合肥是一种有商业价值的负碳产品,可以大规模生产,以提升土壤碳汇,储碳于田,促进碳中和目标达成,同时具有高产、环保和生态等多方面的效益,推进生态、有机和可持续农业的发展。

关键词:生物质 水热炭复合肥 碳中和 水热反应 土壤碳汇

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2022)04-0364-07

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyb.20221209.006

2015年12月12日,联合国气候变化大会达成了《巴黎协定》^[1,2],提出“把全球平均气温较工业化前水平升高控制在2℃之内,并为把升温控制在1.5℃之内而努力。”“全球将尽快实现温室气体排放达峰,21世纪下半叶实现温室气体净零排放。”我国属于发展中国家,经济仍处在发展期,目前我国二氧化碳排放量持续增长,自2006年以来,中国一直是世界上二氧化碳排放量排名第一的国家^[1,3]。根据文献统计数据,2020年世界各国二氧化碳排放量的分布见图1^[4-6],2020年,中国二氧化碳的排放量占世界各国的比重为31%,是第二大二氧化碳排放国(美

国,14%)的两倍多,印度(7%)排第三,而这前3个国家的总排放量超过了全球二氧化碳排放量的一半。碳达峰是指在规定的期限内,碳的排放量达到历史峰值,然后开始下降。碳中和是比碳达峰更高层次的目标,通俗的解释就是通过人工调节与控制,使排放到大气中的二氧化碳与从大气中回收的二氧化碳达到平衡。

1850-1900年世界工业化前大气的二氧化碳浓度为0.028%,到目前已超过0.041%^[7,8]。近年来,二氧化碳排放量持续增长的趋势并没有得到明显改

收稿日期:2022-03-17

修回日期:2022-07-29

* 广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA075042),广西科学院科研发展基金项目(2021YFJ1209,2021YFJ1208)和广西科学院基本科研业务费项目(2018YJJ908)资助。

【作者简介】

龙思宇(1984-),女,副研究员,主要从事生物基材料的制备及应用研究。

【**通信作者】

杜奇石(1945-),男,教授,主要从事理论化学和生物质资源高值化利用研究,E-mail:duqishi@foxmail.com。

【引用本文】

龙思宇,洗学权,唐培朵,等.有碳中和功能的水热炭复合肥技术路线[J].广西科学院学报,2022,38(4):364-370.

LONG S Y, XIAN X Q, TANG P D, et al. Technology Route of Hydrothermal Carbon Compound Fertilizer with Carbon Neutrality Function [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2022, 38(4): 364-370.

善,加速实现碳达峰,特别是实现碳中和的目标刻不容缓。许多专家指出,如果仅采用常规的技术手段,那么在《巴黎协定》规定的期限内,就无法实现预期的目标,因此必须研发出更先进的技术,采取更有效的措施。2015年,法国农业部认为农业(包括畜牧业)90%的减排份额可以通过土壤固碳来实现,提出了“千分之四全球土壤增碳计划”^[9,10]。相比较而言,呼声很高的碳捕获、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)方案^[11-14],提出直接从空气中捕捉二氧化碳,再加以浓缩、运输、加压、冷冻和固化,并将其封存在地下或再利用,但该技术复杂、成本高,达不到大规模运营的水平,前景尚难预料。

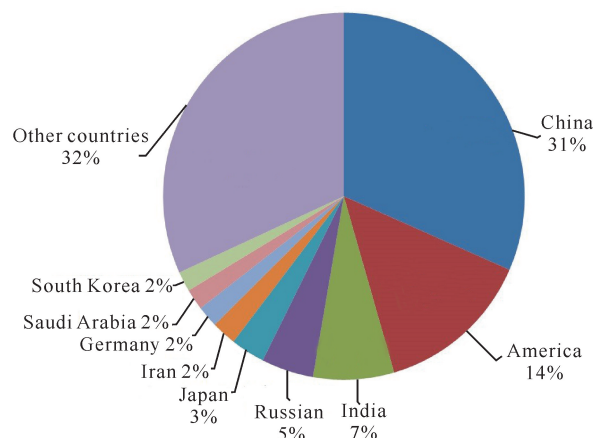


图1 2020年各国二氧化碳排放量分布图^[4-6]

Fig. 1 Distribution map of carbon dioxide emissions by countries in 2020^[4-6]

2020年9月22日在第75届联合国大会上,中国宣布国家自主贡献新目标举措:中国二氧化碳排放量力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[15,16]。碳达峰、碳中和已经成为中国坚定的发展方向。本文综合分析现有的各种碳中和的技术路线,针对现有方法的局限性,提出利用农林废弃物通过水热法制造水热炭复合肥(Hydrothermal Carbon Compound Fertilizer, HCCF),把秸秆等废弃物中的有机碳以腐殖酸的形式固定在土壤中,改善土壤结构,提高土壤碳汇和肥力,实现碳中和的目标,并分析该方法可能产生的综合效益。

1 碳中和现有技术分析

碳中和的主要技术为碳捕捉和碳固定,分为“物理捕捉与固定”和“生物捕捉与固定”两大技术路线。物理路线是用物理或化学方法捕捉大气中的二氧化碳、燃煤或燃油电厂产生的二氧化碳以及其他工业产

生的二氧化碳并将其封存在废弃油井中,或者以二氧化碳为原料,生产高价值的化工产品^[17,18]。生物路线是指陆地上和海洋里的微生物、绿色植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,转化为含碳有机物,储存和固定在生物质中,或转化为其他产物^[19,20]。

1.1 碳捕捉和碳固定的物理路线

碳捕捉和碳固定的物理技术路线可以直接捕捉和固定大气中的二氧化碳,并有可能转化为高价值的化工产品,虽然具有较好的前景,但是大规模开展仍存在技术复杂、需要大量的设备、消耗大量的能源动力等缺陷。

当前物理技术路线有3种方案:溶剂吸收法、变压吸附法和有机膜分离法^[21]。用溶剂吸收法从燃煤或燃油电厂的烟囱里捕捉二氧化碳,需要用有效的化学捕捉剂,如单乙醇胺(MEA),与二氧化碳分子生成稳定的复合物,截留电厂烟囱中大部分的二氧化碳分子,然后在高温、低压下分解,再对释放出的二氧化碳气体进行收集、加压、降温,转化为固态干冰进行封存,同时化学捕捉剂MEA可以循环使用。该方法虽然在二氧化碳的吸收和释放过程中所需的能耗低,但是后续的浓缩、运输、压缩、冷却、固化过程中还须使用复杂的设备和消耗能量^[21]。在我国,溶剂吸收法已被广泛应用在合成氨厂的变换气脱碳工艺中^[22]。变压吸附法是基于气体与吸附剂表面活性位点之间的引力来实现的,通过利用固态吸附剂对混合气体中二氧化碳的选择性可逆吸附作用来分离回收二氧化碳,该工艺近十年来已被广泛应用在脱碳工艺中。有机膜分离法的原理是利用原料气体透过有机膜材料的速度不同来实现二氧化碳与其他组分的分离,目前在工业上广泛应用的有机膜有醋酸纤维、乙基纤维素、聚苯醚和聚砜等^[22]。上述物理方法都存在技术复杂、成本高、能源消耗大等问题。捕捉和固定二氧化碳的物理技术路线需要动用复杂的设备、大量的人力和物力,除少量的CCUS示范项目外,目前大规模捕捉二氧化碳的物理方法仍在研究中,短期内难以大规模推广^[23-25]。

1.2 碳捕捉和碳固定的生物路线

碳捕捉和碳固定的生物技术路线由微生物和绿色植物通过光合作用自发进行^[26,27],是无须人工干预和人工能量输入的自然过程,因此多数专家认为生物路线是实现碳中和目标的主要技术手段。在生物技术路线中,由于树木的生命周期长、生物质蓄积量大、捕捉及固定二氧化碳的效果明显,因此植树造林

受到各方面重视,被认为是碳中和的主要技术路线,在宜林地区应大力推进植树造林,发挥森林碳中和的巨大作用。

在我国,单纯的植树造林路线有一定的局限性。首先,植树造林需要在气候条件适宜和土、水、肥条件较好的地域进行。我国的宜林面积有限,在高山和沙漠干旱地区开展人工造林,需要消耗大量的水资源,投入大量的人力、物力和能源动力。其次,森林的生命周期约为几十年到上百年,成长期的森林有正的碳汇增长;随着森林进入成熟期,碳汇增长逐渐减慢,光合作用吸收的二氧化碳与呼吸作用释放的二氧化碳逐渐平衡,便不再有正的碳汇效应;而进入老年期的森林,其碳汇作用逐渐丧失。最后,植树造林是一个缓慢的过程,需要 20-30 a 后才能看到效果。

2 生物质有机碳固碳技术

地球的陆地上和海洋里的植物和微生物每年直接从大气中吸收巨量的二氧化碳,以有机碳的形式存储在生物质中,是大气中碳循环的主要环节,每年新生的生物质质量高达 1 000 亿 t,碳含量远高于每年消耗的化石燃料碳含量的总和^[28-30]。木材和竹材存储有机碳的时间可长达几十年,包括大多数农作物在内的一年生草本植物,其中的有机碳在一年之内就会重返大气。如果把这些碳储存时间较短的生物质中的有机碳固定下来,就可以起到碳捕捉和碳固定的作用。捕捉和固定碳的生物技术路线不仅仅限于植树造林,还应高度重视其他生物质有机碳的作用。

2.1 固定生物质有机碳的必要性

2017 年,中国农作物秸秆可收集资源量为 8.27 亿 t,以碳元素占比 45% 计算,农作物秸秆中含有机碳约 3.72 亿 t^[31,32]。按二氧化碳的分子量 44、碳的原子量 12 计算,相当于从空气中固定了 13.64 亿 t 的二氧化碳。除农作物秸秆外,红薯秧、花生蔓、瓜藤、棉秆、丢弃的香蕉树和菠萝茎等都会产生大量的生物质,含有巨大数量的有机碳^[31,32]。

如果这些秸秆等农林废弃物得不到适当处置,如秸秆焚烧,不仅污染环境,大量的二氧化碳还会返还大气;把秸秆丢弃河沟、水渠、湖泊,不仅使化学需氧量(COD)过高,造成水体污染,而且有机碳最终也会转化为二氧化碳和甲烷返还大气;简单的秸秆还田处理,只有少量有机碳存留在土壤中,多数有机碳最终还是以二氧化碳和甲烷的形式返还大气。此外,这些秸秆等农林废弃物带有害虫的虫卵、病菌和微生物的

孢子,如果处置不当,会造成病虫害的发生和传播,特别是在塑料大棚中,会引发重茬病、根腐病等病虫害^[31,32]。

碳中和要求的碳捕捉和碳固定,不应简单地理解为二氧化碳的捕捉和固定,也应包括生物质中的有机碳分离和固定。一旦把这些最终要转化为二氧化碳和甲烷气体的有机碳固定下来,大气中二氧化碳的数量同样也会减少,而且每固定 1 t 生物质中的有机碳,相当于从大气中捕捉和固定了 3.67 t 的二氧化碳。

2.2 以活性炭为底物的炭基复合肥

在空气中(常温下),碳是一种非常稳定的元素,如汉唐时期的墨迹,至今仍清晰如初。生物质中的有机碳一旦转化为单质碳,就可长期稳定存在,只要不燃烧,便不会转化为二氧化碳。从这种意义上讲,只要把生物质中的碳转化为单质碳,就相当于把植物从大气中捕捉的二氧化碳固定了下来。实现这一转换的技术,就是古老的烧制木炭、草炭的方法,即生物物质的高温热裂解。近年来发展出以活性炭为底物的炭基复合肥^[33],即把活性炭与各种肥料成分和(或)益生菌复合,既可以提高土壤的肥力,又可以增加土壤的碳汇,把碳固定在土壤里,起到碳中和的作用。

传统的用生物质烧制活性炭的高温热裂解法存在以下缺点。第一,烧制活性炭需要 600℃ 以上的高温,需要消耗大量的燃料或电能。第二,烧制活性炭会产生大量的焦油和挥发性有机气体,造成雾霾和环境污染。第三,活性炭基本上是无机碳,以活性炭为底物的炭基复合肥不能改善土壤团粒结构。由于大量施用化肥和高强度耕作,我国农田土壤的团粒结构受到破坏,造成土壤碳汇下降。土壤的团粒结构是由腐殖酸支撑和维系的,腐殖酸存在于褐煤和泥煤中,商业销售的腐殖酸肥料,就是从褐煤中提取和加工的^[34,35]。用腐殖酸改良土壤结构,在我国有长期的应用实践和研究积累^[36-39]。

2.3 以水热炭为底物的炭基复合肥

由于以活性炭为底物的炭基复合肥存在局限性,因此为了更有效地固定生物质中的有机碳,达到碳中和的目的,并取得其他多方面的效益,本文提出了以生物质为原料,通过水热法生产水热炭复合肥的技术路线。水热反应通常在密封的水热反应釜中进行,温度为 160-200℃,时间为 1-3 h,压力为 1-2 MPa^[40]。生物物质的水热反应又称为煤化反应^[37,38,41,42],在一定温度和压力下生物质会发生脱水

和碳化反应, 转化为类似于褐煤的有机碳, 腐殖酸的含量可以达到45%以上。为区别于含义广泛的有机碳, 本文称之为生物质的“水热炭”。生物质经过水热反应, 水热炭的得率为55%–60%, 纯碳含量在75%以上^[40,41], 保持着生物质的碳链和芳香环的结构以及部分含氧官能团^[43-45]。钱永球等^[40]在水热反应中加入适量的过氧化氢, 有效地提升了有机碳中腐殖酸的成分。有机碳肥料的传统原料是褐煤和泥炭, 笔者认为生物质水热反应生成的、富含腐殖酸的水热炭可以替代褐煤和泥炭作为有机碳复合肥的基质。腐殖酸作为水热炭复合肥的底物, 更易于与碱性的氨、尿素及钾肥复合, 生产长效、缓释的复合肥, 可以改善土壤的团粒结构, 这对中国北方和西部的黄壤、中国南方的红壤都非常有利。

3 水热炭复合肥技术方案的优势分析

本文提出了以农林废弃物为原料, 通过水热法生产水热炭复合肥的技术方案, 该方法的优越性分析如下。

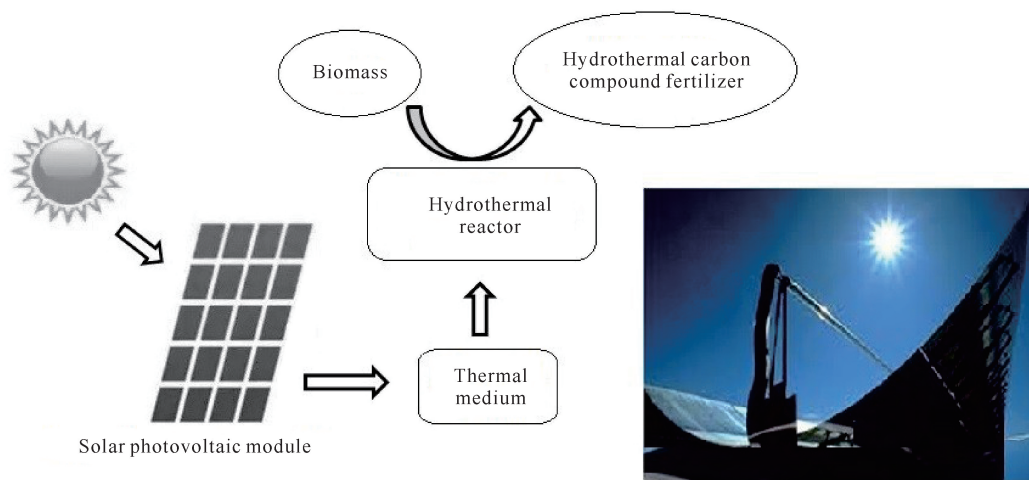


图2 生物质基水热炭复合肥阳光加热器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sunlight heater for biomass-based organic carbon compound fertilizer

3.2 原料来源广及可操作性强

水热法生产水热炭复合肥底物的原料来源十分广泛, 不仅可以用农作物秸秆, 也可以用瓜藤、薯蔓、棉秆、丢弃的香蕉树和菠萝茎, 还可以用城市的树木落叶等劣质生物质资源。图3是广西被砍伐丢弃的香蕉树, 此类生物质资源容易收集, 如果经过合理处理, 可利用性强。以我国2017年农作物秸秆可收集

3.1 能源消耗少及生产成本低

以水热炭复合肥为底物的水热反应所需的温度为160–200℃, 时间为1–3 h, 远低于烧制活性炭所需的450–800℃的高温, 可以节约大量的能源。200℃左右的温度可以利用发电厂、炼钢厂和垃圾焚烧厂的余热所得, 也可以利用地热资源或通过反光镜汇聚太阳光获得。图2是阳光加热器的示意图, 聚光镜把太阳光汇聚起来, 加热管道中的介质(如硅油), 可以得到300–400℃的高温, 为水热反应器提供热源, 生物质在水热反应器中发生炭化和其他反应, 生成富含腐殖酸的水热炭, 即可作为复合肥的底物。水热法生产有机碳肥底物所需的原料通常是农业和林业的废弃物、水和少量过氧化氢, 而过氧化氢可以通过电解法获得, 原料的成本极低。如果采用太阳能或地热加热, 就没有人工能源消耗。另外, 水热炭化过程中产生的液相产物含有多种有机成分, 如糠醛类化合物、有机酸和醛类等, 可以将其进一步分离, 实现资源化再利用^[46,47]。

资源量8.27亿t的数据为例计算^[32], 如果其中的一半(4.135亿t)用于制造水热炭复合肥底物, 按水热反应转换率约55%计算, 可产出有机碳肥底物约2.27亿t; 按含纯碳量75%计算, 可固定碳约1.7亿t, 折合每年固定二氧化碳约6.23亿t^[31,40,41]。这一数量其他任何单项技术都难以比拟。

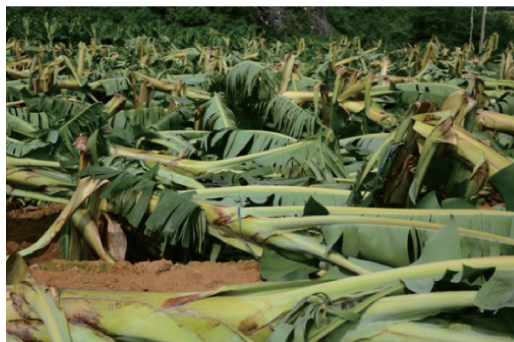


图3 广西被砍伐的香蕉树

Fig. 3 Banana trees chopped in Guangxi

3.3 固碳效率高及成果见效快

生物质的水热反应是在封闭系统中进行的脱水和煤化反应,没有焦油和有机气体逸出,碳的转化率较高^[40,41]。生物质中绝大部分有机碳被固定,并以水热炭复合肥的形式施于土壤,可以在农业生产中发挥长期效益。与碳捕捉和碳固定的物理技术路线相比,物理法需要消耗大量的能源,使用复杂的设备,并且后续不会产生效益。

通过植树造林的方法捕捉和固定二氧化碳,耗时长,不确定因素较多^[48,49]。相比之下,通过水热炭复合肥技术路线实现固碳,短期就可以看到明显的效果。同时,植树造林需要巨大面积的土地,而生产水热炭复合肥只需要很小的工作场地。

3.4 固碳、环保、生态、农业多方兼顾

用水热法生产水热炭复合肥的技术方案,不仅在碳中和方面可以发挥重大作用,而且会产生多方面的综合效益。把农作物秸秆等农林废弃物作为原料转化为水热炭复合肥,不仅避免了废弃物丢弃造成的环境污染,还能节约成本,变废为宝。把富含腐殖酸的水热炭复合肥施入土壤,有效地增加了土壤中有机的含量,快速改造土壤结构,平衡盐与水分,增加土壤肥力,促进作物生长,从而改善土壤的生态环境^[36,50]。水热炭复合肥不同于无机化肥,是一种长效缓释肥,可以长期、均衡地发挥作用,有助于生态农业和有机农业的发展。

4 结语

生物质在碳循环圈中占据核心地位,特别是包括农作物秸秆在内的一年生植物产生的生物质,直接影响大气中二氧化碳和甲烷的数量。以碳中和为目的的碳捕捉和碳固定生物路线,除植树造林外,应聚焦于生物质,特别是农作物秸秆等农林废弃物的合理处置,尤其要重视水热炭复合肥技术路线对碳中和的巨

大作用。在中国,由于人口众多、耕地有限,农田的频繁耕作以及化肥、农药的大量施用,严重破坏了土壤的团粒结构,导致土壤碳汇流失,农田二氧化碳排放增加,从而会造成全球变暖。因此,笔者认为生物质水热炭复合肥可以替代化肥,在中国农业大规模应用,以提高作物产量,改善生态和环境。最重要的是,大量的水热炭复合肥应用于农田,将极大地增加土壤中的碳汇,有效阻止二氧化碳排放,对碳中和作出贡献。

本文提出的水热炭复合肥技术是一种负碳排放技术,也是一种有商业价值的方法。水热炭复合肥技术不仅可以在实现碳中和目标方面发挥核心作用,还可以产生多种综合效益,如促进粮食产量、改善土壤结构、增加农田碳汇、消除农业病虫害以及保护生态环境。将大量农作物秸秆等农林废弃物转化为水热炭复合肥,无疑是一项庞大的系统工程,需要大量的人力和物力。然而,与造林、CCUS这两种方法相比,水热炭复合肥技术路线更具有可操作性,有可能对中国的碳中和作出重大贡献,帮助中国在较短时间内实现碳中和目标。

参考文献

- [1] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate Change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University, 2014: 1-1535.
- [2] HULME M. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2017.
- [3] NORMILE D. Can China, the world's biggest coal consumer, become carbon neutral by 2060? [EB/OL]. [2022-02-10]. <https://www.science.org/news>.
- [4] FRIEDLINGSTEIN P, JONES M W, O' SULLIVAN M, et al. Global carbon budget 2021 [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(4): 1917-2005.
- [5] ANDREW R, PETERS G. The global carbon project's fossil CO₂ emissions dataset [EB/OL]. [2022-02-10]. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- [6] DUAN H B, ZHOU S, JIANG K J, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit [J]. Science, 2021, 372: 378-385.
- [7] CO₂. earth, Daily CO₂ [EB/OL]. (2021-11-28) [2022-02-24]. <https://www.CO2.earth/daily-CO2>.
- [8] LYMAN E J. World carbon dioxide concentration passes 400 ppm, prompting calls for action [J]. International Environment Reporter, 2013, 36(11): 695.

- [9] 程琨,潘根兴.“千分之四全球土壤增碳计划”对中国的挑战与应对策略[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 457-464.
- [10] MINASNY B, MALONE B P, MCBRATNEY A B, et al. Soil carbon 4 per mille [J]. *Geoderma*, 2017, 292: 59-86.
- [11] VAN OOST K, SIX J, GOVERS G, et al. Soil erosion: A carbon sink or source? Response [J]. *Science*, 2008, 319: 1039-1042.
- [12] GATES B. How to avoid a climate disaster: The solutions we have and the breakthroughs we need [M]. London, UK: Penguin Books, 2021: 1-44.
- [13] HETTI R K, KARUNATHILAKE H, CHHIPI-SHRESTHA G, et al. Prospects of integrating carbon capturing into community scale energy systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133: 110193.
- [14] JAYA A K. Integrated strategies for rapid carbon capture, storage and utilization (CCSU) implementation [C]//82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 2021.
- [15] PIKE L. Dire warming report triggers calls for more action from China [J]. *Science*, 2021, 373(6557): 842.
- [16] 吴月辉,刘诗瑶,喻思南. 提升固碳能力实现双碳目标(科技创新助力“双碳”)[N]. 人民日报, 2021-10-10(5).
- [17] OTT J B, BOERIO-GOATES J, BEASLEY D. Chemical thermodynamics: Principles and applications [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2001, 54(6): 110.
- [18] STØLEN S, GRANDE T. Chemical thermodynamics of materials: Macroscopic and microscopic aspects [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [19] CRAFTS-BRANDNER S J, SALVUCCI M E. Rubisco activase constrains the photosynthetic potential of leaves at high temperature and CO₂ [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(24): 13430-13435.
- [20] SPREITZER R J, SALVUCCI M E. Rubisco: Structure, regulatory interactions, and possibilities for a better enzyme [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, 53: 449-475.
- [21] 于笑丹,王万福,庄亮亮. 溶剂吸收法 CO₂ 捕集技术简述[J]. 油气田环境保护, 2013, 23(1): 53-54, 62.
- [22] 邓丹. 变压吸附法脱除烟气中二氧化碳的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [23] BOOT-HANDFORD M E, ABANADES J C, ANTHONY E J, et al. Carbon capture and storage update [J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7: 130-189.
- [24] SPRENG D, FLÜELER T, GOLDBLATT D L, et al. Tackling long-term global energy problems: The contribution of social science [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [25] LIU W, KING D, LIU J, et al. Critical material and process issues for CO₂ separation from coal-powered plants [J]. *JOM*, 2009, 61(4): 36-44.
- [26] CAMPBELL W H, BLACK C C. Cellular aspects of C₄ leaf metabolism [M]. Berlin: Springer, 1982: 223-248.
- [27] HATCH M D, SLACK C R. Photosynthesis by sugarcane leaves: A new carboxylation reaction and the pathway of sugar formation [J]. *Biochemical Journal*, 1966, 101: 103-111.
- [28] ELHACHAM E, BEN-URI L, GROZOVSKI J, et al. Global human-made mass exceeds all living biomass [J]. *Nature*, 2020, 588: 442-444.
- [29] SÁNCHEZ Ó J, CARDONA C A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 5270-5295.
- [30] ZHANG Q F, UCHAKER E, CANDELARIA S L, et al. Nanomaterials for energy conversion and storage [J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42: 3127-3171.
- [31] 李飞跃,汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1-7.
- [32] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 132-140.
- [33] 苗得雨,姜灏. 碳基复合肥示范效果总结[J]. 现代化农业, 2019, 483(10): 22-24.
- [34] WANG L. Humic acid water-soluble fertilizer and preparation method therefor: WO2018112868A1 [P]. 2018-06-28.
- [35] ZENG J T. Water-soluble nano-organic carbon fertilizer and preparation method therefor, and organic compound fertilizer: WO2018082266A1 [P]. 2018-05-11.
- [36] 张水勤,袁亮,林治安,等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065-1076.
- [37] MANNA M C, SWARUP A, WANJARI R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India [J]. *Field Crops Research*, 2005, 93: 264-280.
- [38] NAKHRO N, DKHAR M S. Impact of organic and inorganic fertilizers on microbial populations and biomass carbon in paddy field soil [J]. *Journal of Agronomy*, 2010, 9(3): 102-110.
- [39] 周丽平,袁亮,赵秉强,等. 腐植酸促进作物根系生长机理的研究进展[J]. 腐植酸, 2019(2): 13-18.
- [40] 钱永球,杜奇石,钱锦春. 一种以秸秆为原料的有机碳

- 肥底物的制造方法;CN113754502A [P]. 2021-12-07.
- [41] 胡见波, 杜泽学, 闵恩泽. 生物质水热液化机理研究进展[J]. 石油炼制与化工, 2012, 43(4): 87-92.
- [42] KARAGÖZ S, BHASKAR T, MUTO A, et al. Low-temperature hydrothermal treatment of biomass; Effect of reaction parameters on products and boiling point distributions [J]. Energy & Fuels, 2004, 18: 234-241.
- [43] ISHIDA Y, KUMABE K, HATA K, et al. Selective hydrogen generation from real biomass through hydrothermal reaction at relatively low temperatures [J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33: 8-13.
- [44] CHENG B H, HUANG B C, ZHANG R, et al. Bio-coal: A renewable and massively producible fuel from lignocellulosic biomass [J]. Science Advances, 2020, 6: eaay0748.
- [45] EISNER P, MALBERG A, STÄBLER A, et al. Method for the wet-chemical transformation of biomass by hydrothermal carbonization; US2010/0101142A1 [P]. 2010-4-29.
- [46] 查湘义. 生物质水热炭化技术的现状及进展[J]. 北京农业, 2013(10): 248.
- [47] 尉士俊, 杨冬, 时亦飞. 水热炭化技术在废弃生物质资源化中的应用研究[J]. 节能, 2015, 34(1): 59-62.
- [48] 李吉跃, 张建国. 北方主要造林树种耐旱机理及其分类模型的研究(I)——苗木叶水势与土壤含水量的关系及分类[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 1-11.
- [49] YANG X H, CI L J. Comment on "Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem" [J]. Environment Science & Technology, 2008, 42(20): 7722-7723.
- [50] 王利宾, 王曰鑫. 腐植酸肥对土壤养分与微生物活性的影响[J]. 腐植酸, 2011(4): 6-9.

Technology Route of Hydrothermal Carbon Compound Fertilizer with Carbon Neutrality Function

LONG Siyu¹, XIAN Xuequan¹, TANG Peiduo¹, ZENG Jun¹, QIAN Yongqiu², Wang Lei³, CHEN Haishan³, DU Qishi^{1**}

(1. Guangxi Key Laboratory of Bio-refinery, State Key Laboratory of Bioenergy Enzyme Technology, National Engineering Research Center for Non-Food Biorefinery, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Nantong Keyuan New Materials Co. Ltd., Nantong, Jiangsu, 226333, China; 3. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China)

Abstract: In this article Hydrothermal Carbon Compound Fertilizer (HCCF) technology route was proposed, a hydrothermal carbon (lignite) rich in humic acid was prepared by hydrothermal method using agricultural and forestry waste such as crop straw as raw materials. It was used as a substrate to compound with nitrogen, phosphorus, potassium and other fertilizer components to produce long-term and slow-release HCCF, which was applied to farmland to improve soil fertility and improve soil aggregate structure. Hydrothermal carbon compound fertilizer is a kind of negative carbon product with commercial value. It can be produced on a large scale, improve soil carbon sink, store carbon in the field, and promote the achievement of carbon neutralization goals. At the same time, it has many benefits such as high yield, environmental protection and ecological benefits, and promotes the development of ecological, organic and sustainable agriculture.

Key words: biomass; hydrothermal carbon compound fertilizer; carbon neutrality; hydrothermal reaction; soil carbon stock

责任编辑: 唐淑芬