

光伏扶贫农村综合能源站设计与优化配置方法

杜松怀 孙若男 杨 曼 苏 娟 童光毅

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对我国农村综合能源建设无法照搬城市能源结构的问题,结合光伏扶贫和农村沼气循环利用模式,创新性地设计出融合农村产业发展特色的农村综合能源站,并提出优化配置方法。该模型综合考虑光伏扶贫、沼气循环利用成本、收益和农村能源站电、热、冷约束,对燃气轮机、燃气锅炉、电制冷机、储能装置等装置容量进行优化配置。以北方某贫困村为研究对象,利用当地光伏扶贫政策支持及生物质资源丰富特点,对其农村综合能源站设备进行优化配置,分析了基于光伏扶贫的农村综合能源站的收益。算例分析表明,本文提出的农村综合能源站优化配置结果合理有效,为未来农村综合能源规划及绿色产业扶贫提供理论和技术支持。

关键词: 农村综合能源站; 光伏扶贫; 优化配置; 效益分析

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)S0-0367-10

Optimal Allocation Method of Rural Integrated Energy Station under Background of Photovoltaic Poverty Alleviation

DU Songhuai SUN Ruonan YANG Man SU Juan TONG Guangyi

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Photovoltaic poverty alleviation not only makes full use of solar energy resources, but also promotes rural poverty alleviation and development and new energy utilization. There is a lack of research on the optimal allocation of rural comprehensive energy. In view of the problem that China's rural comprehensive energy construction cannot copy the urban energy structure. Based on the background of China's rural photovoltaic poverty alleviation, combined with the rural biogas recycling mode, a rural integrated energy station with the characteristics of rural industrial development was innovatively designed, and the optimization allocation method was put forward. Considering the cost and benefit of photovoltaic poverty alleviation, biogas recycling and the constraints of electricity, heat and cold in rural energy stations, the model optimized the capacity of gas turbine, gas boiler, electric cooler and energy storage device. Taking a poverty-stricken village in the north as the research object, using the local photovoltaic poverty alleviation policy support and the characteristics of rich biomass resources, the rural integrated energy station equipment was optimized, and the income of rural integrated energy station based on photovoltaic poverty alleviation was analyzed. The results showed that the optimal allocation of rural integrated energy station proposed was reasonable and effective, which can provide theoretical and technical support for future rural integrated energy planning and green industry poverty alleviation.

Key words: rural integrated energy station; photovoltaic poverty alleviation; optimize configuration; benefit analysis

0 引言

随着我国扶贫和相关惠农工程的持续推进,光伏扶贫电站大规模接入农村电网。近年来光伏产业

成本不断降低,产能迅速增长,2020 年光伏新增装机 4.82×10^7 kW,同比增长 60.1%。光伏扶贫清洁环保、技术可靠、收益稳定,是产业扶贫的新兴业态,是增加贫困村集体经济收入的有效方式。“十四

收稿日期: 2021-07-25 修回日期: 2021-08-28

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5412-201924270A-0-0-00)和中国农业大学 2115 人才工程项目

作者简介: 杜松怀(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业电气化和农村综合能源规划研究,E-mail: songhuaidu@cau.edu.cn

通信作者: 苏娟(1980—),女,副教授,博士生导师,主要从事电力市场、需求侧管理和农村综合能源研究,E-mail: sujuan@cau.edu.cn

五”时期,农村能源是做好脱贫攻坚与实施乡村振兴战略的有机衔接,可继续巩固脱贫攻坚成果,优化农村能源供应结构。重点是就地发展太阳能、生物质能等清洁能源,在满足生产生活清洁化需求的同时,助力建设美丽乡村^[1]。

然而,当前农村能源系统中可再生能源消费比例低,能源浪费严重,用能品质较差^[2]。农村能源供需特点决定其无法照搬城市的能源结构,亟待建立符合我国农村发展特点的、多能互补、能源梯级利用的新型农村综合能源体系,实现我国农村清洁能源精准扶贫。

国外提出综合可再生能源系统(Integrated renewable energy system, IRES)解决农村能源问题,该系统利用多种形式的本地可再生能源,以求用最具效益性的方式去匹配农村可再生能源及负荷需求^[3-4]。综合能源系统规划多针对于城市或工业园区或智能小区等。如考虑光伏电池与混合储能配合的工业园区规划^[5];以冷热电三联供机组(Combined cooling heating and power, CCHP)作为电-气耦合枢纽的配电网及燃气管道规划^[6]和CCHP系统的容量优化配置模型^[7-9];考虑多方利益主体的投资费用及综合效益的源-网-荷-储多环节灵活配置模型^[10]。以上研究的可再生能源系统直接迎合农村终端需求,未并入电网实现以电为

主的能源布局,且未考虑我国独有的光伏扶贫政策及沼气生态循环农业,不符合我国农村能源发展场景。

为解决以上问题,本文基于光伏扶贫政策、结合农村特色产业,建立含电力、天然气、生物质能、光伏的农村综合能源站,以满足农村负荷需求。模型追求含投资成本及预期收益的综合效益最大化,对能源装置容量进行优化配置,以实例验证其可行性,以期为未来农村规划建立以电为主的、结合绿色产业的特色综合能源系统提供技术支持,推动光伏与农业、养殖等综合发展,形成多元化光伏发电发展模式。

1 农村综合能源站总体设计

在满足农村用能需求的基础上,结合我国光伏扶贫政策和农村种植业、养殖业等特色产业,建立以电网为主,沼气、光伏发电自发自用的农村综合能源站,解决农村用能单一、能源消费品质不高、能源利用率低的问题。

1.1 农村综合能源站总体结构

农村综合能源站涵盖了能源供给侧、能源转换网络及能源需求侧3个基本单元,同时,考虑用能形式的多样性,将电网、热网、冷网耦合到一起,输出电/热/冷负荷供用户消费,系统具体结构见图1。

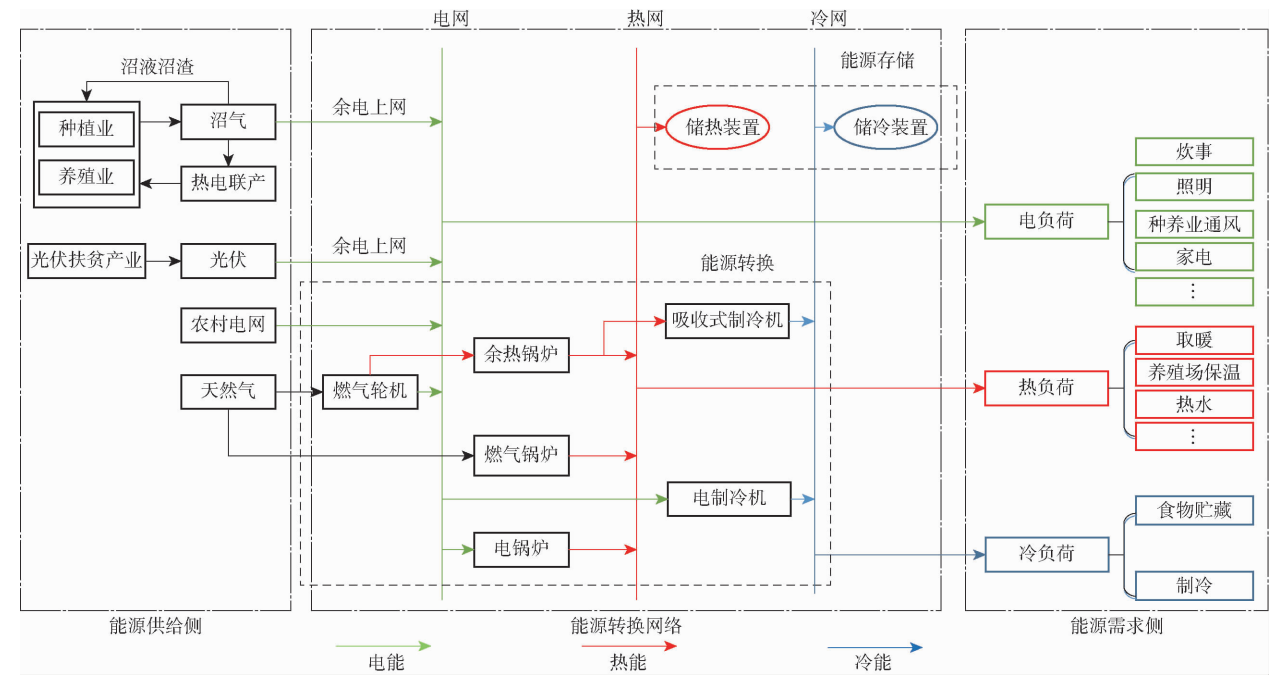


图1 农村综合能源站总体结构图

Fig.1 Overall structure diagram of rural integrated energy station

图1中,能源供给侧依靠天然气、沼气、光伏、农村电网联合实现电力供应,光伏发电填补电能供需平衡缺口,余电上网、自发自用,增加发电收益;将养

殖业、种植业与大中型沼气工程形成良好耦合,畜禽粪便及秸秆为沼气原料,沼气以热电联产方式为种养业提供电能及热能,沼液沼渣处理为有机肥促进

农作物增产^[11-14],既解决养殖场粪便排污问题又产生经济效益,从多方面增加农村综合收益。

能源需求侧主要指农村在生活用能和生产用能上使用到电负荷、热负荷、冷负荷3类,例如:电负荷用于照明、炊事、种植、养殖、农产品加工等;热负荷用于取暖、供热水等;冷负荷用于食物贮藏、制冷等。

在满足农村用户用能的需求下,能源转换网络利用燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、电制冷机等一系列能源转换设备,将电能、气能转换成用户需要的能源形式,同时增加储热装置及蓄冷装置向能源需求侧供电负荷、热负荷、冷负荷。

由沼气、光伏、天然气、典型能源设备等构成了具有农村特色的含光伏扶贫电站的农村综合能源站,为农村用户生活、生产提供能量。

1.2 基于光伏扶贫的农村综合能源站设计

在我国光伏扶贫政策支持下,结合农村种养业等特色产,设计具有农村特色的综合能源站。以光伏扶贫电站为建设核心,主要利用农村荒弃土地、斜坡等建设光伏板,采用“政府统一建设、村集体共同运维、全额补贴上网”的模式,以多种形式为村集体及农户带来经济效益^[15-16]。

农村种养业利用厌氧发酵技术,将秸秆、畜禽粪便等原料转化为沼气,同时将过程中产生的沼液沼渣废料用作种植业的有机肥,促进农作物增收,实现资源循环利用。本文使沼气通过热电联产环节产生电能及热能,为养殖场及农作物大棚运行供能,多余电力售卖给电网,可以为农村生产提供电能及热能、减少农村资源浪费、美化环境。

2 基于光伏扶贫的农村综合能源站优化配置模型构建

农村综合能源站涵盖了多种能源形式耦合供给,其中光伏电站和沼气循环利用可余电上网,产生项目收益。对光伏扶贫电站和沼气循环利用模式建立数学模型,对能源转换网络中的典型能源设备进行数学建模。

2.1 光伏扶贫电站收益模型

光伏扶贫电站收益模式如图2所示。由政府统一进行项目建设,投资费用采取“50%财政投资+50%银行贷款”形式,项目建成后产权归村集体所有。村集体及农户需支付施工单位的运维费用及银行贷款费用。上网采用“自发自用、余量上网”模式,余电上网由电网企业按当地光伏电站标杆上网电价收购作为售电费用,同时还有政府对光伏扶贫电站的发电补贴、简单运维工作给村民带来的就业收入及农村建设光伏电站的用地租赁费用。

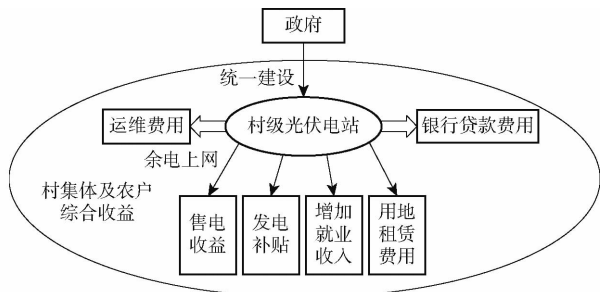


图2 光伏扶贫电站收益模式图

Fig. 2 Income model of photovoltaic poverty alleviation power station

假设光伏扶贫电站运行寿命为20 a,则其规划期内的净收益为

$$C_{\text{benefit_PV}} = \sum_{i=1}^n (C_{PV_get}^i - C_{PV_cost}^i) \quad (1)$$

式中 $C_{\text{benefit_PV}}$ ——光伏扶贫电站在规划期内的总收益

n ——规划总年限,为20 a

$C_{PV_get}^i$ 、 $C_{PV_cost}^i$ ——第*i*年的光伏电站总收益及总支出

(1) 总收益子分量

光伏扶贫电站每年的总收益为售电收益 $C_{PV_s}^i$ 、发电补贴 $C_{PV_b}^i$ 、就业收入 $C_{PV_e}^i$ 及用地租赁费用 $C_{PV_g}^i$ 之和,表示为

$$C_{PV_get}^i = C_{PV_s}^i + C_{PV_b}^i + C_{PV_e}^i + C_{PV_g}^i \quad (2)$$

其中

$$C_{PV_s}^i = \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} P_{PV_sold,j,s}^i W_s \quad (3)$$

$$C_{PV_b}^i = \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} P_{PV,j,s}^i W_b \quad (4)$$

$$C_{PV_e}^i = \sum_{g=1}^{kP_{PV}} \sum_{m=1}^{12} W_{emg} \quad (5)$$

式中 s ——规划的典型场景数,本文设一年有3个典型场景

$P_{PV,j,s}^i$ ——第*i*年第*s*个典型场景中第*j*时刻的光伏电站出力值

$P_{PV_sold,j,s}^i$ ——第*i*年第*s*个典型场景中第*j*时刻光伏电站余电上网电功率

W_s ——光伏上网电价

W_b ——政府对光伏扶贫发电补贴电价

W_{emg} ——第*m*个月的增加就业工资

P_{PV} ——光伏扶贫电站的配置容量

g ——雇佣人数,与 P_{PV} 呈正相关

k ——比例系数

(2) 总支出子分量

总支出包括运维费用及占总投资50%的银行贷款费用,即

$$C_{PV_cost}^i = C_{PV_m}^i + C_{PV_l}^i \quad (6)$$

其中

$$C_{PV_m}^i = \sum_{k=1}^t M_k^i \tag{7}$$
$$C_{PV_l}^i = 0.5 C_{in_total} (1 + r_l^i) = 0.5 k_1 P_{PV} (1 + r_l^i) \tag{8}$$

式中 $C_{PV_m}^i$ 、 $C_{PV_l}^i$ ——第 i 年的运维费用、贷款利息费用

M_k^i ——第 i 年第 k 次运维的费用

C_{in_total} ——光伏扶贫电站项目总投资费用,与光伏扶贫电站容量有关

r_l^i ——第 i 年的贷款利息

k_1 ——总投资与光伏扶贫电站容量之间比值

2.2 沼气循环利用收益模型

沼气循环利用的经济评价需综合考虑其总收益及总投入。总收益包括直接经济收益和间接经济收益,直接经济收益即沼气发电余电上网的售电收入,与沼气发电量及种养业的用电量有关;间接经济收益包括沼气热电联供结合种养业实际用能状况供电及热能产生节能收益,以及农田因施用沼肥减少的化肥支出和农产品的增收收益。总投入包括初始建设投入及后期运维投入。初始建设投入包括发酵原料加工费用、实现循环农业系统的配套设施费用、施工费用及建设材料费用;后期运维费用包括每年的日常管理维护费用及隔 10 a 后对老化的沼气池更换费用。具体收益模式见图 3。

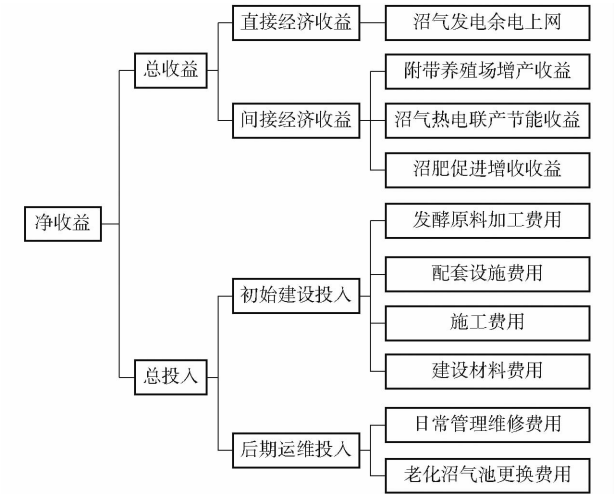


图3 沼气循环利用收益模式图

Fig.3 Income model of biogas recycling

沼气循环利用净收益计算年限同光伏扶贫电站,为 20 a,其净收益的计算方法为

$$C_{benefit_B} = \sum_{i=1}^n (C_{B_get}^i - C_{B_cost}^i) \tag{9}$$

其中

$$C_{B_get}^i = C_{B_d}^i + C_{B_ind}^i \tag{10}$$
$$C_{B_d}^i = \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} (P_{B,j,s}^i - P_{B_l,j,s}^i) W_m \tag{11}$$

$$C_{B_ind}^i = \sum_{i=1}^n V_B (Q_{Bi} K_1 C_f) + C_1 + C_2 + C_3 \tag{12}$$
$$C_{B_cost}^i = C_{B_inv} + \sum_{i=1}^n C_{B_m}^i + C_{B_ex} = V_B \left[k_2 + \sum_{i=1}^n (k_{3i} + k_{4i}) \right] \tag{13}$$

式中 $C_{benefit_B}$ ——沼气循环利用在规划年限内的净收益

$C_{B_get}^i$ 、 $C_{B_cost}^i$ ——第 i 年的总收益、总投入

$C_{B_d}^i$ 、 $C_{B_ind}^i$ ——第 i 年的直接、间接经济收益

$P_{B,j,s}^i$ 、 $P_{B_l,j,s}^i$ ——沼气通过热电联产在第 i 年第 s 个场景中第 j 时刻的发电值、为种养业运行提供的电能值

W_m ——沼气发电上网电价

V_B ——沼气池容量

Q_B ——单位体积沼气产生的沼肥量

K_1 ——单位沼肥中含有的氮、磷、钾含量

C_f ——氮、磷、钾化肥的价格,此处取相同值

C_1 ——沼气热电联产节能收益

C_2 ——施加沼肥减少化肥支出收益

C_3 ——施加沼肥促进农作物增收收益

C_{B_inv} ——初始建设投入费用

$C_{B_m}^i$ ——沼气池日常管理维护费用

C_{B_ex} ——老化沼气池更换费用

k_2 、 k_{3i} 、 k_{4i} ——沼气池容量与初始建设投入费用、沼气池日常管理维护费用、老化沼气池更换费用的比值

2.3 能源基本单元模型

2.3.1 能源转换单元

能源转换单元涵盖了燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、电制冷机和吸收式制冷机 5 类典型能源转换设备,分别对其建立物理数学模型。

(1) 燃气轮机

以天然气为原料带动燃气轮机运行,产生的电力满足用户电力需求,排出的废热用余热锅炉设备吸收,通过吸收式制冷机提供冷负荷。

$$P_{GT,j,s}^i = Q_{GT,j,s}^i \eta_{GT} \tag{14}$$

$$\frac{P_{GT,j,s}^i}{H_{GT_else,j,s}^i} = \eta_{GT,H} \tag{15}$$

式中 $P_{GT,j,s}^i$ 、 $Q_{GT,j,s}^i$ 、 $H_{GT_else,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 个时刻燃气轮机的输出功率、消耗天然气量及产生余热量

η_{GT} ——燃气轮机的转换效率

$\eta_{GT,H}$ ——燃气轮机输出电热比

(2) 燃气锅炉

$$H_{GB,j,s}^i = Q_{GB,j,s}^i \eta_{GB} \quad (16)$$

式中 $H_{GB,j,s}^i$ 、 $Q_{GB,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 个时刻燃气锅炉的输出热功率、消耗天然气量

η_{GB} ——燃气锅炉的转换效率

(3) 电锅炉

$$H_{EB,j,s}^i = P_{EB,j,s}^i \eta_{EB} \quad (17)$$

式中 $H_{EB,j,s}^i$ 、 $P_{EB,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 个时刻电锅炉的输出热功率、消耗电功率

η_{EB} ——电锅炉的转换效率

(4) 电制冷机

$$C_{EC,j,s}^i = P_{EC,j,s}^i \eta_{EC} \quad (18)$$

式中 $C_{EC,j,s}^i$ 、 $P_{EC,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 个时刻电制冷机的输出冷功率、消耗电功率

η_{EC} ——电制冷机的性能系数,即输出冷功率与消耗电功率比值

(5) 吸收式制冷机

吸收式制冷机利用燃气锅炉的余热制冷,供给冷负荷,制冷后的剩余热量供给热负荷。

$$C_{AC,j,s}^i = H_{GT,else,j,s}^i \eta_{AC} \quad (19)$$

$$H_{AC,j,s}^i = H_{GT,else,j,s}^i (1 - \eta_{AC}) \quad (20)$$

式中 $C_{AC,j,s}^i$ 、 $H_{AC,j,s}^i$ ——吸收式制冷机的输出冷功率、热功率

η_{AC} ——吸收式制冷机的制冷效率

2.3.2 能源存储单元

储热装置及蓄冷装置模型相近,具有一定耗能率且存在储能、耗能 2 种状态。以储热装置为例,其存储特性为

$$H_{S,j,s}^i = (1 - \eta_{loss}) H_{S,j-1,s}^i + (\eta_{ch} H_{ch,j,s}^i - H_{dis,j,s}^i / \eta_{dis}) \Delta T \quad (21)$$

式中 $H_{S,j,s}^i$ 、 $H_{S,j-1,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 和 $j-1$ 个时刻储热(冷)装置的储能

η_{loss} ——单位时刻储能装置的耗能率

η_{ch} 、 η_{dis} ——单位时刻的充、放能效率

$H_{ch,j,s}^i$ 、 $H_{dis,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 个时刻储热(冷)装置的充放、能功率

ΔT ——调度时段单位

2.4 农村综合能源站优化配置模型

农村综合能源站的建立是在区域综合能源框

架基础上,并入我国农村特有的光伏扶贫电站及沼气循环利用 2 个供能环节,综合考虑规划期内的年运行综合效益最大化,实现对设备容量的优化配置,是一个混合整数线性规划模型。包含农村综合能源站优化配置模型的目标函数、约束条件以及求解方法。

2.4.1 目标函数

本文优化配置考虑了建设农村综合能源站的成本及收益,总目标是实现农村综合能源站年运行综合效益最大化。其中,成本包括投资成本、年运维成本、年购能成本;收益包括光伏扶贫电站收益、沼气循环利用收益。

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \left(1 - \gamma \frac{\lambda_n}{\lambda_i} \right) (C_{benefit_PV} + C_{benefit_B}) - C_{inv} - C_{op} - C_e \quad (22)$$

其中

$$C_{inv} = K_{GT} P_{GT} + K_{GB} P_{GB} + K_{EB} P_{EB} + K_{EC} P_{EC} + K_{AC} P_{AC} + K_{SH} P_{SH} + K_{SC} P_{SC} \quad (23)$$

$$C_{op} = K'_{GT} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} P_{GT,j,s}^i + K'_{GT,else} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} H_{GT,else,j,s}^i + K'_{GB} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} H_{GB,j,s}^i + K'_{EB} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} H_{EB,j,s}^i + K'_{EC} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} C_{EC,j,s}^i + K'_{AC} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} C_{AC,j,s}^i + K'_{SH} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} (H_{S1,j,s}^i + H_{S2,j,s}^i) + K'_{SC} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 d_s \sum_{j=1}^{24} (C_{ch,j,s}^i + C_{dis,j,s}^i) \quad (24)$$

$$C_e = E_{Grid} \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 \sum_{j=1}^{24} P_{Grid,j,s}^i + E_G \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^3 \sum_{j=1}^{24} (G_{GT,j,s}^i + G_{GB,j,s}^i) \quad (25)$$

式中 C_{total} ——年运行综合效益

$C_{benefit_PV}$ 、 $C_{benefit_B}$ ——光伏电站、沼气循环利用净收益

C_{inv} ——机组初始投资成本

C_{op} ——年运维成本

C_e ——年购能成本

γ ——资金回收率,为 10%

λ_i ——第 i 年的现值系数

E_{Grid} ——购电电价

$P_{Grid,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 时刻从电网购入电量

E_G ——天然气价格

其中, K_{GT} 、 K_{GB} 、 K_{EB} 、 K_{EC} 、 K_{AC} 、 K_{SH} 、 K_{SC} 为各能源转换设备单位容量的投资成本, P_{GT} 、 P_{GB} 、 P_{EB} 、 P_{EC} 、 P_{AC} 、

P_{SH} 、 P_{SC} 为各能源转换设备的优化配置容量, K'_{GT} 、 K_{GT_else} 、 K'_{GB} 、 K'_{EB} 、 K'_{EC} 、 K'_{AC} 、 K'_{SH} 、 K'_{SC} 为各能源转换设备单位容量运维成本。

2.4.2 约束条件

关于约束条件主要有系统能量平衡约束、设备运行约束、储能装置约束 3 类。

(1) 系统能量平衡约束

农村综合能源站能量平衡约束包括电、热、冷 3 部分。系统各个时刻需满足的电能、热能、冷能供需平衡约束分别为

$$P_{PV,j,s}^i + P_{B,j,s}^i + P_{Grid,j,s}^i + P_{GT,j,s}^i - P_{GB,j,s}^i - P_{EB,j,s}^i - P_{EC,j,s}^i - P_{Load,j,s}^i - P_{B_{L,j,s}}^i = P_{PV_sold,j,s}^i + P_{B_sold,j,s}^i$$

(26)

$$H_{GB,j,s}^i + H_{EB,j,s}^i + H_{AC,j,s}^i + H_{dis,j,s}^i - H_{ch,j,s}^i - H_{Load,j,s}^i = 0$$

(27)

$$C_{AC,j,s}^i + C_{EC,j,s}^i + C_{dis,j,s}^i - C_{ch,j,s}^i - C_{Load,j,s}^i = 0$$

(28)

式中 $P_{PV_sold,j,s}^i$ 、 $P_{B_sold,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 时刻电网公司按标杆电价收购电量

$P_{Load,j,s}^i$ 、 $H_{Load,j,s}^i$ 、 $C_{Load,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 时刻电、热、冷负荷

$C_{ch,j,s}^i$ 、 $C_{dis,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 时刻储冷装置的充放能功率

(2) 设备运行约束

$$\begin{cases} P_{GT}^{\min} \leq P_{GT,j,s}^i \leq P_{GT}^{\max} \\ H_{GB}^{\min} \leq H_{GB,j,s}^i \leq H_{GB}^{\max} \\ C_{EC}^{\min} \leq C_{EC,j,s}^i \leq C_{EC}^{\max} \\ H_{EB}^{\min} \leq H_{EB,j,s}^i \leq H_{EB}^{\max} \\ C_{AC}^{\min} \leq C_{AC,j,s}^i \leq C_{AC}^{\max} \\ 0 \leq P_{Grid,j,s}^i \leq P_{Grid}^{\max} \end{cases}$$

(29)

式中 $P_{GT}^{\max}$ 、 $P_{GT}^{\min}$ ——燃气轮机功率上、下限
 $H_{GB}^{\max}$ 、 $H_{GB}^{\min}$ ——燃气锅炉功率上、下限
 $C_{EC}^{\max}$ 、 $C_{EC}^{\min}$ ——电制冷机功率上、下限
 $H_{EB}^{\max}$ 、 $H_{EB}^{\min}$ ——电锅炉功率上、下限
 $C_{AC}^{\max}$ 、 $C_{AC}^{\min}$ ——吸收式制冷机功率上、下限
 $P_{Grid}^{\max}$ ——从电网购电上限

(3) 储能装置约束

在综合能源系统中, 储热装置及蓄冷装置充放热模型相似, 以储热装置为例, 其约束为

$$\begin{cases} 0 \leq X_{ch,j,s}^i, H_{ch,j,s}^i \leq H_{ch}^{\max} \\ 0 \leq X_{dis,j,s}^i, H_{dis,j,s}^i \leq H_{dis}^{\max} \\ X_{ch,j,s}^i + X_{dis,j,s}^i \leq 1 \end{cases}$$

(30)

式中 $X_{ch,j,s}^i$ 、 $X_{dis,j,s}^i$ ——第 i 年在第 s 个场景中第 j 时刻的充、放能状态, $X_{ch,j,s}^i = 1$, $X_{dis,j,s}^i = 0$ 表示充能状态, $X_{ch,j,s}^i = 0$, $X_{dis,j,s}^i = 1$ 表示放能状态, 二者不能同时为 1, 同时为 0 表示不工作

$H_{ch}^{\max}$ ——充能上限

$H_{dis}^{\max}$ ——放能上限

2.4.3 求解方法

基于光伏扶贫的农村综合能源站优化配置数学模型可描述为一个 0-1 型混合整数线性规划问题, 采用商业软件 Cplex 在 Matlab 中进行求解, 该求解方法高效便捷。其求解模型标准形式为

$$\begin{cases} \max f(x) \\ \text{s. t.} \begin{cases} g(x) = 0 \\ h_{\min} \leq h(x) \leq h_{\max} \\ x_1 \in \mathbf{R} \\ x_2 \in \{0, 1\} \end{cases} \end{cases}$$

(31)

式中 $f(x)$ ——目标函数
 $g(x)$ ——等式约束向量
 $h(x)$ ——不等式约束向量
 $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ —— $h(x)$ 的上、下限向量
 x_1 ——决策变量中的连续变量向量
 x_2 ——决策变量中的 0-1 变量向量

求解流程见图 4。

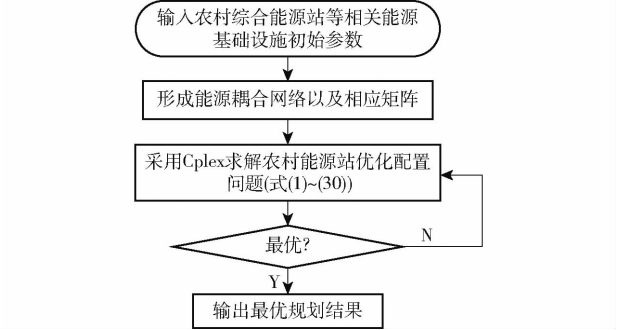


图 4 农村综合能源站优化配置模型求解流程图
Fig. 4 Solving process of optimal allocation model of rural integrated energy station

3 算例分析

本文选取我国北方某贫困村 A 为研究对象, 以验证模型的有效性及其实用性。A 村约有 2 000 人, 地处我国西北地区, 光照丰富, 属于光伏扶贫重点村。该村以农业生产为主, 拟利用光伏扶贫政策支持和生物质资源丰富特点, 建设农村综合能源站, 对其能源设备进行优化配置, 满足农村用能负荷需求。

3.1 基本数据

A 村奶牛场存栏奶牛有近 4 000 头,农作物大棚占地 $1.20 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。日产牛粪约 20 t,年产秸秆量为 134.24 t,按照产沼气潜力可知,每吨牛粪产 35 m^3 沼气,每吨农作物秸秆产生 246 m^3 沼气,日产沼气最高约为 $2\,000 \text{ m}^3$ 。沼气以热电联产方式转化为电、热能, 1 m^3 沼气经国产沼气内燃发电机组可发电约 $1.8 \text{ kW}\cdot\text{h}$,通过余热回收装置可回收约 $2.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 的热能^[32-33]。A 村的养殖厂及种植业的厂区总日用电量约为 $2\,860.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$,养殖场耗热量为 $1\,451.4 \text{ MJ}$ 。沼气发电机组以满足循环农业电、热负荷为基本需求,设定多余电能直接售卖给电网,而多余热能则直接排放。

国家能源局、国务院扶贫办公布的《关于“十三五”光伏扶贫计划编制有关事项的通知》提出,单个村级电站容量应控制在 300 kW 左右(具备就近接入条件的可放大至 500 kW),所以本文设定村级光伏扶贫电站的建设容量为 300 kW。按照当地光伏出力特性得出的光伏出力与安装容量比例变化曲线

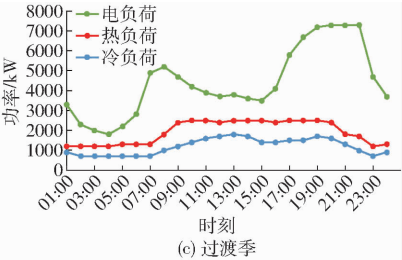
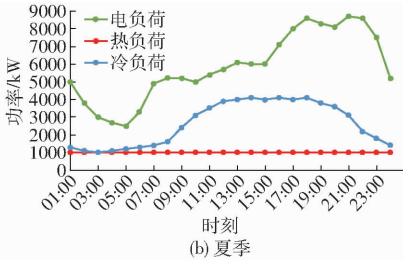
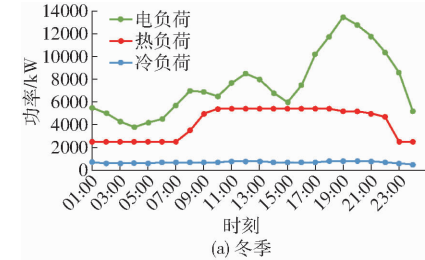


图 6 农村用户负荷需求曲线
Fig. 6 Load demand curve of rural users

3.2 参数设置

A 村属于Ⅲ类资源区,其光伏扶贫电站采用“自发自用、余量上网”模式,运维费用从光伏收益中扣除,运维人员每季度对光伏电站进行一次全面技术检测。参照文献[17-19]光伏电站相关参数设置如表 1 所示。

表 1 光伏扶贫电站建设相关参数 Tab.1 Relevant parameters of photovoltaic power station construction	
参数	数值
光伏上网标杆电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.85
光伏扶贫补贴电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.37
雇佣人数与光伏配置容量比例/(人·MW ⁻¹)	0.006
年运维次数/次	4
单次运维费用/万元	0.89
贷款利率/%	3
总投资与光伏配置容量比例/(万元·MW ⁻¹)	0.74

A 村的沼气发电效率为 $1.5 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,每天发电约 4 h,沼气循环利用相关参数设置如表 2 所

如图 5 所示。

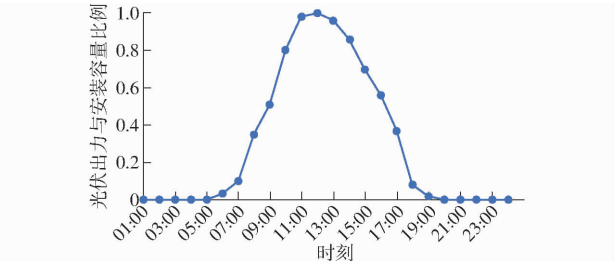


图 5 光伏出力与装机容量的比例曲线
Fig.5 Ratio of photovoltaic output to installed capacity

考虑因季节、温度变换导致的负荷差异性,将全年分为 3 个典型场景——冬季、夏季、过渡季,持续天数分别为 110、153、102 d。不同季节农村用户的电、热、冷日负荷特性如图 6 所示。冬季冷负荷需求基本趋于 0,夏季和过渡季冷负荷集中在 08:00—23:00,夏季冷负荷需求量更大;对电负荷而言,冬季、夏季和过渡季数值差异不大;热负荷需求主要集中在冬季,过渡季相比夏季热负荷需求相对增大。

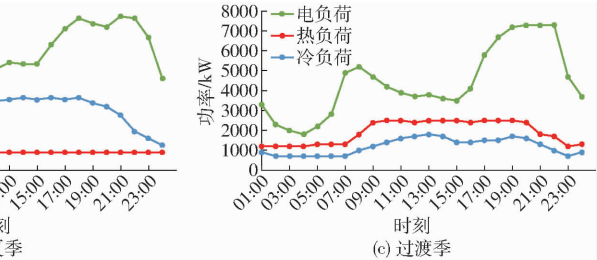


图 6 农村用户负荷需求曲线
Fig. 6 Load demand curve of rural users

示^[20-22]。

表 2 农村沼气循环利用相关参数 Tab.2 Related parameters of rural biogas recycling	
参数	数值
沼气发电上网电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.66
沼液产量/(kg·m ⁻³)	5
沼渣产量/(kg·m ⁻³)	3.33
沼液单位产量价格/(元·t ⁻¹)	10
沼渣单位产量价格/(元·t ⁻¹)	100
初始投入与沼气配置容量比例/(万元·m ⁻³)	0.3
年维修费用与沼气配置容量比例/(万元·m ⁻³)	0.027
老化沼气池更换费用与沼气配置容量比例/(万元·m ⁻³)	0.01

能源转换设备相关参数设置如表 3 所示。
3.3 优化配置结果分析
基于光伏扶贫的农村综合能源站与无沼气循环农业和光伏扶贫电站的传统能源站配置结果对比,其对比结果如表 4 所示。

本文建立的农村综合能源站配置了光伏扶贫电站及沼气热电联产,使得燃气锅炉的容量有所下降,

表 3 能源转换设备相关参数

Tab.3 Relevant parameters of energy conversion equipment

设备名称	转换效率	单位容量投资成本/(元·kW ⁻¹)	单位容量运维成本/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
燃气轮机	气转电 0.37	790	0.025
	电热比 0.32		
燃气锅炉	0.91	34	0.02
电锅炉	0.98	68	0.03
电制冷机	4	110	0.01
吸收式制冷机	1.3	1 100	0.008
储能装置		3.5	0.001 6

表 4 优化配置前后能源设备配置容量对比

Tab.4 Comparison of energy equipment configuration capacity before and after optimization

参数	传统综合能源站	农村综合能源站
燃气轮机配置容量/kW	998	565
燃气锅炉配置容量/kW	2 031	1 475
电锅炉配置容量/kW	1 866	1 531
电制冷机配置容量/kW	1 113	1 189
吸收式制冷机/kW	430	355
储热装置配置容量/(kW·h)	3 579	3 091
储冷装置配置容量/(kW·h)	2 397	2 529

养殖场及配套种植区的电能在农村综合能源站中可实现自发自用、余电上网。而传统能源站除需供应基本负荷需求外,还需供应种养业的电能及热能。因此,相应的燃气锅炉及电锅炉的配置容量较大,增加了设备的投资费用及购电费用。

为说明所建立的基于光伏扶贫电站的农村综合能源站优化配置结果的年综合效益最大,进行效益分析:

(1)光伏扶贫电站收益

光伏扶贫电站估计初始投资为 222 万元,年等值投资为 17.8 万元,年运维费用为 3.56 万元。按照光伏出力特性曲线及规划结果可知,预计年均实现发电量 3.6×10^5 kW,因光伏发电参与电能平衡,可预计余电上网费用约为 10.56 万元;发电补贴为 $36 \times 0.37 = 13.32$ 万元;简单维护光伏电站的村民工资设定为每月 1 000 元,增加就业收入为 $1\,000 \times 12 \times (300 \times 0.006) = 21\,600$ 元;总装机容量为 300 kW 的光伏扶贫电站规划占地面积约为 4 333 m²,针对不同地区不同土地类型其用地租赁费用不同,本文取土地租金为 3 元/(年·m²),则用地租赁费用为 1.3 万元。综上可得光伏扶贫电站的年总收益为 27.58 万元,年将收益 6.22 万元。

光伏扶贫电站充分利用当地太阳能资源,减少电能购入,通过余电售卖给电网实现年效益,减轻了

村集体财政压力。

(2)沼气循环利用收益

计算得到总投资费用 600 万元,按照年利率为 8%,运行年限为 20 a,计算可得年投资费用为 49.20 万元,运维费用为 54.81 万元,年总支出为 104.01 万元;每年的收益中,沼气热电联产除满足种养业电负荷需求外,余电上网的收益按照每天最大产气量计算为 $0.66 \times (2\,000 \times 1.8 - 2\,860.5) \times 365 = 17.81$ 万元;沼气热电联供结合种养业实际用能状况供应电及热能,从而大幅度减少商品电量的购买,降低场区电费支出,从而产生节能收益 42.77 万元;使用沼肥按每年每公顷可增收 3 450 元,配套种植区 1 年可增收 $120 \times 3\,450 \times 10^{-4} = 41.4$ 万元,年产沼肥为 $(5 + 3.33) \times 2\,000 \times 10^{-3} \times 365 = 6\,080.9$ t,按照 1 t 沼肥相当于化肥 0.015 t 计算,1 t 化肥 2 150 元计算,节省化肥费用为 19.6 万元,沼肥节本总增益为 $41.4 + 19.6 = 61.00$ 万元。所以,年总收益为 121.58 万元,年净收益 17.57 万元。

(3)基于光伏扶贫的农村综合能源站综合效益

通过沼气热电联产实现电能及热能的自给自足,且多余电量可上网售卖;光伏扶贫电站除满足农民负荷需求、维持电能平衡外,带来了一定的经济效益;同时,燃气轮机等装置配置容量的减少降低了成本。本文提出的农村综合能源站相比于传统能源站,在电负荷一定的前提下,使得购电量减少了 7.583×10^5 kW,综合效益增加了 99.02 万元,提升了近 46%。综合考虑光伏扶贫电站与沼气循环利用的农村综合能源站,与不考虑两者的传统综合能源站,其年综合效益对比结果如图 7 所示。

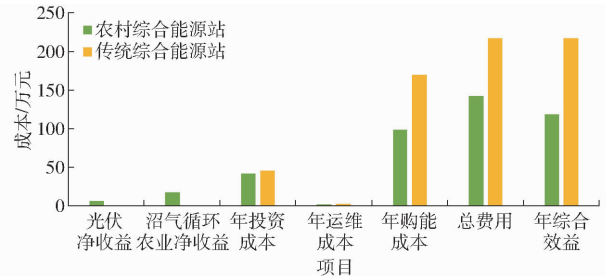


图 7 农村综合能源站与传统能源站效益对比

Fig.7 Comparison of benefits between rural integrated energy stations and traditional energy stations

综上可知,基于光伏扶贫的农村综合能源站能更好地实现经济效益的提升和购能成本的降低,既能有效解决村集体经济空壳问题,又能直接带动无劳动能力的建档立卡贫困户增收,还能为循环农业供能,减少能源支出,农村综合能源站的规划与建设节约更多成本,从而实现农村年综合效益最大化。

4 结论

(1)以村集体的角度,综合考虑农村能源供给,满足农村用户电、冷、热3类负荷需求,设计了基于光伏扶贫的农村综合能源站。

(2)对能源转换设备、光伏扶贫电站收益和农村沼气循环利用收益建立数学模型,以农村年综合效益最大化为目标函数,提出了考虑综合效益的农

村综合能源站优化配置方法。

(3)以北方某贫困村为研究对象,根据上述场景和研究方法,进行算例验证。结果表明,农村综合能源站比传统能源站综合效益提升了近46%。

(4)基于光伏扶贫的农村综合能源站可以有效解决边远、贫困地区因缺电而无法促使其传统农业向现代农业生产方式转变的瓶颈问题,在未来农村能源结构改革、产业结构优化的路径上具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 童光毅,杜松怀. 智慧能源体系[M]. 北京:科学出版社,2020.
- [2] 丛宏斌,赵立欣,王久臣,等. 中国农村能源生产消费现状与发展需求分析[J]. 农业工程学报,2017,33(17):224-231. CONG Hongbin, ZHAO Lixin, WANG Jiuchen, et al. Current situation and development demand analysis of rural energy in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 224-231. (in Chinese)
- [3] MAHESHWARI Z, RAMAKUMAR R. Smart integrated renewable energy systems (SIREs) for rural communities[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2016.
- [4] ALPESH M P, SUNIL K S. Implementation methodology of integrated renewable energy system modeling for off-grid rural electrification: a review[C]//International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE), IEEE, 2018.
- [5] MICHAEL G T, THU Y M. Analysis of ways of solving the problem of hybrid energy complexes based on reserve for power supply of autonomous rural consumers in Myanmar[C]//Renewable Ennrgies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE), IEEE, 2018
- [6] 赵达维,张文涛,刘旭娜,等. 光伏与混合储能配合的园区综合能源系统规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(10):88-95. ZHAO Dawei, ZHANG Wentao, LIU Xu'na, et al. Park-level integrated energy system planning based on the cooperation of PV and hybrid energy storage[J]. Proceedings of the CSU-EPsA, 2019, 31(10):88-95. (in Chinese)
- [7] 权超,董晓峰,姜彤. 基于CCHP耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划[J]. 电网技术,2018,42(8):2456-2466. QUAN Chao, DONG Xiaofeng, JIANG Tong. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2456-2466. (in Chinese)
- [8] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):113-120,141. LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):113-120,141. (in Chinese)
- [9] UNSHUAY-V C, MARANGON-L J W, SOUZA A C Z D, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):1154-1168.
- [10] 程林,张靖,黄仁乐,等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):282-287. CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):282-287. (in Chinese)
- [11] 刘畅,涂国平. 农村沼气工程能源消耗及环境影响的LCA分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(6):47-53. LIU Chang, TU Guoping. On LCA analysis of environmental impact and energy consumption of biogas project in rural areas of China[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2017, 42(6):47-53. (in Chinese)
- [12] 岐皓月,王琳. 精准扶贫背景下农村生物质能源利用现状及对策研究——基于湖南省的调查[J]. 环境与发展,2019,31(1):193-195. QI Haoyue, WANG Lin. Research on the current situation and Countermeasures of rural biomass energy utilization under the background of targeted poverty alleviation—based on the investigation of Hunan Province [J]. Environment and Development, 2019, 31(1): 193-195. (in Chinese)
- [13] 段娜,林聪,刘晓东,等. 以沼气为纽带的生态村循环系统能值分析[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1):261-268. DUAN Na, LIN Cong, LIU Xiaodong, et al. Energy analysis of biogas-linked eco-village circulating system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1):261-268. (in Chinese)
- [14] BERGLUND M, BRJESSON P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3):254-266.

- [15] 童光毅,倪琦,潘跃龙,等. 农业信息化背景下光伏发电扶贫模式及效益提升机制研究[J]. 农业工程学报,2019,35(10):131–139.
TONG Guangyi, NI Qi, PAN Yuelong, et al. Photovoltaic poverty alleviation model and benefit promotion mechanism under background of agricultural informatization[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 131–139. (in Chinese)
- [16] 孙若男,杨曼,苏娟,等. 我国农村能源发展现状及开发利用模式[J]. 中国农业大学学报,2020,25(8):163–173, 6.
SUN Ruonan, YANG Man, SU Juan, et al. Current situation of rural energy development and its development and utilization modes in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(8): 163–173, 6. (in Chinese)
- [17] CHARLES C R, MICHAEL J G. Eco-efficiency analysis of an agricultural research complex[J]. Journal of Environmental Management, 2003, 68(3):219–229.
- [18] 王珺. 区域综合能源系统规划及优化运行[D]. 南京:东南大学,2017.
WANG Jun. Planning and optimal operation of regional integrated energy system [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [19] 安文静. 我国光伏产业扶贫机制与模式研究[D]. 太原:山西财经大学,2018.
AN Wenjing. Research on poverty alleviation mechanism and model of China's photovoltaic industry [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2018. (in Chinese)
- [20] 郑哲鲲.“猪-沼-果”循环农业投资项目的经济效益和环境效应研究[D]. 福州:福建农林大学,2019.
ZHENG Zhekun. Study on economic and environmental effects of “pig biogas fruit” circular agriculture investment project [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [21] 李文斌. 建水县西山村种养结合循环农业模式构建及推广研究[D]. 昆明:云南师范大学,2019.
LI Wenbin. Study on the construction and popularization of planting and breeding combined circular agriculture model in Xishan Village, Jianshui County [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019. (in Chinese)
- [22] 邓晔. 浅谈盐城市生态循环农业发展模式——以江苏梅林畜牧有限公司为例[J]. 农业科技通讯,2020(4):20–22.
DENG Ye. On the development model of ecological circular agriculture in Yancheng City—taking Jiangsu Meilin Animal Husbandry Co., Ltd. as an example [J]. Agricultural Science and Technology Communication, 2020(4): 20–22. (in Chinese)
-

(上接第335页)

- [25] SUDDUTH K A, DRUMMOND S T, KITCHEN N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3):239–264.
- [26] 王晗,王克奇,白雪冰,等. 基于分形维木材表面粗糙度的研究[J]. 森林工程,2007(2):13–15.
WANG Han, WANG Keqi, BAI Xuebing, et al. The research of wood surface roughness based on fractal dimension[J]. Forest Engineering, 2007(2):13–15. (in Chinese)
- [27] 赵海英,杨光俊,徐正光. 图像分形维数计算方法的比较[J]. 计算机系统应用,2011,20(3):238–241,246.
ZHAO Haiying, YANG Guangjun, XU Zhengguang. Fomparison of calculation methods-based image fractal dimension[J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(3):238–241,246. (in Chinese)
- [28] 何汉林,孟爱华,祝甲明,等. 基于优化的 GRNN 和 BP 神经网络的磁滞曲线拟合对比分析[J]. 机电工程,2013,30(1):116–120.
HE Hanlin, MENG Aihua, ZHU Jiaming, et al. Contrast analysis of hysteresis curve fitting between optimized GRNN and BP neural network[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2013, 30(1):116–120. (in Chinese)
- [29] 张文清,傅雨佳,杨慧中. 基于改进聚类 and 加权 bagging 的多模型软测量建模[J]. 化工学报,2012,63(9):2697–2702.
ZHANG Wenqing, FU Yujia, YANG Huizhong. Multi-model soft-sensor modeling based on improved clustering and weighted bagging [J]. CIESC Journal, 2012, 63(9):2697–2702. (in Chinese)
- [30] 陈苏婷,张勇,胡海锋. 基于激光散斑分形维数的表面粗糙度测量方法[J]. 中国激光,2015,42(4):232–237.
CHEN Suting, ZHANG Yong, HU Haifeng. Surface roughness measurement based on fractal dimension of laser speckle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4):232–237. (in Chinese)
- [31] 李小龙. 纸张表面微观形貌的分析与表征研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
LI Xiaolong. Analysis and characterization of paper surface micro-topography [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [32] SHANMUGAVADIVU P, SIVAKUMAR V. Fractal dimension based texture analysis of digital images [J]. Procedia Engineering, 2012, 38:2981–2986.
- [33] 何亮,宋擒豹,海振,等. 基于 Bagging 的组合 k-NN 预测模型与方法[J]. 控制与决策,2010,25(1):48–52.
HE Liang, SONG Qinbao, HAI Zhen, et al. Bagging-based ensemble model and algorithm of k-NN prediction[J]. Control and Decision, 2010, 25(1):48–52. (in Chinese)