

秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究

霍丽丽^{1,2} 姚宗路^{1,2} 赵立欣^{1,2} 罗娟^{1,2} 张沛祯^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;
2. 中国农业科学院农业农村碳达峰碳中和研究中心, 北京 100081)

摘要: 为推进秸秆综合利用,提升农业农村减排固碳能力,针对秸秆综合利用存在的温室气体排放因子基数不明、底数不清等问题,基于 IPCC 指南(2006 年)温室气体排放核算理论框架,构建秸秆综合利用评价方法。明确评价范围与边界,科学核算不同秸秆利用技术的温室气体排放因子,评价秸秆五料化减排固碳底数,基于不同情景预测 2030 年和 2060 年秸秆综合利用的减排固碳潜力。结果表明,2020 年秸秆综合利用的温室气体净减排贡献为 7.0×10^7 tCO₂e,其中,露天焚烧和自然腐解的温室气体排放量为 5.6×10^7 tCO₂e,秸秆五料化利用减排量为 1.26×10^8 tCO₂e;肥料化和燃料化利用的减排量最高,减排量分别为 7.9×10^7 tCO₂e 和 3.8×10^7 tCO₂e。预计到 2030 年秸秆综合利用温室气体减排固碳贡献潜力为 $1.52 \times 10^8 \sim 1.72 \times 10^8$ tCO₂e,到 2060 年贡献潜力可达 $2.20 \times 10^8 \sim 2.73 \times 10^8$ tCO₂e;秸秆肥料化在五料化利用中的减排贡献最大,并持续稳定增加,2030 年和 2060 年减排贡献占比分别为 40.7% 和 31.9%;秸秆燃料化的减排潜力最大,2030 年和 2060 年减排贡献占比分别为 55.2% 和 62.8%。秸秆综合利用应重视土壤/森林碳汇和化石能源替代的双重减碳作用,应坚持农用为主、多元利用的原则,加大力度推进全量利用,减少焚烧废弃的温室气体排放,充分发挥其减排固碳的作用,为实现碳中和目标提供支撑。

关键词: 秸秆; 综合利用; 温室气体; 减排; 固碳

中图分类号: S21; X712 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0349-11 OSID:



Contribution and Potential of Comprehensive Utilization of Straw in GHG Emission Reduction and Carbon Sequestration

HUO Lili^{1,2} YAO Zonglu^{1,2} ZHAO Lixin^{1,2} LUO Juan^{1,2} ZHANG Peizhen^{1,2}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Center for Carbon Neutrality in Agriculture and Rural Region, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: It is vital to promote the comprehensive utilization of straw for enhancing the ability of agriculture and rural areas to reduce carbon emissions and fix carbon. Based on the IPCC Guidelines (2006) greenhouse gas (GHG) emission accounting theoretical framework, and in view of the problems of unclear base and unclear bases of GHG emission factors in the comprehensive utilization of straw, an evaluation method for the comprehensive utilization of straw was constructed, the scope and boundary of the evaluation was clarified, the GHG emission factors were scientifically calculated and the carbon-reduction base of different straw utilization technologies were evaluated. Based on different scenarios, the emission reduction and carbon sequestration potential of comprehensive utilization of straw by 2030 and 2060 was predicted. The results showed that the GHG emission reduction contribution of comprehensive utilization of straw in 2020 was 70 million tCO₂e. Among them, the GHG emission from open burning and natural decomposition was 5.6×10^7 tCO₂e, and the GHG emission reduction from comprehensive utilization of straw was 1.26×10^8 tCO₂e. The emission reduction of straw fertilizer and energy utilization were the highest, with emission reduction of 7.9×10^7 tCO₂e and 3.8×10^7 tCO₂e, respectively. It was estimated that the GHG emission reduction and carbon sequestration contribution potential of comprehensive utilization of straw by 2030 and 2060 would be $1.52 \times 10^8 \sim 1.72 \times 10^8$ tCO₂e and $2.20 \times$

收稿日期: 2021-10-22 修回日期: 2021-11-16
基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02)
作者简介: 霍丽丽(1985—),女,高级工程师,博士,主要从事农业废弃物能源化利用研究,E-mail: huolili666@126.com
通信作者: 赵立欣(1967—),女,研究员,主要从事农业废弃物清洁利用技术研究,E-mail: zhaolixin5092@163.com

$10^8 \sim 2.73 \times 10^8 \text{ tCO}_2 \text{ e}$, respectively. The contribution of straw fertilizer to emission reduction in comprehensive utilization was the highest and continued to increase steadily, and it was estimated that the contribution to emission reduction in 2030 and 2060 would account for 40.7% and 31.9%, respectively. Straw energy utilization had the greatest emission reduction potential, and it was estimated that the contribution to emission reduction in 2030 and 2060 would be 55.2% and 62.8%, respectively. Therefore, the dual carbon reduction effects of soil/forest carbon sinks and fossil energy substitution should be paid attention in comprehensive utilization of straw. Adhere to the principle of agriculture-oriented and diversified utilization, increasing efforts to promote full-scale utilization, reducing GHG emissions from incineration, and making full use of straw in reducing carbon emissions, can provide support for achieving the goal of carbon neutrality.

Key words: straw; comprehensive utilization; greenhouse gas; emission reduction; carbon sequestration

0 引言

中国农作物秸秆资源量大面广,据农业农村部统计,2020 年全国秸秆资源总量 $8.56 \times 10^8 \text{ t}$,可收集资源量 $7.22 \times 10^8 \text{ t}$,秸秆综合利用率达到 87.6%,但仍有约 $8.9 \times 10^7 \text{ t}$ 秸秆未被有效利用,露天焚烧防控压力大^[1-2]。推进秸秆综合利用,能够显著减少秸秆露天焚烧和随意堆弃产生的温室气体 (GHG) 排放,是耕地质量提升、农业农村污染治理的重要内容,有利于提升农田土壤碳汇、替代化石能源,是促进农业农村减排固碳、实现农业绿色低碳发展、建设生态宜居乡村的重要举措。

中国力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和^[3],农业农村减排固碳既是碳达峰、碳中和的重要举措,也是潜力所在。2014 年中国农业温室气体排放总量约为 $8.3 \times 10^8 \text{ tCO}_2 \text{ e}$ (CO_2 当量,下同),占全国的 7% 左右,如果加上农业生产用能和生活用能的排放,中国农业农村温室气体排放量占全国温室气体排放量的 15% 左右^[4-6]。农业农村领域的非二氧化碳温室气体排放占比高,农业活动 CH_4 排放约占全国的 43%、 N_2O 排放约占 60%^[4]。

秸秆综合利用包括肥料、饲料、燃料、基料和原料等五料化利用,秸秆利用与农业生产、农村生活紧密联结,可有效提升农业农村减排固碳的能力,能够为农业种植、畜牧养殖提供肥料与饲料,直接或间接还田可提高土壤固碳能力,增加土壤碳汇;能够生产成型燃料、沼气/生物天然气等燃料化利用,为农村生活取暖炊事提供燃料,替代生产生活使用的煤炭等化石能源,减少温室气体排放;还能够为菌菇生产提供基料,以及为造纸、板材等提供原料,从而减少林木砍伐,提高森林碳汇。因此,秸秆综合利用对农业农村减排固碳贡献潜力和空间较大,需要深入挖掘、充分利用。目前,秸秆综合利用仍存在温室气体排放基数不明、底数不清等问题,为科学评价秸秆综合利用的减排固碳底数及未来潜力,本文研究基于

IPCC 指南(2006 年)温室气体排放核算理论框架,构建秸秆综合利用减排固碳评价方法,明确边界设定、核算不同技术的排放因子,研究秸秆综合利用减排固碳贡献,并根据秸秆利用潜力、设定不同情景,分析预测秸秆减排固碳潜力,为加强秸秆科学利用、促进农业减排固碳提供技术支撑。

1 评价方法

1.1 评价范围

根据 IPCC 指南(2006 年),秸秆综合利用过程其自身的 CO_2 排放不计入温室气体排放核算中,认为其利用释放的 CO_2 与作物生长吸收的 CO_2 形成循环^[7]。秸秆综合利用的温室气体排放源主要包括秸秆从农作物收获后还田,离田收储运、加工转化与利用以及副产物还田等全过程的温室气体排放。采用全生命周期评价方法核算温室气体排放量^[8],忽略农作物生长过程各类能源及化学品投入的温室气体排放,研究主要考虑了农作物收获后,秸秆还田、离田利用全过程的煤炭、燃油、电力等化石燃料消耗的排放,未考虑土地利用变化、作物种植、还田和收储运过程所用设备加工制造能耗、转化及利用的厂房建设与设备加工制造能耗、秸秆利用设施加工及安装能耗等^[9-11]。秸秆综合利用的温室气体减排源主要包括秸秆直接或间接还田农田土壤碳汇、秸秆利用减少林木砍伐的森林碳汇,以及秸秆直接或间接能源利用抵扣化石能源的 CO_2 减排。此外,研究还考虑了秸秆露天焚烧过程 CH_4 、 N_2O 、 NO_x 和 CO 等直接和间接温室气体排放,以及秸秆露天堆放自然腐解的 CH_4 和 N_2O 温室气体排放。

1.2 边界设定

秸秆综合利用的核算边界包括肥料(含根茬还田)、饲料、燃料、基料和原料等五料化利用的秸秆,以及露天焚烧、堆放自然腐解等未被有效利用的秸秆。秸秆资源量与利用现状数据来源于农业农村部门相关统计数据,秸秆种类主要包括早稻、中稻和一

季晚稻、双季晚稻、小麦、玉米、马铃薯、甘薯、花生、油菜籽、大豆、棉花、木薯、甘蔗等 13 种。秸秆五料化利用温室气体核算边界如表 1 所示。

表 1 秸秆五料化利用温室气体核算边界
Tab.1 Accounting boundary range of GHG emissions from straw utilization

类别	利用过程温室气体排放	土壤碳汇	森林碳汇	替代化石能源减排
肥料化	√	√		
饲料化	√	√		
燃料化	√	√		√
基料化	√	√	√	
原料化	√	√	√	√

秸秆肥料化利用温室气体核算包含秸秆还田过程的农机燃料消耗温室气体排放,以及秸秆还田有机碳固碳的土壤碳汇,未核算秸秆还田腐解过程的 N₂O 排放。

秸秆饲料化利用温室气体核算包括秸秆收储运与加工饲料过程、畜禽粪污堆肥与还田过程等消耗的化石燃料的排放,以及秸秆消化后间接还田的土壤碳汇。土壤碳汇参考秸秆直接还田测算方法,未核算畜禽粪污还田腐解过程的 N₂O 排放。研究暂不考虑反刍动物饲养过程肠道发酵产生的 CH₄ 排放以及粪便收储运管理过程中产生的 CH₄ 与 N₂O 排放,根据 IPCC 指南(2006 年)将其纳入畜牧养殖和粪便管理的排放核算中。

秸秆燃料化利用温室气体核算的排放源从秸秆收储、加工到能源产品终端应用,以及副产物利用等全链条外部能源消耗产生的温室气体排放;抵扣化石能源减排主要是替代煤炭等化石能源的温室气体 CO₂ 当量(包括 CO₂、CH₄、N₂O 等);副产物土壤碳汇主要包括秸秆炭气联产、秸秆沼气等技术的副产物(如生物炭、沼渣沼液)还田的土壤固碳。未核算副产物还田腐解过程的 N₂O 排放。

秸秆基料化利用温室气体核算的排放源主要包括秸秆收储、加工与利用以及副产物利用(废菌棒堆肥还田)全过程的外部能源消耗的温室气体排放;碳汇源包括通过生产食用菌基质减少采伐林木增加森林碳汇,以及废菌棒堆肥还田的土壤碳汇。未核算废菌棒还田腐解过程的 N₂O 排放。

秸秆原料化利用温室气体核算的排放源主要包括秸秆收储、加工与利用以及废旧人造板材和废纸张回收利用全链条过程的外部能源消耗的温室气体排放;碳汇源包括通过秸秆生产板材和纸张减少采伐林木增加森林碳汇,以及废旧人造板材和废纸张能源利用抵扣的化石能源排放。

秸秆露天焚烧温室气体排放主要包括 CH₄、N₂O 等直接排放源和 CO、NO_x 等间接排放源。IPCC 指南(2006 年)第 7 章前体物与间接排放中描述了 CO、NO_x 排放最终会在大气中被转化成 CO₂ 或 N₂O,可将 NO 和 NO₂ 折合为 N₂O,将 CO 折合为 CO₂ 核算温室气体排放。秸秆自然堆放温室气体排放主要是秸秆在微生物作用下腐解过程释放的 CH₄ 和 N₂O。

1.3 核算方法

秸秆综合利用评价的温室气体主要包括 CO₂、CH₄、N₂O 3 类,为统一衡量温室气体排放,采用全球增温潜势将温室气体换算成 CO₂ 当量计算,参考《IPCC 第五次评估报告》中温室气体的 100 年时间尺度下的全球增温潜势,CO₂、CH₄、N₂O 的全球增温潜势(GWP)分别为 1、28 和 265^[4]。

秸秆利用温室气体排放量计算公式为

$$E_{GHG,ft} = \sum (F_{C,ft} E_{FGHG,ft}) + S_B G_{GHG,ef} + S_T H_{GHG,ef} \tag{1}$$

其中 $E_{FGHG,ft} = H_{FGHG,ft} - C_{S,Farm} - C_{S,Forest} - A_{E,Fossil}$ (2)

$$H_{FGHG,ft} = \sum [H_{Ei} \lambda_j (W_{jCO_2} + G_{CH_4} W_{jCH_4} + G_{N_2O} W_{jN_2O})] \tag{3}$$

$$C_{S,Farm} = 44 C_{org,k} (1 - \lambda_k) \eta_k / 12 \tag{4}$$

$$C_{S,Forest} = 44 C_{org,k} Y / 12 \tag{5}$$

$$A_{E,Fossil} = E_m \tau \tag{6}$$

式中 $E_{GHG,ft}$ ——秸秆利用全过程的温室气体(GHG)排放量,t

$F_{C,ft}$ ——每种技术的秸秆利用量,t

$E_{FGHG,ft}$ ——每种技术的秸秆利用 GHG 排放因子

S_B ——秸秆露天焚烧量,t

$G_{GHG,ef}$ ——秸秆露天焚烧 GHG 排放因子

S_T ——秸秆自然堆放量,t

$H_{GHG,ef}$ ——秸秆自然堆放 GHG 排放因子

$H_{FGHG,ft}$ ——单位秸秆从作物收获后还田,离田收储运输、加工转化与利用以及副产物还田等全过程的 GHG 排放量,t

$C_{S,Farm}$ ——单位秸秆直接或间接受还田农田土壤碳汇量,t

$C_{S,Forest}$ ——单位秸秆利用过程中减少林木砍伐的森林碳汇量,t

$A_{E,Fossil}$ ——单位秸秆燃料利用抵扣化石能源的 GHG 减排量,t

H_{Ei} ——第 i 类二次能源(含电力)或化学品生产所消耗的能量量

λ_j ——二次能源(含电力)或化学品生产第 j

类能源消耗占总能源消耗的比例

W_{jCO_2} ——第 j 类能源 CO_2 排放系数

W_{jCH_4} ——第 j 类能源 CH_4 排放系数

W_{jN_2O} ——第 j 类能源 N_2O 排放系数

G_{CH_4} —— CH_4 全球增温潜势

G_{N_2O} —— N_2O 全球增温潜势

i ——秸秆从作物收获后还田,以及离田收储运输、加工转化与利用、副产物还田等全过程能源或化学品的类型序号

j ——各类物质消耗的能源类型序号

$C_{org,k}$ ——单位秸秆(干物质)总有机碳含量

λ_k ——秸秆利用过程被分解或消化的秸秆所占的百分比

η_k ——秸秆直接或间接还田有机碳固定在土壤中的比例

k ——不同秸秆利用方式序号

Y ——林木资源的碳转换周期,即林木采伐周期 30 年与 100 年增温尺度之比,本研究 Y 取值为 0.3

E_m ——单位秸秆直接或间接能源利用所抵扣化石能源的量

τ ——抵扣化石能源的 GHG 排放因子

秸秆露天焚烧 GHG 排放因子,参考 IPCC 指南(2006 年)第 4 卷第 4 章农田中的源自生物质燃烧的非二氧化碳排放核算方法。秸秆自然腐解 GHG 排放因子,参考 IPCC 指南(2006 年)第 5 卷第 4 章《固体废弃物的生物处理》提供的废弃物生物处理中的堆肥方式 CH_4 和 N_2O 排放进行测算。

2 秸秆综合利用减排固碳贡献现状

2.1 不同秸秆利用技术的排放因子

2.1.1 秸秆肥料化

秸秆肥料化利用方式主要包括根茬还田、粉碎覆盖还田、深翻还田和旋耕还田等技术。相关研究表明,采用 DNDC 模型对农田土壤碳库进行估算,发现中国农田土壤碳库正以 7.38×10^7 t/a(C 当量)的速度减退,说明中国农田土壤碳库容量还远达不到饱和,农田土壤碳库增加潜力巨大,秸秆还田后,有 8% ~ 35.7% 的有机碳以土壤有机碳的形式保存于土壤碳库中^[12-15]。有研究采用 Meta 法分析了秸秆持续还田对中国农田土壤有机碳的影响,与秸秆不还田相比,秸秆还田可以显著提高土壤有机碳含量,平均可提高 $13.97\% \pm 1.38\%$ ^[16-18]。

基于文献[19-21]研究,假设秸秆还田有机碳固定于土壤中的比例按 10% 计,秸秆总有机碳含量按 0.4 计,核算出秸秆还田的土壤碳汇量为

146.8 gCO₂e/kg。根据调研数据测算,秸秆根茬还田、粉碎覆盖还田、深翻还田、旋耕还田等还田过程农机燃料消耗产生的温室气体排放因子分别为 4.38、10.52、28.05、21.4 gCO₂e/kg。经测算秸秆根茬还田、粉碎覆盖还田、深翻还田、旋耕还田排放因子分别为 -142.3、-136.1、-118.6、-125.6 gCO₂e/kg。

2.1.2 秸秆饲料化

秸秆饲料化利用主要方式为干秸秆粗饲料,研究暂不考虑玉米全株青贮饲料。有研究显示,施用氮磷钾+农家肥的地块总有机碳储量比氮磷钾和休耕地块分别增加了 25% 和 45%^[22]。在黑龙江省肇州县的研究发现,有机肥施用后土壤有机碳总量中来源于玉米残茬的比例为 14.36%,来源于有机肥的比例为 25.92%,土壤原有有机碳比例为 59.72%^[23]。在江西红壤长期定位实验站的研究表明,红壤施用有机肥后,玉米秸秆源的有机碳比例约为 11.0%,有机肥源的有机碳比例约为 21.0%^[24]。可以看出,畜禽粪便还田的固碳效果优于秸秆直接还田,其有机碳固碳率为 20% ~ 30%。

基于 IPCC 指南(2006 年),反刍动物的消化率为 55%;粪污有机碳的农田固碳率按 20% 计,测算秸秆饲料化利用间接还田固碳量为 132.0 gCO₂e/kg。据前期调研秸秆饲料利用全过程能源消耗测算,秸秆收储运温室气体排放因子为 27.53 gCO₂e/kg,加工与利用过程中的温室气体排放因子为 21.04 gCO₂e/kg,畜禽粪污堆肥还田温室气体排放为 25.65 gCO₂e/kg。因此,干秸秆粗饲料温室气体排放因子为 -57.8 gCO₂e/kg。

2.1.3 秸秆燃料化

秸秆燃料化利用主要包括成型燃料、打捆供暖、沼气/生物天然气、热解炭气联产、热电联产、秸秆直燃发电、燃料乙醇等技术。替代化石能源采用抵扣煤炭(折合标准煤)的热量计算,基于原煤的单位热值含碳量为 26.37 g/MJ,碳氧化率为 0.94,基于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》,参考《中国发电企业温室气体排放测算方法与报告指南(试行)》中煤炭排放因子的相关测算方法,原煤的 CO₂ 排放因子为 90.89 gCO₂/MJ,CH₄ 和 N₂O 排放量较小,忽略不计;1 t 标准煤(tce)单位热量为 29 307.6 MJ,折合 1 t 标准煤的温室气体排放因子为 2.663 7 tCO₂e。秸秆成型燃料、打捆供暖、热电联产、秸秆直燃发电、燃料乙醇、规模化沼气/生物天然气、热解炭气联产技术替代煤炭的温室气体减排量分别为 1 117.39、1 031.44、932.18、327.2、421.7、570.49、496.19 gCO₂e/kg,如表 2^[9-11,25-30]所示。

表 2 秸秆燃料化利用的 GHG 测算相关参数
Tab.2 GHG calculation related parameters for straw fuel utilization

技术类别	产品热值	原料用量	能量转化率/%
成型燃料	14.6 MJ/kg	1.2 kg/kg	78.0
打捆供暖	14.6 MJ/kg	1.3 kg/kg	67.4
沼气/生物天然气	21 MJ/m ³	3.45 kg/m ³	35.8
热解炭气联产	18 MJ/m ³	3.33 kg/m ³	31.8
秸秆直燃发电	3.6 MJ/(kW·h)	1.23 kg/(kW·h)	30.7
热电联产	3.6 MJ/(kW·h)	1.1 kg/(kW·h)	70.0
燃料乙醇	26.8 MJ/kg	6.0 kg/kg	26.3

不同秸秆利用技术的 GHG 排放有一定差异,成型燃料、打捆供暖、直燃发电/热电联产、燃料乙醇、规模化沼气/生物天然气、热解炭气联产技术的转化与利用过程温室气体排放量分别为 90.4、41.8、85.5、131.4、138.5、146.1 gCO₂e/kg。规模化沼气/生物天然气、热解炭气联产技术的副产物还田土壤碳汇量分别为 513.4、803.5 gCO₂e/kg。因此,秸秆成型燃料、打捆供暖、热电联产、直燃发电、燃料乙醇、规模化沼气/生物天然气、热解炭气联产技术的温室气体排放因子分别为 -1 027.0、-990.8、-845.97、-241.4、-264.7、-945.4、-1 153.6 gCO₂e/kg。

2.1.4 秸秆基料化

秸秆基料化主要利用方式为食用菌栽培和废菌渣堆肥还田。相关研究表明,用稻草、豆秸部分替代阔叶树锯末栽培黑木耳,秸秆替代比例为 25% ~ 35% 时,菌丝、子实体生长方面与阔叶树锯末栽培基本相同^[31],因此秸秆基料利用可替代部分林木资源。经测算,秸秆基料化利用替代林木资源的森林碳汇量为 462 gCO₂e/kg。菌菇生产过程碳损失率为 30%^[32-33],假设菌菇有机碳的农田固碳率等于秸秆还田固碳率,按 10% 计,废菌渣还田的土壤碳汇为 136.1 gCO₂e/kg。秸秆基料化的收储运、加工利用、废菌棒堆肥还田的排放量分别为 27.5、88.0、25.7 gCO₂e/kg。因此,秸秆基料化利用温室气体排放因子为 -457.0 gCO₂e/kg。

2.1.5 秸秆原料化

秸秆原料化以人造板材和造纸利用为主,目前,废旧秸秆人造板材或秸秆纸张最终处理途径主要用于燃烧发电。人造板消耗原木材量为 1.1 m³/m³,1 kg 人造板消耗秸秆量为 1.5 kg,人造板密度为 650 kg/m³^[34-35],秸秆人造板原料化利用替代木材砍伐的森林碳汇量为 308 gCO₂e/kg。废旧人造板能源利用,根据 IPCC 指南(2006 年)其回收率为 97.7%,秸秆人造板发热量假设与秸秆发热量相等,按 14.6 MJ/kg 计,减排量参照秸秆成型燃料抵扣化

石能源碳减排量计算,废旧人造板替代化石能源的温室气体减排量为 574 gCO₂e/kg。秸秆人造板的收储运、加工利用、废旧板材能源利用的排放量分别为 27.5、122.0、63.0 gCO₂e/kg。因此,秸秆原料化人造板的温室气体排放因子为 -669.6 gCO₂e/kg。

秸秆造纸假设生产秸秆纸产品等效替代等量的木材纸产品,即生产 1 t 秸秆纸可以减少因生产 1 t 木材纸产品所需消耗的木材的采伐量,1 t 秸秆可生产纸产品为 0.628 t^[36-37]。秸秆造纸替代木材砍伐的森林碳汇量为 290.1 gCO₂e。假设废旧秸秆纸张与秸秆的发热量相当,抵扣化石能源减排量参照秸秆成型燃料抵扣化石能源碳减排量计算,秸秆纸张量与秸秆造纸利用量(干物质)之比为 22/35^[38],根据 IPCC 指南(2006 年)给出纸制品丢弃率为 34.2%,废旧纸张回收率 65.3%,废旧秸秆纸张能源利用抵扣化石能源减排量为 383.6 gCO₂e/kg。秸秆造纸的收储运、加工利用、废纸张能源利用的排放量分别为 27.5、1 004.6、63.0 gCO₂e/kg。因此,秸秆原料化造纸的温室气体排放因子为 421.3 gCO₂e/kg。

2.1.6 秸秆露天焚烧与堆放自然腐解

根据 IPCC 指南(2006 年)给出农田残余物露天焚烧的燃烧因子 C_f ,小麦秸秆为 0.90、玉米秸秆为 0.80、水稻秸秆为 0.80。根据我国国情,2020 年小麦秸秆机械化收获率约 97%^[39],机械化收获时将秸秆直接粉碎还田,焚烧量极少,因此燃烧因子 C_f 取 0.8。按 IPCC 指南(2006 年)给出的缺省值计算,折合温室气体排放量为 872.4 gCO₂e/kg。基于现有文献数据^[40-45],采用箱线图位数计算,秸秆露天焚烧的 CH₄排放量为 4.0 g/kg,N₂O 排放量为 0.07 g/kg,NO_x 排放量为 2.2 g/kg,CO 排放量为 69.25 g/kg,折合温室气体排放因子为 802.0 gCO₂e/kg。其中,直接排放源温室气体排放量为 130.4 gCO₂e/kg,间接排放量为 671.6 gCO₂e/kg。按照 IPCC 指南(2006 年)推荐采用实测值,因此取排放因子为 802.0 gCO₂e/kg。秸秆自然腐解参考 IPCC 指南(2006 年)第 5 卷第 4 章中固体废弃物的生物处理,废弃物堆肥产生的 CH₄排放量为 0.08 ~ 20 g/kg,平均值为 10 g/kg,N₂O 排放量为 0.2 ~ 1.6 g/kg,平均值为 0.6 g/kg,基于平均值计算,秸秆自然腐解折合温室气体排放因子为 439.0 gCO₂e/kg。

2.1.7 不同技术对比分析

不同秸秆综合利用技术的温室气体排放量差异较大,温室气体排放因子和组成如图 1、2 所示。

燃料化利用技术普遍优于其他利用技术,主要是秸秆燃料化利用直接替代化石能源的减排贡献,

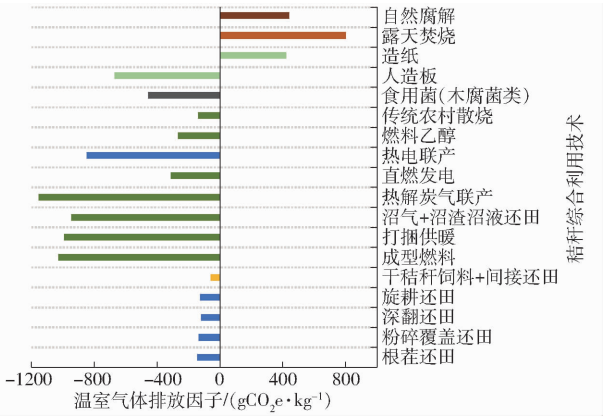


图 1 各类技术温室气体排放因子

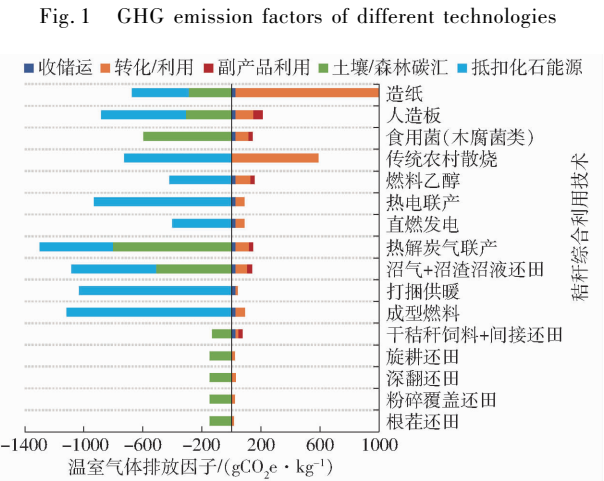


图 2 各类技术温室气体排放组成

Fig. 2 Composition of GHG emissions of different technologies

热解炭气联产、成型燃料、打捆供暖、沼气 + 沼渣沼液还田技术的温室气体减排优势明显。生物质发电技术增加余热利用可显著提升能源利用效率,温室气体减排仍有较大增长空间;燃料乙醇技术温室气体减排量较其他能源技术略低,仍待技术突破提升能源转化率以及副产物低碳循环利用。木腐菌类食用菌栽培和人造板技术的温室气体减排量仅次于秸秆燃料化利用技术,二者在减少木材砍伐的森林碳汇作用方面优势显著,食用菌废菌渣可还田固碳产生土壤碳汇,人造板废弃后可燃料化利用替代化石能源。秸秆直接还田和秸秆饲料间接还田技术均具有一定的土壤碳汇作用。秸秆造纸利用技术表现为正向碳排放,其森林碳汇和能源替代的碳减排无法全部抵消利用过程的碳排放。

2.2 秸秆综合利用减排固碳贡献

2020 年全国秸秆产生量为 8.56×10^8 t,可收集量为 7.22×10^8 t,利用量为 6.33×10^8 t,秸秆综合利用率达到 87.6%。肥料化、饲料化、燃料化、基料化、原料化利用量占秸秆可收集资源量的比例分别为 62.1%、15.4%、8.5%、0.7% 和 1.0%。据相关

研究及统计数据显示,2015 年秸秆露天焚烧量约为 8.11×10^7 t,约占秸秆可收集资源量 9.0%^[46-47];据生态环境部卫星遥感监测,2019 年全国秸秆焚烧火点数比 2015 年下降了 42%^[48],若按此比例计算,2020 年秸秆露天焚烧量约为 4.7×10^7 t,约占秸秆可收集资源量的 6.5%。

2020 年秸秆综合利用温室气体净减排贡献为 7.0×10^7 tCO₂e,其中,秸秆五料化利用的温室气体减排量为 1.26×10^8 tCO₂e,露天焚烧和自然腐解的温室气体排放量为 5.6×10^7 tCO₂e。

从五料化利用结构分析,2020 年,秸秆肥料化、饲料化、燃料化、基料化、原料化利用的温室气体减排量分别为 7.9×10^7 、 5×10^6 、 3.8×10^7 、 4×10^5 、 3×10^6 tCO₂e,占比分别为 62.7%、4.4%、30.0%、0.4%、2.6%。肥料化和燃料化利用的减排量最高,占总减排量的 92.7%,温室气体减排贡献较大。2020 年秸秆露天焚烧温室气体排放量为 3.8×10^7 tCO₂e,自然腐解温室气体排放量为 1.8×10^7 tCO₂e,如图 3 所示。

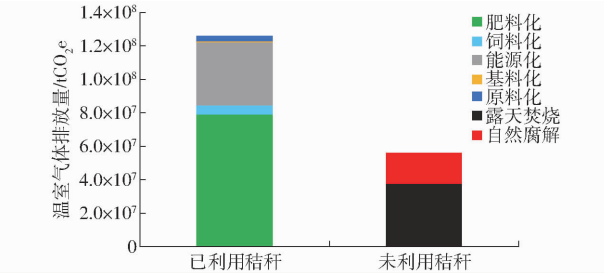


图 3 2020 年秸秆综合利用的温室气体排放量

Fig. 3 GHG emissions from utilization of straw in 2020

温室气体排放与减排结构分析如图 4 所示,2020 年秸秆综合利用过程的温室气体排放总量为 2.9×10^7 tCO₂e。秸秆利用温室气体减排源主要包括提高农田固碳的土壤碳汇、减少木材砍伐森林碳汇、抵扣化石能源的 CO₂减排,减排总量为 1.55×10^8 tCO₂e,其中土壤和森林碳汇占比为 69.2%,抵扣化石能源占比为 30.8%。

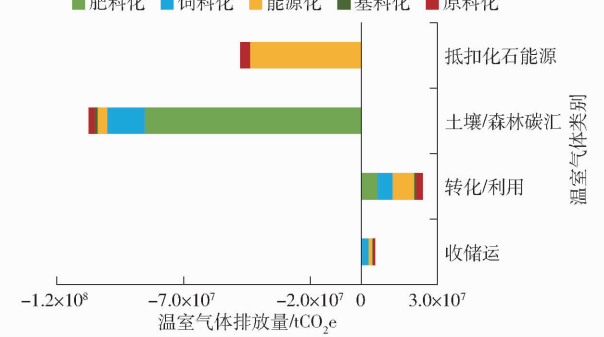


图 4 秸秆五料化利用的温室气体组成

Fig. 4 GHG composition of comprehensive utilization of straw

3 秸秆综合利用减排固碳潜力预测

3.1 秸秆资源量与利用预测

“十四五”期间,我国耕地总面积基本稳定在 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 以上,粮食播种面积稳定在 $1.1 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 以上,为保障粮食安全,粮食产量要实现稳中有增,年产量需稳定在 $6.5 \times 10^9 \text{ t}$ 以上。目前棉花、油料、糖类等作物播种面积约 $1.78 \times 10^7 \text{ hm}^2$,未来产量也将略有增加。基于中国农业科学院农业经济与发展研究所与国际食物政策研究所(IFPRI)共同开发的中国农业产业模型(China agriculture sector model,CASM),预测到 2060 年,粮食产量增长率约 8.4%,棉花、油料及糖类作物产量增长率约 14.5%。根据粮食产量测算出到 2030 年我国秸秆年产生量 $9.0 \times 10^8 \text{ t}$ 左右,到 2060 年将达到 $1.0 \times 10^9 \text{ t}$ 左右。按秸秆可收集率为 87% 计,预测 2030 年、2060 年的秸秆可收集资源量分别约为 $7.8 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $8.8 \times 10^8 \text{ t}$ 。

未来将持续推进秸秆综合利用,在保障农田土壤有机质含量和养殖饲料需求的基础上,促进秸秆燃料化、基料化和原料化等多元化利用,预计秸秆综合利用率将保持稳定增加,直至达到全部资源化利用。为保证粮食稳产增产,保障耕地土壤肥力,我国不同区域应保证适宜数量的秸秆还田。根据现有研究结果,在土壤有机质含量为 1%、年矿化率 2%、腐殖化系数 20% 情况下,为维持和逐步提高土壤有机质含量,每年需给土壤补充 $16.7 \sim 33.3 \text{ kg/hm}^2$ 干秸秆^[49-53]。不同地区的秸秆还田比例占秸秆产生量的 50%~70% 较为适宜,不同作物、不同土壤类型的秸秆还田量有一定差异。根据不同区域还田需求进行测算,各区域的秸秆适宜的还田量分别为:华北区 33.3 kg/hm^2 、长江中下游区 29.1 kg/hm^2 、东北区 27.3 kg/hm^2 、西北区 26.7 kg/hm^2 、华南区 21.0 kg/hm^2 、西南区 15.3 kg/hm^2 。因此,测算出全国秸秆肥料化利用总量应不低于 $4.9 \times 10^8 \text{ t}$ 。基于粮食、油料、棉花等作物的产量变化趋势,预计到 2030 年肥料化利用量将达到 $4.69 \times 10^8 \text{ t}$,2060 年将达到 $5.09 \times 10^8 \text{ t}$ 。

基于中国农业产业模型(CASM)畜禽农产品增长率,预测秸秆饲料化利用变化趋势,预计到 2030 年和 2060 年秸秆饲料化利用量将分别达到 $1.27 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $1.89 \times 10^8 \text{ t}$ 。秸秆基料化和原料化利用总体规模较小,2020 年仅占秸秆可收集量的 1.7%,未来将保持缓慢增加,预计到 2030 年、2060 年分别达到 $1.5 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $1.7 \times 10^7 \text{ t}$ 。在满足肥料、饲料农用需求基础上,基于不同区域的经济发展水平和用能

习惯,及现有秸秆燃料化技术成熟度和应用规模增长情况预测,秸秆燃料化利用到 2030 年将达到 $1.24 \times 10^8 \text{ t}$ 、2060 年将达到 $1.67 \times 10^8 \text{ t}$ 。

基于以上五料化利用情况预测,秸秆综合利用率到 2030 年将达到 94%,到 2040 年以后可基本实现全部利用。不同年度秸秆综合利用预测如图 5 所示。

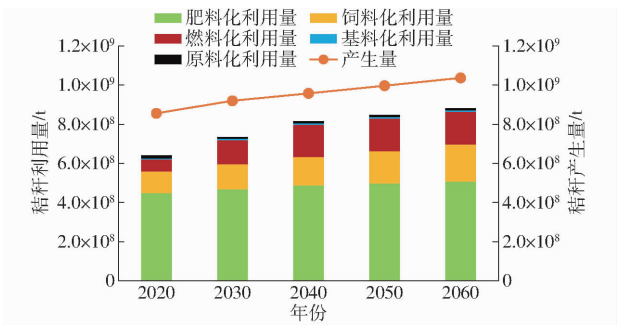


图 5 秸秆综合利用预测 (2020—2060 年)

Fig.5 Prediction of straw utilization potential (2020—2060)

3.2 情景假设

以减排固碳为导向,在满足土壤有机质提升和饲料需求的基础上,进行秸秆综合利用减排固碳预测。其中,秸秆五料化利用的秸秆收储运、加工与利用等过程的能源消耗,暂不考虑未来燃油、电力等能源的温室气体排放因子的变化。

情景 1(基线情景):基于秸秆综合利用现状及利用潜力进行预测。假设各类利用技术结构及能效不变,以及秸秆露天焚烧占未利用秸秆量的 48.5% 比例不变,考虑现有耕地面积、农业生产、草食畜牧、农村清洁能源等现状。

情景 2:基于情景 1 秸秆利用结构不变,燃料化利用的技术水平提升情况下预测。秸秆综合利用减排固碳贡献最大的是肥料化和燃料化利用。其中,秸秆燃料化利用的技术水平仍有提升潜力,随着生物质能技术不断发展,成型燃料/打捆供暖的能源转化效率将进一步提升,沼气/生物天然气将从低浓度厌氧发酵向高浓度或干法发酵转变,生物质发电将从直燃发电向热电联产转变,热解炭气联产将从传统低值气化向高值燃气或炭气联产转变,燃料乙醇将从淀粉糖类乙醇向纤维素乙醇转变,且转化效率也将进一步提升^[27,54-57]。研究假设在 2020 年的基础上,从原料收储、能源加工转化与应用全链条的净能量转化率 2030 年提升 5%~10%,2060 年提升 10%~20%。秸秆燃料化利用技术净能源转化率增长情况如表 3 所示。

情景 3:基于情景 2 燃料化利用的技术水平提升,燃料化利用结构变化情况下进行预测。在秸秆燃料化技术水平提升,同时基于不同燃料化技术成

熟度,考虑了在碳达峰碳中和目标下未来能源结构的需求,秸秆燃料化技术仍为多元化结构,但在非电领域应用将进一步增强,将逐步从传统的固体燃料向清洁燃气和液体燃料转变,按照目前的政策,由于秸秆直燃发电效率低,将向热电联产转变。燃料化利用结构变化后的秸秆原料量如表 4 所示。

3.3 秸秆综合利用减排固碳潜力

3 种情景下,秸秆综合利用温室气体减排固碳潜力预测如图 6 所示,到 2030 年秸秆综合利用减排固碳潜力将达到 $1.52 \times 10^8 \sim 1.72 \times 10^8$ tCO₂e,到 2060 年秸秆综合利用减排固碳潜力将达到 $2.20 \times 10^8 \sim 2.73 \times 10^8$ tCO₂e。

表 3 秸秆燃料化利用技术净能源转化率增量

Tab.3 Increase in energy conversion rate of energy utilization

技术类别	现状		能源转化率增量/%		
	原料用量	能源转化 率/%	2025	2030	2060
			年	年	年
成型燃料	1.1 kg/kg	78.0	3	5	10
打捆供暖	1.1 kg/kg	67.4	6	10	15
规模化沼气/生物 天然气	3.45 kg/m ³	35.8	6	10	20
热解炭气联产	3.33 kg/m ³	31.8	6	10	15
直燃发电	1.23 kg/(kW·h)	30.0	3	5	5
热电联产	1.23 kg/(kW·h)	70.0	3	5	10
燃料乙醇	6.0 kg/kg	26.3	3	5	20

表 4 秸秆燃料化利用变化量

Tab.4 Changes in straw energy utilization

t

类型	情景 1 和情景 2		情景 3	
	2030 年	2060 年	2030 年	2060 年
成型燃料	3.855×10^7	5.237×10^7	3.794×10^7	2.700×10^7
打捆供暖	7.63×10^5	10.36×10^5	7.63×10^5	4.70×10^5
沼气+沼渣沼液还田	2.286×10^7	3.105×10^7	2.00×10^7	4.54×10^7
热解炭气联产	2 000	2 000	5.00×10^6	2.133×10^7
直燃发电	4.336×10^7	5.890×10^7	1.734×10^7	0
热电联产	1.084×10^7	1.472×10^7	3.686×10^7	6.680×10^7
燃料乙醇	4.00×10^6	4.00×10^6	4.50×10^6	6.00×10^6
合计	1.24×10^8	1.67×10^8	1.24×10^8	1.67×10^8

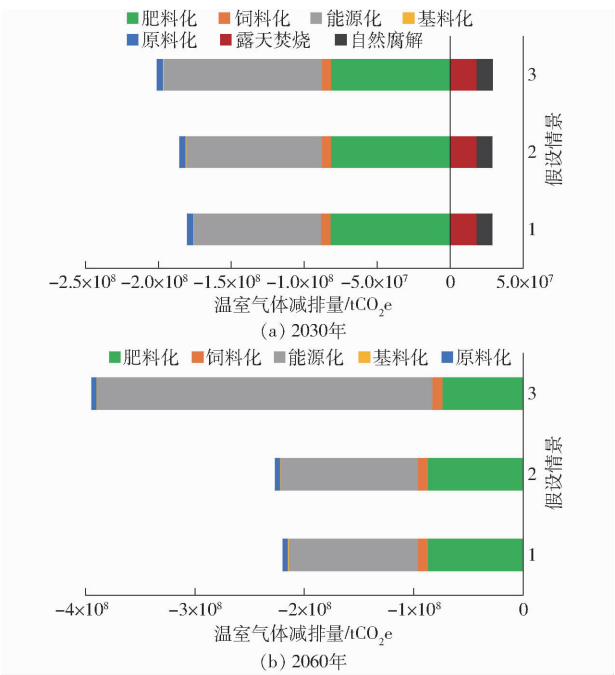


图 6 秸秆综合利用温室气体净减排量预测

Fig.6 Prediction of greenhouse gas emission reduction potential of comprehensive utilization of straw

到 2030 年秸秆焚烧或自然腐解温室气体排放量为 2.9×10^7 tCO₂e,秸秆综合利用的温室气体排放总量为 3.4×10^7 tCO₂e,秸秆综合利用的农田/森

林碳汇减排量为 1.22×10^8 tCO₂e,3 种不同情景下,秸秆综合利用抵扣化石能源减排量分别为 9.3×10^7 、 9.7×10^7 、 1.10×10^8 tCO₂e。到 2060 年,秸秆综合利用的温室气体排放总量为 $4.4 \times 10^7 \sim 4.6 \times 10^7$ tCO₂e,秸秆综合利用的农田/森林碳汇减排量为 $1.40 \times 10^8 \sim 1.72 \times 10^8$ tCO₂e,秸秆综合利用替代化石减排贡献为 $1.24 \times 10^8 \sim 1.48 \times 10^8$ tCO₂e。

秸秆五料化利用分析,肥料化和燃料化利用在秸秆综合利用减排固碳中仍发挥主要作用,到 2030 年肥料化利用减排固碳贡献占比为 40.7%、燃料化利用减排固碳贡献占比为 55.2%;到 2060 年,肥料化利用减排固碳贡献占比为 31.9%、燃料化利用减排固碳贡献占比为 62.8%。相关研究认为秸秆厌氧发酵和秸秆热解联产等能源化利用均具有较好的减排固碳贡献,通过秸秆制取生物天然气技术,替代天然气的温室气体最大减排量为 1.97×10^8 tCO₂e^[26];通过中速热解多联产技术(Biomass intermediate pyrolysis poly-generation, BIPP)生产生物炭联产可燃气和电力,替代化石燃料及生物炭固碳的温室气体减排总量最高可达 136.45 gCO₂e/MJ,在全国范围内的应用可以使 2030 年单位国内生产总值的碳排放量比 2005 年减少 2%~61%^[27]。基于情景 3 预

测,到 2060 年秸秆燃料化利用量占比仅 18.9%,温室气体减排贡献潜力占比可达 62.8%。秸秆燃料化利用的减排贡献中仍具有较高的还田固碳贡献,其中替代化石燃料减排贡献约占 72.2%、间接还田固碳贡献约占 27.8%。因此,秸秆综合利用应重视化石能源替代和土壤碳汇的双重减碳作用,在推广应用中应选择温室气体减排贡献潜力大的技术。

4 结论

(1)2020 年秸秆综合利用温室气体净减排量为 7.0×10^7 tCO₂e,其中,秸秆五料化利用的温室气体减排量为 1.26×10^8 tCO₂e,露天焚烧和自然腐解的温室气体排放量为 5.6×10^7 tCO₂e。

(2)秸秆综合利用温室气体减排固碳贡献潜力

较大,到 2030 年为 $1.52 \times 10^8 \sim 1.72 \times 10^8$ tCO₂e,2060 年为 $2.20 \times 10^8 \sim 2.73 \times 10^8$ tCO₂e。秸秆肥料化在五料化利用中的减排贡献最大,到 2030 年和 2060 年秸秆肥料化利用的减排固碳贡献分别达到 8.2×10^8 tCO₂e 和 8.7×10^7 tCO₂e,在秸秆综合利用贡献中的占比分别为 40.7% 和 31.9%。秸秆燃料化在五料化利用中的减排增加潜力最大,到 2030 年和 2060 年秸秆燃料化利用减排贡献占比分别为 55.2% 和 62.8%。

(3)建议加快秸秆综合利用,聚焦秸秆肥料化和燃料化,重点支持温室气体减排效果显著的秸秆利用技术,提高减排固碳贡献。积极推进秸秆全量利用,减少秸秆露天焚烧和自然腐解产生的大量温室气体排放,助力实现碳达峰碳中和目标。

参 考 文 献

[1] 中国农业绿色发展研究会,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所. 中国农业绿色发展报告 2020[M]. 北京:中国农业出版社,2020.

[2] 环资司. “十四五”循环经济发展规划[EB/OL]. 国家发展改革委,[2021-07-07]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/P020210707324072693362.pdf>.

[3] 新华社. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议强调 推动平台经济规范健康持续发展把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[EB/OL]. 中华人民共和国国家互联网信息办公室,[2021-03-15]. http://www.cac.gov.cn/2021-03/15/c_1617385021592407.htm.

[4] IPCC: Climate Change 2014: Synthesis report[R/OL]. IPCC, Geneva, Switzerland. [2019-05-12]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

[5] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[EB/OL]. [2019-07-01]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ycqhbh/wsqtz/201907/P020190701765971866571.pdf>

[6] 高志民. 碳中和,农业农村如何发力?[N/OL]. 人民政协报,[2021-03-25]. <http://finance.sina.com.cn/jjxw/2021-03-25/doc-ikkntiam7794557.shtml>.

[7] National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. IGES. [2020-07-01]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.

[8] ISO 14040:2006. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework[S]. 2006.

[9] 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. HUO Lili, TIAN Yishui, MENG Haibo, et al. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2011, 32(12): 1875-1880. (in Chinese)

[10] 霍丽丽,赵立欣,孟海波,等. 秸秆类生物质气炭联产全生命周期评价[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊):261-266. HUO Lili, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Life cycle assessment analysis for cogeneration of fuel gas and biochar[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.): 261-266. (in Chinese)

[11] 霍丽丽,赵立欣,姚宗路,等. 秸秆捆烧清洁供暖技术评价[J]. 农业工程学报,2020,36(24):218-226. HUO Lili, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Technical evaluation of baled stover burning for clean heating[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 218-226. (in Chinese)

[12] 高洪军,彭畅,张秀芝,等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(22):4613-4622. GAO Hongjun, PENG Chang, ZHANG Xiuzhi, et al. Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(22):4613-4622. (in Chinese)

[13] 陈鲜妮,岳周杰,葛玺祖,等. 长期秸秆还田对壤土耕层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报,2012,27(1):25-32. CHEN Xianni, YUE Xijie, GE Xizu, et al. Effect of long-term residue return on soil organic carbon storage[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(1):25-32. (in Chinese)

[14] LU F, WANG X, HAN B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's crop land [J]. Global Change Biology,2009,15(2): 281-305.

[15] LAI R. Carbon management in agricultural soils[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2007,12(2): 303-322.

[16] 王旭东,庄俊杰,刘冰洋,等. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 中国农业大学学报,2020,25(8):12-24. WANG Xudong, ZHUANG Junjie, LIU Bingyang, et al. Residue returning induced changes in soil organic carbon and the

influential factors in China's croplands: a Meta-analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(8):12-24. (in Chinese)

[17] WANG Y, WU P, MEI F, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A Meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288:112391.

[18] CHEN J, WANG S, KROXNER F, et al. Spatial analysis of the soil carbon sequestration potential of crop-residue return in China based on model simulation[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(2):184-195.

[19] LIU J, JIANG B, SHEN J, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2021, 311(6):107286.

[20] TRUONG T, KRISTIANCEN P, MARSCHNER P. Influence of mulch C/N ratio and decomposition stage on plant N uptake and N availability in soil with or without wheat straw[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2019, 182(6): 879-887.

[21] YAO L A, AK B, JY A, et al. Effect of chemical fertilizer and straw-derived organic amendments on continuous maize yield, soil carbon sequestration and soil quality in a Chinese Mollisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021,314:107403.

[22] MADHURI W. Long-term manure application for crop yield stability and carbon sequestration in subtropical region[J]. Soil Use and Mangement, 2021,37(2): 264-276.

[23] 张娟,徐宁彤,孟庆峰,等. 有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2):107-113.

ZHANG Juan, XU Ningtong, MENG Qingfeng, et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 107-113. (in Chinese)

[24] TAO Liang, WEN Xiaocui, LI Hui, et al. Influence of manure fertilization on soil phosphorous retention and clay mineral transformation: evidence from a 16-year long-term fertilization experiment[J]. Applied Clay Science, 2021, 204:106021.

[25] MEHMET A D, SAMUEL A S, ERNEST F A. Does biomass energy drive environmental sustainability? An SDG perspective for top five biomass consuming countries[J]. Biomass and Bioenergy, 2021,149:106076.

[26] YANG Qing, ZHOU Hewen, PIETRO B, et al. Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals[J]. Nature Communications, 2021, 12:1698.

[27] SUN Hui, WANG Enzhen, LI Xiang, et al. Potential biomethane production from crop residues in China: contributions to carbon neutrality [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021,148:111360.

[28] 国家可再生能源中心,国家发改委能源研究所,中国产业发展促进会生物质能产业分会. 生物质电价政策研究报告[R/OL]. [2018-11-07]. <https://news.bjx.com.cn/html/20181108/940341.shtml>.

[29] 魏庭玉. 木质纤维素类生物质转化为液体燃料的能源-环境-经济综合评价[D]. 杭州:浙江大学,2020.

WEI Tingyu. Integrated energy - environment - economy assessment of biofuel from lignocellulose[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2020. (in Chinese)

[30] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析[D]. 北京:中国农业科学院,2016.

WANG Hongyan. Emetgy analysis of straw biogas project for central gas supply based on life cycle assesement[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2016. (in Chinese)

[31] 张鹏,邹亚杰,赵鹤,等. 秸秆栽培黑木耳研究进展[J]. 北方园艺,2021(4):124-128.

ZHANG Peng, ZOU Yajie, ZHAO He, et al. Research progress in straw cultivation of auricularia heimuer[J]. Northern Horticulture,2021(4):124-128. (in Chinese)

[32] 张莹,田龙,徐敏慧,等. 食用菌菌糠综合利用研究进展[J]. 微生物学通报,2020,47(11):3658-3670.

ZHANG Ying, TIAN Long, XU Minhui, et al. Research progress in comprehensive utilization of spent mushroom substrates [J]. Microbiology China,2020,47(11):3658-3670. (in Chinese)

[33] 任鹏飞,刘岩,任海霞,等. 秸秆栽培食用菌基质研究进展[J]. 中国食用菌,2010,29(6):11-14.

REN Pengfei, LIU Yan, REN Haixia, et al. Research advance on substrate of edible fungi cultivated by straw[J]. Edible Fungi of China,2010,29(6):11-14. (in Chinese)

[34] 省林业局公布《浙江省木材制品耗材折率标准》、《浙江省人造板耗材折率标准》和《浙江省竹制品耗材折率标准》[J]. 浙江林业, 2002(6):10-11.

[35] 陈浩波,涂小琳,刘尚余. 秸秆人造板项目碳减排计量方法学研究[J]. 新能源进展,2016,4(5):373-378.

CHEN Haobo, TU Xiaolin, LIU Shangyu. Measurement methodology of carbon emission reduction for strawboard project[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016,4(5):373-378. (in Chinese)

[36] 韩育林. 造纸工业的生命周期水耗、能耗、温室气体排放及可持续生产路径分析[D]. 广州:华南理工大学,2019.

HAN Yulin. Life cycle analysis of water consumption, energy consumption, and GHG emissions and sustainable production pathways investigation for papermaking industry in China[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

[37] 孙文叶. 废弃农作物秸秆造纸项目碳减排方法学研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2017.

SUN Wenye. Study of carbon emission reduction methodology in waste straw paper-making project[D]. Handan: Hebei University of Engineering,2017. (in Chinese)

[38] 中国造纸协会,中国造纸学会. 造纸工业可持续发展白皮书[J]. 造纸信息, 2019(3):10-19.

[39] 农业农村部新闻办公室. 全国大规模小麦机收告捷机收率达 97% [EB/OL]. 农业农村部. [2020-06-17]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202006/t0200617_6346651.htm.

[40] ANDREAE M O, MERLET P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. Glob[J]. Biogeochem. Cycles,

2001,15(4): 955 – 966.

[41] ZHANG Y S, SHAO M, LIN Y, et al. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region[J]. China Atmos. Environ. , 2013, 76: 189 – 199.

[42] LI Jing, BO Yu, XIE Shaodong. Estimating emissions from crop residue open burning in China based on statistics and MODIS fire products[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016,44:158 – 170.

[43] 王艳,郝炜伟,程轲,等. 秸秆露天焚烧典型大气污染物排放因子[J]. 中国环境科学,2018,38(6):2055 – 2061.
WANG Yan, HAO Weiwei, CHENG Ke, et al. Emission factors of typical air pollutants from open burning of crop straws[J]. China Environmental Science,2018,38(6):2055 – 2061. (in Chinese)

[44] LI X H, WANG S H, DUAN L, et al. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China[J]. Environmental Science & Technology,2007,41(17):6052 – 6058.

[45] WEI W, WANG S X, CHATANI S, et al. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. Atmospheric Environment,2008,42: 4976 – 4988.

[46] 石祖梁,贾涛,王亚静,等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(9): 32 – 37.
SHI Zuliang, JIA Tao, WANG Yajing, et al. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from burning in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Plannin,2017,38(9):32 – 37. (in Chinese)

[47] ZHUANG Y, LI R, YANG H, et al. Understanding temporal and spatial distribution of crop residue burning in China from 2003 to 2017 using MODIS data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3):15071504.

[48] 生态环境部. 卫星监测 2019 年全国秸秆焚烧火点数比 2015 年下降 42% [EB/OL]. 新华社. [2020 – 10 – 21]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1681161320100950136&wfr=spider&for=pc>.

[49] 陈帅. 黑土区坡耕地玉米秸秆还田水土保持功效研究[D]. 北京:中国科学院大学,2019.
CHEN Shuai. Effect of corn straw returning on soil and water conservation in slopping farmland of black soil region [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

[50] 高燕,张延,郭亚飞,等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳周转的影响[J]. 土壤与作物,2019,8(1):93 – 101.
GAO Yan, ZHANG Yan, GUO Yafei, et al. Effect of residue return patterns on soil organic carbon turnover—a review[J]. Soils and Crop,2019,8(1):93 – 101. (in Chinese)

[51] 窦莉洋. 秸秆还田对不同类型土壤团聚体稳定性、有机碳含量及其分布的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018.
DOU Liyang. Effects of straw return to field in stability, organic carbon content and distribution of different types of soil aggregates [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2018. (in Chinese)

[52] 李硕. 秸秆还田与减量施氮对土壤固碳、培肥和农田可持续生产的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
LI Shuo. Effect of straw return and nitrogen reduction on soil carbon sequestration, fertility and sustainable production [D]. Yangling: Northwest A&F University,2017. (in Chinese)

[53] 李新华,朱振林,董红云,等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报,2015, 34(11):2228 – 2235.
LI Xinhua, ZHU Zhenlin, DONG Hongyun, et al. Effects of different return modes of wheat straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration of maize fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015,34(11):2228 – 2235. (in Chinese)

[54] 田慎重. 基于长期耕作和秸秆还田的农田土壤碳库演变、固碳减排潜力和碳足迹分析[D]. 泰安:山东农业大学,2014.
TIAN Shenzhong. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system [D]. Taian:Shandong Agricultural University,2014. (in Chinese)

[55] KUNWAR P, MONIKA Y, NUPUR K, et al. Strategies to improve solid state anaerobic bioconversion of lignocellulosic biomass: an overview[J]. Bioresource Technology, 2021, 331: 125036.

[56] LI Yangyang, QI Chuanren, ZHANG Yiran, et al. Anaerobic digestion of agricultural wastes from liquid to solid state: performance and environ-economic comparison[J]. Bioresource Technology, 2021, 332: 125080.

[57] MUHAMMAD A, WU Jing, MAHDI S, et al. Novel insights of impacts of solid content on high solid anaerobic digestion of cow manure: kinetics and microbial community dynamics[J]. Bioresource Technology, 2021, 333: 125205.