

基于碳汇的能源生态循环理论体系构建

蒋楷林², 汪敬恒^{1,3*}, 谷利敏¹, 刘蕊¹, 杨素芬¹

¹河南省科学院 河南郑州

²武汉轻工大学 湖北武汉

³南京沃野化工科技有限公司 江苏南京

【摘要】本文以农林固体废弃物为基础材料, 提出了构建基于碳汇的生物质能源-电力-化工-碳捕集-环保-土壤固碳-植物固碳-生物质能源的生态循环理论体系, 并阐述了构建该理论的机理和依据, 同时可联产土壤调理剂、液氨、碳酸氢铵及多元长效粒状复合氮肥等多种化工和新型肥料产品, 即可大幅减少温室气体的排放, 消除硫、氮氧化物对环境的污染和破坏, 又可实现二氧化碳、硫氧化物和氮氧化物的资源化循环利用; 联产的产品可广泛应用于农林草业, 提高农产品产量和质量, 增加碳汇, 经济、社会和生态效益显著, 对推进农林废弃物的资源化综合利用, 实现碳达峰和碳中和目标具有十分重要的现实意义。

【关键词】能源; 温室效应; 碳中和; 碳汇; 复合氮肥; 生态循环; 理论体系

【收稿日期】2023 年 5 月 10 日 **【出刊日期】**2023 年 6 月 28 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20230006

Construction of energy ecological cycle theoretical system based on carbon sink

Kailin Jiang², Jingheng Wang^{1,3*}, Limin Gu¹, Rui Liu¹, Sufen Yang¹

¹Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, Henan

²Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei

³Nanjing Woye Chemical Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

【Abstract】This article takes agricultural and forestry solid waste as the basic material and proposes the construction of an ecological cycle theoretical system based on carbon sink for biomass energy, electricity, chemical engineering, carbon capture, environmental protection, soil carbon fixation, plant carbon fixation, and biomass energy. The mechanism and basis for constructing this theory are explained, and various chemical and new fertilizer products such as soil conditioner, liquid ammonia, ammonium bicarbonate, and multi-element long-term granular composite nitrogen fertilizer can be co produced, It can significantly reduce greenhouse gas emissions, eliminate environmental pollution and damage caused by sulfur and nitrogen oxides, and achieve resource recycling of carbon dioxide, sulfur oxides, and nitrogen oxides; The products of co production can be widely used in agriculture, forestry and grass industry, improve the output and quality of agricultural products, increase carbon sinks, and achieve significant economic, social and ecological benefits. It is of great practical significance to promote the comprehensive utilization of agricultural and forestry waste resources, and achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality.

【Keywords】Energy; Greenhouse effect; Carbon neutrality; Carbon sink; Compound nitrogen fertilizer; Ecological cycle; Theoretical system

1 能源资源环境存在的问题
能源短缺、温室气体排放、资源浪费是困扰我

国经济高质量发展和生态文明建设的一大瓶颈。我国是世界最大的能源生产国和消费国, 根据国家统

*通讯作者: 汪敬恒 (1961-) 男, 河南睢县, 博士, 教授级高工, 研究方向: 化工、环保、土壤污染治理与修复、碳中和及资源化利用等。

2.4 灰渣制取土壤调理剂^[3,4]

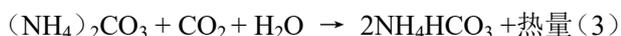
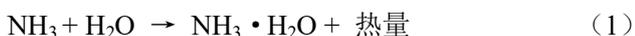
在生物质燃烧后, 会排出大量的炉渣和飞灰, 其中含有多种植物营养元素和有益元素(如 P、K、Ca、Mg、S、Fe、Cu、Zn、Mo、Si 等)及未燃尽的有机质, 这些元素和物质都来自于植物从土壤中的吸收和转化, 可作为营养全面的枸溶性肥料归还于土壤, 用于补充、平衡土壤养分, 提高作物产量和农产品品质, 完成这些物质的吸收-转化-转运-再吸收循环, 由于这种灰渣呈碱性, 还可作为酸性土壤调理剂中和酸性土壤, 改善土壤的理化性能, 提高土壤质量。

2.5 烟道气制取碳铵及多元素长效粒状复合氮肥

(1) 碳捕集制取碳铵机理

化石能源或生物质电厂发电产生的烟道气, 其成分非常复杂, 主要组成成分及百分含量(干基, mol%, 不同燃料及燃烧方式有较大差别)为: N_2 : 64.4%~70%, CO_2 : 12.0%~15%, CO : 5.5%~6%, O_2 : 4.0%~10%, SO_x (SO_2 、 SO_x): 0.02%~0.2%, NO_x (NO 、 NO_2): 1000ppm~1500 ppm, Ar: 0.8%~1.0%, H_2O : 6.1%~10%, 因此烟道气的排放是造成温室气体的主要原因, 按照我国 3060 的碳达峰碳中和目标, 脱除二氧化碳已是我国的重要战略任务。该理论体系中是以氨(水)为吸收中和剂, 吸收烟道气中的二氧化碳, 制备碳酸氢铵肥料, 用于农林、果蔬、牧草市场、城市园林和绿化等, 适用于各种植物和各类土壤, 可取代任何氮肥。本系统实现的吸收反应机理如下:

生成碳酸氢铵的化学机理:



碳酸氢铵在农业上可用作氮肥, 在食品行业可用作膨胀剂和高级发酵剂, 在工业上可用于合成铵盐和织物脱脂、塑胶和橡胶、陶器和铬鞣革等, 用途广泛, 市场需求量大, 在以氨(水)中和吸收二氧化碳的同时, 烟道气中含有的硫氧化物和氮氧化物将被一并吸收, 分别生成硫酸铵和硝酸铵。

(2) 碳捕集制取碳酸氢铵、硫酸铵和硝酸铵工艺^[5]

氨水捕集吸收 CO_2 的工艺过程为: 首先将液氨

与水按照一定比例制成一定浓度的氨水, 置入碳化中和吸收塔; 将烟囱排出的烟气经除尘后, 将烟气中少量的 SO_x 、 NO_x 氧化为 SO_2 、 SO_3 、 NO_2 , 逆流通入中和吸收塔, 与氨水进行气-液反应, 吸收并中和烟气中的二氧化碳、二氧化硫、三氧化硫和二氧化氮, 分别生成碳酸铵和少量的亚硫酸铵、硫酸铵和硝酸; 碳酸铵进一步吸收二氧化碳形成碳酸氢铵, 亚硫酸铵通过进一步强制氧化形成硫酸铵, 硝酸进一步与氨反应形成硝酸铵; 待溶液达到过饱和并形成一定量的结晶后, 用泵抽出, 进行固-液分离, 得具有高含水量的混合物料; 将混合物料送入离心机进行离心分离, 得到以碳酸氢铵为主、含水量小于 5% 的粉状碳酸氢铵及少量的硫酸铵和硝酸铵复合氮肥。工艺流程见图 2。

(3) 多元素长效粒状复合氮肥的制备^[6]

在以 NH_3 为吸收剂处理烟气生成的复合氮肥中, 主要成分为碳酸氢铵, 这是一种农化性能优良、速效, 最易被土壤吸持的一种氮肥, 不含有害中间产物和最终分解产物, 长期使用无残留, 对土壤无任何不良影响, 且又兼具驱、避虫效果, 是最安全的氮肥品种之一。但由于碳酸氢铵也存在着游离水含量高, 化学性能不稳定, 受热易分解流失、吸湿即结块、养分利用率低、肥效期短, 且又是粉状, 施用不便等缺点。为克服普通碳酸氢铵的缺点和不足, 我们根据碳酸氢铵的物化特性、物理混合性和化学相溶性, 通过配入适量含有中、微量营养元素的铵离子复合稳定剂, 在常温下, 通过挤压造粒工艺制成新型肥料—多元素长效粒状复合氮肥新品种。实践表明, 该工艺方法可使原材料的利用率达到 100%, 产品具有总有效养分高、外形美观、肥效期长、抗御淋溶、利用率高、长期存放不结块等特点, 且产品以颗粒状存在, 大大降低了其与土壤或空气接触的比表面积和溶解速率, 避免了由于氮素流失而引起的环境污染, 对保护环境具有可持续发展性。生产工艺流程见图 3。

2.6 烟道气制取氩气

烟道气中含有 1% 左右的氩气, 在完成二氧化碳和硫氧化物、氮氧化物脱除后, 氩气的百分含量进一步提高, 通过分子筛分离可得到纯度较高的稀有气体—氩气, 可广泛应用于飞机制造、造船、原子能工业和机械工业等部门。

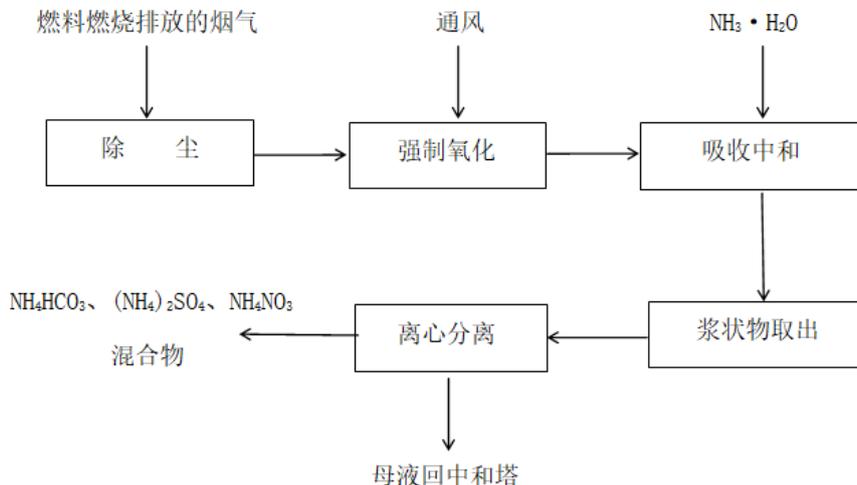


图 2 捕集 CO₂ 生产碳酸氢铵（复合氮肥）工艺流程简图

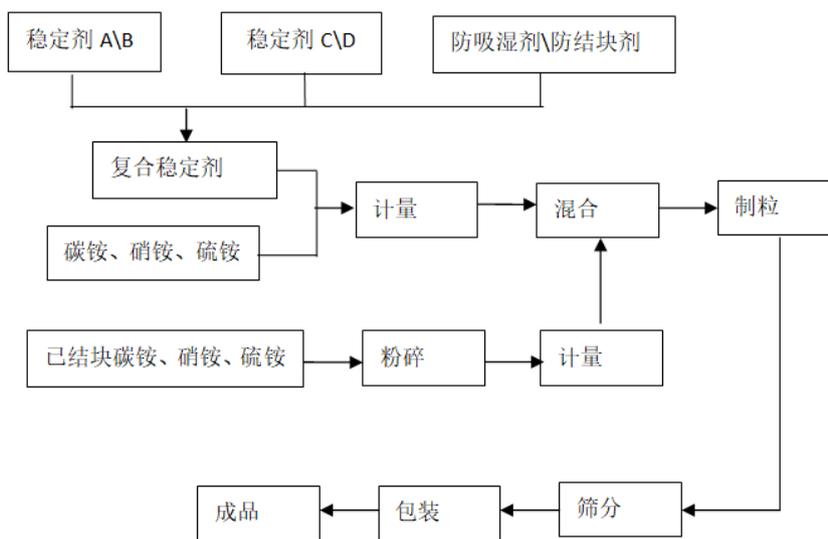


图 3 多元素长效粒状复合氮肥生产工艺流程简图

2.7 烟道气制取液氨

由于燃料是在通入空气的条件下燃烧，其烟道气中含有的氮气达到烟气总量的 70%左右，在完成二氧化碳、硫氧化物、氮氧化物和氫气脱除后，烟道气中氮气的百分含量可达 95%左右，经气体净化精制，可得到高纯的氮气，除部分用于工业和航空航天外，大部分可在催化剂条件下，与 2.3 制取的氢气反应合成液态氨，制成氨水，再用于 2.5 (2) 吸收中和烟道气中的二氧化碳、硫氧化物和氮氧化物，实现烟道气的全资源化综合利用。

2.8 碳酸氢铵理化特性^[7]

碳酸氢铵 (NH₄HCO₃)，简称碳铵) 是一种速效肥料，含有的所有元素氮、碳、氢、氧都是植物生

长所必需的营养成分，不含任何有害的中间产物和最终分解产物，施入土壤后，不需任何转化过程即可直接被植物吸收，且长期施用不会使土壤板结，不破坏土壤团粒结构，是最优良、最安全的氮肥品种；碳酸氢铵的另一特点是，只要碳酸氢铵能较完全地接触土壤，其解离出的铵离子较其他氮肥解离的铵更易被土壤颗粒吸持，淋失量仅是其他氮肥的 1/10~1/3。在农化性质上，没有像硝酸铵那样不利水稻的硝酸根、爆炸性和吸湿性，没有氯化铵那样对烟草、果类等作物产生的副作用，也没有尿素那样可能存在的有害物质缩二脲等，只要等氮等价合理施用，其田间肥效则明显优于其他氮肥。

2.9 碳酸氢铵应用功效

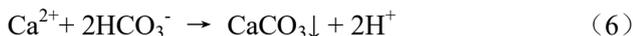
(1) 促进植物生长, 提高产量和品质

碳酸氢铵含有植物生长所必需的多种大量营养元素—碳、氢、氧、氮, 所有元素均可为植物吸收利用, 是合成淀粉等有机物的主要元素, 可直接用于农业、林业、饲草、绿化生产, 适用于各种土壤和各种植物, 可有效促进植物生长, 大幅提高作物产量, 改善农产品品质, 并可替代各类氮肥品种。

(2) 改良钙质碱性土壤与固碳^[8]

碳的固定过程非常多, 其中土壤是最有效、固碳容量最大的载体。中国地下水多半呈卤碱性, 在干旱、半干旱地区的碱性土壤中含有许多钙离子, 而碳酸氢铵是一种水溶性的碳酸化合物, 施入土壤后, 可形成 NH_3 、 NH_4^+ 和 CO_2 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- , 其中 CO_2 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 与钙离子结合, 生成化学式很稳定的化合物—碳酸钙, 这是一个非常强大的自然过程。我国有大面积的干旱半干旱地区, 这是一个非常重要的过固碳过程。

化学反应机理如下:

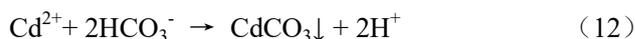
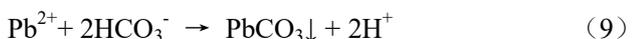


如此, 既达到了二氧化碳的固定, 又降低了土壤的碱性, 提高了土壤质量, 改善了土壤性能。

(3) 修复污染土壤与固碳

碳酸氢铵又是良好的重金属污染土壤的修复材料。我国农田重金属污染土壤面积约为 1.5 亿亩, 每年被重金属污染粮食达 1200 万吨, 由农田土壤重金属污染引发的食品安全问题已受到政府的高度关注。碳酸氢铵可作为由铅、镉等重金属污染土壤的修复剂。其修复机理同 2.9 (1), 即碳酸氢铵形成的 CO_2 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 可与土壤中的重金属铅离子 (Pb^{2+}) 和镉离子 (Cd^{2+}) 形成难溶的碳酸铅 (PbCO_3) 和碳酸镉 (CdCO_3) 而使其固定下来, 使铅离子和镉离子失去生物活性。

化学反应机理:



这样既修复了由铅、镉污染的土壤, 改善了土壤品质, 又可将碳固定下来。

(4) 植物吸收固碳与释氧

碳酸氢铵施入土壤后, 碳铵会释放出氨 (NH_3)、水 (H_2O)、二氧化碳 (CO_2), 或碳酸氢根 (HCO_3^-)、碳酸根 (CO_3^{2-}), 其中氨作为氮肥通过生化作用被植物吸收转化为植物体物质 (含氮化合物), 碳酸氢根和碳酸根离子可以通过土壤溶液质流方式进入植物体^[9], 进行光合作用, 二氧化碳通过光合作用或生化反应, 转化为组成植物体的含碳化合物 (如葡萄糖等), 同时还可释放大量氧气 (O_2), 增加植物有机碳的贮量。

化学反应机理^[10]:

光能



叶绿体

由此可知, 碳酸氢铵所含的所有元素可全部被植物吸收利用, 二氧化碳进入植物体而将碳固定下来, 增加碳汇, 同时释放大量氧气进入大气, 优化空气质量。因此, 依据长效碳铵的水溶性特性, 可能有效地解决了碳处理这一世界性难题, 长效碳铵对于全球脱碳意义重大^[8]。

2.10 植物废弃物收储

再通过植物废弃物 (农作物秸秆、树枝 (树皮、树叶)、木材加工下脚料、糟渣、糠醛渣、果渣等) 的收储并用于发电。

上述的循环往复, 即完成了基于碳汇的植物废弃物收储 (生物质能源) → 燃烧发电 → 化工生产 (碳捕集、合成氨、复合氮肥) → 土壤固碳 (改良、修复土壤) → 植物固碳 (农林吸收、释氧) → 植物废弃物收储的闭合生态循环体系 (如图 1)。

3 效益分析

3.1 经济效益分析

以年发电量 60 万 kW 机组发电厂为例, 年耗标煤约 110 万 t (按 330 天) 计, 折农林废弃物约 220 万 t, 则排放 CO_2 约 288.2 万 t、 SO_x 0.935 万 t、 NO_x 0.814 万 t, 以氨水捕集吸收后, 按中和吸收率 90% 计, 则可联产粉状复合氮肥 468.72 万 t, 通过添加铵离子复合稳定剂并造粒后, 可制得多元素长效粒

状复合氮肥 520.8 万 t。按市场价 1300 元/t 计, 年新增销售收入 67.7 亿元, 按 15% 利润计, 则新增利润 10 亿元以上; 同时还获得 3 亿多元的碳交易收入, 总体实现利润 13 亿元以上, 经济效益极为显著。

3.2 社会效益分析

以吸收中和烟道气中二氧化碳、硫氧化物、氮氧化物联产的多元素硫碳基复合氮肥, 可广泛应用于农业、工业和食品业等领域, 应用于农业, 适应于各种土壤和作物, 并可替代各类氮肥品种。以联产 520.8 万 t 吨多元素长效粒状复合氮肥计, 可用于农业、林业、饲草生产 1000 多万亩, 按每亩投入减少 10 元, 产量增产 10% 计 (按收益 150 元/亩), 则可使农业、林业、饲草等获得收益 160 多亿元。该项目与建设同规模的氮肥生产装置相比, 可节约大量能源、装备投资、蒸汽消耗和运行费用, 同时还增加大批人员就业, 产品出口创汇等, 社会效益十分显著。

3.3 生态效益分析

随着世界科技工业的快速发展和二氧化碳的大量排放, 温室气体猛增, 对全球的生命系统构成了严重威胁, 努力控制温室气体排放, 更好地保护我们赖以生存的环境和家园, 已成为全球亟待解决的重大战略课题。构建生态循环理论体系并加以实施, 可大幅减少温室气体的排放, 消除硫、氮氧化物对环境的污染和破坏, 实现二氧化碳、硫氧化物和氮氧化物的资源化循环利用, 具有十分显著的生态效益。

4 结论

4.1 构建生态循环理论体系的意义

构建生态循环理论体系, 实现植物废弃物资源化综合利用, 对节约能源、补充电力、更好地支援工业用能; 发展合成氨产业, 为化学工业提供更多的基础原料; 为农业提供更多的优质氮肥, 减少尿素缩二脲对土壤的危害; 修复重金属污染土壤、提高农产品质量、发展生态农业; 实现碳减排碳中和固碳目标, 优化人们赖以生存的环境质量等均具有十分重要的现实和深远意义。

4.2 经济社会生态效益巨大

该理论体系的构建与实施, 可实现能源→发电→化工(碳捕集、合成氨、复合氮肥)→土壤固碳

(改良、修复土壤)→植物固碳(农林吸收、释氧)→能源的生态绿色循环, 符合我国可持续高质量发展的内在要求, 对促进我国能源、化工、环保、农业领域的技术进步和产业技术升级将发挥重要作用, 无疑是对全球脱碳、治理温室效应和污染土壤的修复的巨大贡献, 并将产生巨大的经济、社会和生态效益。

参考文献

- [1] 国家统计局,《中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报》,2023,2,28
- [2] 肖宇, 彭子龙, 何京东, 刘中民. 科技创新助力构建国家能源新体系. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 385-391.
- [3] 艾雪竹, 汪婷婷, 李强, 刘路远, 张浩. 生物质发电及其灰渣处理综述《安徽化工》, 2017(043)001 (P6-8).
- [4] 郁金星. 生物质能电厂烟气污染控制的研究 华北电力大学硕士学位论文, 2007 35.
- [5] 汪敬恒. 一种捕集 CO₂ 联产粒状多元素硫碳基复合氮肥的方法, 中国, 202210250619.2
- [6] 汪敬恒. 多元素长效碳铵颗粒肥的研制及其在小麦-玉米轮作中的效应研究 南京农业大学博士学位论文, 2015 S 145.5
- [7] 汪敬恒. 农用碳酸氢铵的市场前景分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- [8] 李新民: 长效碳铵: 中国对于全球碳减排的巨大贡献, 经济参考报, 2008, 12, 09
- [9] 张志明, 长效碳酸氢铵增加植物有机碳固定的研究, 第三届全国绿色环保肥料新技术新产品交流会, 2003, 12, 10
- [10] 生物学, 人民教育出版社第三单元 第五章 绿色植物与生物圈中的碳-氧平衡.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS