

中国生物质燃气产能及碳减排潜力

赵 晓¹, 常化振^{1*}, 彭思洋¹, 王 伟², 王书肖², 马 中¹ (1.中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2.清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 基于回归分析预测模型和来源分类预测模型对 2020~2050 年生物质燃气产量和能源结构占比进行预测, 并对碳减排潜力进行了情景分析. 结果表明, 回归分析预测偏差较小, 其中逐步回归预测偏差值为 9.34%, 略小于多元线性回归的 13.99%. 来源分类模型的准确度高于回归模型. 到 2050 年, 沼气增幅约为 176%. 在低碳情景中提高生物质燃气应用比例最高可降低未来情景中 10% 的碳排放量, 表明大力发展生物质燃气对于碳减排和碳循环有较为明显的正面效应. 结合现状对经济、技术、市场等方面提出政策建议. 为下一步发掘生物质燃气产品市场潜力提供理论指导.

关键词: 生物质燃气; 回归预测; 情景分析; 碳减排潜力计算

中图分类号: X324 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)08-3151-09

The analysis of biomass gas production capacity and carbon emission reduction potential in China. ZHAO Xiao¹, CHANG Hua-zhen^{1*}, PENG Si-yang¹, WANG Wei², WANG Shu-xiao², MA Zhong¹ (1.School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2018,38(8): 3151~3159

Abstract: Based on the regression analysis prediction model and the source classification prediction model, the biomass gas production and the energy structure proportion between 2020 and 2050 were predicted. And the scenarios of carbon emission reduction potential were analyzed. The results showed that the regression analysis had a smaller prediction error, which stepwise regression prediction was 9.34%, slightly less than 13.99% of the multiple linear regression. The source classification model was more accurate. By 2050, biogas would increase by about 176%. And increasing the application of biomass gas in the low-carbon scenario can reduce the carbon emission by 10% in the future scenario, indicating that the vigorous development of biomass gas has a significant positive effect on carbon emission reduction and carbon cycle. Based on the status, we put forward several policy suggestions on economy, technology and market to provide theoretical guidance for further exploring of market potential on biomass gas.

Key words: biogas; regression forecast; scenario analysis; carbon emission reduction potential

生物质能作为一种绿色、清洁、可再生的新能源是未来发展的主要能源之一,在解决未来能源需求,全球变暖,生态环境保护方面有着重要地位.尤其在清洁能源短缺和大气污染形势严峻的今天,生物质燃气开发具有越来越重要的意义^[1-2].

根据国家能源局颁布的生物质能发展“十三五”规划^[2],生物质能按照利用方式分类可分为以下 4 类能源:生物质发电电能,生物质成型燃料,生物质燃气及生物质液体燃料.据统计^[3],到 2015 年底,我国各大类生物质能产量折合标准煤约 3540 万 t,其中商品化利用比例达 51.4%.

生物质燃气从工程规模角度来分可分为 2 类:一是分布散乱,单个规模较小的农村户用沼气;二是品质优良,单个规模较大的规模化沼气工程生产的生物质气化燃气^[3].从原料来源可以分为 4 类:分别

是工业废物生物质燃气,农业废物生物质燃气,生活垃圾生物质燃气以及市政污泥生物质燃气.

回归模型在包括环境领域在内的诸多领域都有广泛应用,可以将多个变量之间的线性或非线性关系进行数量分析.回归模型可用于预测空气污染物浓度^[4],预测污水厂剩余污泥厌氧消化产气量^[5],对气象进行了同期回归和多元回归等统计预报模型^[6].相比国内,国外对于多元回归的应用更早.回归模型可用于^[7]研究本地气象因素和大气化学过程对小尺度时空变化影响,对细颗粒物浓度进行预测及评价^[8]等.以上表明多元线性回归在大气监测预警,空气

收稿日期: 2018-01-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203900,2016YFC0203901)及国家自然科学基金项目(51778619,21577173)

* 责任作者, 副教授, chz@ruc.edu.cn

质量预报和产量预测等都可以进行变量预测等统计分析,且有较高的可信度.但回归模型较少有应用于生物质燃气产量预测可供参考的数据不多.

本文针对新形势下生物质燃气产品和市场发展需要,研究国内外生物质燃气发展规模,技术应用现状以及先进的商业模式.按照工程规模和原料来源两个分类口径分别构建模型进行预测分析.在此基础上,进一步梳理国内实现的渠道及可能性,给出生物质燃气产品市场应用潜力分析,并结合我国现实国情提出政策建议,为下一步推动生物质燃气市场发展提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 回归模型

从国际沼气产量报告,中国农业统计年鉴,中国统计年鉴,中国轻工业统计年鉴^[8-11]等来源搜集基础数据,运用多变量线性回归模型和逐步回归模型对生物质产量进行了预测.

1.1.1 变量选取 年均沼气产量是反映沼气发展的重要指标,设当年沼气产量(TJ)为因变量 y .在以上基础上结合变量的有效性和可获取性,选择上年沼气产量(TJ),GDP(亿元),能源消费量(kg 标准煤),人口(万人),财政补贴,技术进步,产业结构等因素分别为自变量 $x_1 \sim x_6$.

针对上述变量,采用文献调研和资料收集相结合的方法获取有关数据.主要参考中国农业统计年鉴^[12]和中国社会经济发展统计公报^[13]得到 2004~2014 年的相关数据,具体如表 1 所示.

表 1 2004~2014 沼气产量相关数据
Table 1 Biogas production in 2004~2014

年份	实际产量(TJ)	上年产量(TJ)	GDP(亿元)	人均 GDP(元)	能耗(kg 标准煤)	人口(万人)	补贴(亿元)
2004	116893	96777	161840	12487	191	129988	10
2005	144387	116893	187319	14368	211	130756	10
2006	149041	144387	219439	16738	230	131448	50
2007	214271	149041	270232	20505	250	132129	70
2008	265498	214271	319516	24121	254	132802	80
2009	322384	265498	349081	26222	264	133450	90
2010	292712	322384	413030	30876	273	134091	110
2011	325393	292712	489301	36403	294	134735	150
2012	329369	325393	540367	40007	313	135404	180
2013	329891	329369	595244	43852	335	136072	250
2014	324430	329891	643974	47203	346.1	136782	280

关于财政补贴,根据全国农村沼气发展“十三五”规划^[16],全国农村沼气工程建设规划(2006~2010 年)^[17]中资金预算部分,2001~2005 年期间,中央累计投入 35.3 亿元,其中农村户用沼气池投资 34.5 亿元,建设沼气池 357.60 万户;殖场沼气工程投资 8115 万元,建设沼气工程 120 处.2004 年和 2005 年财政补贴分别为 103250 万元和 102980 万元.但农村沼气建设采取国家补助和农户自筹相结合的建设模式,按照“一池三改”建设标准,除去国家补助外,还需农民自筹投资,导致建池困难问题.如户均投资需 3000~3500 元,其中国家补助 800~1200 元,农民需自筹 2000 多元.在十一五期间,规划全国新建农村户用沼气 2300 万户左右,其中中央补助建设 1300 万户左右,带动地方建设 1000 多万户.到 2010 年底,全国户用沼气总数达到 4000 万户左右,约占适宜农户的 30%.

全国农村户用沼气建设总投资 400.65 亿元,中央投资 125 亿元重点用于农村户用沼气池的建设.西北和东北地区平均每户总投资 3200 元/户,其他地区平均 3000 元/户.中部地区比照西部大开发有关政策按照 1000 元/户标准进行补贴.十一五期间具体补贴情况如图 1 所示.十三五期间农村沼气总投资 500 亿元:规模化生物天然气工程 181.2 亿元,规模化大型沼气工程 133.61 亿元,中型沼气工程 91 亿元,小型沼气工程 59 亿元,户用沼气 33.3 亿元,沼气科技创新平台 1.89 亿元.根据上述国家出台的财政补贴,估算 2004~2014 年沼气池财政补贴.

1.1.2 模型适配度检验 首先,对沼气产量采用多元线性回归方法进行分析,同时进行方差检验.在计算过程中,由于自变量较多,且个别因素影响较小或因素之间存在共线性影响,误差平方和会随着变量

的引入而增大,影响了模型整体的稳定性.因此,在多元线性回归的基础上,对沼气产量进行非线性回归

分析即逐步回归方法,从多因素中挑选出影响显著的因素来建立回归模型.

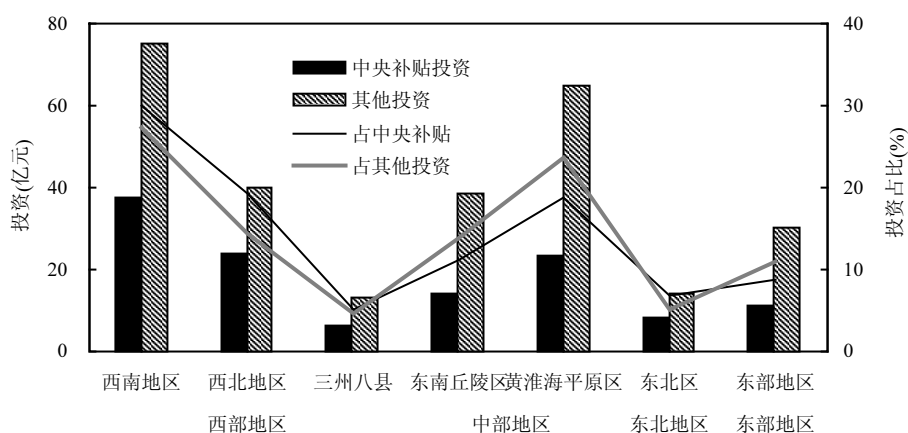


图 1 全国各地区十一五沼气建设财政补贴

Fig.1 Financial subsidies for the 11th five-year biogas construction

从图 2 来看,逐步回归的标准化残差的绝对值更接近于 1,说明其适配性更高.

相关系数是 0.977,判定系数是 0.955,修正系数为 0.910,达-沃检验统计值为 2.703,当达-沃检验 ≈ 2 时说明残差独立.对于逐步回归,模型的复相关系数是 0.955,判定系数是 0.911,修正系数为 0.902,达-沃检验统计值为 1.531.整体来看 2 种模型的拟合优度都较好.

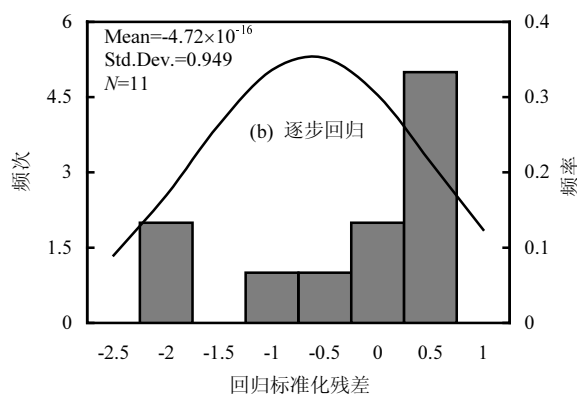
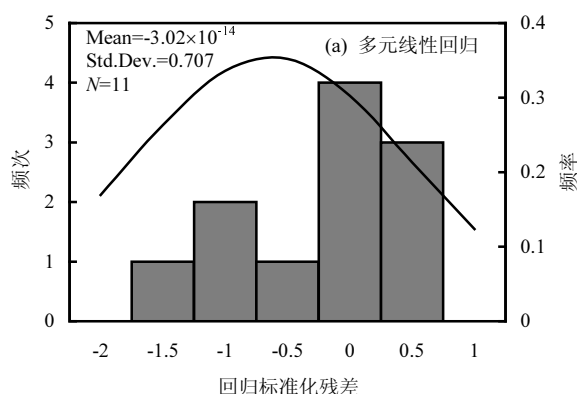


图 2 回归标准化残差直方图

Fig.2 Regression normalized residual histogram

表 2 模型拟合度适配

Table 2 Model fit table

模型	复相关系数	判定系数	达-沃检验	修正系数
多元回归	0.977	0.955	2.703	0.910
逐步回归	0.955	0.911	1.531	0.902

2 结果与讨论

2.1 回归预测模型

对于多元线性回归,在计算过程中剔除了人均 GDP 的影响(t 值为 1.525),根据计算的系数建立的多元线性回归方程为:

$$y_1 = 3261074.863 + 0.638x_1 + 0.09x_2 - 12.925x_3 - 24.799x_4 + 0.15x_5 \quad (1)$$

对于逐步回归,在计算过程中分别剔除了上年沼气产量(t 值为 2.205),GDP(t 值为 0.274),能源消费(t 值为 -0.204),人口(t 值为 0.409)和人均 GDP(t 值为 0.319)等因素的影响,计算方程为:

$$y_2 = 103248.753 + 0.186x_5 \quad (2)$$

从表 2 中可看出,对于多元线性回归,模型的复

图 3 表示,回归分析与实际值偏差较小,有较高的适用度,若引入更多变量回归标准差会进一步缩小,证明了线性回归方法在沼气产量预测中的可行性.且多元线性回归的百分比偏差为 13.99%,略大于逐步回归的百分比偏差值 9.34%,证明逐步回归具有相对较高的准确度,逐步回归剔除变量后剩余影响因素为财政补贴,说明我国财政补贴对于沼气工程的扶植力度较大,若想提高沼气产量可进一步增加财政补贴.

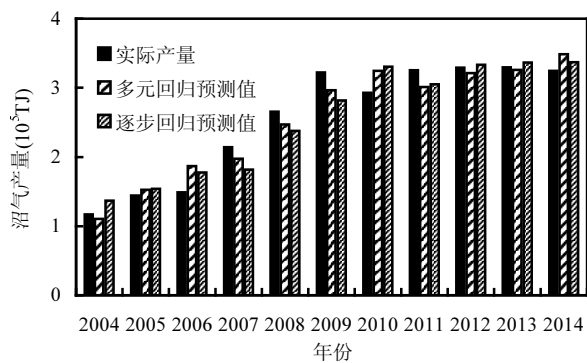


图 3 沼气产量回归预测情况
Fig.3 Biogas production regression prediction

回归自变量发展趋势较为稳定,有较强的规律性,因此可进行自变量回归,对上年沼气产量、GDP、人均 GDP、能源消费、人口数量、财政补贴等自变量分别使用幂函数、二次函数、logistic 模型等方法分别进行拟合求值,得到 2020、2030、2040、2050 年等自变量值,具体如表 3 所示.

表 3 自变量预测值
Table 3 Independent predictors

年份	上年产量(TJ)	GDP(亿元)	人均 GDP(元)
2020	436958	1029158	74152
2030	584413	2015689	141722
2040	710169	3324341	230105
2050	822466	4955113	339299

年份	能源消费 (kg 标准煤)	人口 (万人)	财政补贴 (亿元)
2020	432	139899	563
2030	630	145871	1440
2040	861	151365	2726
2050	1125	156379	4422

在此基础上,用回归分析的方法对未来沼气产量进行了预测,未来年沼气产量如图 4 所示.

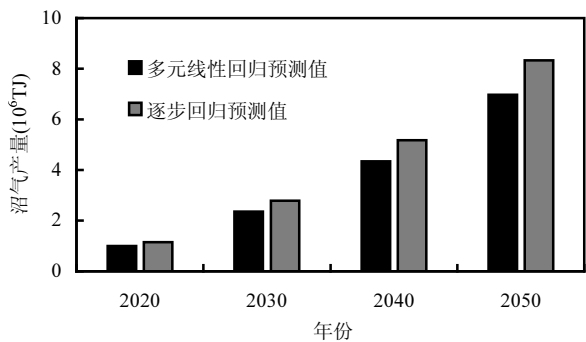


图 4 未来年沼气产量预测值
Fig.4 Prediction of future biogas production

2.2 来源分类预测模型

按照生物质废物来源分类,分成工业废物、农业废物、城市垃圾、生活污水 4 类生物质废物,其中工业生物质废物主要包括高浓度有机废水和有机废渣,农业生物质废物主要包括养殖废物及农业秸秆,生活垃圾包括通过填埋处理可产生填埋气的部分垃圾,市政污泥是指市政污水经处理得到的脱水污泥.基于对各类废物资源量的预测和转化为沼气的开发利用,预测 2020、2030、2040 和 2050 年的沼气产量.

根据 2010 年的统计数据得到 2010 年 4 类生物质废物产沼气资源量及产沼气量的基础数据.通过参数假设得出未来各类生物质废物产沼气量.

2.2.1 工业废物产沼气潜力预测 根据轻工业环保所统计,2010 年全国工业排放有机废水为 43.67 亿 t,废渣为 9.46 亿 t.可转化为沼气(甲烷含量 56%)的资源量为 280.83 亿 m³.根据各行业协会、有关省市、各承担沼气工程设计建设的公司和设计院所等进行的统计,并根据 2010 年进行的全国工业污染源调查数据,估算得出全国工业沼气工程年产沼气量约为 50.0 亿 m³,占总资源量的 17.86%.2015 年工业企业生产沼气的总资源量为 322.11 亿 m³.

按照十三五规划发展速度,预计到 2020 年中国工业总产值比 2010 年翻一番,达到 143 万亿元.同时随着工业企业开展清洁生产节能减排,预计污染(以 COD 计)增长减半,即污染排放削减率为 50%.到 2020 年,工业企业污染排放量预计比 2010 年增加 50%,2020 年工业企业生产沼气的总资源量为 421.24 亿 m³.

在未来我国产业结构转型的大趋势下,预计未来我国工业增长率将逐步放缓,模型中 2020~2030

年、2030~2040 年、2040~2050 年 3 个时间段的年平均工业增长率分别按 6%、4%、3% 计算.同时随着清洁生产和节能减排力度不断扩大,预计未来我国污染物排放削减率将逐步上升.

2020~2030 年总体工业增长率为 79.1%,工业排放污染量按总体增长的 35% 计算,则 2030 年工业企业生产沼气的总资源量约为 537.86 亿 m^3 .

2030~2040 年总体工业增长率为 48%,工业排放污染量按总体增长的 30% 计算,则 2040 年工业企业生产沼气的总资源量为 651.31 亿 m^3 .

2040~2050 年总体工业增长率为 34.4%,工业排放污染量按总体增长的 25% 计算,则 2050 年工业企业生产沼气的总资源量为 707.32 亿 m^3 .

具体计算公式如下:

$$\hat{S} = S_{2010} \times (1 + r_1)^T \times D \quad (3)$$

$$\hat{P} = \hat{S} \times U \quad (4)$$

式中: $\hat{S}$ 为产沼气资源量预测值,亿 m^3 ; r_1 为工业年均增长率,%; T 为预测年限; D 为污染物削减排放率,%; $\hat{P}$ 为产沼气潜力预测值,亿 m^3 ; U 为预计开发利用效率,%.

根据上述关于沼气资源量的预测,对工业废物产沼气潜力预测结果如表 4.

表 4 未来工业废物产沼气潜力预测结果

Table 4 Prediction results of biogas production potential from industrial waste in the future

项目	2015	2020	2030	2040	2050
产沼气资源量(亿 m^3)	322.11	421.24	537.86	651.31	707.32
开发利用效率(%)	20	25	30	35	40
产沼气潜力(亿 m^3)	64.42	105.31	161.36	227.96	282.93

2.2.2 农业废物产沼气潜力预测 根据 2010 年中国统计年鉴中畜禽粪便排放量数据以及不同种类畜禽粪便产气率数据.2009 年全国畜禽养殖年排放粪便总量约为 148732.592 万 t,如果采取全部厌氧消化方式处理,可产沼气 819.5 亿 m^3 .而目前农业沼气工程仅在规模化畜禽养殖场存在.

根据畜牧业发展“十二五”规划发展速度进行估算,我国畜牧业从 2010~2020 年将以年均增长率为 3% 的速度增长,因此到 2015 年全国畜禽养殖年排放粪便总量约为 17.2 亿 t,可产沼气资源量为 950 亿 m^3 .2020 年全国畜禽养殖年排放粪便总量约为 19.94

亿 m^3 ,可产沼气资源量为 1100 亿 m^3 .模型中 2020~2030 年间年均增长率按 2% 计算,2030 年可产沼气资源量约为 1340 亿 m^3 ,最后到 2050 年保持稳定.

根据农业部 2007 年的统计,规模化养殖场养殖量占全国养殖总量的 8.11%(占粪便排放量).按目前规模化程度的平均增加速度为 8.5% 计算,2015 年规模化程度为 15.6%,2020 年规模化程度为 23.4%.预计未来养殖场规模化程度将保持继续平稳增长的态势,但增速有所放缓,2030、2040、2050 年规模化程度分别按 35%、40%、45% 计算.

计算公式如下:

$$\hat{S} = S_{2010} \times (1 + r_2)^T \times V \quad (5)$$

$$\hat{P} = \hat{S} \times U \quad (6)$$

式中: $\hat{S}$ 为产沼气资源量预测值,亿 m^3 ; r_2 为畜牧业年均增长率,%; T 为预测年限; V 为规模化程度; $\hat{P}$ 为产沼气潜力预测值,亿 m^3 ; U 为预计开发利用效率,%.

根据上述关于沼气资源量的预测,对农业废物产沼气潜力预测结果如表 5.

表 5 未来农业废物产沼气潜力预测结果

Table 5 Prediction results of biogas production potential from future agricultural waste

项目	2015	2020	2030	2040	2050
总资源量(亿立 m^3)	950	1100	1340	1340	1340
规模化程度(占粪便量比例,%)	15.6	23.4	35	40	45
规模化养殖场资源量(亿 m^3)	148.2	257.4	469	536	600
开发利用效率(%)	10	13%	15	20	25
产沼气潜力(亿 m^3)	14.82	33.46	70.35	107.20	150.00

2.2.3 生活垃圾产沼气潜力预测 根据国家统计局数据,2015 年城市生活垃圾清运量为 1.91 亿 t,据环保部门预测,到 2020 年,全国城市垃圾清运量将每年以 6% 以上的速度增加.到 2020 年后,增长速度预计有所减缓,模型中 2020~2030 年、2030~2040 年、2040~2050 年 3 个时间段年均增长率分别按 4%、2%、1% 计算.则 2015 年~2050 年城市垃圾清运量从 1.91 亿 t 增加到 5.1 亿 t.按照每吨城市垃圾卫生填埋平均所产生的填埋气 120 m^3 计算,得到相应的填埋气资源量.

而城市垃圾产沼气主要集中在填埋垃圾气体利用.2015 年填埋处理量达 1.15 亿 t.预计,垃圾填埋处理能力年均增长率将按 8% 增长.2020 年,填埋处理量为 1.69 亿 t.环保部门预测 2020 年后垃圾填埋

增长率减缓.模型中 2020~2030 年、2030~2040 年、2040~2050 年 3 个时间段年均增长率分别按 4%、2%、1%计算,而填埋场产气率和填埋气收集率均有提高,分别按照每 t 产气 120m³ 和 30%计算.

具体计算公式如下:

$$\hat{S} = G_c \times (1 + r_3)^T \times 120 \tag{7}$$

$$\hat{P} = G_p \times (1 + r_3)^T \times 120 \times 30\% \tag{8}$$

式中: $\hat{S}$ 为产沼气资源量预测值,亿 m³; $\hat{P}$ 为产沼气潜力量预测值,亿 m³; G_c 为生活垃圾清运量,万 t; G_p 为生活垃圾填埋量,万 t; r_3 为生活垃圾年均增长率,%; T 为预测年限.

根据上述关于沼气资源量的预测,对城市垃圾产沼气潜力预测结果如表 6.

表 6 未来生活垃圾产沼气潜力预测结果(亿 m³)

Table 6 Prediction results of biogas production potential from domestic waste in the future (×10⁸m³)

产量	2015	2020	2030	2040	2050
填埋气资源量	229.2	306.72	454.02	553.45	611.35
产沼气潜力量	41.4	60.83	90.04	109.76	121.25

2.2.4 市政污泥产沼气潜力预测 根据建设部和环保部门有关规划和 2010 年“全国污泥处理与综合利用研讨会”部分专家预测,我国城市污水、污泥处理将有一个快速发展,预计 2010 年~2020 年城市污水和污泥处理量将分别增加 1 倍以上.2020 年以后速度将减缓.干污泥产率按 1.6tDS/万 m³ 污水计算.污泥产气率按含水 94%的污泥产沼气 12m³ 计算.

根据城市污水处理及污染防治技术政策中的规定,日处理能力在 10 万 m³ 以上的污水二级处理设施产生的污泥,宜采取厌氧消化工艺进行处理,产生的沼气应进行综合利用.据估计,我国现有的城市污水处理厂规模在 10 万 t/d 以上约有 20%,处理的废水量应占我国生活污水总量的 40%左右.

具体计算公式如下:

$$\hat{P} = \hat{S} \times r_4 \times A \tag{9}$$

式中: $\hat{S}$ 为产沼气资源量预测值,亿 m³; $\hat{P}$ 为产沼气潜力量预测值,亿 m³; r_4 为污泥处理率,%; A 为厌氧处理比例,%.

同时考虑污水处理率以及厌氧处理比例,估算出 2020~2050 年的产沼气目标.根据上述关于沼气资源量的预测,对污泥产沼气潜力预测结果如表 7.

表 7 未来市政污泥产沼气潜力预测结果

Table 7 Prediction results of biogas production potential from municipal sludge in the future

项目	2015	2020	2030	2040	2050
城市污水排放量(亿 m ³)	466.6	700	800	900	1000
城市污水干污泥排放量(万 t)	746.3	1120	1280	1440	1600
污泥产沼气资源量(亿 m ³)	14.93	22.40	25.60	28.80	32.00
城市污泥处理率(%)	91.9	93	95	97	99
厌氧处理比例(%)	40	42	45	47	50
产沼气潜力量(亿 m ³)	5.49	8.75	10.94	13.13	15.84

2.2.5 来源分类预测模型总结及敏感性分析 根据以上四类来源分类预测模型结果,将 4 类生物质废物产沼气资源量和潜力量预测值进行汇总如表 8 所示.

表 8 产沼气资源量预测结果汇总(亿 m³)

Table 8 Summary of forecast results for biogas production (×10⁸m³)

年份	工业废物	工业废物	农业废物	农业废物
	产沼气资源量	产沼气潜力量	产沼气资源量	产沼气潜力量
2015	322.11	64.42	148.2	14.82
2020	421.24	105.31	257.4	33.46
2030	537.86	161.36	469	70.35
2040	651.31	227.96	536	107.2
2050	707.32	282.93	600	150

年份	生活垃圾	生活垃圾	市政污泥	市政污泥
	产沼气资源量	产沼气潜力量	产沼气资源量	产沼气潜力量
2015	229.2	41.4	14.93	5.49
2020	306.72	60.83	22.4	8.75
2030	454.02	90.04	25.6	10.94
2040	553.45	109.76	28.8	13.13
2050	611.35	121.25	32	15.84

来源分类预测模型是根据原材料产量来进行沼气产量的计算和预测,预测时限较长,具有较强的实际指导意义.但是,该模型同样存在着预测的不确定性.模型中假设参数值的不确定性可能对未来预测结果准确度产生影响.影响模型预测结果的因素有:未来工业增长率、工业污染排放削减率、未来畜牧业增长率、养殖场规模化程度、未来城市生活垃圾清运量增长率、垃圾填埋处理增长率、未来城市污水排放量增长率和城市污泥处理率.未来这些模型假设参数非规律性变动可能会引起实际值与本模型预测值之间的偏差.为避免误差,对各参数 $r_1 - r_4$ 分别取相同大小区间[2,7],在区间内随机取值生成灵敏度曲线,检验参数值波动对结果 G 的影响程度.根据公式(10)计算灵敏度.

$$S_i = \frac{\Delta G/G}{\Delta r_i/r_i} \quad (i=1,2,3,4) \quad (10)$$

根据式(10)的计算结果,灵敏度 S 均小于 1,说明参数在上述区间内取值对结果影响很小,计算时可忽略。

来源分类预测模型预测精度较高,两种方法计算出的沼气产量单位不同,无法直接进行对比,但是来源分类模型中从沼气原材料出发,综合考虑了产业结构、能源利用效率、污泥处理率等参数,与实际情况较为符合。从 2015~2050 年,工业废物沼气产量、农业废物沼气产量、生活垃圾沼气产量和市政污泥沼气产量分别增长了 119%、305%、167%和 114%。沼气产量平均增幅约为 176%。说明未来我国沼气产量增长的主要贡献者为农业废物贡献。

单从增长率来看,逐步回归预测值从 2020~2050 年增幅为 624%,线性回归预测值增幅为 595%,均远远大于来源分类预测值。对比其他的能源情景计算结果^[22-24]来源分类预测模型的结果更符合实际。但其对参数的要求也更高。

2.3 碳排放情景分析

生物质燃烧同样会产生不良环境效应,陈雅琳等^[18]对生物质能源替代化石能源的潜力及环境效应进行研究,证明生物质能的使用对环境损失有减弱作用。关于生物质燃烧的影响,沈潇雨等^[19]研究发现生物质燃烧产物中的碳质(OC、EC)特征及同位素组成。张宜升等^[20]对生物质露天焚烧及家庭燃用的多环芳烃排放特征进行研究。但是相比传统能源,生物质燃气为碳中性能源,具有正向的环境效益。

目前,可对未来提出多种方案预测的情景分析法是最常用的分析方法之一,在污染物预报预警、能源规划等都有广泛的应用^[21-24]。在前述结果基础上,利用情景分析法分析未来沼气在不同能源消费情景下的结构占比情况。EIA,研究者^[25-27]均对未来中国能源消费总量进行情景预测计算,本文根据不同国家标准的控制和能源消费总量设定基准情景和低碳情景两个情景^[29-31]。

基准情景 BAU:以 2014 年为基准年,各项影响因子进行趋势外延,在基准情景中采用和基准年相同的沼气生产技术和环境政策,即不采取严格标准和新的控制技术,同时也不考虑未来环境政策的变化。

低碳情景 LC:基于基准情景,根据国家新能源发展规划,到 2020、2030、2040、2050 年非化石能源占一次能源消费比重逐步提高。不同情景下的沼气产量及生物质燃气在能源供应结构中占比情况如图 5 所示。

预计生物质燃气占能源供应总量比例由 2020 年的 0.31%到 2050 年达到能源供应总量的 0.6%。若在低碳场景下,这个比例将会更高,沼气产量会大幅提升,能源比例由 1%提升到 5%。

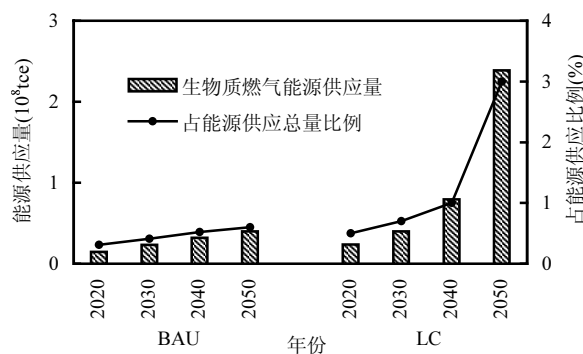


图 5 未来不同情景下沼气供能情况

Fig.5 Biogas energy supply in the future different scenarios

根据 IPCC 给出的碳排放系数并结合我国燃料热值计算得知,煤、燃料油、燃料气的碳氧化因子都为 1,煤、燃料油和燃料气的碳排放系数分别为 98825、74260 和 95940。不确定性 95%信赖区间下限分别为 -8%、-5.2%和 -11.9%,不确定性 95%信赖区间上限分别为 7.9%、5.8%和 15.1%。3 种燃料对应的国内热值分别为 5390、8488.73 和 7184。因此,煤、燃料油和燃料气的建议排放系数分别为 2.21、2.64 和 1.83,不确定性 95%信赖区间上下限和碳排放系数相同。

根据北京市企业(单位)CO₂ 核算和报告指南^[28],燃料燃烧产生的 CO₂ 直接排放量计算公式如下所示:

$$E = \sum_{i=1}^I A_i F_i \quad (10)$$

式中: A_i 为活动水平数据,第 i 种化石燃料燃烧数量,TJ; F_i 为第 i 种燃料的排放因子,tCO₂/TJ; i 为燃料类型; I 为燃料类型数量。

结合 IPCC 和北京市碳排放计算方法,未来情景 CO₂ 排放量计算公式为:

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1}^I \xi_i \cdot Q_i \cdot \theta_i \cdot A_i \quad (11)$$

式中: E_{CO_2} 为碳排放量, kg; ξ_i 为燃料排放系数, kg CO_2 /TJ; Q_i 为国内燃料热值, kcal/kg; θ_i 为燃料碳氧化因子; A_i 为燃料活动水平数据, TJ; i 为燃料类型; I 为燃料类型数量。

根据图 5 中不同情景下生物质燃气占能源结构的比例和公式(2)计算的 2020~2050 年在不同情景下的碳排放量如图 6 所示。

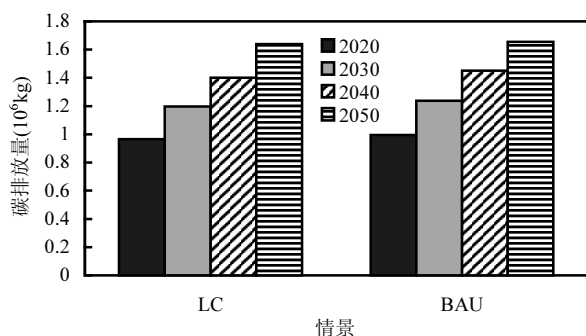


图 6 未来情景下的 CO₂ 排放量

Fig.6 CO₂ emissions in future scenarios

低碳情景中燃煤和石油的消费量均低于基准情景.生物质燃气应用比例大幅升高.不同情景下生物质燃气的产量对碳排放有较为显著的影响.从 2020~2050 年,低碳情景下的 CO₂ 排放量减少了 3%~10%,低碳情景明显低于基准情景下的碳排放量.结果表明,大力发展生物质燃气对于碳减排和碳循环有较为明显的正面效应。

3 结论

3.1 回归预测模型和来源分类预测模型均可以用于生物质燃气产量预测计算.其中回归分析引入变量越多回归标准差越小,逐步回归的百分比偏差值 9.34% 小于多元线性回归百分比偏差 13.99%,且剔除变量过程证明在我国财政补贴对于沼气产量影响最大.来源分类模型根据原材料产量来进行预测,可预测时间段较长,但模型中假设参数的不确定性对未来预测结果准确度产生影响.综合沼气产量增幅来看,来源分类模型的精确度高于回归预测模型。

3.2 不同能源情景下生物质燃气应用比例差别较大.在基准情景下,预计我国生物质燃气产量从 2015~2050 年间由 126.13 亿 m³ 增长到 570 亿 m³,占能源供应总量比例由 2020 年的 0.31%,达到 2050 年的 0.6%,其中工业和农业生物质废物将成为未来

生物质燃气的主要来源.在低碳情景下,生物质燃气能源供应量会大量提高,由 2020 年的 0.5% 提高到 2050 年的 3.5%,将会大幅减轻能源压力.同时低碳情景下碳排放量远远小于基准情景,有利于我国能源结构更为科学的调整。

3.3 为最大限度发掘生物质燃气市场潜力,针对国内生物质燃气产业在经济、技术、市场和政策四个方面的发展障碍,为未来政策制定提供几点建议:尽快落实沼气发电上网补贴实施细则,更大限度地提高生物质燃气产业生产积极性和市场活跃度;继续加强环保治理执法力度;制定一个具有统一性、强制性的国家级沼气技术标准;建立专门的生物质燃气产业化融资机制,对于中小型的沼气项目,政府可以提供贴息贷款或者财政补贴政策予以支持。

参考文献:

- [1] 张秀,夏运生,尚艺婕,等.生物质炭对镉污染土壤微生物多样性的影响[J]. 中国环境科学, 2017,37(1):252-262.
- [2] 曹国良,张小曳,王丹,等.中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. 中国环境科学, 2005,25(4):389-393.
- [3] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/05/content_5143612.htm, 2016-12-06
- [4] 沈劲,钟流举,何芳芳,等.基于聚类与多元回归的空气质量预报模型开发[J]. 环境科学与技术, 2015,38(2):63-66.
- [5] 张文阳,张良均,李娜,等.多元回归和 BP 神经网络在预测混合厌氧消化产气量过程中的应用比较[J]. 环境工程学报, 2013, 7(2):747-752.
- [6] 徐伟嘉,李红霞,黄慎,等.珠海市空气质量预测模型研究与分析[J]. 环境科学与技术, 2015(11):142-147+158.
- [7] G Miskell, J A Salmond, D E Williams. Use of a handheld low-cost sensor to explore the effect of urban design features on local-scale spatial and temporal air quality variability [J]. Science of The Total Environment, 2017,(619):480-490.
- [8] Zhou X, Cai J, Zhao Y, et al. Estimation of residential fine particulate matter infiltration in Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 2017,(233):494-500.
- [9] 国家能源局 [EB/OL]. <http://www.nea.gov.cn/>.
- [10] 沈振寰.国际沼气工程发展现状报告 [R]. 北京:轻工业环境保护研究所, 2011.
- [11] 国家统计局农业社会经济调查司.中国农村统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2000-2015.
- [12] 国家统计局;环境保护部.中国农村统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2005-2015.
- [13] 国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 1995-2015.
- [14] 中国畜牧业年鉴编辑部.中国畜牧业年鉴 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000-2015.

- [15] 中国经济发展统计数据库 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/>.
- [16] 全国农村沼气发展十三五规划 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/10/content_5167076.htm, 2017-06-07.
- [17] 全国农村沼气工程建设规划(2006~2010年) [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2007/dsiq/201806/t20180613_6151883.htm, 2007-03-21.
- [18] 陈雅琳,高吉喜,李咏红.中国化石能源以生物质能源替代的潜力及环境效应研究 [J]. 中国环境科学, 2010,30(10):1425-1431.
- [19] 沈潇雨,郭照冰,姜文娟,等.生物质室内燃烧产物的碳质特征及 EC 同位素组成 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3669-3674.
- [20] 张宜升,张厚勇,栾胜基,等.生物质露天焚烧及家庭燃用的多环芳烃排放特征研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):387-395.
- [21] TY Chen, OS Yu, JY Hsu, et al. Renewable energy technology portfolio planning with scenario analysis: A case study for Taiwan [J]. Energy Policy, 2009,37(8):2900-2906.
- [22] P Schwartz. The Art of the Long View [J]. Currency and Doubleday, 1991.
- [23] 娄 伟,李 萌.情景分析法在能源规划研究中的应用 [J]. 中国电力, 2012,45(10):17-18.
- [24] 云雅如,王淑兰.情景分析法在我国环境保护相关领域管理决策中的现状与展望 [J]. 中国人口资源与环境, 2012,22(11):131-133.
- [25] U.S. Energy Information Administration (EIA). International energy outlook 2013 [EB/OL]. [http://www.eia.gov/forecast/ia/energy/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecast/ia/energy/pdf/0484(2013).pdf), 2014-09-02.
- [26] 姜克隽,胡秀莲,刘 强,等.中国 2050 年低碳发展情景研究 [C]//2050 中国能源和碳排放研究课题组.2050 中国能源和碳排放报告.北京:科学出版社, 2009:753-820.
- [27] British Petro(BP). Energy outlook to 2035 [EB/OL]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/energy-outlook.html>, 2014-09-02.
- [28] 北京市企业(单位)二氧化碳核算和报告指南 [EB/OL]. <http://www.tanpaifang.com/tanhecha/201612/2758083.html>, 2016-12-27.
- [29] 张宜升,栾胜基,邵 敏,等.生物质燃烧源排放烟尘罩稀释采样系统设计与应用 [J]. 中国环境科学, 2014,34(11):2741-2748.
- [30] 马 彤,陈家宝,韦进进,等.南宁市生物质锅炉排放的颗粒物中碳组分特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(1):21-26.
- [31] 赵金平,钟英立,徐小静,等.南方地区典型生物质燃烧锅炉二噁英排放污染特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(9):3473-3480.

作者简介: 赵 晓(1994-),女,山东淄博人,中国人民大学环境学院硕士研究生,主要从事大气污染控制成本研究.发表论文 2 篇.