

# 以畜禽粪污为原料的生物天然气项目碳减排效益分析

冉龙飞, 高丽娟, 贾 宝, 柴宝华

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了量化以畜禽粪污为原料的生物天然气项目的生态效益, 采用自愿碳减排方法学计算 CO<sub>2</sub> 减排量并申请碳减排项目, 审批通过后进入碳交易市场获得碳减排收益, 提升项目经济效益。以江苏省某粪污处理中心生物天然气项目为例, 采用 CMS-016-V01、CMS-030-V01 等方法学计算项目的减排量, 得到该项目在正常达产情况下, 年均 CO<sub>2</sub> 减排量为 50499 t, 可获得约 159.1 万元的减排收益, 对项目经济效益提升效果显著。

**关键词:** 畜禽粪污; 生物天然气; 自愿碳减排方法学; CO<sub>2</sub> 减排量; 经济效益

**中图分类号:** R937; X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)05-0050-05

**DOI:** 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023050050

**Carbon Emission Reduction Benefit Analysis of Bio-natural Gas Projects Using Livestock Manure as Raw Material / RAN Longfei, GAO Lijuan, JIA Bao, CHAI Baohua / (Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xian 710065, China)**

**Abstract:** In order to quantify the ecological benefits of the bio-natural gas project using livestock and poultry manure as raw materials, the voluntary carbon emission reduction methodology is adopted to calculate the CO<sub>2</sub> emission reduction and apply for the carbon emission reduction project. After the approval, the project will enter the carbon trading market to obtain the carbon emission reduction benefits and improve the economic benefits of the project. This study takes the biogas project of a fecal sewage treatment center in Jiangsu Province as an example, and calculates the project's emission reductions using CMS-016-V01, CMS-030-V01 and other methodologies. It is obtained that under normal production conditions, the average annual CO<sub>2</sub> emission reduction of the project is 50499 t, and the emission reduction income of about 1.591 million yuan can be obtained, which has a significant effect on the improvement of the project's economic benefits.

**Key words:** livestock manure; bio-natural gas; methodology of voluntary carbon emission reduction; CO<sub>2</sub> reduction; economic benefits

国内畜禽养殖的种类主要包括牛、猪、羊、家禽等, 年畜禽粪污的理论资源产量达 31.6 亿 t<sup>[1]</sup>。随着现代养殖业的不断发展, 畜禽养殖规模化、专业化、集约化程度逐步提高, 但粪污处理一直是养殖场规模扩大、环保达标排放、卫生防疫合格所面临得棘手问题<sup>[2,3]</sup>。按照《中华人民共和国畜牧法》、《畜禽养殖污染防治管理办法》等相关法律法规要求, 畜禽养殖场、养殖小区应配套建设畜禽粪污无害化处理设施<sup>[4-5]</sup>。

目前, 畜禽粪污无害化处理模式有种养结合、清洁回用、达标排放三种主流方向, 其中以畜禽粪污为原料建设生物天然气项目, 是种养结合模式中一种典型的粪污资源化利用模式, 即对粪污进行集中收集, 将生物天然气项目作为粪污集中处理中心, 通过

厌氧发酵和沼气净化提纯环节后, 产生生物天然气、沼渣和沼液, 生物天然气压缩后制取压缩天然气 (CNG) 用于汽车燃料, 沼渣可加工成固体有机肥用于设施农业种植, 沼液可稀释后还田或深度处理后达标排放<sup>[6-8]</sup>。

以畜禽粪污为原料的生物天然气项目, 既实现了畜禽粪污的资源化利用, 又产生了清洁燃气及有机肥料, 是一种通过能源替代形式实现 CO<sub>2</sub> 减排的生态环保型项目, CO<sub>2</sub> 减排量所带来经济效益是提升项目收益率的有效手段, 日益受到行业参与各方的高度重视。

## 1 我国碳排放交易发展情况

国内碳排放交易经过将近 20 年的发展, 随着国

收稿日期: 2022-12-12 修回日期: 2023-02-13

项目来源: 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司项目 (XBY-KJ-2022-01)

作者简介: 冉龙飞 (1988 -), 男, 陕西宝鸡人, 工程师, 主要从事生物质能综合利用等方面的工作, E-mail: sxbjrlf@163.com

家“碳达峰碳中和”目标的提出,又一次加速了全国碳市场的建设。我国碳排放交易起源于清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM),2013年以前,CDM是我国唯一能够参与竞争的国际碳交易方式。2013年以后,为了填补国内碳交易市场的空白,我国建立了符合国内实际情况的碳排放交易试点市场,即国家核证自愿减排量(Chinese Certified Emission Reduction, CCER),陆续在深圳、上海、北京等8省市开展碳排放交易试点,期间国家发改委共

计备案200个自愿减排方法学,其中与以畜禽粪污为原料的生物天然气项目有关的自愿减排方法学见表1。发展几年之后,由于交易量小、减碳项目不规范等问题,国家发改委于2017年暂停了减碳项目备案工作,至今仍未启动。2021年2月,为推进全国碳排放权交易市场建设,推动温室气体减排,规范全国碳排放权交易及相关活动,《全国碳排放权交易管理办法(试行)》正式实施,并于当年6月底启动全国碳排放权交易市场配额现货交易<sup>[9-12]</sup>。

表1 以畜禽粪污为原料的生物天然气项目有关的自愿减排方法学

序号	编号	名称
1	CMS-016-V01	通过可控厌氧分解进行甲烷回收(第一版)
2	CMS-030-V01	在交通运输中引入生物压缩天然气(第一版)
3	CMS-021-V01	动物粪便管理系统甲烷回收(第一版)
4	CM-086-V01	通过将多个地点的粪便收集后进行集中处理减排温室气体
5	CM-090-V01	粪便管理系统中的温室气体减排
6	CM-107-V01	利用粪便管理系统产生的沼气制取并利用生物天然气温室气体减排方法学

以畜禽粪污为原料的生物天然气项目申请CCER,需进行碳足迹分析及碳核查,过程中综合选用多个自愿减排方法学,分别对项目基准线情景CO<sub>2</sub>排放量和项目活动CO<sub>2</sub>排放量进行计算,以此得到项目的CO<sub>2</sub>减排量。

## 2 典型案例

以甘肃省某粪污处理中心生物天然气项目为研究对象,采用相关的自愿减排方法学计算项目的CO<sub>2</sub>减排量,并对该项目的生态效益进行估算。

### 2.1 项目概况

本项目以种牛场产生的牛粪为原料,建设一处

生物天然气项目,工艺流程为:牛粪原料进入厌氧发酵罐产生沼气和消化液,沼气净化提纯后压缩加以利用;消化液部分回流至厌氧发酵罐再次发酵,部分进入固液分离车间,分离的沼渣作为固体有机肥的原料进行加工,分离的沼液进入沼液储存设施进行储存,最终稀释还田进行处理<sup>[13-14]</sup>。

本项目日处理畜禽粪污450t(30000头牛对应的粪污产量,含固率为21%、其中有机质含量为85%、有机质标准产气量取415m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup>),正常达产后日产沼气35355m<sup>3</sup>、生物天然气21213m<sup>3</sup>(年产生物天然气约770万m<sup>3</sup>)、固体有机肥86t、普通沼液肥600t。各个工艺系统的耗电量见表2。

表2 各工艺系统耗电量

序号	工艺系统	耗电量/(kWh·d <sup>-1</sup> )	占比/%	备注
1	预处理+厌氧发酵	6640	24.5	—
2	沼气净化提纯	1120	4.1	—
3	生物天然气压缩	6720	24.8	—
4	固体有机肥生产	5920	21.8	—
5	除臭	6720	24.8	设置于有机肥车间
6	合计	27120	100	—

### 2.2 计算步骤

采用自愿减排方法学计算项目减排量的步骤如下:

(1)确定项目边界,分析项目活动CO<sub>2</sub>排放情

况,并绘制项目边界图;

(2)提出计算所需要的假设条件;

(3)确定适用的自愿减排方法学;

(4)确定基准线情景,分析基准线情景CO<sub>2</sub>排

放情况,并计算基准线情景对应的 CO<sub>2</sub> 排放量;

(5) 计算项目活动对应的 CO<sub>2</sub> 排放量;

(6) 计算项目的 CO<sub>2</sub> 减排量。

### 2.3 项目边界确定

本项目的边界包含牛场、生物天然气生产场所、

生物天然气消纳点、沼渣沼液加工处理和使用点、原料收集点到生物天然气生产场所以及从生物天然气生产场所到生物天然气消纳点之间的运输系统。本项目使用的电力全部来自电网,项目的边界包含本项目所消耗的电。综上所述,本项目的边界图见图 1。

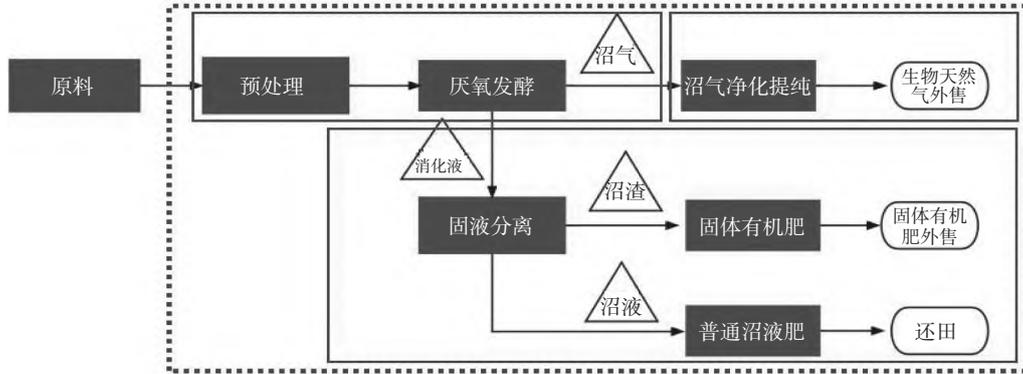


图 1 项目边界图

### 2.4 假设条件

采用自愿减排方法学计算项目减排量的假设条件包含以下内容:

(1) 畜禽粪污从养殖场移出后的贮存时间(含运输时间) ≤ 45 d;

(2) 沼气净化提纯后用作交通运输的燃料;

(3) 在事前减排量预估过程中,不考虑火炬燃烧产生的排放。

(4) 沼渣的储存、运输和土壤施肥不会导致 CO<sub>2</sub> 或 CH<sub>4</sub> 排放;

(5) 沼液不直接进入污水处理系统或就近排入水体。

### 2.5 方法学选择

通过对表 1 中自愿减排方法学的研究,并没有完全适用本项目的的方法学,需要综合多个方法学进行 CO<sub>2</sub> 减排量计算,具体分析如下:

(1) CMS-016-V01 通过可控厌氧分解进行甲烷回收(第一版)。

本项目以畜禽粪污为原料进行厌氧发酵生产沼气,厌氧发酵后的沼渣用于生产固体有机肥最终用于土壤施肥,沼渣的贮存、运输和土壤施肥严格按照相关生产流程进行,不会导致 CH<sub>4</sub> 排放。

(2) CMS-021-V01 动物粪便管理系统甲烷回收(第一版)。

本项目活动假设畜禽养殖场均采用封闭式管理,且粪便及处理后的沼液不排入天然水体。在基准线情景下,畜禽粪污被丢弃堆放在养殖场的露天

的粪污暂存池内,堆存时间超过 30 d,在自然天气下,会排放 CH<sub>4</sub>,且不设置火炬,沼气也不利用。

(3) CMS-030-V01 在交通运输中引入生物压缩天然气(第一版)。

本项目活动通过厌氧发酵生产沼气,沼气净化提纯后产生物天然气 CH<sub>4</sub> 含量不低于 96%。

### 2.6 生物天然气产气量计算

本项目生物天然气产气量按照下式计算<sup>[15]</sup>:

$$V = 0.60 \times G \times \theta \times TS \times \zeta \times \varepsilon / 1000 \quad (1)$$

式中:  $V$  为生物天然气产气量, m<sup>3</sup>;  $G$  为牛的存栏量, 头;  $\theta$  为每头牛每天的产排污系数, 取 15.01 kg;  $TS$  为干物质质量分数, %, 取 21%;  $\zeta$  为有机质含量, %, 取 85%;  $\varepsilon$  为有机质标准产气量, m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup>, 取 415。

根据公式(1), 本项目日产生生物天然气 21213 m<sup>3</sup>, 年产生生物天然气 770 万 m<sup>3</sup>。

### 2.7 基准线排放量计算

根据方法学“CMS-016-V01 通过可控厌氧分解进行甲烷回收(第一版)”, 基准线情景是“在没有项目的情况下, 在项目边界内的动物粪污将被丢弃并自然腐烂, 且产生的 CH<sub>4</sub> 排放到大气中”; 根据方法学“CMS-030-V01 在交通运输中引入生物压缩天然气(第一版)”, 基准线情景是“如果车辆不在项目边界之内, 则假设所有生物天然气代替天然气作为燃料”。根据以上论述, 本项目基准线 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法如下:

$$C_{\text{基准线}} = C_{\text{畜禽粪污}} + C_{\text{燃料}} \quad (2)$$

$$C_{\text{畜禽粪污}} = \alpha \times GWP \times \rho \times MCF \times B \times N \times VS \times MS \quad (3)$$

$$VS = \frac{W}{W_0} \times VS_0 \times d \quad (4)$$

$$C_{\text{燃料}} = Q \times NCV \times EF \quad (5)$$

式中： $C_{\text{基准线}}$  为基准线  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{畜禽粪污}}$  为畜禽粪污自然发酵时  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{燃料}}$  为生物天然气完全作为燃料时  $\text{CO}_2$  排放量，t； $\alpha$  为修正系数，取 0.94； $GWP$  为  $\text{CH}_4$  的全球变暖潜势，取 25； $\rho$  为标况下  $\text{CH}_4$  的密度，取  $0.00067 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ； $MCF$  为畜禽粪污自然发酵时  $\text{CH}_4$  的转换因子，取 66； $B$  为畜禽排泄的挥发性固体的最大  $\text{CH}_4$  生产潜力， $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，取 0.13； $N$  为畜禽的存栏量，头，取 30000； $VS$  为粪污的

挥发性固体量，kg； $W$  为畜禽的实际平均体重，kg，取 400； $W_0$  为畜禽默认体重，kg，取 350； $VS_0$  为粪污中的挥发性固体量， $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \text{d}^{-1}$ ，取 2.8； $d$  为运行天数，d，取 365； $MS$  为畜禽粪污的比例，%； $Q$  为燃料的生物天然气量， $\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ，取 770； $NCV$  为生物天然气的净热值， $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ ，取 46.5； $EF$  为天然气的  $\text{CO}_2$  排放因子， $\text{t} \cdot \text{GJ}^{-1}$ ，取 0.0543。

根据公式(1)~(4)，基准线  $\text{CO}_2$  排放量计算结果见表 3，分析可见，在无本项目活动的情况下， $\text{CO}_2$  排放量共计 59841.5 t $\text{CO}_2\text{e}$ ，其中禽粪污自然发酵时  $\text{CO}_2$  排放量 47336.3 t $\text{CO}_2\text{e}$ ，占总排放量的 79.1%；生物天然气完全作为燃料时  $\text{CO}_2$  排放量 12505.2 t $\text{CO}_2\text{e}$ ，占总排量的 20.9%。

表 3 基准线  $\text{CO}_2$  排放量计算结果汇总表

序号	项目	单位	数值	占比/%
1	禽粪污自然发酵时 $\text{CO}_2$ 排放量	t $\text{CO}_2\text{e}$	47336.3	79.1
2	生物天然气完全作为燃料时 $\text{CO}_2$ 排放量	t $\text{CO}_2\text{e}$	12505.2	20.9
3	总排放量	t $\text{CO}_2\text{e}$	59841.5	100

### 2.8 项目排放量计算

依据假设条件，本项目  $\text{CO}_2$  排放主要来自沼气生产和生物天然气生产、销售使用环节，沼气生产环节  $\text{CO}_2$  排放量依据“CMS-016-V01 通过可控厌氧分解进行甲烷回收(第一版)”进行计算，生物天然气生产及销售使用环节  $\text{CO}_2$  排放量依据“CMS-030-V01 在交通运输中引入生物压缩天然气(第一版)”进行计算。根据以上论述，本项目  $\text{CO}_2$  排放量计算方法如下：

$$C_{\text{项目}} = C_{\text{沼气生产}} + C_{\text{生物天然气生产}} \quad (6)$$

$$C_{\text{沼气生产}} = C_{\text{原料和有机肥运输}} + C_{\text{电力消耗}} + C_{\text{发酵罐物理泄露}} \quad (7)$$

$$C_{\text{原料和有机肥运输}} = \frac{A_1}{CT_1} \times L_1 \times EX_1 + \frac{A_2}{CT_2} \times L_2 \times EX_2 \quad (8)$$

$$C_{\text{电力消耗}} = EL \times (1 + \eta) \times EG \quad (9)$$

$$C_{\text{发酵罐物理泄露}} = ED \times V \times \omega \times \rho \times GWP \quad (10)$$

$$C_{\text{生物天然气生产}} = GWP \times \lambda \times \psi \times T \quad (11)$$

式中： $C_{\text{项目}}$  为项目活动  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{沼气生产}}$  为沼气生产环节的  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{生物天然气生产}}$  为生物天然气生产及销售使用环节  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{原料和有机肥运输}}$  为原料运输到厂区以及有机肥运输到消纳处的  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{电力消耗}}$  为沼气生产环节电力消耗的  $\text{CO}_2$  排放量，t； $C_{\text{发酵罐泄露}}$  为发酵罐沼气泄露的  $\text{CO}_2$  排放量，t； $A_1$  为粪污量， $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ； $CT_1$  为粪污运输车载重，t，取 10； $L_1$  为粪污运输距离，km，取

20； $EX_1$  为粪污运输车燃料的  $\text{CO}_2$  排放因子， $\text{kg CO}_2 \cdot \text{km}^{-1}$ ，取 0.8110642； $A_2$  为有机肥 + 沼液量， $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ； $CT_2$  为沼渣运输车载重，t，取 20； $L_2$  为沼渣运输距离，km，取 100； $EX_2$  为沼渣运输车燃料的  $\text{CO}_2$  排放因子， $\text{kg CO}_2 \cdot \text{km}^{-1}$ ，取 0.8110642； $EL$  为沼气 + 沼气净化提纯 + 有机肥生产 + 压缩等环节的耗电量， $\text{MW} \cdot \text{h}$ ； $\eta$  为线损率，%，取 20； $EG$  为电网排放因子， $\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{MW} \cdot \text{h}^{-1}$ ，取 0.788325； $ED$  为发酵罐泄露所产生的甲烷排放因子， $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ； $V$  为沼气量， $\text{m}^3$ ； $\omega$  为沼气中甲烷的含量，%，取 60； $\lambda$  为  $\text{CH}_4$  的平均重量比，取 0.3529； $\psi$  为压缩设备的泄漏率， $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{台}^{-1}$ ，取 0.00072； $T$  为设备运行小时数，h，取 8760。

根据公式(5)~(10)，本项目活动  $\text{CO}_2$  排放量计算结果见表 4，分析可见，本项目活动  $\text{CO}_2$  排放量共计 9342.5 t $\text{CO}_2\text{e}$ ，其中沼气生产环节的  $\text{CO}_2$  排放量 9286.9 t $\text{CO}_2\text{e}$ ，占总排放量的 99.4%；生物天然气生产及销售使用环节  $\text{CO}_2$  排放量 55.6 t $\text{CO}_2\text{e}$ ，占总排量的 0.6%。

### 2.9 项目减排量计算

本项目  $\text{CO}_2$  减排量等于基准线  $\text{CO}_2$  排放量与项目  $\text{CO}_2$  排放量的差值，计算得到本项目  $\text{CO}_2$  的减排量为 50499 t $\text{CO}_2\text{e}$ 。

表4 项目活动 CO<sub>2</sub> 排放量计算结果汇总表

序号	项目	单位	数值	占比/%
1	沼气生产环节的 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> e	9286.9	99.4
1.1	原料运输到厂区以及有机肥运输到消纳处的 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> e	1281.8	—
1.2	沼气生产环节电力消耗的 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> e	1560.7	—
1.3	发酵罐沼气泄露的 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> e	6444.4	—
2	生物天然气生产及销售使用环节 CO <sub>2</sub> 排放量	tCO <sub>2</sub> e	55.6	0.6
3	总排放量	tCO <sub>2</sub> e	9342.5	100

### 2.10 减排效益分析

通过以上计算,可见该项目年均 CO<sub>2</sub> 的减排量为 50499 tCO<sub>2</sub>e。以同类已进行自愿碳减排(VER)交易的典型项目为例,该项目交易价格为 31.5 元·tCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>,本项目进入碳交易市场进行交易,每年可获得 159.1 万元的碳减排收益。可见,生物天然气项目作为绿色低碳项目,可通过绿色清洁燃气、有机肥料获取收益,如项目积极申请备案后纳入到自愿减排交易机制取得减排量收益,对提升项目经济效益显著。

### 3 结论及建议

本研究通过分析以畜禽粪污为原料的生物天然气项目的基准线和项目活动碳排放活动,根据多个方法学的综合应用,建立了符合本项目实际的 CO<sub>2</sub> 减排量计算方法,并以典型项目为例进行计算,得到日产 21082 m<sup>3</sup> 的以畜禽粪污为原料的生物天然气项目,年均可减排 CO<sub>2</sub> 约 50499 tCO<sub>2</sub>e,生态效益显著。如本项目 CO<sub>2</sub> 减排量进行自愿碳减排交易,年均可获得经济收益 159.1 万元,进一步提升了项目经济效益。因此,生物天然气项目作为处理畜禽粪污的主要应用方法,还可混合处理农作物秸秆、农副产品加工废水废渣、厨余垃圾等城乡有机废弃物,从生态环保、循环农业、绿色低碳能源等多方面考虑,值得推广应用。

综合分析行业内现有的方法学,以畜禽粪污为单一原料的生物天然气项目可综合多个方法学进行估算,针对农作物秸秆或者多原料混合的方法学未出台,但行业内多数生物天然气项目是混合原料生产项目,因此,建议相关部门加大对此类方法学的研究,进一步提升项目的综合效益,促进行业快速发展。

#### 参考文献:

[1] 徐少奇,陈文杰,解林奇,等. 我国有机废弃物资源总

量及养分利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报,2022, 28(8):1341-1352.

- [2] 鲁敏. 畜禽粪污处理与资源化利用综合措施[J]. 畜牧业环境,2022(21):5-6.
- [3] 李玉. 畜禽粪污资源化利用体系的构建与发展[J]. 世界热带农业信息,2022(12):49-50.
- [4] 农业农村部新闻办公室. 进一步完善健全无害化处理制度机制促进畜牧业高质量发展[J]. 江西畜牧兽医杂志,2022(3):50.
- [5] 薛久洲,薛琳珏,高晓娟. 基层畜禽检疫工作现状及解决路径[J]. 中国动物保健,2022,24(8):127-128.
- [6] 吕继同. 关于畜牧业粪污治理对策的探讨[J]. 畜牧业环境,2022(20):5-6.
- [7] 邓玲玲,刘德洪,许李丽,等. 南方农区畜禽养殖场粪污资源化高效利用模式探索[J]. 畜牧业环境,2022(19):9-10.
- [8] 孙梦媛. 猪粪鸡屎变废为宝[J]. 农业知识,2020(21):51.
- [9] 刘通,华佳,柏双友. 中国 CDM 项目开发现状及存在问题分析研究[J]. 环境科学与管理,2018,43(3):1-5.
- [10] 金书秦,韩冬梅,林煜,等. 碳达峰目标下开展农业碳交易的前景分析和政策建议[J]. 农村金融研究,2021(6):3-8.
- [11] 郝丽娟,孙明烨,常旭宁. 垃圾填埋气提纯生物天然气的碳减排效益分析[J]. 煤气与热力,2018,38(12):26-31.
- [12] 刘通,华佳,柏双友. 中国 CDM 项目开发现状及存在问题分析研究[J]. 环境科学与管理,2018,43(3):1-5.
- [13] 陈德露,安风霞,邵旦洋,等. 生物质固废甲烷化技术研究进展[J]. 电力科技与环保,2022,38(3):184-194.
- [14] 杨嘎玛,穆廷桢,杨茂华,等. 生物燃气净化提纯制备生物天然气技术研究进展[J]. 过程工程学报,2021, 21(6):617-628.
- [15] 冉龙飞,王美净,柴宝华. 河南省典型生物质资源评价及生物天然气产气潜力分析[J]. 西北水电,2022(4): 108-111,117.