

张鑫,朱宇恩,李磊,等.“双碳”视角下基于LCA的市域秸秆资源化利用探讨[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(4):65-74.

Zhang X, Zhu Y E, Li L, et al. Exploring local straw resource utilization based on LCA from “double carbon” perspective[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2023,43(4):65-74.

doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202304009



“双碳”视角下基于LCA的市域秸秆资源化利用探讨

张鑫^{1,2},朱宇恩³,李磊⁴,谢莹⁵,李华^{2,3*}

(1.山西农业大学 城乡建设学院,山西 晋中 030801;2.山西大学 资源与环境工程研究所,山西 太原 030006;

3.山西大学 环境与资源学院,山西 太原 030006;4.太原恒瑞泰环保科技有限公司,山西 太原 030006;

5.山西大地民基生态环境股份有限公司,山西 太原 030002)

摘要:[目的]从“双碳”角度进一步推进市域秸秆资源化利用,明确各区域秸秆资源化利用全生命周期过程中的固碳减排能力。[方法]本文以山西省晋中市为例,基于《山西省统计年鉴》的相关数据,研究了2020年晋中市的作物秸秆资源量、全量化利用潜力及其空间分布特征,运用生命周期理论分析了各县(市、区)秸秆全量化利用的碳中和强度。[结果]2020年晋中市主要农作物秸秆可收集资源量为164.90万t,主要以玉米秸秆为主,占比84.66%,主要集中于晋中市中部及东北部地区。全市肥料化、饲料化、基料化、原料化、能源化利用潜力分别为71.41、39.00、3.77、1.00、49.72万t。单位秸秆原料化利用的固碳减排能力最高,为1.83 tCO₂ eq·t⁻¹,市域作物秸秆能源化利用碳中和强度最高,在0.2~0.7 tCO₂ eq·hm⁻²之间。[结论]寿阳县的作物秸秆可收集资源量最大,肥料化需求最高,应该重点推进秸秆的科学还田;祁县的牲畜饲养量大且饲料化碳中和强度最高,应该重点聚焦秸秆的饲料化利用方式,提高饲料化利用效率;东部地区由于其山地面积占比较大,不适宜作物种植,除了必要的秸秆还田外,应该重点推进秸秆的能源化、原料化利用。

关键词:双碳目标;秸秆资源化利用;碳减排;LCA;晋中市

中图分类号:X712;S19

文献标识码:A

文章编号:1671-8151(2023)04-0065-10

实施“双碳”战略不仅是我国主动承担应对全球气候变化的国际责任,同时也是我国践行社会主义生态文明观的重要体现。农业作为实现“双碳”目标的重要领域,如何发展绿色现代化农业、减少农业生产过程中的温室气体排放、促进农业废弃物的资源化利用就变得尤为重要。传统的农作物种植主要依赖于化肥的使用,因其施用总量大^[1]、强度高^[2]、生产力低^[3],现在已经成为制约我国农业发展的主要因素;而化肥、农药的使用、化石燃料的直接消耗以及秸秆的燃烧^[4]是我国农业碳排放的主要来源。秸秆作为主要的农业废弃物,因其富含C、H、O、N、P、K等元素以及纤维素、半纤维素等有机能源,可以对其进行肥料化、饲料

化、能源化、基料化、原料化利用。因此,秸秆的资源化利用对于发展绿色现代农业、减少农业碳排放具有重要的现实意义,同时有助于我国“双碳”目标的实现。

对于各级政府而言,想要对所辖区域的秸秆进行资源化利用的同时促进当地“双碳”目标的实现,就必须在全面评估秸秆资源化利用潜力的同时从全生命周期的角度评价各种资源化利用方式下的固碳减排量。前人对于作物秸秆资源化的研究主要集中于利用方式^[5-6]以及全国和大流域水平上利用潜力的研究^[7-9];对于秸秆利用碳减排的研究则主要集中于某种利用方式^[10-12]和全国尺度上^[13]综合利用对碳减排贡献。目前还没有学者在

收稿日期:2023-04-07 修回日期:2023-07-27

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1803000);山西农业大学青年科技创新(2016019)

作者简介:张鑫(ORCID:0009-0007-3013-1094),博士研究生,讲师,研究方向:环境污染评价与修复和农业废弃物利用

*通信作者:李华(ORCID:0000-0002-5711-1612),博士,教授,博士生导师,研究方向:土壤污染治理与生态恢复及植物营养。E-mail: lihua@sxu.edu.cn

市域尺度上利用生命周期评价方法来评估秸秆资源化利用潜力及其固碳减排能力。晋中市位于山西省中部,属于“十四五”规划布局的国家级城市群之一,也是山西省的主要粮食产地之一。本文以晋中市为例,基于《山西省统计年鉴》^[14],在分析2020年晋中市作物秸秆资源量、构成、空间分布以及全量化利用潜力的基础上,基于单位秸秆各利用方式全生命周期的固碳减排能力,重点分析了秸秆资源化利用的碳中和强度及其空间分布,以期为当地提高秸秆利用率、发展现代化农业以及实现“双碳”目标提供资料支持和决策参考,同时也能对其他城市群的建设起到一定的借鉴作用。

1 材料与方 法

1.1 作物秸秆理论资源量估算

作物秸秆理论资源量是指农作物收获后除了可食用部分外剩余的茎、叶农作物副产品总量,不包括后期精加工、作物根的资源量,与秸秆经济产量和草谷比两因子密不可分^[9],则作物秸秆理论资源量的计算公式如下所示:

$$S_R = S_{EQ} \times S_G \quad (1)$$

式中: S_R 为作物秸秆资源量,t; S_{EQ} 为作物经济产量,t; S_G 为作物草谷比系数,常见作物的 S_G 如表1所示。

1.2 作物秸秆可收集资源量估算

作物秸秆可收集资源量是指农作物经过机械和人工等收获技术,可从田间收集起来,可供人类利用的秸秆资源最大数量,作物秸秆可收集资源量的计算公式如下:

$$S_P = S_R \times S_C \quad (2)$$

式中: S_P 为作物秸秆可收集资源量,t; S_C 为作物秸秆可收集系数,常见作物的 S_C 如表1所示。

1.3 作物秸秆全量化利用潜力估算

(1)肥料化利用潜力:主要是指秸秆还田的数量,还田方式包括根茬还田、粉碎覆盖还田、深翻还田、旋耕还田等。根据农业部《区域农作物秸秆全量处理利用技术导则》^[18]华北农区秸秆还田量推荐范围为3~9 t·hm⁻²,按还田量3 t·hm⁻²计算。

(2)基料化利用潜力:主要是指用于生产食用菌培养基质的秸秆数量。根据调查,晋中市食用菌种植主要为平菇、双孢蘑菇。根据农业部《区域

表1 作物秸秆资源化利用潜力估算参数

Table.1 Calculation parameters of resource utilization potential of crop straw

| 作物类别 Crops category | 草谷比 S_G ^[9,15-18] Straw and grains ratios | 可收集系数 S_C ^[8,18] Collectivity coefficients | |
|------------------------|---|--|------|
| 小麦 | 1.30 | 0.73 | |
| 玉米 | 1.20 | 0.85 | |
| 谷类作物 | 谷子 | 1.59 | 0.85 |
| | 高粱 | 1.60 | 0.85 |
| | 其它谷物 | 1.50 | 0.85 |
| 豆类作物 | 大豆 | 1.34 | 0.56 |
| | 其它豆类 | 1.60 | 0.56 |
| 薯类作物 | 马铃薯 | 0.46 | 0.73 |
| | 其它薯类 | 0.46 | 0.73 |
| 油料作物 | | 1.22 | 0.83 |
| 蔬菜 | | 0.10 | 0.60 |

农作物秸秆全量处理利用技术导则》^[18],1 t秸秆可转化平菇1500 kg、双孢蘑菇550~800 kg。2020年晋中市食用菌的产量来源于晋中市农业农村局的统计数据。

(3)饲料化利用潜力:主要是指用于加工生产羊和牛、马、驴等大型牲畜饲料所需的秸秆数量。饲料化利用量参考《晋中市秸秆资源综合利用计划》。

(4)原料化利用潜力:主要是指用于制造人造板材、清洁造纸等的秸秆数量。原料化利用量参考《晋中市秸秆资源综合利用计划》。

(5)能源化利用潜力:主要是指用于生产可替代能源的秸秆数量,能源化利用方式主要包括生产成型燃料、进行打捆供暖、制备燃料乙醇、进行沼气发酵、热解气化等。可能源化利用的秸秆数量为扣除其它方式秸秆利用数量外剩余的秸秆资源量。

1.4 作物秸秆全量化利用碳减排量估算

作物秸秆全量化利用碳减排量是指作物秸秆进行资源化利用时所减少的CO₂排放数量,包括代替露天焚烧引起的CO₂排放量、秸秆替代物全生命周期的CO₂排放量以及资源化利用过程引起的碳汇量及全生命周期的CO₂排放量,秸秆露天焚烧引起的碳排放量为0.802 tCO₂eq·t⁻¹^[13],其余计算过程中所用到的各项参数如表2、表3所示。

$$CQ = \sum_{i=5}^n CQ_i + CE_b \times S_p \quad (3)$$

$$CQ_i = (CS_i - CE_i + CR_i \times r_i) \times SU_i \quad (4)$$

式中： CQ 为作物秸秆全量化利用可减排的 CO_2 量， tCO_2eq ； CQ_i 为作物秸秆进行第*i*种方式利用时可减排的 CO_2 量， tCO_2eq ； CE_b 为作物秸秆露天焚烧时的碳排放系数， $tCO_2eq \cdot t^{-1}$ ； CS_i 为作物秸秆进行第*i*种方式利用时的碳汇系数， $tCO_2eq \cdot t^{-1}$ ； CE_i 为作物秸秆进行第*i*种方式利用时全生命周期的碳排放系数， $tCO_2eq \cdot t^{-1}$ ； CR_i 为作物秸秆进行第*i*种方式利用时所替代物的全生命周期的碳排放系数， $tCO_2eq \cdot t^{-1}$ ； r_i 为秸秆替代系数； SU_i 为作物秸秆进行第*i*种方式的利用数量， t 。

表2 秸秆全量化利用过程的碳汇系数及碳排放系数

Table 2 Carbon sink and emission coefficient in the process of full quantitative utilization of straw

单位： $tCO_2eq \cdot t^{-1}$

| 利用方式 Utilization mode | CE_i | 类别 Category | CS_i |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|
| 肥料化利用 | 根茬还田 0.004 ^[13] | 秸秆还田 | 0.147 ^[13,26-27] |
| | 粉碎覆盖 0.011 ^[13] | | |
| | 还田 0.028 ^[13] | | |
| | 深耕还田 0.021 ^[13] | | |
| 饲料化利用 | 0.074 ^[21] | 粪污还田 | 0.132 ^[21] |
| 能源化利用 | 成型燃料 0.090 ^[19] | — | — |
| | 打捆供暖 0.042 ^[22] | — | — |
| | 燃料乙醇 0.131 ^[12] | — | — |
| | 沼气工程 0.139 ^[23] | 沼渣还田 | 0.513 ^[13] |
| 基料化利用 | 热解气化 0.146 ^[24] | 木炭还田 | 0.804 ^[13] |
| | 0.141 ^[13] | 菌渣还田 | 0.598 ^[28] |
| 原料化利用 | 人造板材 -0.362 ^[25] | 减少伐木 | 0.308 ^[29] |
| | 造纸 0.711 ^[20] | | 0.290 ^[20] |

注： CE_i 的核算边界为秸秆从农作物收获后还田，离田收储运、加工转化与利用等全过程的 CO_2 排放

Note: The calculation boundary of CE_i included the CO_2 emissions from straw after crop harvest, encompassing the processes of incorporation into the field, off-field collection, storage, transportation, processing, transformation, and utilization

1.5 作物秸秆全量化利用碳中和强度估算

作物秸秆全量化利用碳中和强度是指作物秸秆进行肥料化、饲料化、基料化、原料化以及能源化利用时单位面积可中和的 CO_2 的数量，其值越

表3 秸秆替代物的替代系数及其全生命周期的碳排放系数

Table 3 Substitution coefficient of straw substitute and its carbon emission coefficient in the whole life cycle

| 替代物 Substitute | r_i | $CR_i/(tCO_2eq \cdot t^{-1})$ |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 氮肥 | 0.007 ^[30] | 0.577 ^[32] |
| 磷肥 | 0.002 ^[30] | 0.173 ^[32] |
| 钾肥 | 0.001 ^[30] | 0.049 ^[32] |
| 精饲料 | 0.300 ^[21] | 0.192 ^[33] |
| 锯末 | 1.000 ^[31] | 0.144 ^[13] |
| 传统木板 | 1.200 ^[25] | 0.283 ^[34] |
| 传统纸张 | 2.358 ^[20] | 1.125 ^[35-36] |
| 成型燃料 | 0.598 ^[11] | |
| 打捆秸秆 | 0.647 ^[22] | 2.500 ^[19,37] |
| 沼气 | 0.256 ^[38] | |
| 燃气 | 0.182 ^[37] | |
| 燃料乙醇 | 替代汽油 0.124 ^[12] | 3.088 ^[12] |

注： CR_i 的核算边界为替代物从原料开采、加工、制造、使用、维护等等直到最终废弃处理等全过程的 CO_2 排放

Note: The accounting boundary of CR_i is the CO_2 emissions from the entire process of raw material extraction, processing, manufacturing, use, maintenance, etc. to the final disposal of substitutes

大，说明该地区碳中和的能力越强。具体计算公式如下：

$$CNI = CQ/A \quad (5)$$

式中： CNI 为作物秸秆资源化利用潜力碳中和强度， $tCO_2eq \cdot hm^{-2}$ ； A 为区域面积， hm^2 。

1.6 数据来源

2020年晋中市主要农作物经济产量、播种面积、各县(市、区)耕地面积等数据来源于2021年山西省统计年鉴^[14]。

2 结果与分析

2.1 晋中市主要农作物秸秆资源量及构成

如表4、图1所示，2020年晋中市主要农作物秸秆理论和可收集资源量分别为200.95万t、164.9万t，平均可收集系数为0.82；晋中市主要以玉米种植为主，其播种面积占全市总播种面积的74.47%，其次为蔬菜、谷子、大豆，占比分别为9.33%、4.87%、2.95%；玉米秸秆是晋中市的主要农作物秸秆，其可收集资源量占全市的84.66%，其次为蔬菜、谷子、高粱，占比分别为6.67%、3.04%、1.99%，其余农作物秸秆占比仅为3.64%。由此可见，虽然谷类作物、豆类作物、

薯类作物、油料作物、蔬菜类在晋中市都有种植, 要以玉米秸秆为主, 蔬菜、谷子、高粱秸秆为辅。但秸秆资源量差异相对较大, 农作物秸秆品类主

表4 2020年晋中市主要农作物播种面积、产量及秸秆资源量

Table 4 The major crop sowing area, yield, and straw resource quantity in Jinzhong City in 2020

| 作物类别 Crop category | 播种面积/($\times 10^3$ hm ²) Sowing area | 经济产量/万 t Yield | 理论秸秆资源量/万 t Theoretical Straw resources | 可收集秸秆资源量/万 t Collectable straw resources |
|-----------------------|---|-------------------|--|---|
| 小麦 | 6.62 | 2.59 | 3.37 | 2.46 |
| 玉米 | 209.01 | 136.87 | 164.24 | 139.61 |
| 谷子 | 13.68 | 3.72 | 5.91 | 5.02 |
| 高粱 | 4.89 | 2.41 | 3.86 | 3.28 |
| 其它谷物 | 1.73 | 0.40 | 0.59 | 0.51 |
| 大豆 | 8.29 | 2.01 | 2.70 | 1.51 |
| 其它豆类 | 0.46 | 0.09 | 0.1 | 0.08 |
| 马铃薯 | 4.53 | 1.62 | 0.74 | 0.54 |
| 其它薯类 | 1.98 | 0.68 | 0.31 | 0.23 |
| 油料作物 | 3.28 | 0.65 | 0.79 | 0.66 |
| 蔬菜 | 26.18 | 183.47 | 18.34 | 11.00 |
| 合计 | 280.65 | 334.51 | 200.95 | 164.90 |

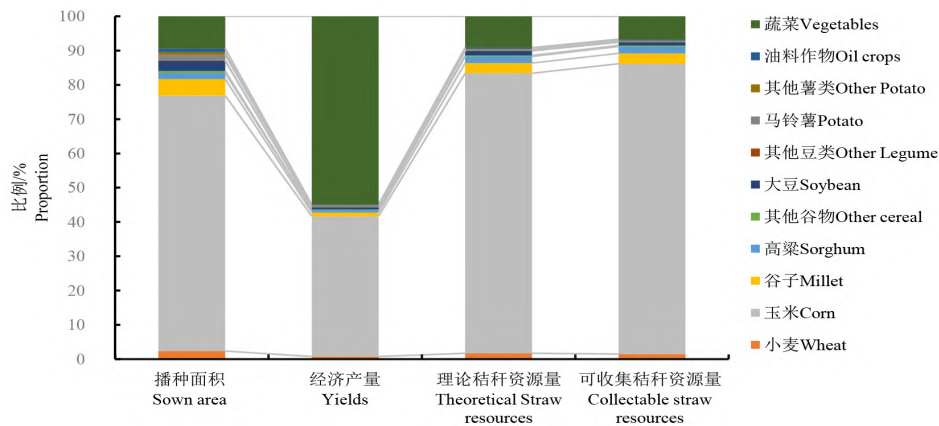


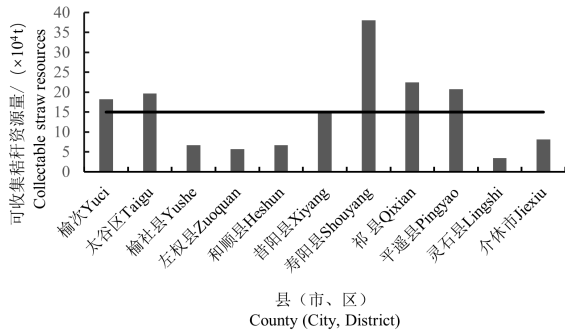
图1 2020年晋中市主要农作物播种面积、产量及秸秆资源量占比

Fig.1 Proportion of main crops in sowing area, yield, and straw resources in Jinzhong City in 2020

2.2 晋中市主要农作物秸秆可收集资源量的集中程度及空间分布

如图2所示,2020年晋中市作物秸秆可收集资源量区域均值为15.0万t,其中,寿阳县作物秸秆可收集资源量最大,为38.0万t,最小为灵石县,为3.48万t,仅为平均水平的23.20%;在区域11个县(市、区)中,有5个县(市、区)的作物秸秆可收集资源量超过了区域平均值,分别为榆次区、太谷区、寿阳县、祁县、平遥县,昔阳县的作物秸秆可收集资源量基本与区域均值持平,有将近1/2的县(市、区)的作物秸秆可收集资源量还未达到区域平均水平。

根据各县(市、区)作物秸秆可收集资源量占总区域的比例来确定该地区作物秸秆可收集资源量的集中程度,比值乘以100在18~24以内的为一级区,在12~18以内的为二级区,在6~12以内的为三级区,在0~6以内的为四级区。如图3作物秸秆可收集资源量空间分布图所示,作物秸秆可收集资源量有一级区1个,为寿阳县,主要是因为虽然寿阳县的单位面积经济产量为 $13.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但总作物种植面积占到全市的19.48%,而玉米种植面积则占到了全市总面积的22.13%,经济产量占全市24.60%;二级区2个,为祁县、平遥县;主要是因为祁县单位面积经济产量达到了 $17.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,



图中实线为区域可收集秸秆资源量均值
Solid line means regional average value of collectable crop

straw resources
图2 2020年晋中市各县(市、区)秸秆可收集资源量及区域均值
Fig.2 The collectable straw resources and regional average value of all counties in Jinzhong City in 2020

但种植面积却仅占全市的9.79%，而平遥县则是因为种植面积大，占全市的14.18%；三级区3个，为榆次区、太谷区、昔阳县，虽然榆次区、太谷区单位面积经济产量分别达到了17.84 t·hm⁻²、20.64 t·hm⁻²，但种植谷子、高粱等草谷比系数相对较高的作物面积却相对较小；四级区5个，为榆社县、左权县、和顺县、灵石县、介休市，主要是因为这5个县(市、区)单位面积经济产量低且种植面积小。

2.3 晋中市作物秸秆全量化利用分析

2.3.1 秸秆肥料化利用

根据2021年《山西省统计年鉴》，2020年末晋中市实有耕地面积为35.82万hm²，按照农业部发

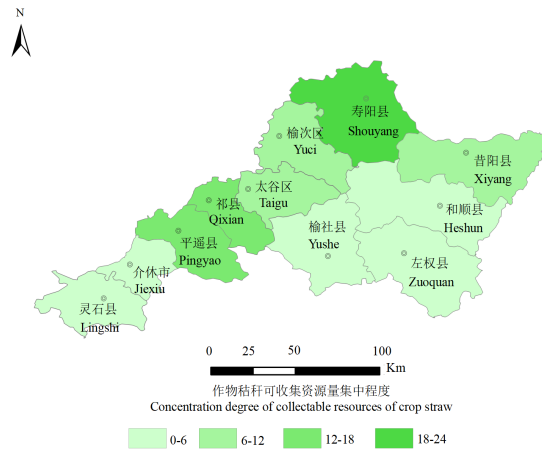


图3 2020年晋中市作物秸秆可收集资源量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of collectable crop straw resources in Jinzhong City in 2020

布的《区域农作物秸秆全量处理利用技术导则》中华北农区秸秆还田量推荐范围为3~9 t·hm⁻²，按最低还田量3 t·hm⁻²计算，则所需秸秆量为107.46万t，扣除留茬量36.05万t，还需71.41万t秸秆进行肥料化利用，占秸秆可收集资源量的43.31%。根据各县(市、区)的耕地面积，估算了晋中市秸秆肥料化需求量的空间分布特征，如图4(a)所示，寿阳县秸秆肥料化需求最大，榆次区、平遥县次之，主要和其耕地面积相对较大有关；虽然左权县、榆社县、和顺县、灵石县、介休市的耕地面积较祁县、太谷县小，但其肥料化需求却在祁县、太谷县之上，主要是因为秸秆留茬量小。

表5 晋中市各县(市、区)耕地面积

| 区域 | | 区域 | | 区域 | | 区域 | |
|--------|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|------------------|
| Region | Cultivation area | Region | Cultivation area | Region | Cultivation area | Region | Cultivation area |
| 榆次区 | 4.56 | 太谷区 | 2.82 | 榆社县 | 2.12 | 左权县 | 1.75 |
| 和顺县 | 2.15 | 昔阳县 | 2.94 | 寿阳县 | 7.21 | 祁县 | 2.71 |
| 平遥县 | 4.63 | 灵石县 | 2.31 | 介休市 | 2.63 | | |

2.3.2 秸秆饲料化利用

根据晋中市秸秆资源综合利用计划，预计推进秸秆饲料化利用39万t，占秸秆可收集资源量的23.65%，可喂养羊55.71万只羊或牛、马、驴等大型牲畜11.14万头；根据2021年山西统计年鉴，2020年末晋中市羊存栏量为99.81万只，大型牲畜存栏量为14.42万只，由此可见，若全部满足羊、

牛、马、驴的饲料需求，需要秸秆120.34万t，预计推进的秸秆饲料化利用量仅占到需求量的32.41%。根据各县(市、区)的食草性牲畜的年末存栏数量，估算了晋中市秸秆饲料化需求量的空间分布特征，如图4(b)所示，晋中市秸秆饲料化需求量较多的区域主要集中于晋中市中部地区，其中祁县秸秆饲料化需求最大，要远远大于其他县

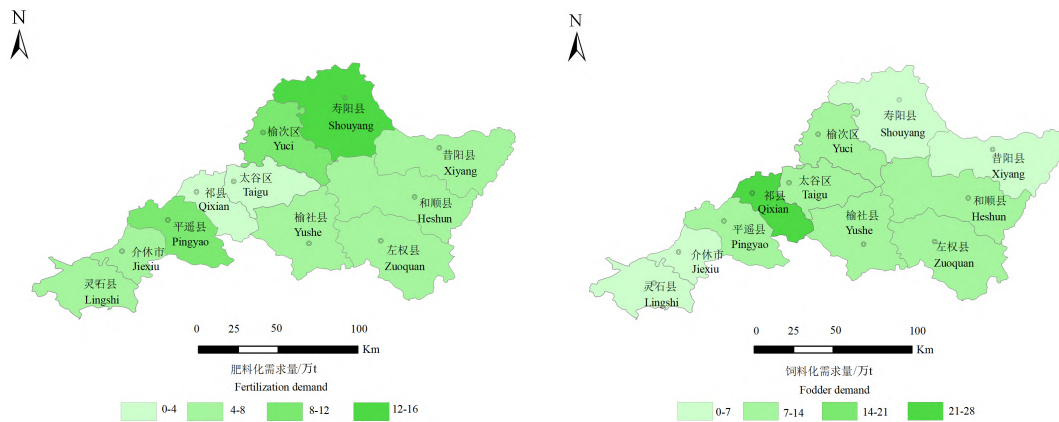


图4 晋中市肥料化、饲料化需求量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of fertilizer and feed demand in Jinzhong City

(市、区),在27万t以上,即便把全县可收集秸秆用于制备饲料,也还有4.88万t的缺口,主要是因为其大型牲畜的年末存栏量就占到了全市的38.29%,同时羊的年末存栏量也高于平均水平。

2.3.3 秸秆基料化和原料化利用

根据调查,晋中市食用菌种植主要为平菇、双孢蘑菇。2020年食用菌总量0.52万t,所需秸秆量为3.77万t,占可收集资源量的2.29%;此外,根据晋中市秸秆资源综合利用计划,预计推进秸秆原料化利用1万t,占可收集资源量的0.61%。

2.3.4 秸秆能源化利用

除去以上肥料化、饲料化、基料化、原料化利用的秸秆量,剩余可利用的秸秆数量为49.72万t,占可收集资源量的30.15%,可以进行热解气化、沼气化、炭化、生产固化成型燃料等能源化利用。

2.4 作物秸秆全量化利用碳中和强度及空间分布

如图5所示,各县(市、区)作物秸秆能源化利用的碳中和强度最高,在0.2~0.7 tCO₂eq·hm⁻²之间,其次为肥料化利用、饲料化利用,其碳中和强度分别在0.02~0.12、0~0.125 tCO₂eq·hm⁻²,基料化利用和原料化利用的碳中和强度最低,分别在0.005~0.030、0.005~0.025 tCO₂eq·hm⁻²。介休市除了饲料化利用外,其余4种资源化利用方式的碳中和强度都比其他县(市、区)要高,主要是因为其区域面积同比最小;祁县除了肥料化利用外,其余4种资源化利用方式的碳中和强度也都相对较高,尤其是饲料化利用的碳中和强度,要明显高于其他县(市、区),主要是因为其羊、牛、马、驴等牲畜的养殖数量多,饲料化利用潜力最大,同时区

域面积也相对较小;东部地区的昔阳县、和顺县、左权县、榆社县的各种资源化利用方式的碳中和强度都相对较小,主要是因为东部地区虽然区域面积较大,但山地面积占比较大,可耕地面积较小;寿阳县除肥料化利用碳中和强度相对较大之外,其余利用方式的碳中和强度都相对较小,主要是因为寿阳县的耕地面积最大,肥料化需求最高。整体来看,各县(市、区)作物秸秆资源化利用的碳中和强度在0.5~2.5 tCO₂eq·hm⁻²之间,西南部地区的祁县、平遥县、介休市的碳中和强度最高,其次为榆次区、太谷区、灵石县,主要是因为这些地区的区域面积相对较小,但地势相对平坦、水资源相对充足,适宜农作物的种植。

3 讨论

明确市域秸秆资源总量、类型、全量化利用潜力及其空间分布特征是对秸秆进行资源化利用并进行科学规划的基础,同时从全生命周期的角度评估各种资源化利用方式下的固碳减排量对于促进当地“双碳”目标的实现以及经济社会的协调发展有着重要的作用。本文在计算秸秆资源化利用潜力时所用到的草谷比系数和可收集系数这两个关键参数,都是引用的其他学者的相关研究成果,并没有进行实测和现场调研,因此计算出的结果可能与实际情况有出入。计算表明,晋中市2020年主要农作物秸秆可收集资源量为164.90万t,主要以玉米秸秆为主,这与杜艳玲等^[38]的研究结果一致,玉米秸秆占比高达84.66%,主要集中于中部和东北部地区。寿阳县的作物秸秆可收集资源

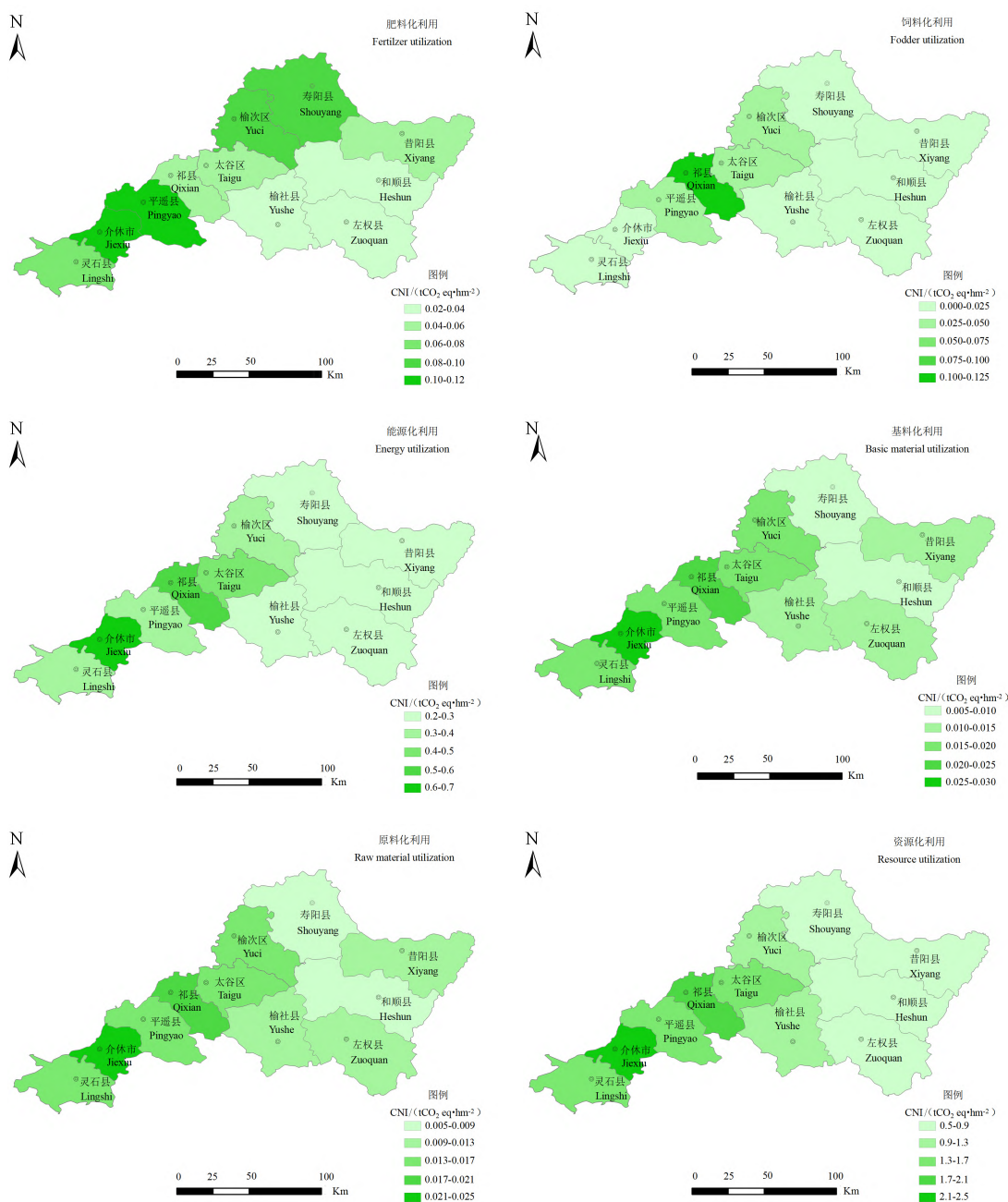


图5 作物秸秆全量化利用碳中和强度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of carbon neutralization intensity of the full quantitative utilization of crop straw

表6 晋中市各县(市、区)区域面积

Table 6 Area of counties in Jinzhong City

单位:万hm²

| 区域 Region | 耕地面积 Cultivation area | 区域 Region | 耕地面积 Cultivation area | 区域 Region | 耕地面积 Cultivation area | 区域 Region | 耕地面积 Cultivation area |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| 榆次区 | 13.27 | 太谷区 | 10.34 | 榆社县 | 16.51 | 左权县 | 20.28 |
| 和顺县 | 22.51 | 昔阳县 | 19.43 | 寿阳县 | 21.11 | 祁县 | 8.54 |
| 平遥县 | 12.60 | 灵石县 | 12.06 | 介休市 | 7.43 | | |

量最大,肥料化需求也最大,应该重点推进秸秆还田,聚焦秸秆的肥料化利用,同时碳中和强度可达到 $0.04\sim 0.06\text{ tCO}_2\text{ eq}\cdot\text{hm}^{-2}$;祁县的作物秸秆可收集资源量仅次于寿阳县,饲料化需求最大,应该重点聚焦秸秆的饲料化利用方式,改进饲料生产工艺,提高饲料化利用效率,同时碳中和强度可达到 $0.100\sim 0.125\text{ CO}_2\text{ eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。单位秸秆原料化利用的固碳减排能力最高,为 $1.83\text{ tCO}_2\text{ eq}\cdot\text{t}^{-1}$,与霍丽丽等^[13]的研究结果存在一定差异,主要是因为核算边界以及测算相关参数不是完全一致。虽然单位秸秆原料化利用的固碳减排能力最高,但目前进行原料化利用的数量却最少,各级政府应该出台相应政策,鼓励并支持建设一批利用作物秸秆生产人造板和纸张的厂家,增加秸秆的原料化利用率。市域作物秸秆能源化利用碳中和强度最高,在 $0.2\sim 0.7\text{ tCO}_2\text{ eq}\cdot\text{hm}^{-2}$,在5种常见的能源化利用方式中,制备成型燃料和进行打捆供暖的固碳减排能力也相对较高,可以优先考虑这2种能源化利用方式,但生产燃料乙醇所带来的经济效益要明显高于其他方式,所以各级政府也应该鼓励建设一批生物质燃料乙醇企业。东部地区由于其山地面积占比较大,不适宜作物种植,除了必要的秸秆还田外,当地政府应该重点推进秸秆的能源化、原料化利用。

4 结论

本文对2020年晋中市作物秸秆的构成、全量化利用潜力以及各利用方式下的碳中和强度及其空间分布特征进行初步分析,并估算了作物秸秆全量化利用碳减排经济效益。结果表明,单位秸秆原料化利用的固碳减排能力最高,市域作物秸秆能源化利用碳中和强度最高。寿阳县的作物秸秆可收集资源量最大,肥料化需求最大,应该重点推进秸秆科学还田,提高秸秆肥料化利用效率;祁县的牲畜饲养量大且饲料化碳中和强度最高,应该重点聚焦秸秆的饲料化利用方式,提高饲料化利用效率;东部地区由于其山地面积占比较大,不适宜作物种植,除了必要的秸秆还田外,应该重点推进秸秆的能源化、原料化利用。各级政府应当基于当地的“双碳”目标,结合秸秆综合利用现状,因地制宜的制定促进秸秆综合利用的各项政策,进一步提高秸秆综合利用率,同时也能实现环境

效益和经济效益的双赢。

参考文献

- [1]李圆宾,王舒华,徐璐瑶,等.中美肥料施用及产出效益对比分析[J].中国土壤与肥料,2021(5):252-259.
Li Y B, Wang S H, Xu L Y, et al. Comparative analysis of fertilizer application and yield benefits between China and America[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(5): 252-259.
- [2]冯志文.化肥面源污染的评估及其对策分析——以苏中某市为例[D].扬州:扬州大学,2010.
Feng Z W. Empirical study on chemical fertilizer non-point source pollution——a case study of a city in central Jiangsu Province [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.
- [3]中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计年鉴,2021:222-239.
National Bureau of statistics of the people's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Yearbook. 2021:222-239.
- [4]Zhou Y, Zhang Y Y, Zhao B B, et al. Estimating air pollutant emissions from crop residue open burning through a calculation of open burning proportion based on satellite-derived fire radiative energy [J]. Environmental Pollution, 2021, 286: 117477.
- [5]Dias D, Lapa N, Bernardo M, et al. Properties of chars from the gasification and pyrolysis of rice waste streams towards their valorisation as adsorbent materials [J]. Waste Management, 2017, 65:186-194.
- [6]Meng X P, Guo Z Y, Yang X N, et al. Straw incorporation helps inhibit nitrogen leaching in maize season to increase yield and efficiency in the Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211:105006.
- [7]霍丽丽,赵立欣,孟海波,等.中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J].农业工程学报,2019,35(13):218-224.
Huo L L, Zhao L X, Meng H B, et al. Study on straw multi-use potential in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13):218-224.
- [8]李胜男,纪雄辉,邓凯,等.区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J].农业工程学报,2020,36(12):221-228.
Li S N, Ji X H, Deng K, et al. Analysis of regional distribution patterns and full utilization potential of crop straw resources [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12):221-228.
- [9]毕于运,高春雨,王亚静,等.中国秸秆资源数量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.
Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, et al. Estimation of straw resources in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12):211-217.
- [10]冯新新.秸秆成型燃料集中供暖温室气体减排研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
Feng X X. Study on greenhouse gas emission reduction of straw briquette central heating [D]. Beijing: Chinese Academy

- of Agricultural Sciences, 2021.
- [11] 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 L L, Tian Y S, Meng H B, et al. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(12): 1875-1880.
- [12] 马丹. 基于SimaPro的燃料乙醇生命周期分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
Ma D. Life cycle assessment of fuel ethanol based on Simapro [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2020.
- [13] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359.
Huo L L, Yao Z L, Zhao L X, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 349-359.
- [14] 山西省统计局. 山西省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 122-140.
Shanxi Bureau of Statistics. Shanxi Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 122-140.
- [15] 杨海蓉, 周怀平, 解文艳, 等. 山西省农作物秸秆资源量及时空分布特征[J]. 山西农业科学, 2015, 43(11): 1458-1463.
Yang H R, Zhou H P, Xie W Y, et al. Crop straw resources and the space-time distribution characteristics in Shanxi Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 1458-1463.
- [16] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1-8.
Xie G H, Han D Q, Wang X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1-8.
- [17] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 9-17.
Xie G H, Wang X Y, Han D Q, et al. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 9-17.
- [18] 王飞, 石祖梁, 李想, 等. 区域秸秆全量处理利用的概念、思路与模式探讨[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(5): 8-12.
Wang F, Shi Z L, Li X, et al. Discussion on concept, design idea and technology model of regional total straw utilization [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(5): 8-12.
- [19] 夏德建, 任玉珑, 史乐峰. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J]. 统计研究, 2010, 27(8): 82-89.
Xia D J, Ren Y L, Shi L F. Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain [J]. Statistical Research, 2010, 27(8): 82-89.
- [20] 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 W Y. Study of carbon emission reduction methodology on waste straw paper-making project [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017.
- [21] 廖仁郡. 基于生命周期理论的规模化养猪场碳足迹与水足迹研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
Liao R J. Carbon footprint and water footprint of scale pig farms based on life cycle theory [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [22] 王环. 秸秆打捆直燃集中供暖温室气体减排研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
Wang H. The mitigation potential of greenhouse gas emissions from central heating based on direct combustion of bundled crop straws [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [23] 王红彦, 王亚静, 高春雨, 等. 基于LCA的秸秆沼气集中供气工程环境影响评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 237-243.
Wang H Y, Wang Y J, Gao C Y, et al. Environment impact evaluation of straw biogas project for central gas supply based on LCA [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 237-243.
- [24] Yang Q, Zhou H W, Bartocci P, et al. Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals [J]. Nature Communications, 2021, 12: 1698.
- [25] 宋思琦. 再生秸秆墙体材料的生命周期环境影响评价研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
Song S Q. Study on life cycle environmental impact assessment of recycled straw wall materials [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020.
- [26] Liu J, Jiang B S, Shen J L, 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: 107286.
- [27] Liang Y, Al-Kaisi M, Yuan J C, 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.
- [28] 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 Y, Tian L, Xu M H, et al. Research progress in comprehensive utilization of spent mushroom substrates [J]. Microbiology China, 2020, 47(11): 3658-3670.
- [29] 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 H B, Tu X L, Liu S Y. Measurement methodology of carbon emission reduction for strawboard project [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016, 4(5): 373-378.
- [30] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1-21.
- [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 P, Zou Y J, Zhao H, et al. Research progress in straw cultivation of *Auricularia heimuer* [J]. *Northern Horticulture*, 2021(4):124-128.
- [32]陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. *生态学报*, 2015, 35(19):6371-6383.
- Chen S, Lu F, Wang X K. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19):6371-6383.
- [33]王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13):179-184.
- Wang X Q, Liang D L, Wang X D, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13):179-184.
- [34]吴智慧. 木材的生命周期与碳汇的关系分析[J]家具, 2015, 36(2):1-6, 43.
- Wu Z H. Relation analysis of the life cycle and carbon sequestration of wood[J]. *Furniture*, 2015, 36(2):1-6, 43.
- [35]陈莎, 杨孝光, 李焱佩, 等. 中国纸产品全生命周期GHG排放分析[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(6):944-949.
- Chen S, Yang X G, Li Y P, et al. Life-cycle GHG emissions of paper in China [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(6):944-949.
- [36]任丽娟. 生命周期评价方法及典型纸产品生命周期评价研究[D]. 北京:北京工业大学, 2011.
- Ren L J. Methodology research and typical paper products of life cycle assessment [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [37]江唐洋. 中国产业和能源系统碳排放及减排研究:投入产出分析视角[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
- Jiang T Y. Study on carbon emission and reduction of China's industry and energy systems: The perspective of input-output analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [38]张海成, 张婷婷, 郭燕, 等. 中国农业废弃物沼气化资源潜力评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(6):194-199.
- Zhang H C, Zhang T T, Guo Y, et al. Chinese marsh gas resource potential of agricultural wastes [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6):194-199.
- [39]杜艳玲, 周怀平, 程曼等. 山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3):329-336.
- Du Y L, Zhou H P, Cheng M, et al. Study on composition and utilization potential of waste from planting and breeding in Shanxi Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3):329-336.

Exploring local straw resource utilization based on LCA from “double carbon” perspective

Zhang Xin^{1,2}, Zhu Yuen³, Li Lei⁴, Xie Ying⁵, Li Hua^{2,3*}

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2. Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. Taiyuan Hengruitai Environmental Protection Technology Company Limited, Taiyuan 030006, China; 5. Shanxi Dadi Minji Ecological Environment Company Limited, Taiyuan 030002, China)

Abstract: [Objective] In order to further promote the utilization of straw resources from the perspective of “dual carbon” at the local level, this study aimed to clarify the carbon sequestration and emission reduction capacity during the entire lifecycle of straw resource utilization in different regions. [Methods] Based on relevant data from the “Statistical Yearbook of Shanxi Province”, the present study analyzed the quantity of crop straw resources, the potential for comprehensive utilization, and their spatial distribution characteristics in Jinzhong City in 2020. In addition, the life cycle theory was applied to analyze the carbon-neutrality intensity of comprehensive straw for each county. [Results] The results showed that the collectible quantity of main crop straw resources in Jinzhong City in 2020 was 1.649 million tons, primarily composed of corn straw, vegetables, millet, sorghum and others accounted for 84.66%, 6.67%, 3.04%, 1.99%, and 3.64% of the total straw resources, respectively. The corn straw resources mainly concentrated in the central and northeast areas of the City. The potential for fertilizer utilization, feed utilization, raw material utilization, energy utilization, and material utilization were 714 100, 390 000, 37 700, 10 000, and 497 200 tons, respectively. The carbon sequestration and emission reduction capacity of straw raw material utilization per unit straw was the highest, at 1.83 t CO₂ eq·t⁻¹. The carbon neutrality intensity of crop straw energy utilization was the highest, ranging from 0.2 to 0.7 tCO₂ eq·hm⁻². [Conclusion] Shouyang County has the largest collectible crop straw resource quantity and the highest demand for fertilizer utilization, emphasizing the need for scientific straw incorporation into the field. Qi County had a large livestock population and the highest carbon neutrality intensity in feed utilization, suggesting a focus on straw utilization for animal feed to improve efficiency. Due to its large proportion of mountainous area unsuitable for crop cultivation in the eastern region, apart from necessary straw incorporation into the field, the emphasis should be on promoting energy and raw material utilization of straw.

Keywords: double carbon target, straw resource utilization, carbon emission reduction, LCA, Jinzhong City