DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808126

村镇人口密度对生物质热电厂运输成本的影响

张一飞[1],马克尼[2]

(1.寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150001;
2.中国城市规划设计研究院,北京 100037)

摘 要: 具备热电联产功能的生物质热电厂相对于生物质发电厂具有更高的能源利用效率,不仅可以满足冬季采暖需求,而且更适合于寒冷地区村镇体系发展生物质能源,但目前其发展受成本制约严重,而运输成本是关系运营成本的重要问题之一. 为实现根据研究区域内村镇人口密度数据来提升生物质热电厂运输成本的研究目的,依据不同农作物地理分布状态测算生物质潜能,运用GIS分析工具的网络分析、邻近分、叠加分析等方法,依托人口分布与能源需求数据确定生物质热电厂位置与服务区域,采用含收费、油耗、路况多种干扰因素的公式计算生物质热电厂原料供应范围与运输成本,形成区域范围内优化运输路径. 分析结果表明,根据能源完全自给自足的假设前提进行判断,生物质热电厂仅适合于人口密度较低的村镇体系,供应范围随着村镇人口密度增加呈现反S曲线形态,运输成本随着村镇人口密度增加呈现指数曲线形态,当区域范围内村镇人口密度小于65人/km^2时建设生物质热电厂的整体运营效率更高.

关键词: 村镇;人口密度;生物质热电厂;供应范围;运输成本
中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0157-07

Influence of rural population density on the transportation cost of biomass combined heat and power plants

ZHANG Yifei[1], MA Keni[2]

(1. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology (Harbin Institute of Technology), Harbin 150001, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

Abstract: Biomass combined heat and power (CHP) plants have higher energy efficiency than biomass power plants. They can meet the demand of heating in winter, and they are more suitable for cold regional village and town system to develop biomass energy. However, such development is limited by cost, especially operation cost, and transportation cost. To improve the transportation cost of biomass CHP plants according to rural population density data in the research area, the GIS analysis tool of network analysis, adjacent points, overlay analysis, as well as and other methods on the basis of the distribution status of different crops biomass potential are used and position and service area relying on the population distribution and biomass CHP plants' energy demand data are determined. In the meantime, the raw material supply area of the biomass CHP plants and the transportation cost were calculated, which contains a variety of charges, fuel consumption, and traffic interference factors of the formula, and then regional scale optimization of transportation paths was obtained. Results show that biomass CHP plants are only suitable for low population density villages and towns systems according to the assumption of energy being completely self-sufficient. The supply area presented an inversed S curve pattern as rural population density increased, and transport costs presented an exponential curve pattern as rural population density increased. The overall operating efficiency of the biomass CHP plants was higher when the rural population density was not more than 65 people/km^2.

Keywords: rural; population density; biomass combined heat and power plants; supply area; transportation cost

农业为人类提供食物来源,相对于林业生物质来说,农业生物质来源稳定可靠,潜能巨大,是更可靠的生物质载体形式[1]. 建立生物质热电厂是效率较高的农业生物质利用方式,由此催生了诸多与生物质热电厂相关的效率分析研究,运输成本也是关键影响因素之一[2].

Golecha等[3]从生物质产量密度与道路网交通半径入手建立测算模型公式研究生物质热电厂运输成本;但该研究未考虑生物质类型、秸秆热值差异、村镇人口密度等因素的影响. Daianova等[4]研究瑞典境内生物质热电厂原料运输车队消耗的燃料成本,认为乙醇生产成本、汽油价格、秸秆加工费3个因素影响最大;然而将该研究未考虑公路收费、路况

收稿日期: 2018-08-27
基金项目: 国家自然科学基金(51578175)
作者简介: 张一飞(1979—),男,博士,副教授
通信作者: 马克尼,makeni0000@163.com

差异、设计车速等因素. Kurka 等[5]运用 GIS 工具对 10 个中型生物质热电厂的运输成本与 CO_2 排放量进行测算,认为在传统能源与可再生能源共存前提下分散布置生物质热电厂更有利;不过该分析模型选取的热电厂总功率趋于相近,在应对人口密度差异较大情境时会产生测算误差. Riha 等[6]从道路交通视角对城市与乡村道路交通成本进行建模测算;但该研究没有针对生物质热电厂等具体交通出行方式设定额外参数. 刘广建等[7]对生物质预处理物流成本进行研究,认为运输距离小于 26 km 时宜采用破碎方式,在 26 ~ 80 km 时宜采用打包模式,大于 80 km 时宜采用固化成型模式;不过该研究并未对运输距离小于 26 km 区间进行细化研究. 程旭云等[8]采集 4 种农作物秸秆样品 172 个,测量得到其热值数据;不过该研究所在地气候与本文案例不同,秸秆热值存在一定程度的偏差.

从上述研究可以看出,关于生物质热电厂运输成本的研究在生物质产量密度、道路网半径、运输消耗燃料、生物质预处理等层面取得了研究成果,但是关于村镇人口密度与生物质热电厂运输成本之间关系的研究仍较为薄弱,因此本文将此问题作为研究重点,致力于描述其变化规律,为生物质热电厂选址提供数据支撑.

由于秸秆单位质量所能产生的热值仅相当于煤炭的 1/2 左右,因此体积较大的劣势使小型热电厂运营成本收到运输成本制约. 本文研究对象所在地区农业生物质空间分布较均匀,但区域内的村镇人口分布密度差异较大. 人口密度较高的村镇由于热能需求较大,所需秸秆数量也较多,因此不得不在更大范围内收集与运输秸秆,造成较高的运输成本. 本文研究的主要目的是在运输成本和人口密度之间建立逻辑联系,致力于计算能够满足运输成本和产热收益大致平衡的人口密度临界值,研究结果可为小型生物质热电厂选址提供指导.

研究中涉及的人口密度与人口构成会对生物质能源供应与消费量产生影响. 本文中提及的人口密度特指村镇体系内的人口而言,由于村镇体系兼具小城镇与乡村的特点,因此对其人口数据进行平均化处理,以期模拟结果能够尽量接近真实情况. 人口构成数据采集难度过大,本文只能依据区域统计数据的平均数值来进行计算.

1 供应范围与运输成本计算方法与关键变量

村镇人口密度会对生物质热电厂的一系列指标产生影响,其中包括输出总功率、服务范围、供应范围、运输成本. 本文以往研究结果显示,热电厂总功率由区域能源需求分布状态决定,热电厂服务范围由热能传输阈值决定[9]. 本文在该研究成果基础上继续对供应范围、运输成本进行分析. 确定供应范围是测算运输成本的前提,因此本文将在确定研究案例后首先分析供应范围,然后计算运输成本.

基于农业产量高、道路网络完备、人口分布不均匀几个普适性条件进行筛选,最终确定如图 1 所示的村镇体系为研究案例. 该区域位于黑龙江省东北部三江平原,东西跨越 57. 87 km,南北跨越 46. 62 km,总面积 1 586. 16 km^2,总人口 98 492 人,上街基、长安、锦山 3 个镇人口较多,其余 144 个村人口较少[10],人口密度区域差异性较大. 在运用 Arcgis 软件进行人口分布的过程中采用人口密度梯度模型,其数学表达式为

$$D(r) = D_o e^{-br}.$$

式中:D_o 为村镇中心区人口密度;r 为某一地点到中心区的距离;$D(r)$ 为这一地点的人口密度. 在 GIS 分析时将区域分析精度设置为 100 m 的方格,将村镇位置与人口数据输入 Arcgis 软件进行分析,可以得到如图 2 所示的人口分布状态.

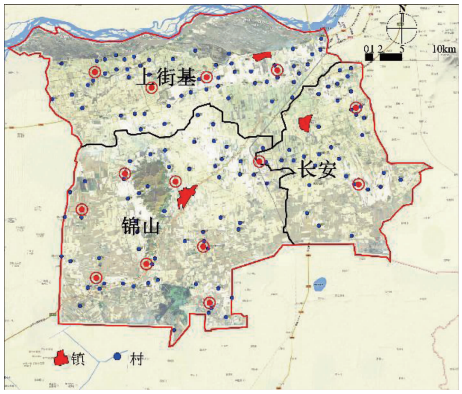

图 1 村镇区位关系

Fig. 1 Relative locations of the villages and towns

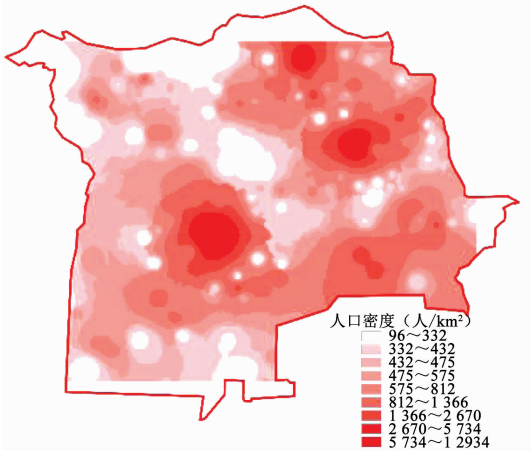

图 2 人口分布状态

Fig. 2 Population distribution

1.1　生物质热电厂供应范围计算方法

不同农作物的秸秆热值、种植面积、分布范围差异明显，这些差异会对生物质热电厂供应范围产生影响. 依据从地方政府获取的农作物种植类型与分布数据，绘制成如图 3 所示的农作物种植范围分布图. 在汇总秸秆产量相关文献[11 - 12]的基础上，本文采用了认可度较高的下式来计算秸秆产量.

$$P = FI. \tag{1}$$

式中：P 为秸秆产量；F 为作物单位面积产量；I 为草谷比. 根据农产品产量统计数据[10,13 - 14]与作物草谷比可以计算出研究区域所能获得的秸秆数量. 本文对以往成熟公式进行优化拓展，结合秸秆数量与热值计算农田面积对应潜能，进而测算生物质热电厂原料供应范围为

$$RN(E+T) = KC(H_rP_rL_r + H_bP_bL_b + H_cP_cL_c + H_wP_wL_w + H_pP_pL_p + H_oP_oL_o). \tag{2}$$

式中：R 为生物质原料库存调峰系数；N 为生物质热电厂服务人口数量；E 为年人均用电量；T 为年人均用热量；K 为生物质燃烧效率；C 为秸秆可收集系数；H_r、H_b、H_c、H_w、H_p、H_o分别为水稻、大豆、玉米、小麦、马铃薯、杂粮类秸秆的热值；P_r、P_b、P_c、P_w、P_p、P_o分别表示上述 6 类作物秸秆单位面积产量；L_r、L_b、L_c、L_w、L_p、L_o分别表示上述 6 类作物种植面积.

结合式(1)、(2)整理后可以得出：

$$RN(E+T) = KC(H_rF_rI_rL_r + H_bF_bI_bL_b + H_cF_cI_cL_c + H_wF_wI_wL_w + H_pF_pI_pL_p + H_oF_oI_oL_o), \tag{3}$$

$$L = L_r + L_b + L_c + L_w + L_p + L_o, \tag{4}$$

式中 L 为生物质热电厂原料供应范围，它是受上述 6 类作物种植面积共同影响的动态变量，多种农作物比例存在浮动可能性，因此上述公式的解并非唯一. 因此，后续 GIS 分析将依托生物质热电厂总功率及村镇现状条件来测算各种农作物种植面积的最优组合方式.

1.2　生物质热电厂运输成本计算方法

中国村镇体系道路可划分为高速公路、国道、省道、县道、乡道 5 类，道路等级差异会造成运输成本的差异. 依据收费与否以及最高限速条件，案例境内道路可划分为如图 4 所示的 A、B、C、D 类，其中：A 类为高速公路；B 类为国道、省道；C 类为县道；D 类为乡道.

在综合分析以往运输成本计算方法[15 - 16]的基础上，将与区位和运输距离无关的折旧费、工人工资、维修保养费等参数考虑成常数，拓展增加收费、油耗、路况等与道路类型相关的影响要素，就可以得到如下式所示的针对道路网络特性的运输成本测算方法：

$$D = \sum (M + PQ_{au}J_a/100)A_w + \sum PQ_{bx}J_bB_x/100 + \sum PQ_{cy}J_cC_y/100 + \sum PQ_{dz}J_dD_z/100. \tag{5}$$

式中：D 为运输成本；M 为高速公路每公里收费标准；P 为燃料价格；w 为区域内货车途经 A 类公路的段数；Q_a为货车在高速公路上运行时百公里油耗体积；J_a为 A 类公路拥堵系数；A_w为货车途经某段 A 类公路的距离，x 为区域内货车途经 B 类公路的段数；Q_b为货车在 B 类公路上运行时百公里油耗体积；J_b为 B 类公路拥堵系数；y 为区域内货车途经 C 类公路的段数；Q_c为货车在 C 类公路上运行时百公里油耗体积；J_c为 C 类公路拥堵系数；z 为区域内货车途经 D 类公路的段数；Q_d为货车在 D 类公路上运行时百公里油耗体积；J_d为 D 类公路拥堵系数.

至此上述公式的逻辑算法已经明确，接下来的工作就是确定公式中的参数赋值.

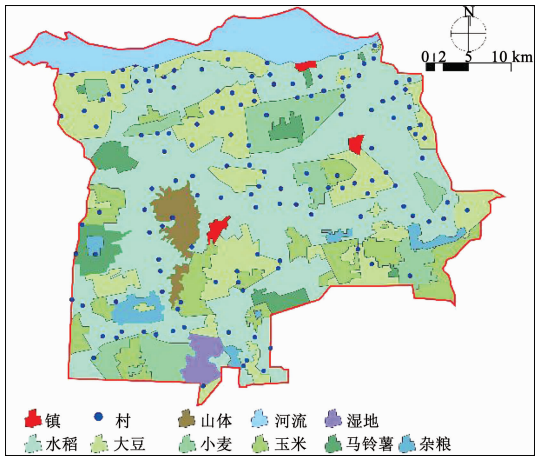

图 3　境内农作物种植分布情况

Fig. 3　Distribution of cultivated crops within the study area

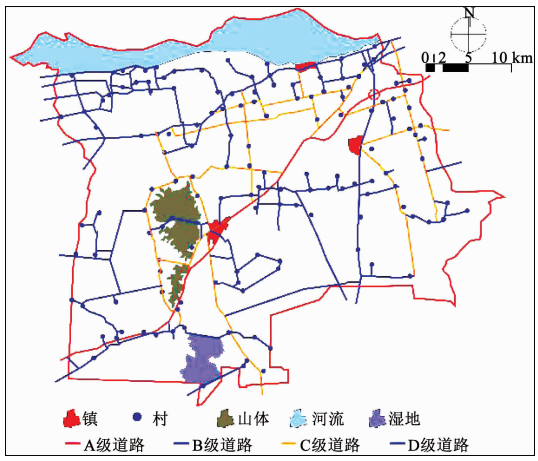

图 4　境内道路等级分布情况

Fig. 4　Distribution of various classes of roads within the study area

2 分析模型参数赋值与网络分析

在此部分将确定上述公式中大部分参数赋值，然后借助 Arcgis 软件对案例区域进行网络分析，进而对上述公式中少部分暂时无法赋值的参数进行优选分析. 案例境内村镇人口密度分布极不均匀，可以提供多种不同密度的情境，而后续研究的目的就是在多种情境下寻求供应范围与运输成本两个变量的变化规律.

2.1 生物质热电厂供应范围模拟分析

在进行模拟分析之前，需要对式(3)中的参数赋值进行考虑与分析. 通过地方统计数据[10]可以得知年人均用电量 E 为 562 kWh/y，年人均用热量 T 为 37.976 GJ/y. 为统一单位以方便计算，将 E 的赋值 562 kWh/y 折算为 2.023 GJ/y. 由此可以看出寒冷地区冬季采暖导致年人均用热量远大于年人均用电量，体现了建设热电联产电厂的必要性. 虽然生物质热值密度较低，但是其最大优势在于生物质能是可以存储的可再生能源，这一优点是传统的煤炭发电所无法具备的，在充分研究运输成本的条件下可以较大幅度提高生物质热电厂的运营效率. 同时，通过政府给予适当的新能源补贴可以弥补生物质发电用户用电价格偏高的弱点. 依据地方统计数据[10]中的能耗季节性与每日波动规律，将生物质原料库存调峰系数 R 设定为 3.182. 根据文献[17 – 18]研究成果，由于村镇人口密度与生物质发电机组装机容量普遍偏小，因此将生物质燃烧效率 K 确定为下限值 80%. 依据近年当地秸秆收集水平，秸秆可收集系数 C 被确定为 0.85.

为了确定 H_r、H_b、H_c、H_w、H_p、H_o的赋值，采用苏科 JL-1 型材料热值检测仪测量各种农作物的秸秆热值. 根据地方统计数据[10]可以确定参数 F_r、F_b、F_c、F_w、F_p、F_o以及 I_r、I_b、I_c、I_w、I_p、I_o的赋值，结合秸秆热值数据可以计算得出 P_r、P_b、P_c、P_w、P_p、P_o的赋值以及其他指标. 将这些数据与图 3 中各种农作物种植面积进行汇总，可以得到如表 1 所示的结果.

表 1 主要农作物相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of the main crops

相关参数	秸秆热值/(MJ·kg^{-2})	单位面积粮食产量/(kg·hm^{-2})	草谷比	单位面积秸秆产量/(kg·hm^{-2})	单位面积秸秆理论潜能/(GJ·hm^{-2})	单位面积秸秆实际转化能源/(GJ·m^{-2})	单位面积秸秆对应供给人口/(p·hm^{-2})	作物种植面积/ha
水稻	12.560	6 860	0.97	6 654.20	83.577	56.832	0.470	7 086 679
大豆	15.900	1 781	1.70	3 027.70	48.140	32.735	0.271	2 952 560
小麦	14.650	5 327	0.93	4 954.11	72.578	49.353	0.408	1 404 577
玉米	15.490	5 973	1.86	11 109.78	172.090	117.021	0.967	1 455 275
马铃薯	14.230	3 776	0.71	2 680.96	38.150	25.942	0.214	601 581
杂粮类	14.230	5 452	0.97	5 288.44	75.255	51.173	0.423	357 991

本文前置研究工作得出了生物质热电厂网络的热能传输距离最大值为 8 km 时热能利用效率最高的结论[9]，因此本文在此结论基础上借助 Arcgis 软件生成如图 5 所示的生物质热电厂网络. 根据图 5 中生物质热电厂服务范围可以确定每个生物质热电厂的服务人口数量 N.

上述参数确定后，式(3)中只剩下 L_r、L_b、L_c、L_w、L_p、L_o为变量参数，下面将运用 Arcgis 软件进行网络分析. 综合考虑图 2、3、5 的空间与属性数据信息，采用式(3)、(4)的算法，在 Arcgis 软件里设定供应点距离生物质热电厂尽可能短(《关于进一步加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知》规定生物质热电厂与居民区距离不得小于 300 m，所以“距离尽可能短”也存在限制阈值)的前提条件来进行模拟分析，可以计算出如图 6 所示的供应范围分析结果.

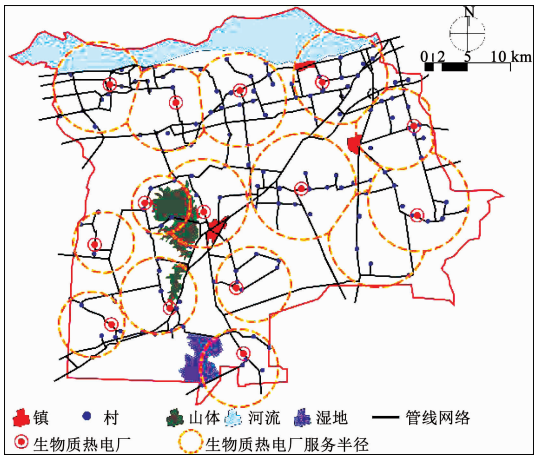

图 5 热能利用效率优先的生物质热电厂网络

Fig. 5 Biomass CHP plant network generated by giving priority to heat use efficiency

图 6 及其分析数据显示，由于编号为 3、11、14 的 3 个生物质热电厂供应范围内人口数量过多，这

些生物质热电厂无法仅依靠生物质能源来满足服务范围内的所有热电供应；而其余 11 个生物质热电厂则能依靠生物质能源来满足服务范围内的所有热电供应.

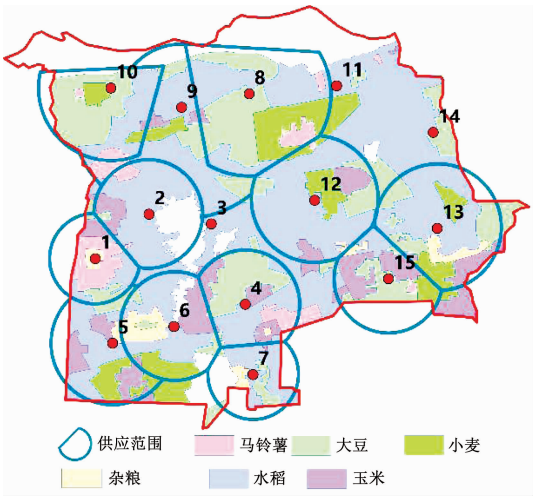

图 6　生物质热电厂供应范围的 GIS 分析结果

Fig. 6　ArcGIS analysis results regarding the supply area for each biomass CHP plant

2.2　生物质热电厂运输成本模拟分析

在进行模拟分析之前，需要对式(5)中的参数赋值进行分析. 中国高速公路收费是依据路途距离而确定的，因此 E 可以折算为 0.5 元/km. 在汇总多种车辆油耗研究成果[19-22]的基础上，对调查案例区域内采用最多的解放 J6P-420 型卡车(车自重 25 t，可载重 15 t)进行油耗实测，得到如图 7 所示的油耗关系图. 从图 7 中可以看出最经济时速为 76 km/h，在时速处于 10 ~ 100 km/h 区间内，油耗指标呈现 U 形变化趋势[23]. A、B、C、D 类公路的最高限速分别为 80、80、60、40 km/h，因此可以依据图 7 的函数曲线及数据计算得到 Q_a、Q_b、Q_c、Q_d 的各自对应值为 38.20、38.20、38.34、39.35 L/10^2 km. 由于高速公路、国道、省道在不同时段的具体行车时速差异巨大，因此此处根据从黑龙江省交通部门调取的平均测速统计数据来进行测算，将各种类型道路的拥堵系数 J_a、J_b、J_c、J_d 分别确定为如表 2 所示的 1.03、1.10、1.14、1.26. 如果想进一步提高计算精度，可以采用实时交通监控数据来长时间采样比对分析，但是再完善的模拟分析过程也避免不了交通事故等不可预见的突发事件带来的干扰，因此，理论模拟分析只能尽可能接近现实状态，完全体现现实状态几乎是不可能达到的目标.

在图 6 生物质热电厂供应范围的限定条件下，结合图 7、表 2 所包含的空间与属性数据信息，运用式(5)的计算方法，在 Arcgis 软件里设定公式中所有已知参数，对式(5)中未知的 w、x、y、z 几个变量进行网络分析，进而得出如图 8 所示的运输路径分析结果与如表 3 所示的运输成本测算数据.

表 2　道路类型与特性

Tab. 2　Road classes and attributes

道路类型	隶属等级	是否收费	道路拥堵系数	最高限速/(km·$^{-1}$)
高速公路	A	是	1.03	80
国道	B	否	1.10	80
省道	B	否	1.10	80
县道	C	否	1.14	60
乡道	D	否	1.26	40

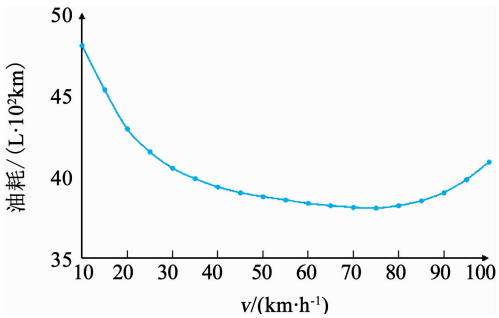

图 7　解放 J6P-420 卡车满载状态时速与油耗关系

Fig. 7　Relationship between fuel consumption and speed for a fully loaded Jiefang J6P-420 truck

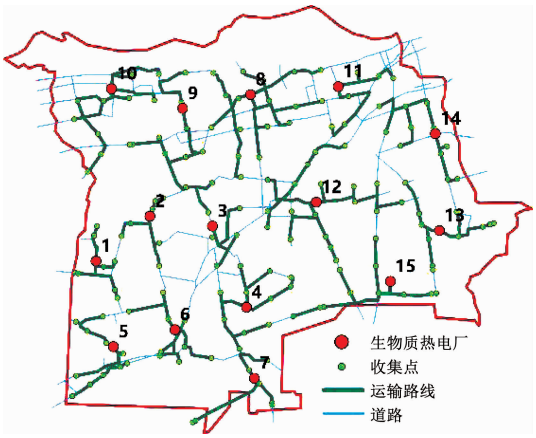

图 8　生物质热电厂运输路径 GIS 分析结果

Fig. 8　ArcGIS analysis results regarding the transportation paths for the biomass CHP plants

在得出图 8 和表 3 的图形与数据的过程中可以发现，除编号为 3、11、14 的 3 个镇以外的所有村镇都可以实现 100% 利用生物质能源供能的目标，而编号为 3、11、14 的 3 个镇由于人口众多，区域内的生物质潜能不足以提供居民所需的全部能源，只能采取可再生能源与不可再生能源混用的方式.

2.3　村镇人口密度与供应范围、运输成本的关系

上述分析结果不仅包含着空间信息，还包含很多具有关键作用的属性信息，对这些数据进行分析可以寻求其中的规律.

运用多元回归分析方法来对村镇人口密度与生

物质热电厂原料供应范围进行分析,可以得出如图 9所示的关联曲线. 分析结果显示,供应范围随着人口密度的增加呈现出反 S 曲线的形态,在人口密度适中的区间,供应范围增长趋势较为平缓. 从图 9 中曲线变化趋势进行判断,临界阈值可确定为 65 人/km^2.

表 3 运输成本测算数据

Tab. 3 Estimated transportation cost data

热电厂编号	服务人口/人	供应范围/km^2	人口密度/(人·km^{-2})	运输秸秆质量/t	运输成本/元
1	1 770	68.30	25.92	35 562	44 892.78
2	2 923	105.34	27.75	37 772	43 703.70
3	17 086	98.95	172.67	20 124	38 519.92
4	4 236	93.13	45.48	60 210	124 039.87
5	3 006	92.61	32.46	60 216	89 581.93
6	4 882	100.78	48.44	46 808	62 937.53
7	2 053	68.59	29.93	27 477	43 092.14
8	7 410	179.69	41.24	70 920	151 480.25
9	5 121	103.58	49.44	65 559	227 497.76
10	4 203	109.96	38.22	37 793	92 764.42
11	15 511	89.83	172.67	30 929	65 868.87
12	6 341	144.54	43.87	105 706	258 709.66
13	5 410	138.01	39.20	51 602	82 246.57
14	17 707	102.55	190.68	58 104	131 659.00
15	3 886	90.30	43.03	68 047	149 780.04

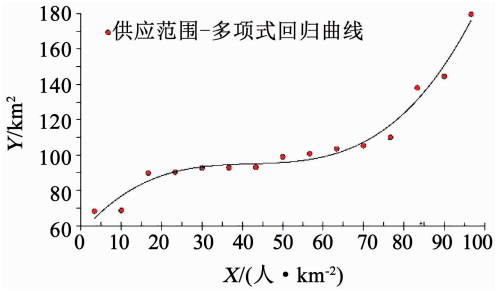

图 9 村镇人口密度(*X* 轴)与生物质热电厂原料供应范围(*Y* 轴)的多元回归分析

Fig. 9 Polynomial regression analysis of PD_{VTS} (x-axis) versus supply area for the biomass CHP plants (y-axis)

运用多元回归分析方法来对村镇人口密度与生物质热电厂原料运输成本进行分析,可以得出如图 10 所示的关联曲线. 分析结果显示,运输成本随着人口密度的增加呈现出指数曲线形态,在人口密度达到阈值之前,运输成本增长趋势较为稳定与缓慢,而当人口密度达到阈值之后,运输成本则急剧攀升. 从图 10 中曲线变化趋势进行判断,临界阈值可确定为 70 人/km^2.

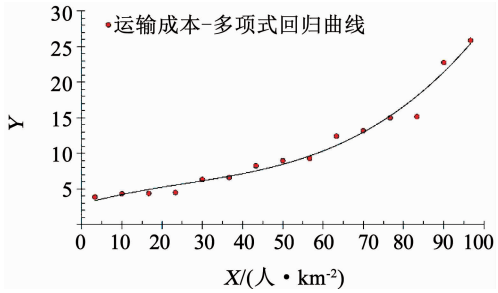

图 10 村镇人口密度(*X* 轴)与生物质热电厂原料运输成本(*Y* 轴)的多元回归分析

Fig. 10 Polynomial regression analysis of PD_{VT} (x-axis) versus transportation cost for the biomass CHP plants (y-axis)

3 结 论

1)生物质热电厂适合应用于人口密度较低的村镇体系区域,此时能够实现 100% 利用生物质能源供能的目标;而针对人口密度较高的村镇体系区域时则无法实现 100% 利用生物质能源供能的目标,必须通过消耗其他能源来进行补充.

2)生物质热电厂的原料供应范围随着村镇人口密度的增长呈现反 S 曲线的变化趋势,当人口密度小于 65 人/km^2时供应范围增长趋势较为平缓稳定,当人口密度大于 65 人/km^2时增长趋势较为迅速.

3)生物质热电厂的原料运输成本随着村镇人口密度的增长呈现指数曲线的变化趋势,当人口密度小于 70 人/km^2时运输成本增长趋势较为平缓稳定,当人口密度大于 70 人/km^2时运输成本增长趋势较为迅速.

4)根据木桶理论对限制阈值进行综合,将村镇人口密度阈值定为 65 人/km^2更为适宜,因此可以确定在村镇人口密度小于 65 人/km^2时建设生物质热电厂的整体经济性与运营效率更高.

参考文献

[1] APFELBACHER A, CONRAD S, SCHULZKE T. Ablative fast pyrolysis-potential for cost effective conversion of agricultural residues [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2014, 33(3): 669. DOI: 10.1002/ep.12017

[2] MIRKOUEI A, HAAPALA K R, SESSIONS J, et al. A mixed biomass-based energy supply chain for enhancing economic and environmental sustainability benefits: A multi-criteria decision making framework[J]. Applied Energy, 2017, 206(11): 1088. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.09.001

[3] GOLECHA R, GAN Jianbang. Biomass transport cost from field to conversion facility when biomass yield density and road network vary with transport radius[J]. Applied Energy, 2015, 164(2): 321. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.070

[4] DAIANOVA L, DOTZAUER E, THORIN E, et al. Evaluation of a regional bioenergy system with local production of biofuel for

transportation, integrated with a CHP plant[J]. Applied Energy, 2012, 92(4): 739. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.08.016

[5] KURKA T, JEFFERIES C, BLACKWOOD D. GIS-based location suitability of decentralized, medium scale bioenergy developments to estimate transport CO_2 emissions and costs[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 46(11): 366. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.08.004

[6] RIHA Z, TICHY J. The costs calculation and modelling in transport [C]//Transport Means-Proceedings of the International Conference, Lithuania-Kaunas: Kaunas University Technology Press, 2015: 388

[7] 刘广建，王茹，沈毅. 典型预处理对生物质物流成本影响分析[J]. 电力科学与工程，2014，30(1)：8
LIU Guangjian, WANG Ru, SHEN Yi. Research of the effect of typical preprocessing on cost of biomass logistics[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(1): 8. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2014.01.002

[8] 程旭云，牛智有，晏红梅，等. 基于工业分析指标的生物质秸秆热值模型构建[J]. 农业工程学报，2013，29(11)：196
CHENG Xuyun, NIU Zhiyou, YAN Hongmei, et al. Building of calorific value model of straw biomass based on industrial analysis indexes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 196. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.11.025

[9] ZHANG Yifei, KANG Jian. Effects of the distribution density of a biomass combined heat and power plant network on heat utilisation efficiency in village-town systems[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 202(11): 21. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.019

[10] 富锦市人民政府. 富锦市统计年鉴(2016)[R/OL]. (2017-08-01)[2017-10-20]. http://www.fujin.gov.cn/f/list-31978.html
Fujin Municipal People's Government. Fujin statistical yearbook (2016)[R/OL]. (2017-08-01)[2017-10-20]. http:// www.fujin.gov.cn/f/list-31978.html

[11] 朱建春，李荣华，杨香云，等. 近 30 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2012，40(4)：139
ZHU Jianchun, LI Ronghua, YANG Xiangyun, et al. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in 30 years in China [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, 40(4): 139. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2012.04.009

[12] 谢光辉，王晓玉，任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报，2010，26(7)：855
XIE Guanghui, WANG Xiaoyu, REN Lantian. China's crop residues resources evaluation [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 855. DOI: 10.13345/j.cjb.2010.07.023

[13] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2016)[R]. 北京：中国统计出版社，2016：189.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2016) [R]. Beijing: China Statistics Press, 2016: 189

[14] 黑龙江省统计局. 黑龙江省统计年鉴(2016)[R]. 北京：中国统计出版社，2016：124
Heilongjiang's Bureau of Statistics. Heilongjiang's statistical yearbook (2016) [R]. Beijing: China Statistics Press, 2016: 124

[15] 赵光辉. 运输市场价格与成本测算——以中国十省市道路货运市场为例[J]. 中国流通经济，2017，31(4)：94
ZHAO Guanghui. Research on price and cost estimation of transportation market: Taking ten provinces' road freight markets in China as the example[J]. China Business and Market, 2017, 31(4): 94. DOI: 10.14089/j.cnki.cn11-3664/f.2017.04.011

[16] 王玲. 我国公路运输成本结构及驱动因素——基于 GTC 模型的实证研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版)，2013，12(4)：7
WANG Ling. An empirical study on the structure and driving factors of China's road transportation cost based on a GTC model[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Sŏcial Sciences Edition), 2013, 12(4): 7. DOI: 10.16797/j.cnki.11-5224/c.2013.04.002

[17] CHEN W H, LIN B J, HUANG M Y, et al. Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review[J]. Bioresource Technology, 2015, 184(5): 314. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.050

[18] SCARLAT N, DALLEMAND J F, MONFORTI-FERRARIO F, et al. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union: An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports [J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2015, 51(11): 969. DOI: 10.1016/ j.rser.2015.06.062

[19] WANG Jinghui, RAKHA H A. Fuel consumption model for heavy duty diesel trucks: Model development and testing [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 55(8): 127. DOI: 10.1016/j.trd.2017.06.011

[20] DIAZ-RAMIREZ J, GIRALDO-PERALTA N, FLOREZ-CERON D, et al. Eco-driving key factors that influence fuel consumption in heavy truck fleets: A Colombian case[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 56(10): 258. DOI: 10.1016/j.trd.2017.08.012

[21] 吴丽荣，胡祥培，饶卫振. 考虑燃料消耗率的车辆路径问题模型与求解[J]. 系统工程学报，2013，28(6)：804
WU Lirong, HU Xiangpei, RAO Weizhen. New capacity-vehicle-routing-problem model and algorithm for reducing fuel consumption [J]. Journal of System Engineering, 2013, 28(6): 804. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5781.2013.06.010

[22] 蔺宏良，余强. 轻型柴油车辆典型工况燃料消耗特性试验[J]. 中国科技论文，2016，11(7)：818
LIN Hongliang, YU Qiang. Experimental research of fuel consumption performance of light-duty diesel vehicles under typical conditions[J]. China Science Paper, 2016, 11(7): 818. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2016.07.019

[23] ZHANG Yifei, QIN Chunpeng, LIU Yi. Effects of population density of a village and town system on the transportation cost for a biomass combined heat and power plant [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 223(6): 444. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.06.071

(编辑　张　红)