



农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响研究——以黄河流域9省(区)60个地级行政区为例

杜欢政, 刘香玲, 王韬

引用本文:

杜欢政,刘香玲,王韬. 农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响研究——以黄河流域9省(区)60个地级行政区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1443-1451.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0785>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究

杜艳玲, 周怀平, 程曼, 解文艳, 杨振兴, 郭晋, 吕倩倩, 王志伟

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 329-336 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0161>

我国蔬菜废弃物资源化利用技术分析及展望

刘佳豪, 姚昕, 翟胜, 孙树臣, 杨伟鹏, 魏蓉, 陈锦秀, 丁新惠, 田晓飞

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 636-644 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0267>

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

徐子云, 李永强, 李洁, 王哲, 贾森

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 904-913 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0638>

城乡有机废弃物资源化利用现状及展望

李龙涛, 李万明, 孙继民, 褚飞, 饶中秀, 黄凤球

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 264-271 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0150>

切实加强农业资源环境工作不断提升农业绿色发展水平——在全国农业资源环境与能源生态工作会暨 2016中国现代农业发展论坛上的讲话

张桃林

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 95-101 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0025>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杜欢政, 刘香玲, 王韬. 农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响研究——以黄河流域9省(区)60个地级行政区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1443-1451.

DU H Z, LIU X L, WANG T. Impact of agricultural waste energy utilization on rural energy sustainability in the Yellow River basin: based on data analysis of 60 prefecture-level administrative regions in nine provinces[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1443-1451.

农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响研究 ——以黄河流域9省(区)60个地级行政区为例

杜欢政¹, 刘香玲^{2,3}, 王韬^{4*}

(1. 同济大学生态文明与循环经济研究所, 上海 200092; 2. 井冈山大学马克思主义学院, 江西 吉安 34009; 3. 同济大学马克思主义学院, 上海 200092; 4. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:为探讨不同类型农业废弃物资源化利用方式对农村能源可持续性的影响, 根据1990—2019年黄河流域9省(区)60个地级行政区(市、州、盟)的农作物产量和畜禽数量, 采用草谷比法和排泄系数法计算出其农业废弃物资源量。同时, 从能源消耗、能源结构、环境排放三方面构建农村能源可持续性指标体系。结果表明: 1990—2019年, 黄河流域农业废弃物年产生量呈现先增加后减少的“双峰”变化趋势, 峰值分别出现在1996年和2006年, 分别为6.81亿t和7.06亿t。2019年黄河流域农村能源可持续性平均得分为0.323 7, 且省域差异显著, 呈现上下游高、中游低的空间分布特征。最后, 依据不同类型农业废弃物资源化利用方式对农村能源可持续性影响程度、秸秆与畜禽粪便比率以及秸秆资源密度, 推荐了适合各地级行政区的农业废弃物资源化利用方式。

关键词: 农业废弃物; 资源化; 能源可持续性; 农村

中图分类号: X71; F323.214

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)06-1443-09

doi: 10.13254/j.jare.2022.0785

Impact of agricultural waste energy utilization on rural energy sustainability in the Yellow River basin: based on data analysis of 60 prefecture-level administrative regions in nine provinces

DU Huanzheng¹, LIU Xiangling^{2,3}, WANG Tao^{4*}

(1. Institute of Ecological Civilization and Circular Economy, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Marxism, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China; 3. School of Marxism, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. College of Environmental Science And Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this study, we discuss the impact of different types of agricultural waste energy utilization methods on rural energy sustainability. According to the crop yield and number of livestock and poultry in 60 prefecture-level administrative regions (cities, prefectures, and leagues) in nine provinces in the Yellow River basin from 1990 to 2019, the amount of agricultural waste resources was calculated by using the ratio of grass to grain and excretion coefficient. Additionally, a rural energy sustainability index system was constructed from three aspects: energy consumption, energy structure, and environmental emissions. The results show that from 1990 to 2019, the annual production of agricultural waste in the Yellow River basin showed a “double peak” trend of increasing first and then decreasing, with peaks of 681 million t and 706 million t in 1996 and 2006, respectively. In 2019, the average score of rural energy sustainability in the Yellow River basin was 0.323 7, and the provincial differences were significant, showing high upstream and downstream and low midstream spatial distribution characteristics. According to the impact of different types of agricultural waste energy utilization methods on rural energy sustainability, the ratio of straw to livestock and poultry manure, and the density of straw resources, the energy utilization methods of local administrative regions are recommended.

Keywords: agricultural waste; energization; energy sustainability; rural

收稿日期: 2022-11-04 录用日期: 2023-01-16

作者简介: 杜欢政(1962—), 博士, 教授, 主要从事循环经济、绿色发展、生态文明理论与实践研究。E-mail: dhz0403@126.com

*通信作者: 王韬 E-mail: a.t.wang@foxmail.com

基金项目: 国家社科基金重大项目(21ZDA087); 国家自然科学基金项目(71974144); 吉安社科项目(23GHA550); 上海市环境与生态高峰学科科学研究基金项目(2022001); 四川矿产资源研究中心资助项目(SCKCZY2020-ZD002)

Project supported: The Major Program of the National Social Science Foundation of China (21ZDA087); The National Natural Science Foundation of China (71974144); The Social Studies Program of Ji'an (23GHA550); Shanghai Environmental and Ecological Peak Science Research Fund (2022001); Project of Sichuan Mineral Resources Research Center (SCKCZY2020-ZD002)

<http://www.aed.org.cn>

化石燃料的大量使用,导致全球气候变暖、极端天气频现。为应对全球气候变化,我国做出“力争于2030年前CO₂排放达到峰值、2060年前实现碳中和”的庄严承诺。作为具有“碳中性”的可再生能源,农业废弃物资源化利用既能够减少秸秆焚烧产生的有害气体,又能够解决畜禽粪便带来的环境污染,还能够替代化石能源,减少CO₂排放。农业废弃物资源化利用已成为“双碳”背景下我国低碳发展与可再生能源开发的战略重点。值得注意的是,“十三五”期间我国非化石能源发电装机容量虽稳居世界第一,但生物质发电量仅从2015年的0.1亿kWh增加到2020年的0.3亿kWh,尤其是农村能源利用过分依赖传统化石能源。生物质能消费能力不足,存在能源结构不合理、绿色低碳转型难度大等难题。因此,推进农业废弃物资源化利用不仅是落实我国“双碳”目标的重要抓手,而且是实现农村能源可持续性发展目标的必然要求。

我国是农业大国且农业结构的地区差异性显著,农业废弃物年产量大,分布不均衡与相对集中并存。近年来,无论全国还是区域农业废弃物资源化利用都受到学者的广泛关注。田宜水^[1]、张海成等^[2]、赵晓等^[3]估算了我国农业废弃物燃气产能潜力;崔卫芳等^[4]、毛爱涵等^[5]、张颖等^[6]、王爱军等^[7]分别对三江源区、青海省、河南省以及我国中部地区的农业废弃物资源化利用潜力进行了估算;陈利洪^[8]、张蓓蓓^[9]、刘志彬^[10]定量分析了我国农业废弃物资源化潜力及空间分布差异;付鹏等^[11]、洪振国^[12]从发电潜力角度估算了我国农业废弃物资源化利用对节能减排的贡献,张崇尚等^[13]从农业废弃物资源化利用与能源企业的区域布局出发,探讨农业废弃物能源密度与能源企业布局之间的耦合关系。

纵观现有研究,学者们对农业废弃物资源化利用进行了诸多有益探索,但仍存在一定的局限性。第一,对黄河流域尤其是从地市尺度探讨农业废弃物资源化利用的研究尚处于空白;第二,区域农业废弃物资源化研究主要集中在农业废弃物资源化潜力定量分析、空间分布及减排效应等方面,农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响尚未见报道。作为我国北部最重要的地理单元,黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。为此,本研究从计算黄河流域农业废弃物资源量出发,对比不同类型农业废弃物资源化利用方式新增能源供应量差异的同时,构建黄河流域农村能源可持续性指标体系,探讨不同类型农业废弃物资源化利用方式对黄河流域

农村能源可持续性影响,为推动黄河流域生态保护和高质量发展,实现“双碳”目标提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域西起巴颜喀拉山,东临渤海,南至秦岭,北抵阴山,流域面积宽广,是我国重要的生态安全屏障、经济社会发展区域以及农产品生产基地。2019年,黄河流域粮食、肉类产量分别占全国的31.73%、35.31%,贡献了24.97%的国内生产总值和30.14%的农林牧渔总产值。流域内有农村人口2.02亿,约占全国农村人口的36.61%。随着我国经济社会的快速发展,黄河流域农村能源消耗发生较大改变,农村一次能源人均消耗量从2000年的0.037 9 t·人⁻¹(以标准煤计,下同)增长到2019年的0.329 2 t·人⁻¹,但仍低于2019年全国农村人均能源消耗水平(0.401 8 t·人⁻¹)。为了更好地体现以自然流域为基础,考虑地域单元的完整性以及地区经济与黄河的直接关联性原则,选取黄河干流和支流流经的9省(区)60个地级行政区为研究样本(图1),上中下游划分参考《黄河年鉴》的标准,同时考虑行政区影响(2019年国务院批复同意山东省莱芜市撤地设区,辖区划归济南市)。

1.2 研究方法

农业废弃物资源量的计算、农业废弃物能源产生量的计算以及农村能源可持续性指标体系构建的具体方法如下。

1.2.1 农业废弃物资源量的计算

农业废弃物是指农业生产过程中产生的非第一目的性产品的衍生物,常见的生物质废弃物有农作物秸秆、农产品加工副产品、畜禽粪便等。本研究中的农业废弃物主要包括农作物秸秆和畜禽粪便,二者资源量之和即为农业废弃物资源量。其中,计算农作物秸秆资源量采用草谷比法^[14],计算畜禽粪便资源量采用排泄系数法^[8]。

1.2.2 农业废弃物新增能源供应量的计算

采用秸秆制生物燃气、秸秆粪便联合制生物燃气、秸秆固化成型燃料发电、秸秆粪便联合制气发电等四种类型农业废弃物资源化利用方式,计算不同类型农业废弃物资源化利用方式新增能源供应量,转换参数见表1。

1.2.3 农村能源可持续性指标体系构建

根据联合国可持续发展目标(SDGs)之一——可持续能源目标,参考已有研究^[15-17],结合黄河流域农

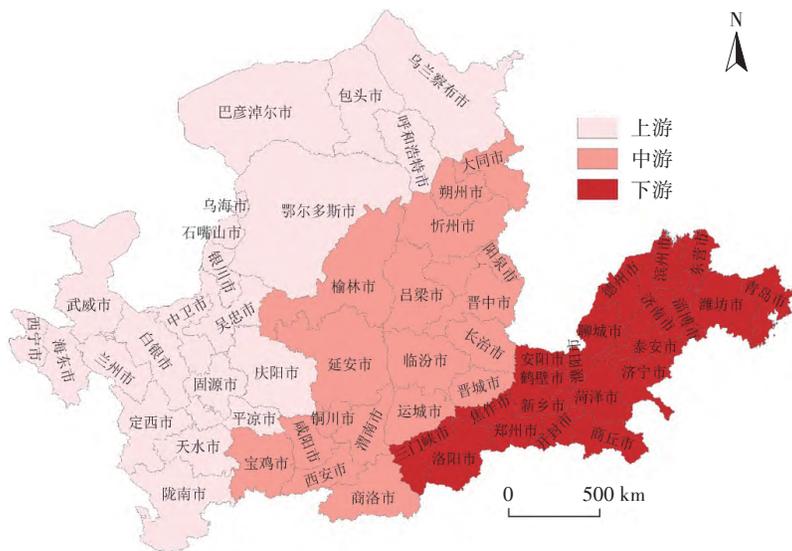


图1 研究区位图

Figure1 Location map of the Yellow River basin

表1 不同类型资源化利用方式的转换参数

Table 1 Conversion parameters for different types of energy utilization

| 转化方式 Transformation mode | 转换参数 Conversion parameter | 单位 Unit | 数据来源 Data source |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|
| 秸秆制生物燃气 | 162 | $m^3 \cdot t^{-1}$ | [8-10] |
| 秸秆粪便联合制生物燃气 | 549 | $m^3 \cdot t^{-1}$ | [8-10] |
| 秸秆固化成型燃料发电 | 238 | $kWh \cdot t^{-1}$ | 调研数据 |
| 秸秆粪便联合制气发电 | 444 | $kWh \cdot t^{-1}$ | 调研数据 |

注:调研数据来自浙江博新新能源科技服务有限公司、山东正信德环保科技发展有限公司、浙江嘉兴新嘉爱斯热电有限公司,转换参数取三个公司调研数据的算术平均值。

Note: The survey data are obtained from Zhejiang Boxin New Energy Technology Services Co., Ltd., Shandong Zhengxinde Environmental Technology Development Co., Ltd., and Zhejiang Jiaying New Jiase Thermal Power Co., Ltd., the conversion parameters take the arithmetic mean of the three companies' survey data.

村能源消耗实际特点,遵循科学性、全面性、可操作性、量化的基本原则以及数据可得性,从能源消耗、能源结构、环境排放三方面构建农村能源可持续性指标体系(表2)。

能源消耗表征农村生产和生活所消耗的能源,选择人均能源用量和人均可再生能源用量衡量能源消耗状况。其中:人均能源用量由终端能源消耗量/农村人口计算得出;人均可再生能源用量由终端能源消耗中的可再生能源消耗量/农村人口计算得出。

能源结构是指能源消耗中各类能源的构成,选择电气化率、可再生能源占比、煤炭占比反映能源结构状况。其中:电气化率由终端电力消耗量/终端能源消耗量计算得出;可再生能源占比由一次能源消耗中的可再生能源消耗量/一次能源消耗量计算得出;煤炭占比由一次能源消耗中的煤炭消耗量/一次能源消

表2 黄河流域农村能源可持续性指标体系

Table 2 Indicator system of rural energy sustainability in the Yellow River basin

| 一级指标 Level 1 indicator | 二级指标 Level 2 indicator | 指标含义 Indicator meaning | 计量单位 Unit of measurement | 指标属性 Indicator attribute | 权重 Weight |
|---------------------------|---------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| 能源消耗 | 人均能源用量 | 终端能源消耗量(以标准煤计)/农村人口 | $t \cdot 人^{-1}$ | 正向 | 0.15 |
| | 人均可再生能源用量 | 可再生能源消耗量(以标准煤计)/农村人口 | $t \cdot 人^{-1}$ | 正向 | 0.10 |
| 能源结构 | 电气化率 | 电力消耗量/终端能源消耗量 | % | 正向 | 0.25 |
| | 可再生能源占比 | 可再生能源消耗量/一次能源消耗量 | % | 正向 | 0.10 |
| | 煤炭占比 | 煤炭消耗量/一次能源消耗量 | % | 负向 | 0.10 |
| 环境排放 | 人均碳排放量 | 碳排放量(以CO ₂ 计)/农村人口 | $t \cdot 人^{-1}$ | 负向 | 0.20 |
| | 单位能耗碳排放量 | 碳排放量(以CO ₂ 计)/终端能源消耗量(以标准煤计) | $t \cdot t^{-1}$ | 负向 | 0.10 |

耗量计算得出。

环境排放可反映农村能源消耗的环境可持续性,用人均碳排放量和单位能源碳排放量来评价环境排放状况。其中:人均碳排放量由终端能源消耗的碳排放量/农村人口计算得出;单位能源碳排放量由终端能源消耗的碳排放量/终端能源消耗量计算得出。

采用层次分析法和熵权法相结合赋予二级指标权重。其中,层次分析法是专家主观地根据指标重要性打分确定权重,熵权法是根据指标提供的信息,依赖数据本身的离散程度确定权重^[18]。两种方法相结合既避免过于客观而忽视主观因素的影响,又避免因主观因素导致失去客观事实的偏差。对于层次分析法和熵权法国内外文献已有较多论述,在此直接给出通过两种方法计算得出的二级指标权重结果(表2)。为了便于比较,对可持续性得分统一进行归一化处理,分值范围0~1,分数高者为最佳。

1.3 数据来源及参数确定

农作物、畜禽的种类和数量主要来源于黄河流域9省(区)统计年鉴以及60个地级行政区统计年鉴等。农作物草谷比系数、畜禽粪便排泄系数参考石元春^[14]、杜欢政等^[19]的研究结果;产气因子参考陈利洪^[8]的研究结果;折标煤系数参考《中国能源统计年鉴》以及陈利洪^[8]的研究结果;能源数据主要来源于《中国能源统计年鉴》,部分缺失数据采用插值法处理。

2 结果与分析

2.1 黄河流域农业废弃物资源量的时空演变

1990—2019年,黄河流域农业废弃物累积量177.90亿t,农业废弃物年产生量呈现先增加后减少的“双峰”变化趋势,峰值出现在1996年和2006年,分别为6.81亿t和7.06亿t。随着年代变化,黄河流域农业废弃物累积量也呈现先增加后减少的变化趋势,从20世纪90年代的53.08亿t增加到21世纪00年代的63.28亿t,后减少到21世纪10年代的61.54亿t。黄河流域上、中、下游农业废弃物累积量呈现不同的变化趋势。上游农业废弃物累积量一直处于增长状态,从20世纪90年代的14.54亿t增长到21世纪10年代的19.83亿t,增长率达36.38%。中游和下游农业废弃物累积量先增加后减少,分别从20世纪90年代的11.75亿、28.79亿t增加到21世纪00年代的12.21亿、31.42亿t,而后减少到21世纪10年代的11.55亿、30.16亿t(表3)。黄河流域农业废弃物累积量之所以呈现如此动态变化,与各地级行政区农作物、畜禽的

表3 不同年代黄河流域农业废弃物累积量

Table 3 Accumulation of agricultural wastes in the Yellow River basin in different years

| 区域 Area | 20世纪90年代 1990s | 21世纪00年代 2000s | 21世纪10年代 2010s |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 上游 | 14.54 | 19.65 | 19.83 |
| 中游 | 11.75 | 12.21 | 11.55 |
| 下游 | 26.79 | 31.42 | 30.16 |

品种和产量有所调整和变动有关。

黄河流域农业废弃物累积量空间分布差异性显著。以21世纪10年代为例,黄河流域下游农业废弃物累积量最高(30.16亿t),上游次之(19.83亿),中游最低(11.55亿t)。农业废弃物累积量排名前十的地级行政区有1个在上游,9个在下游。下游农业废弃物累积量占整个流域农业废弃物累积量的49.00%,主要原因在于黄河下游的河南省和山东省是农业大省,且两省的农作物产量和畜禽养殖量均位居全国前列。纵观之,黄河流域农业废弃物累积量呈现下游高于中上游、农业主产区高于非主产区的空间分布特点。

2.2 黄河流域农业废弃物新增能源供应量的空间分布

黄河流域农业废弃物年资源量存在差异,以2010—2019年为例,黄河流域农业废弃物年资源量在5.30亿~6.64亿t之间变化,最大变异系数为8.68%,变异系数较小,说明2010—2019年黄河流域农业废弃物资源量相对较为稳定。因此,本研究依据2019年黄河流域农业废弃物资源量,按照不同类型农业废弃物资源化利用方式的转化参数(表1),计算出不同类型资源化利用方式新增能源供应量。由结果可知,2019年黄河流域秸秆制生物燃气212.34亿m³,秸秆粪便联合制生物燃气388.35亿m³,秸秆固化成型燃料发电量为312.33亿kWh,秸秆粪便联合制气发电量为815.55亿kWh。

基于不同类型农业废弃物资源化利用方式,计算出2019年黄河流域60个地级行政区的秸秆制生物燃气量、秸秆粪便联合制生物燃气量、秸秆固化成型燃料发电量、秸秆粪便联合制气发电量(为了便于比较,能源产生量统一换算为标准煤)。从计算结果发现,黄河流域农业废弃物资源量直接影响农业废弃物能源产生量。能源产生量较大的城市主要集中在山东省和河南省,主要有菏泽、德州、聊城、济宁、新乡、开封、滨州等地市,7地秸秆制生物燃气量之和、秸秆粪便联合制生物燃气量之和、秸秆固化成型燃料发电量之和、秸秆粪便联合制气发电量之和分别占2019年

黄河流域总量的37.10%、34.52%、37.10%、34.52%。从2019年各地级行政区农业废弃物资源量可以看出,秸秆和畜禽粪便的比例在0~12.3之间。秸秆和畜禽粪便的比例直接影响不同类型农业废弃物资源化利用方式新增能源供应量,这与秸秆和畜禽粪便适宜的能源化利用方式不同有关。秸秆比例高者适合秸秆制生物燃气或秸秆固化成型燃料发电,反之,则适合秸秆粪便联合制生物燃气或秸秆粪便联合制气发电。

2.3 农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响

2.3.1 黄河流域农村能源可持续性省域比较

依照农村能源可持续性指标体系和二级指标权重,计算出2019年黄河流域9省(区)农村能源可持续性综合得分以及一级指标得分(表4)。其中,各省(区)综合得分取自各省(区)所辖地级行政区综合得分的平均值。通过比较可知,黄河流域农村能源可持续性存在区域性差异。其中,四川综合得分最高,其次是青海、河南,山西综合得分最低,内蒙古、山东综合得分也较低。总体来看,黄河流域农村能源可持续性水平呈现上下游高、中游低的空间分布特征。

四川综合得分最高,为0.485 5,能源结构、环境排放得分也较高,排名分别是第1和第2,这极有可能与四川省水能、风能、太阳能等可再生能源资源禀赋较高且利用率较高有关。“十三五”期间,四川省把发展清洁低碳能源作为调整能源结构的主攻方向,科学有序地发展水电,积极布局风电、太阳能发电、生物质能的开发,有效提升了农村能源可持续性水平。2019年四川可再生能源发电量占全省发电量的87.88%,但四川农村人口较多,人均能源用量和人均可再生能源用量得分较低,导致能源消耗得分较低,仅排名第

8。山西综合得分最低,仅为0.294 2。尽管能源消耗得分较高,排名第2,但由于山西是我国重要的煤炭基地,农村能源消耗仍以煤炭为主。2019年农村能源消耗中煤炭占比为80.78%。因此,山西能源结构得分和环境排放得分均较低,排名分别为第8和第5,进一步造成山西农村能源可持续性水平较低。综合得分排名第2的是青海,与四川一样,青海可再生能源资源禀赋也较高,且2019年青海可再生能源发电量占全省发电量的87.04%,这也是青海排名靠前的主要原因。

2.3.2 黄河流域地级行政区农村能源可持续性层次聚类分析

利用SPSS软件对2019年黄河流域60个地级行政区农村能源可持续性一级指标(能源消耗、能源结构和环境排放)得分进行层次聚类分析,结果见图2。依据聚类结果,将黄河流域60个地级行政区划分为五个组群:第一组群包括乌海、巴彦淖尔、呼和浩特、包头、鄂尔多斯、阿拉善、郑州7个地级行政区,其农村能源可持续性水平平均值为0.304 2;第二组群包括新乡、淄博2个地级行政区,其农村能源可持续性水平平均值为0.309 7;第三组群仅有阿坝州1个地级行政区,其农村能源可持续性水平平均值为0.485 5;第四组群包括晋城、晋中、菏泽等20个地级行政区,其农村能源可持续性水平平均值为0.306 9;第五组群包括西宁、兰州、固原等30个地级行政区,其农村能源可持续性水平平均值为0.335 0。可见,2019年农村能源可持续性水平第三组群>第五组群>第二组群>第四组群>第一组群。第三组群仅包含阿坝州,说明2019年阿坝州的农村能源可持续性水平在黄河流域处于较高位置,原因在于阿坝州位于川西北高原,平均海拔

表4 2019年黄河流域农村能源可持续性得分

Table 4 Rural energy sustainability score for the Yellow River basin in 2019

| 区域 Area | 省份 Province | 综合评价 | | 能源消耗 | | 能源结构 | | 环境排放 | |
|------------|----------------|--------------------------|---------|--------------------|---------|------------|---------|------------------------|---------|
| | | Comprehensive evaluation | | Energy consumption | | Energy mix | | Environmental emission | |
| | | 得分 Score | 排序 Rank | 得分 Score | 排序 Rank | 得分 Score | 排序 Rank | 得分 Score | 排序 Rank |
| 上游 | 青海 | 0.376 4 | 2 | 0.035 9 | 6 | 0.125 1 | 5 | 0.215 5 | 1 |
| | 四川 | 0.485 5 | 1 | 0.027 8 | 8 | 0.245 4 | 1 | 0.212 3 | 2 |
| | 甘肃 | 0.328 7 | 4 | 0.033 5 | 7 | 0.106 8 | 7 | 0.188 5 | 3 |
| | 宁夏 | 0.315 9 | 5 | 0.018 5 | 9 | 0.114 2 | 6 | 0.183 2 | 4 |
| | 内蒙古 | 0.302 7 | 8 | 0.151 0 | 1 | 0.095 1 | 9 | 0.056 7 | 9 |
| 中游 | 山西 | 0.294 2 | 9 | 0.058 1 | 2 | 0.100 2 | 8 | 0.135 8 | 5 |
| | 陕西 | 0.313 9 | 6 | 0.049 0 | 5 | 0.146 8 | 4 | 0.118 1 | 7 |
| 下游 | 河南 | 0.329 6 | 3 | 0.055 9 | 3 | 0.149 0 | 3 | 0.124 7 | 6 |
| | 山东 | 0.308 4 | 7 | 0.049 1 | 4 | 0.154 8 | 2 | 0.104 5 | 8 |

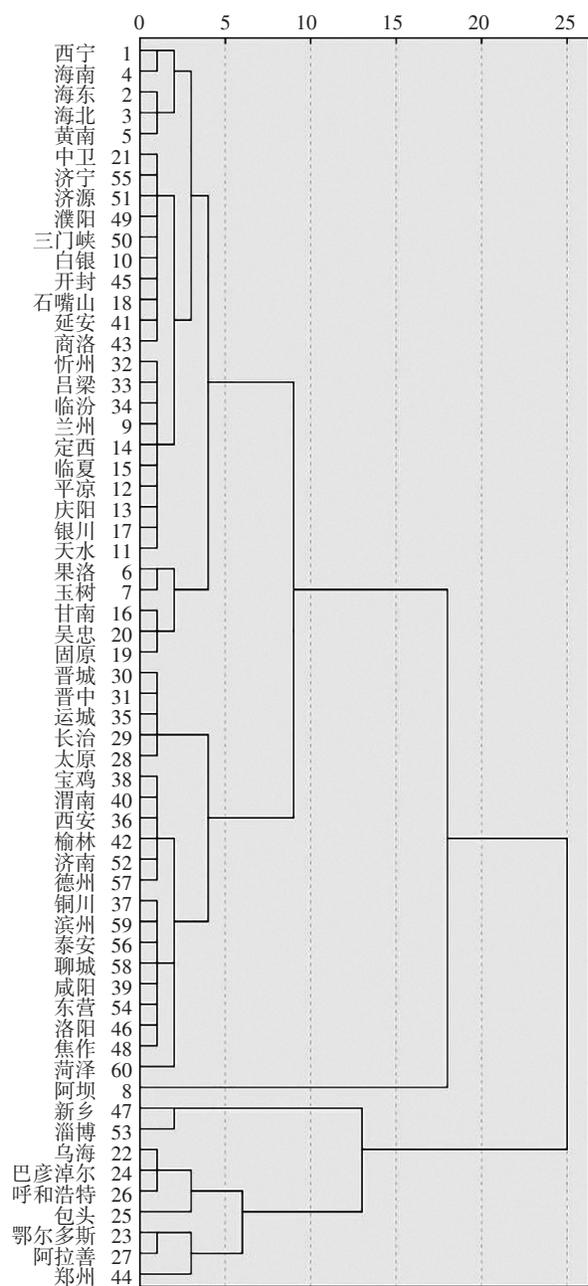


图2 农村能源可持续性水平二级指标聚类分析结果

Figure 2 Results of cluster analysis on secondary indicators of rural energy sustainability level

高,地理落差大,水能、太阳能等可再生能源资源十分丰富。农村能源利用以水力发电为主,集中式光伏为辅^[20],2019年农村再生能源用量占农村能源消耗量的50.84%,远高于其他地级行政区。鄂尔多斯、阿拉善、乌海、巴彦淖尔、呼和浩特、包头、郑州这7个地级行政区位于层次聚类分析的第一个组群,农村能源可持续性处于较低水平。总体来看,此7个地级行政区煤炭消耗量大,存在可再生能源占比低、人均碳排放量高等问题,并且近年来因为外送通道、储能、电力调

峰等原因,其可再生能源发展受阻严重。西宁、兰州、固原等30个地级行政区被划分到第五组群,其农村能源可持续性水平均值排名第2。此30个地级行政区大多数位于青海、甘肃、宁夏等省份,也包含山西、陕西、河南、山东等省份部分地级行政区。这些地级行政区可再生能源资源禀赋、能源结构各有差异,但一般有单个指标位于中间水平,反映出其农村能源可持续性具有很大潜力。

2.4 废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响

2.4.1 不同类型资源化利用方式下农村能源可持续性空间分布

基于不同类型资源化利用方式和农业废弃物资源量,计算出2019年60个地级行政区农业废弃物新增能源供应量,并将其作为可再生能源量代入各地级行政区农村能源可持续性指标体系中,计算出不同类型资源化利用方式下各地级行政区农村能源可持续性综合得分。为便于比较,将秸秆制生物燃气、秸秆粪便联合制生物燃气、秸秆固化成型燃料发电、秸秆粪便联合制气发电分别命名为利用方式1、利用方式2、利用方式3、利用方式4。实际情况下和4种利用方式下黄河流域农村能源可持续性空间分布如图3所示。由图3可知,利用方式3对农村能源可持续性水平提升幅度较小,仅是实际的1.001~1.929倍。利用方式4对农村能源可持续性水平提升幅度最大。资源化利用方式4下,可持续性得分高于实际2倍的地级行政区有17个,上、中、下游分别有11、2、4个,分别占上、中、下游地级行政区数量的40.74%、12.50%、23.53%。利用方式1影响较大的地级行政区有4个,占比6.67%,均位于上游。利用方式2影响较大的地级行政区有26个,上游19个,占比31.67%,下游7个,占比11.67%。利用方式3影响较大的地级行政区有1个,占比1.67%,位于上游。利用方式4影响较大的地级行政区有31个,上游23个,占比74.19%,下游8个,占比13.33%。整体来看,四种类型资源化利用方式都对上游农村能源可持续性影响较大,农业废弃物资源化利用对黄河流域农村能源可持续性水平影响呈现上游高于中下游的空间分布特点。

2.4.2 农业废弃物资源化利用方式的综合选择

农业废弃物资源化方式的选择,不但需要考虑不同类型资源化利用方式对农村能源可持续性影响程度,而且需要考虑秸秆与畜禽粪便的比例以及秸秆资源密度。其中,影响程度用不同转化方式下农村能源可持续性综合得分与实际农村能源可持续性综合得分

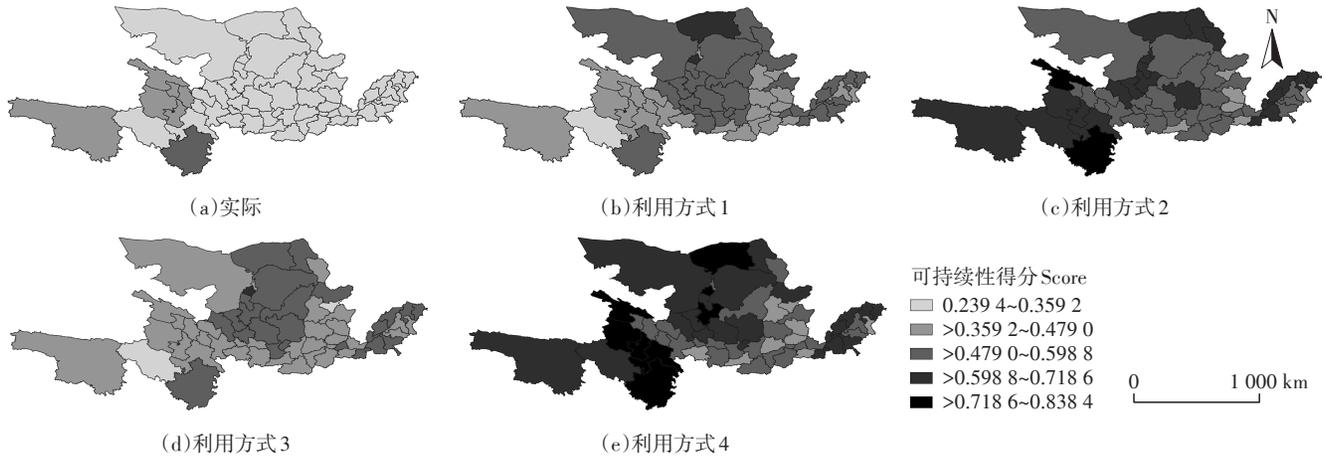


图3 实际情况和4种利用方式下农村能源可持续性空间分布

Figure 3 Spatial distribution of rural energy sustainability under actual and 4 utilization modes

之比值反映,比值越大,影响程度越大。在农业废弃物制生物燃气和农业废弃物沼气发酵发电中,秸秆与畜禽粪便的配比非常重要。同时,农业废弃物资源化利用,尤其是秸秆资源化利用不仅取决于秸秆资源总量,还受到秸秆资源密度的制约。在秸秆资源密度高的地区,农业废弃物相对运输成本较低,比较适合资源化利用。综合考虑以上情况,对2019年黄河流域60个地级行政区农业废弃物资源化利用方式进行如下推荐。

(1)适合秸秆制生物燃气的地级行政区:晋中、运城、西安、渭南、咸阳、郑州、开封、新乡、焦作、德州、聊城、菏泽。其中,聊城、菏泽、德州、开封、新乡、焦作等地位于传统种植业大省河南和山东,不但拥有丰富的秸秆资源,而且秸秆资源密度高,宜集中利用秸秆资源生产生物燃气。西安、咸阳、渭南、郑州、晋中、运城等地秸秆资源密度较低,宜分散开发利用,发展小型生物燃气等。

(2)适合秸秆粪便联合制生物燃气的地级行政区:西宁、海东、兰州、平凉、定西、临夏、乌海、呼和浩特、太原、吕梁、榆林、济南、淄博、滨州。这些地区利用秸秆和畜禽粪便生产生物燃气,对农村能源可持续性影响程度较大,尤其呼和浩特、滨州、乌海等地。其中,济南、淄博、滨州、临夏等农业废弃物资源丰富的地方,可以根据资源量建设不同规模大小的生物燃气工程,进行产业化生物燃气开发利用。西宁、海东、兰州等农业废弃物资源分布分散的地方,可以考虑以户用生物燃气为主。

(3)适合秸秆固化成型燃料发电的地级行政区:天水、长治、晋城、临汾、铜川、宝鸡、延安、洛阳。这些地区畜禽粪便资源量较低,农业废弃物以秸秆为主,并且秸秆资源密度较低。考虑到开发成本和运输成本,

这些地区农业废弃物宜适度开发利用,可以将秸秆加工为成型固体燃烧棒,即便于运输又可用于进行小型发电等。

(4)适合秸秆粪便联合制气发电的地级行政区:海北、海南、黄南、果洛、玉树、阿坝、白银、庆阳、甘南、银川、石嘴山、固原、吴忠、中卫、鄂尔多斯、巴彦淖尔、包头、阿拉善、忻州、商洛、濮阳、三门峡、济源、东营、济宁、泰安。这些地区利用秸秆和畜禽粪便联合厌氧发酵产生沼气对农村能源可持续性影响程度较大,尤其鄂尔多斯、巴彦淖尔、东营、济宁等地。秸秆和畜禽粪便联合厌氧发酵产生沼气受温度、pH值、C/N等多种因素影响,应慎重考虑各种限制因素,因地制宜地发展沼气产业,避免经济损失和生态破坏。

3 讨论

人类对高污染化石能源的依赖是气候变化的主要原因,全球60%的温室气体排放量源于化石能源的使用。联合国在可持续能源目标第7项中提出,到2030年,大幅度增加可再生能源在全球能源结构中的比例,旨在满足不断增长的能源需求并保护环境。基于黄河流域各地级行政区农业废弃物资源化利用的推荐方式,可以计算出地级行政区聚类分组间的农村能源可持续性提升程度,第一组群提升倍数为2.08,第二组群提升倍数为1.54,第三组群提升倍数为1.68,第四组群提升倍数为1.66,第五组群提升倍数为1.82,反映出适宜的农业废弃物资源化利用方式可以很大程度上提升黄河流域农村能源可持续性,特别是农业废弃物资源量丰富但实际农村能源可持续性较低的地区。

随着大城市生物质能发电项目趋于饱和,生物质

能产业未来的主要增长点在于县域,尤其是广大农村地区。从农业废弃物资源化利用技术对比来看,秸秆制生物燃气、秸秆固化成型燃料发电、秸秆粪便联合制生物燃气以及秸秆粪便联合制气发电可以不同程度地改善农村能源可持续性水平,但秸秆制生物燃气或秸秆固化成型燃烧棒需要考虑秸秆运输成本。秸秆资源运送距离以不超过30 km为宜^[8]。秸秆粪便联合制生物燃气或秸秆粪便联合制气发电需要考虑秸秆和畜禽粪便的比例。从农业废弃物资源化利用技术先进性来看,秸秆粪便联合制生物燃气、秸秆粪便联合制气发电比秸秆制生物燃气、秸秆固化成型燃料发电先进,发电比燃气的技术更先进^[21]。从农业废弃物资源化转换效率来看,农业废弃物发电转换效率较低,原因在于发电需要的农业废弃物品质较高,但发电应用更为灵活,也更为清洁。基于此,黄河流域各地级行政区应根据实际需要、技术条件和资源禀赋等,因地制宜地选择农业废弃物资源化利用方式。

作为生物质资源的重要组成部分,农业废弃物资源化利用与现有的发电相比,确实存在技术需要优化、经济效益需要提高等问题。但值得注意的是,农业废弃物资源化利用除具有较大的经济效益外,还具有社会效益和环境效益。以2019年黄河流域农业废弃物资源化利用为例,农业废弃物能源蕴藏量(以标准煤计)9 771.63万t,即使仅开发30%替代现有能耗,其CO₂减排量也可达6 000万t^[22]。按照首笔全国碳交易价格52.78元·t⁻¹计算,黄河流域农业废弃物2019年可获益31.69亿元^[23],再加上发电、燃气以及沼肥等,其农业废弃物资源化利用经济收益将会更高。废弃物资源化利用是新兴节能环保产业,既可以在农业地区得到发展,也可以在工业地区进行生产,不但规模可大可小,而且可以增加就业机会,一定程度上促进社会和谐、增进民生福祉,社会效益明显。第三,农业废弃物资源化利用既能够减少农业废弃物带来的环境污染,又能够替代化石能源而减少CO₂排放,具有明显的环境效益。此外,与美国、日本、德国等发达国家相比,我国农业废弃物资源化利用技术确实存在基础性研究不足、创新性技术研发与科技成果转化能力较低、资金投入体系不健全等问题^[24],但随着“双碳”目标的提出,农业废弃物资源化利用成为落实我国“双碳”目标的重要抓手^[25]。农业废弃物资源化利用必须依靠科技进步,通过积极借鉴国外先进的技术经验,建立健全农业废弃物资金投入体系、强化创新性技术的研发与推广等,积极推动农业废弃物资源化技

术革新,进而实现我国农业废弃物高效能源化。

4 结论

(1)黄河流域1990—2019年农业废弃物年产生量呈现先增加后减少的“双峰”变化趋势,峰值分别出现在1996年和2006年,为6.81亿t和7.06亿t。黄河流域农业废弃物资源累积量空间分布差异性显著,以21世纪10年代为例,下游农业废弃物资源累积量最高(30.16亿t),上游次之(19.83亿t),中游最低(11.55亿t),呈现下游高于中上游、农业主产区高于非主产区的空间分布特点。

(2)不同类型农业废弃物能源利用方式下,2019年黄河流域60个地级行政区农业废弃物能源产生量空间分布差异性明显,下游高于中上游。

(3)2019年黄河流域实际农村能源可持续性综合得分存在省域差异。四川综合得分最高,其次是青海、河南,山西综合得分最低,内蒙古、山东综合得分也较低,呈现上下游高、中游低的空间分布特点。60个地级行政区实际农村能源可持续性二级指标得分层次聚类结果表明,聚类组群农村能源可持续性综合得分差异性显著,主要是由于各地级行政区再生资源禀赋、经济发展水平、能源结构、农村人口等存在差异。

(4)依据不同类型农业废弃物能源利用方式对各地级行政区农村能源可持续性影响程度、各地级行政区秸秆与畜禽粪便的配比以及秸秆资源密度,对黄河流域各地级行政区农业废弃物资源化利用方式进行推荐:郑州等12个地级行政区适合秸秆制生物燃气;济南等14个地级行政区适合秸秆粪便联合制生物燃气;晋城等8个地级行政区适合秸秆固化成型燃料发电;银川等26个地级行政区适合秸秆粪便联合制气发电。

参考文献:

- [1] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 230-234. TIAN Y S. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 230-234.
- [2] 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 in 2009[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6): 194-199.
- [3] 赵晓, 常化振, 彭思洋, 等. 中国生物质燃气产能及碳减排潜力[J].

- 中国环境科学, 2018, 38(8):3151-3159. ZHAO X, CHANG H Z, PENG S Y, et al. The analysis of biomass gas production capacity and carbon emission reduction potential in China[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(8):3151-3159.
- [4] 崔卫芳, 谭春荐, 周继洲, 等. 三江源区生物质资源沼气化利用潜力评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5):156-160. CUI W F, TAN C J, ZHOU J Z, et al. The evaluation of the renewable resource potential in the source region of Yangtse River Yellow River and Lantsang River agricultural research in the arid areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(5):156-160.
- [5] 毛爱涵, 李发祥, 杨思源, 等. 青海省清洁能源发电潜力及价值分析[J]. 资源科学, 2021, 43(1):104-121. MAO A H, LI F X, YANG S Y, et al. Clean energy power generation potential and value in Qinghai Province[J]. *Resources Science*, 2021, 43(1):104-121.
- [6] 张颖, 陈艳. 中部地区生物质资源潜力与减排效应估算[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10):1185-1190. ZHANG Y, CHEN Y. Assessment on potential of biomass resources and carbon emission reduction[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(10):1185-1190.
- [7] 王爱军, 张燕, 张小桃. 河南省农业生物质资源能源利用潜力分析[J]. 河南农业科学, 2012, 41(7):76-79. WANG A J, ZHANG Y, ZHANG X T. Analysis of the energy utilization potential of agricultural biomass resources of Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(7):76-79.
- [8] 陈利洪. 中国生物质废弃物资源空间分布及其燃气潜力[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015:17-43. CHEN L H. Spatial distribution and gas potential of biomass wastes in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015:17-43.
- [9] 张蓓蓓. 我国生物质原料资源及能源潜力评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. ZHANG B B. Assessment of raw material supply capability and energy potential of biomass resources in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [10] 刘志彬. 中国生物质发电潜力评估与产业发展研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. LIU Z B. Research on potential assessment and industry development of biomass power generation in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [11] 付鹏, 徐国平, 李兴华, 等. 我国生物质发电行业发展现状与趋势及减排潜力分析[J]. 工业安全与环保, 2021, 47:48-52. FU P, XU G P, LI X H, et al. Analysis of the development status and trends of China's biomass power industry and carbon emission reduction potential[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2021, 47:48-52.
- [12] 洪振国. 中国农村家庭能源消费与清洁可再生能源节能潜力评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. HONG Z G. Assessment of energy consumption and energy saving potential of clean renewable energy in rural China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [13] 张崇尚, 刘乐, 陆歧楠, 等. 中国秸秆能源化利用潜力与秸秆能源企业区域布局研究[J]. 资源科学, 2017, 39(3):473-481. ZHANG C S, LIU L, LU Q N, et al. Potential and regional distribution for the energy utilization of crop residues in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3):473-481.
- [14] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2):16-23. SHI Y C. China's resources of biomass feedstock[J]. *Strategic Study of CAE*, 2011, 13(2):16-23.
- [15] 王璐. 能源系统可持续性综合评价方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018. WANG L. An holistic approach to the evaluation index system of energy system sustainability and its application [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [16] 李慷. 能源贫困综合评估方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014. LI K. Approaches to energy poverty assessment and their application in China[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [17] 姜璐. 青藏高原农村家庭能源消费与能源贫困研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. JIANG L. Rural household energy consumption and energy poverty in the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [18] 查建平, 周霞, 周玉玺. 黄河流域农业绿色发展水平综合评价分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(1):18-28. ZHA J P, ZHOU X, ZHOU Y X. Evaluation of agricultural green development level in the Yellow River[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(1):18-28.
- [19] 杜欢政, 刘香玲, 王韬. 河南省农业废弃物资源化潜力与分布格局研究[J]. 地域研究与开发, 2022, 41(2):144-149. DU H Z, LIU X L, WANG T. Energy recovery potential and geographical distribution of agricultural waste in Henan Province[J]. *Areal Research and Development*, 2022, 41(2):144-149.
- [20] 黄世涛. “双碳”行动 阿坝电网力推清洁能源[J]. 当代县域研究, 2021(12):35-37. HUANG S T. “Double carbon” action, the power grid is pushing for clean energy in Aba[J]. *Research on Contemporary County Area*, 2021(12):35-37.
- [21] SHAN Y L, LIU J H, LIU Z, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. *Applied Energy*, 2016, 184:742-750.
- [22] WEI J P, LIANG G F, ALEX J, et al. Research progress of energy utilization of agricultural waste in China: bibliometric analysis by CiteSpace [J]. *Sustainability*, 2020, 12(3):812.
- [23] KE H, ZHANG J, ZENG Y. Knowledge domain and emerging trends of agricultural waste management in the field of social science: a scientometric review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670:236-244.
- [24] 韦佳培. 国外资源性农业废弃物转化利用的经验与启示[J]. 农村经济与科技, 2014, 25(6):14-15. WEI J P. Experience and enlightenment of conversion and utilization of resource-based agricultural wastes in foreign countries[J]. *Rural Economy and Science and Technology*, 2014, 25(6):14-15.
- [25] 赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 等. 北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3):667-679. ZHAO Q Y, MA R J, ZHOU L Y, et al. Evaluation of energy potential and emission reduction of agricultural waste biomass utilization for clean heating in rural areas of northern China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3):667-679.