

# 中国沼气产业对减排 CO<sub>2</sub> 的模拟与预测

杨艳丽<sup>1</sup>, 李光全<sup>2</sup>, 张培栋<sup>3</sup>※

(1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101; 2. 青岛市委党校管理教研部, 青岛 266071;  
3. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 青岛 266042)

**摘要:** 沼气是中国可再生能源建设的重点项目, 可提供清洁能源替代化石燃料燃烧, 减少温室气体排放, 对缓解全球变暖趋势具有重要意义。该文利用复合回归模型对中国沼气行业的 CO<sub>2</sub> 减排量 (CO<sub>2</sub> ER) 与生物质资源、农村用能结构以及沼气利用现状等指标之间的数值关系进行模拟分析, 结果表明: 中国户用沼气行业的 CO<sub>2</sub> 减排量与沼气池使用量存在显著的线性关系 ( $R^2=0.992$ ), 与户均产气量存在明显的 S 函数关系 ( $R^2=0.677$ ), 大中型沼气工程行业的 CO<sub>2</sub> 减排量与池容之间存在显著的线性关系 ( $R^2=0.977$ ); 经多元线性回归和曲线拟合所得到的复合回归模型对户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的拟合较好, 各种替代情景下误差率均在 5% 以内; 对大中型沼气工程行业 CO<sub>2</sub> 减排量的模拟在 2006 年后呈现较好的拟合效果, 各种替代情景下误差率均在 2% 以内。依据《可再生能源发展“十二五”规划》进行预测, 2015 年中国沼气行业可减少 CO<sub>2</sub> 排放  $6.18 \times 10^7 \sim 1.38 \times 10^8$  t。加强沼气科技研发, 促使沼气工业化、规模化发展以及提升沼气利用品味, 是保持沼气利用 CO<sub>2</sub> 减排重要地位的有效途径。

**关键词:** 沼气, 回归分析, 排放控制, CO<sub>2</sub> 减排量, 模拟分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.15.001

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-15-0001-09

杨艳丽, 李光全, 张培栋. 中国沼气产业对减排 CO<sub>2</sub> 的模拟与预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 1-9.  
Yang Yanli, Li Guangquan, Zhang Peidong. Simulation and prediction of CO<sub>2</sub> emission reductions of biogas industry in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(15): 1-9. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

由温室气体排放量增加引起的气候变暖目前已成为全球普遍关注的话题, 随着《京都议定书》的生效与实施, 世界范围内温室气体减排活动日益活跃<sup>[1-2]</sup>。沼气是指生物质原料经厌氧发酵产生的以甲烷 (CH<sub>4</sub>) 为主要成分的可燃性混合气体<sup>[3]</sup>, 可替代化石燃料燃烧, 减少 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等有害气体排放, 是清洁的可再生能源, 对减少温室气体排放、缓解全球变暖具有重要意义<sup>[4-8]</sup>。笔者曾对户用沼气和大中型沼气工程的减排效益进行估算, 结果表明在 1996-2003 年间户用沼气利用每年可减少 CO<sub>2</sub> 排放 39.76~419.39 万 t<sup>[9]</sup>, 1996-2005 年间大中型沼气工程年可减少 CO<sub>2</sub> 排放 22.76~166.75 万 t<sup>[10]</sup>。刘宇等研究表明 1991-2005 年的 15a 间, 中国

沼气利用净减少温室气体排放约 73 157.59Gg (以 CO<sub>2</sub> 计), 年均减排量为 4877Gg/a (以 CO<sub>2</sub> 计), 相当于全国总排放量的 0.07%~0.16%<sup>[11]</sup>。

在这些研究中沼气利用的 CO<sub>2</sub> 排放量是基于 IPCC 推荐系数估算, 但 CO<sub>2</sub> 减排量 (CO<sub>2</sub> ER) 估算却需根据能源利用结构、传统燃料利用现状、沼气发展现状、沼气和被替代燃料的热值、利用方式、利用效率以及碳排放系数等相关指标进行繁琐计算, 此过程需消耗大量的时间与人力。复合回归分析是一种可有效反映事物变量之间数值变化规律的统计分析方法, 在能源、经济、环境等各个领域已广泛应用<sup>[12-15]</sup>。本文利用复合回归模型对中国沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量与生物质资源、农村用能结构以及沼气利用现状等指标之间的数值关系进行模拟分析, 探讨沼气行业的 CO<sub>2</sub> 减排规律, 以期科学预测沼气利用对大气碳库的影响及其动态变化提供方法基础和科学依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 情景设定

以中国农村能源消费和沼气发展情况为现实依据, 对沼气利用替代传统燃料的形势进行了情景设定。

收稿日期: 2013-01-11 修订日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金 (40901063; 41201578)

作者简介: 杨艳丽 (1983-), 女, 河南驻马店人, 助理研究员, 研究方向: 能源环境工程。青岛 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 266101。Email: yyli327@126.com

通信作者: 张培栋 (1977-), 男, 甘肃华池人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 生态工程。青岛 青岛科技大学, 266042。

Email: eeesc@163.com

农业工程学会会员 (E041200444S)

情景 A ( 秸秆替代 ) : 2010 年, 中国农村生活用能消耗秸秆  $3.11 \times 10^8 \text{t/a}$ , 约占农村生活用能总量的 28.09%<sup>[16-17]</sup>。由此可见, 秸秆仍是中国农村生活能源的重要组成部分。假设户用沼气池和大中型沼气工程所产的沼气全部用于替代秸秆, 提供生活用能。

情景 B ( 薪柴替代 ) : 2010 年, 薪柴在农村生活用能中约占 14.59%<sup>[16-17]</sup>, 是农村生活用能的重要组成部分。但薪柴的过度砍伐易导致水土流失加剧、生态环境日益恶化。假设户用沼气池和大中型沼气工程产出的沼气全部用于替代薪柴, 减缓生态环境恶化。

情景 C ( 煤炭替代 ) : 随着人们生活水平的逐步提高, 农村生活能源消费中秸秆、薪柴的比例进一步下降, 商品能源将成为生活能源的主流。2010 年煤炭在农村生活用能中的比例首超秸秆, 达到 30.21%<sup>[16-17]</sup>。假设户用沼气池和大中型沼气工程产出的沼气全部用于替代煤炭。

情景 D ( 比例替代 ) : 根据农村生活能源消费的现实情况, 未来很长一段时间内, 沼气对各种传统燃料的替代将同时进行, 假设沼气分别以 40%、20% 和 40% 的比例对秸秆、薪柴和煤炭进行替代。

虽然电能在部分发达农村地区用量较多, 但在全国范围内比例仍较低。且相对于煤炭、秸秆、薪柴来说, 电能属于清洁能源。而沼气对生活能源的替代应从应用最普遍、利用方式最落后以及环境污染最大的能源开始, 本着此原则本研究未考虑电能替代情景。

## 1.2 复合回归

复合回归是在一次回归分析基础上, 对变量进行扩充, 以变量函数为中间变量进行多次回归分析的数理统计分析方法<sup>[14,18]</sup>。本文选用多元线性与曲线拟和组合的复合回归方法研究沼气利用与 CO<sub>2</sub> 减排量之间的数值关系, 模型如下<sup>[19]</sup>:

$$\begin{aligned} C_{ER} &= \sum_{i=1}^n b_i f(x_i, c) \\ &= b_0 + b_1 f(x_1, c) + \dots + b_n f(x_n, c) + \varepsilon \\ &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \end{aligned}$$

式中,  $C_{ER}$  为 CO<sub>2</sub> 减排量, kg;  $b_i$  为自变量权重系数;  $\beta_i$  为总回归参数;  $x_i$  为自变量  $i, i=1, 2, \dots, n$ ;  $f(x_i, c)$  为自变量函数;  $\varepsilon$  为随机变量, 均值为 0, 方差为  $\sigma^2$ , 即遵从正态分布  $N(0, \sigma^2)$ 。

主要步骤为: 1) 通过多元线性回归考察影响因素对 CO<sub>2</sub> 减排量影响的显著性, 并确定  $b_i$ ; 2) 选择不同曲线类型对显著影响因子与 CO<sub>2</sub> 减排量之间的关系分别进行拟合, 通过决定系数 ( $R^2$ ) 检验、 $F$  检验以及 Sig. 检验选取最优关系曲线, 得到  $f(x_i, c)$ ; 3) 确定  $\beta_i$ , 通过残差分析进行回归模型检验。

## 1.3 指标选取与数据来源

沼气利用对 CO<sub>2</sub> 减排贡献受多种因素制约, 其中生物质资源是发展沼气的基础, 农村生活用能结构是判断沼气替代情景的依据, 沼气发展现状指标是估算 CO<sub>2</sub> 减排量的基础依据。本研究分别从生物质资源、农村生活用能结构和沼气现状等 3 个方面选择模拟指标, 具体见表 1。

表 1 中国沼气发展现状及其 CO<sub>2</sub> 减排量

Table 1 Biogas development and CO<sub>2</sub> emission reductions in China

| 年份<br>Year | 生物质资源<br>Biomass resource           |   | 农村生活能源消费<br>Rural living energy consumption |                                     |                                    |                                    | 沼气发展现状 Current situation of biogas development                    |   |   |   |   |                           |   |  |
|------------|-------------------------------------|---|---|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|---|---|---------------------------|---|--|
|            | 秸秆<br>Straw/<br>(10 <sup>4</sup> t) | 禽畜粪便<br>Livestock<br>manure/<br>(10 <sup>4</sup> t) | 总量<br>Total/<br>(10 <sup>4</sup> t)         | 秸秆<br>Straw/<br>(10 <sup>4</sup> t) | 薪材<br>Wood/<br>(10 <sup>4</sup> t) | 煤炭<br>Coal/<br>(10 <sup>4</sup> t) | 户用沼气<br>Household biogas  |   |   |   | 大中型沼气工程<br>Large and middle scale biogas project                |                           |   |  |
|            |                                     |   |   |                                     |                                    |                                    | 沼气池保有量<br>amount of<br>biogas<br>digester/<br>(10 <sup>4</sup> 户) | 沼气池使用量<br>amount of<br>biogas<br>digester/<br>(10 <sup>4</sup> 户) | 户均产气量<br>production per<br>household/<br>(m <sup>3</sup> ·户 <sup>-1</sup> ) | 产气量<br>Biogas<br>production/<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 总池容<br>Digester<br>volume/<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ) | 运行数量<br>Running<br>amount | 单位池容<br>产气量<br>Biogas<br>production<br>per volume<br>(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ) | 产气量<br>Biogas<br>production<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) |
| 2000       | 47 677                              | 60 325  | 36 999                                      | 28 812                              | 14 101                             | 16 528                             | 848.0   | 763.7   | 338.9   | 25.89   | 48.81   | 1 042.0                   | 252.7   | 1.23   |
| 2001       | 48 198                              | 59 477  | 41 427                                      | 30 491                              | 17 088                             | 19 298                             | 957.0   | 857.4   | 347.8   | 29.82   | 63.92   | 1 359.0                   | 263.9   | 1.69   |
| 2002       | 48 665                              | 59 704  | 45 347                                      | 32 979                              | 19 967                             | 22 038                             | 1 110.0   | 1 023.7   | 361.3   | 36.99   | 76.51   | 1 560.0                   | 240.1   | 1.84   |
| 2003       | 46 257                              | 60 678  | 46 127                                      | 33 296                              | 21 092                             | 22 806                             | 1 289.0   | 1 207.9   | 379.1   | 45.80   | 88.29   | 2 355.0                   | 208.3   | 1.84   |
| 2004       | 51 457                              | 61 566  | 47 932                                      | 33 986                              | 21 091                             | 21 817                             | 1 541.0   | 1 446.3   | 384.5   | 55.68   | 286.27  | 2 671.0                   | 167.3   | 2.28   |
| 2005       | 52 372                              | 61 624  | 48 697                                      | 37 202                              | 18 055                             | 23 367                             | 1 807.0   | 1 715.9   | 411.4   | 70.59   | 172.4   | 3 764.0                   | 197.9   | 3.41   |
| 2006       | 54 975                              | 59 864  | 50 176                                      | 37 853                              | 18 991                             | 24 811                             | 2 175.0   | 1 957.3   | 418.3   | 81.87   | 233.76  | 5 550.0                   | 163.9   | 3.47   |
| 2007       | 55 373                              | 58 761  | 51 600                                      | 33 998                              | 18 217                             | 22 961                             | 2 650.0   | 2 487.0   | 397.4   | 98.83   | 334.02  | 8 861.0                   | 161.1   | 4.89   |
| 2008       | 58 512                              | 59 824  | 58 498                                      | 32 420                              | 16 689                             | 22 360                             | 3 050.0   | 2 858.9   | 398.4   | 113.89  | 502.50  | 15 956.7                  | 156.5   | 7.11   |
| 2009       | 57 803                              | 61 496  | 52 331                                      | 34 304                              | 17 535                             | 22 428                             | 3 507.0   | 3 230.2   | 383.9   | 124.00  | 714.96  | 22 892.0                  | 142.1   | 9.17   |

注: \*总量以标准煤为单位。表中数据是根据 2000-2010 年全国农村地区可再生能源统计资料<sup>[16]</sup>、2000-2010 中国农业统计资料<sup>[17]</sup>以及 2001-2011 中国统计年鉴<sup>[20]</sup>等计算整理所得。

Note: \*tce means ton standard coal. These data were calculated by National rural renewable energy statistics 2000-2010<sup>[16]</sup>, China Agriculture statistical report 2000-2010<sup>[17]</sup> and China statistical yearbook (2000-2010)<sup>[20]</sup>.

中国从 20 世纪 70 年代开始在农村地区大力发展沼气，目前沼气已成为农村地区生活能源消费的重要组成部分。文中农村沼气开发利用现状、农村能源消费现状均来源于《全国农村可再生能源统计资料》(2000 - 2010)<sup>[16]</sup>和《全国农业统计资料》(2000 - 2010)<sup>[17]</sup>，资源现状根据《中国统计年鉴》(2001 - 2011)<sup>[20]</sup>以及文献[21-27]估算所得。

## 2 中国沼气行业的 CO<sub>2</sub> 减排量

沼气行业发展对 CO<sub>2</sub> 减排的影响主要表现在以下几个方面：1) 沼气发酵原料(秸秆)生长过程中吸收大气中的 CO<sub>2</sub>，形成碳汇；2) 沼气发酵原料(禽畜粪便)通过厌氧处理，减少了 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 向大气中的直接排放；3) 沼气燃烧释放 CO<sub>2</sub>，形成碳源；但作为清洁燃料用于发电、供热或居民炊事用能，可替代煤炭、薪柴和秸秆等传统能源利用，减少了满足同样供热需求的传统燃料燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[28]</sup>。由于秸秆属于农业生产过程中的废弃物，其生长过程对 CO<sub>2</sub> 的吸收不因秸秆利用方式而改变，故本研究中温室气体减排估算只考虑 2)、3) 两部分。其计算公式如下<sup>[29]</sup>：

$$C_{ER}' = C_{E,CH_4} + C_{E,N_2O} + C_{ER,CO_2}$$

$$= \sum_i EF_{C,i} \times P_i \times \varepsilon_C + \sum_{j,j} (EF_j + nEF_j \times \alpha) \times N_i \times P_i \times \varepsilon_N + \sum_k P_k \times \delta_k - P_b \times \delta_b$$

式中， $C_{ER}'$  为 CO<sub>2</sub> 减排量(估算值)，kg/a； $C_{E,CH_4}$  为粪便管理过程中的 CH<sub>4</sub> 排放量(以 CO<sub>2</sub> 计)，kg/a； $C_{E,N_2O}$  为粪便管理过程中的 N<sub>2</sub>O 排放量(以 CO<sub>2</sub> 计)，kg/a； $C_{ER,CO_2}$  为沼气作为替代能源产生的 CO<sub>2</sub> 减排量，kg/a； $EF_{C,i}$  为  $i$  种牲畜的 CH<sub>4</sub> 排放因子，kg/(a·头)； $P_i$  为  $i$  种牲畜数量，头/a； $\varepsilon_C$  为 CH<sub>4</sub> 相对于 CO<sub>2</sub> 的全球变暖潜势，该文取值 25； $EF_j$  为  $j$  种粪便管理方式的 N<sub>2</sub>O 直接排放因子，kg/kg； $nEF_j$  为  $j$  种粪便管理方式的 N<sub>2</sub>O 间接排放因子，kg/kg； $\alpha$  为氮通过 NH<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 挥发的比例； $N_i$  为  $i$  种牲畜年氮排放量，kg/(a·头)； $\varepsilon_N$  为 N<sub>2</sub>O 相对于 CO<sub>2</sub> 的全球变暖潜势，该文取值 298； $P_k$  为被沼气替代的传统燃料数量，kg/a； $\delta_k$  为被替代传统燃料燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放因子，kg/kg； $P_b$  为沼气数量，m<sup>3</sup>/a； $\delta_b$  为沼气燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放因子，kg/m<sup>3</sup>。依据 IPCC 推荐值各指标取值如表 2 所示，依据上式估算结果如表 3 所示。

表 2 主要温室气体排放系数

Table 2 Emissions coefficients of main greenhouse gas

| 类别               | 排放源<br>Emission sources                   | 排放系数<br>Emission coefficients | 排放源<br>Emission sources                   | 排放系数<br>Emission coefficients | 排放源<br>Emission sources                  | 排放系数<br>Emission coefficients | 排放源<br>Emission sources                  | 排放系数<br>Emission coefficients |
|------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 煤炭/(kg·kg <sup>-1</sup> )                 | 1.478                         | 薪柴/(kg·kg <sup>-1</sup> )                 | 1.247                         | 秸秆/(kg·kg <sup>-1</sup> )                | 1.436                         | 沼气/(kg·m <sup>-3</sup> )                 | 0.714                         |
| CH <sub>4</sub>  | 奶牛/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 19                            | 肉牛/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 1                             | 猪/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 4                             | 羊/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 0.15                          |
| N <sub>2</sub> O | 奶牛/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 0.739                         | 肉牛/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 0.534                         | 猪/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 0.660                         | 羊/(kg·a <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | 1.839                         |
|                  | 直接排放/(kg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>  | 0.016                         | 间接排放/(kg·kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>  |                               | 0.016                                    | 挥发比例/%                        |  | 30                            |

注：数据来源于文献[29]；N<sub>2</sub>O 排放以 N 计。

Note: sourced from reference [29]; N<sub>2</sub>O emissions are measured by N.

表 3 中国沼气行业的 CO<sub>2</sub> 减排量

Table 3 CO<sub>2</sub> emission reductions of biogas industry in China

| 年份<br>Year | 户用沼气 Household biogas  |                                       |                    |                    |                    | 大中型沼气工程 Large and middle scale biogas project                     |                                       |                    |                    |                    |
|------------|--|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|            | 产气量<br>Biogas production/<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | CO <sub>2</sub> 减排量/10 <sup>4</sup> t |                    |                    |                    | 产气量<br>Biogas<br>production/<br>(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | CO <sub>2</sub> 减排量/10 <sup>4</sup> t |                    |                    |                    |
|            |  | 情景 A<br>Scenario A                    | 情景 B<br>Scenario B | 情景 C<br>Scenario C | 情景 D<br>Scenario D |   | 情景 A<br>Scenario A                    | 情景 B<br>Scenario B | 情景 C<br>Scenario C | 情景 D<br>Scenario D |
| 2000       | 25.89  | 1 174.1                               | 974.9              | 222.6              | 753.6              | 1.23  | 115.73                                | 106.24             | 70.40              | 95.70              |
| 2001       | 29.82  | 1 352.3                               | 1 122.9            | 256.4              | 868.0              | 1.69  | 148.66                                | 135.68             | 86.66              | 121.26             |
| 2002       | 36.99  | 1 677.5                               | 1 392.9            | 318.0              | 1 076.8            | 1.84  | 199.85                                | 185.71             | 132.33             | 170.01             |
| 2003       | 45.80  | 2 077.0                               | 1 724.6            | 393.8              | 1 333.2            | 1.84  | 258.89                                | 244.74             | 191.30             | 229.02             |
| 2004       | 55.68  | 2 525.0                               | 2 096.6            | 478.7              | 1 620.8            | 2.28  | 282.01                                | 264.47             | 198.23             | 244.99             |
| 2005       | 70.59  | 3 201.2                               | 2 658.1            | 606.9              | 2 054.9            | 3.41  | 472.38                                | 446.13             | 347.01             | 416.98             |
| 2006       | 81.87  | 3 712.7                               | 3 082.8            | 703.9              | 2 383.2            | 3.47  | 422.94                                | 396.23             | 295.36             | 366.57             |
| 2007       | 98.83  | 4 481.9                               | 3 721.4            | 849.7              | 2 876.9            | 4.89  | 577.84                                | 540.20             | 398.05             | 498.40             |
| 2008       | 113.89   | 5 164.8                               | 4 288.5            | 979.2              | 3 315.3            | 7.11  | 863.79                                | 809.05             | 602.35             | 748.27             |
| 2009       | 124.00   | 5 623.3                               | 4 669.2            | 1 066.1            | 3 609.6            | 9.17  | 1 130.25                              | 1 059.67           | 793.14             | 981.29             |
| 2010       | 130.78   | 5 930.8                               | 4 924.5            | 1 124.4            | 3 807.0            | 11.79   | 1 475.39                              | 1 384.64           | 1 041.91           | 1 283.85           |

注：CO<sub>2</sub> 减排量均以 CO<sub>2</sub> 计；情景 A 为秸秆替代，情景 B 为薪柴替代，情景 C 为煤炭替代，情景 D 为比例替代。

Note: CO<sub>2</sub> emission reductions are measured by CO<sub>2</sub>.

Scenario A means the scenario of straw substituted by biogas; Scenario B is the scenario of wood substituted by biogas; Scenario C is the scenario of coal substituted by biogas; Scenario D is the scenario of straw, wood and coal substituted by biogas with proportions of 40%, 20% and 40%, respectively.

近年来中国沼气利用带来的 CO<sub>2</sub> 减排量呈显著增长趋势, 2010 年达到 3.55 × 10<sup>7</sup> ~ 8.79 × 10<sup>7</sup>t/a, 约占农村生活能源消费 CO<sub>2</sub> 排放量的 3.77% ~ 9.34%<sup>[30]</sup>, 约占全国 CO<sub>2</sub> 排放量的 0.25% ~ 0.74%。在单位沼气的 CO<sub>2</sub> 减排效益方面, 大中型沼气工程比户用沼气更具有优势。每利用 1m<sup>3</sup> 大中型沼气工程产出的沼气可减少 24.2kg 的 CO<sub>2</sub> 排放, 相当于户用沼气的 5.3 倍 (4.5kg/m<sup>3</sup>)。主要是由于沼气工程可减少禽畜粪便和工业废水管理过程中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[31]</sup>, 而 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 具有更强的全球变暖潜能。

注: 由于目前沼气工程主要是禽畜养殖场沼气工程, 粪便发酵和牲畜养殖是流程式的一体化操作, 粪便运输距离较短, 故沼气工程原料运输过程中的 CO<sub>2</sub> 排放暂忽略。

### 3 沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的回归模拟

#### 3.1 影响因子显著性分析

以 2000 - 2009 年各指标数据为基础, 基于 SPSS 软件利用逐步回归法对 4 种替代情景下 CO<sub>2</sub> 减排量与各指标进行多元回归分析 (表 4)。结果显示: 4 种替代情景下, 资源现状中的禽畜粪便资源量、生活用能结构中的薪柴消耗量以及沼气发展现状中的沼气池使用量和户均产气量等 4 指标与户用沼气 CO<sub>2</sub> 减排量的决定系数 R<sup>2</sup> 接近于 1.00, 但禽畜粪便资源量的 Sig. 值为 0.004, 薪柴消耗量的 Sig. 值为 0.002, 均属不可信赖范畴。沼气池使用量

和户均产气量的 Sig. 值小于 0.001, 属可信赖范畴。表明户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量与沼气池使用量和户均产气量具有显著相关性。沼气发展现状因子“池容”与大中型沼气工程 CO<sub>2</sub> 减排量的决定系数 R<sup>2</sup> 为 0.987, Sig. 值小于 0.001, 表明沼气工程 CO<sub>2</sub> 减排量与池容具有明显的相关性, 见表 4。

#### 3.2 最优模型

根据户用沼气和大中型沼气工程在 4 种替代情景下的 CO<sub>2</sub> 减排情况, 分别建立沼气池使用量、户均产气量与户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量以及池容与大中型沼气工程行业 CO<sub>2</sub> 减排量的曲线回归方程, 通过 R<sup>2</sup>、F 值、Sig. 值的比较分析表明: 4 种替代背景下均是线性方程对沼气池使用量与户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量之间的关系拟合最好, 决定系数 R<sup>2</sup>=0.992; S 函数 (系统函数, System function) 对户均产气量与户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量之间的关系拟合最好, 决定系数 R<sup>2</sup>=0.677; 池容与大中型沼气工程行业 CO<sub>2</sub> 减排量的回归方程以线性方程拟合最好, R<sup>2</sup>=0.977。表明沼气池使用量、户均产气量和池容对沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的解释性较强。

相关系数检验、Sig. 检验以及 F 检验仅表明变量之间数值关系的显著性, 难以保证数据拟合效果的最优化。残差是反映预测值与实际值之间的信息, 通过残差值分布分析, 进一步确定沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的因子模型 (表 5); 并结合标准化系数得到中国沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的复合回归模型。

表 4 多元线性回归系数  
Table 4 Multiple linear regression coefficient

| 项目/Items                            | 户用沼气   |        |        |        |        |        |        |        | 沼气工程   |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | 情景 A   |        | 情景 B   |        | 情景 C   |        | 情景 D   |        | 情景 A   | 情景 B   | 情景 C   | 情景 D   |
|                                     | 沼气池使用量 | 户均产气量  | 沼气池使用量 | 户均产气量  | 沼气池使用量 | 户均产气量  | 沼气池使用量 | 户均产气量  | 池容     | 池容     | 池容     | 池容     |
| 原始系数<br>Unstandardized Coefficients | 1.737  | 6.010  | 1.442  | 4.990  | 0.325  | 1.139  | 1.115  | 3.857  | 3.595  | 3.493  | 3.109  | 3.380  |
| 标准化系数<br>Standardized coefficients  | 0.935  | 0.098  | 0.935  | 0.098  | 0.935  | 0.098  | 0.935  | 0.098  | 0.987  | 0.988  | 0.989  | 0.988  |
| t                                   | 70.464 | 7.399  | 70.464 | 7.399  | 70.654 | 7.399  | 70.464 | 7.399  | 18.720 | 18.394 | 17.045 | 18.011 |
| Sig.                                | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

表 5 沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的复合回归模型  
Table 5 Composite Regression model of CO<sub>2</sub> emissions reductions biogas industry

| 项目 Items | 因子模型 Factor models                       |                |        |        | 复合回归模型 Composite regression models                             |  |
|----------|--|----------------|--------|--------|--|--|
|          | 公式 Expression                            | R <sup>2</sup> | F      | Sig.   |  |  |
| 情景 A     | $C_{ER,h,d,A} = 1.85x_1 - 150.21$        | 0.992          | 933.43 | <0.001 | $C_{ER,h,A} = 1.73x_1 - 140.44 + 0.098e^{14.449-2489.365/x_2}$ |  |
|          | $C_{ER,h,b,A} = e^{14.449-2489.365/x_2}$ | 0.677          | 16.771 | <0.001 |  |  |
| 情景 B     | $C_{ER,h,d,B} = 1.54x_1 - 124.72$        | 0.992          | 933.43 | <0.001 |  | $C_{ER,h,B} = 1.44x_1 - 116.61 + 0.098e^{14.449-2489.365/x_2}$ |
|          | $C_{ER,h,b,B} = e^{14.263-2489.362/x_2}$ | 0.677          | 16.771 | <0.001 |  |  |
| 情景 C     | $C_{ER,h,d,C} = 0.35x_1 - 28.48$         | 0.992          | 933.39 | <0.001 | $C_{ER,h,C} = 0.33x_1 - 26.62 + 0.098e^{14.449-2489.365/x_2}$  |  |
|          | $C_{ER,h,b,C} = e^{12.786-2489.359/x_2}$ | 0.677          | 16.771 | <0.001 |  |  |
| 情景 D     | $C_{ER,h,d,D} = 1.19x_1 - 96.42$         | 0.992          | 933.45 | <0.001 |  | $C_{ER,h,D} = 1.11x_1 - 90.15 + 0.098e^{14.449-2489.365/x_2}$  |
|          | $C_{ER,h,b,D} = e^{14.006-2489.36/x_2}$  | 0.677          | 16.771 | <0.001 |  |  |

续表

| 项目 Items | 因子模型 Factor models |                                 |       |         |        | 复合回归模型 Composite regression models |
|----------|--------------------|---------------------------------|-------|---------|--------|------------------------------------|
|          | 公式 Expression      | R <sup>2</sup>                  | F     | Sig.    |        |                                    |
| 沼气工程     | 情景 A               | $C_{ER,b,A} = 3.6x_3 + 130.54$  | 0.978 | 350.426 | <0.001 | $C_{b,A} = 3.56x_3 + 129.11$       |
|          | 情景 B               | $C_{ER,b,B} = 3.49x_3 + 124.82$ | 0.977 | 338.34  | <0.001 | $C_{b,B} = 3.45x_3 + 123.32$       |
|          | 情景 C               | $C_{ER,b,C} = 3.11x_3 + 103.3$  | 0.977 | 338.34  | <0.001 | $C_{b,C} = 3.07x_3 + 101.96$       |
|          | 情景 D               | $C_{ER,b,D} = 3.38x_3 + 118.51$ | 0.976 | 324.387 | <0.001 | $C_{b,D} = 3.34x_3 + 117.91$       |

注：C<sub>ER</sub> 为 CO<sub>2</sub> 减排量，10<sup>4</sup>t；h 表示户用沼气；d 表示沼气池；b 表示沼气工程，A、B、C、D 表示情景；变量 x<sub>1</sub> 为沼气池使用量，10<sup>4</sup> 户；变量 x<sub>2</sub> 为户均产气量，m<sup>3</sup>；变量 x<sub>3</sub> 为大中型沼气工程池容，10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。

Note: C<sub>ER</sub> is CO<sub>2</sub> emission reductions, 10<sup>4</sup>t; h represents household biogas, d represents digester; b represents biogas project, A, B, C and D represents scenario; And variable x<sub>1</sub> is the used amount of biogas digester, 10<sup>4</sup> household; variable x<sub>2</sub> is biogas production per household, m<sup>3</sup>; variable x<sub>3</sub> is the digester volume of large and middle scale biogas project, 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>.

图 1 中预测值与估算值的比较结果显示，户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量模拟预测结果与估算数据的吻合度较高，且 4 种替代情景的变化规律基本相同，误差率可控制在 5% 之内，属可信赖范围；大中型

沼气工程行业 CO<sub>2</sub> 减排量模拟预测值与估算值在 2006-2009 年基本一致，误差率在 2% 以内，属可信赖范围。但 2000-2006 年残差值较大，误差率可达 22%，属不可信赖范围。

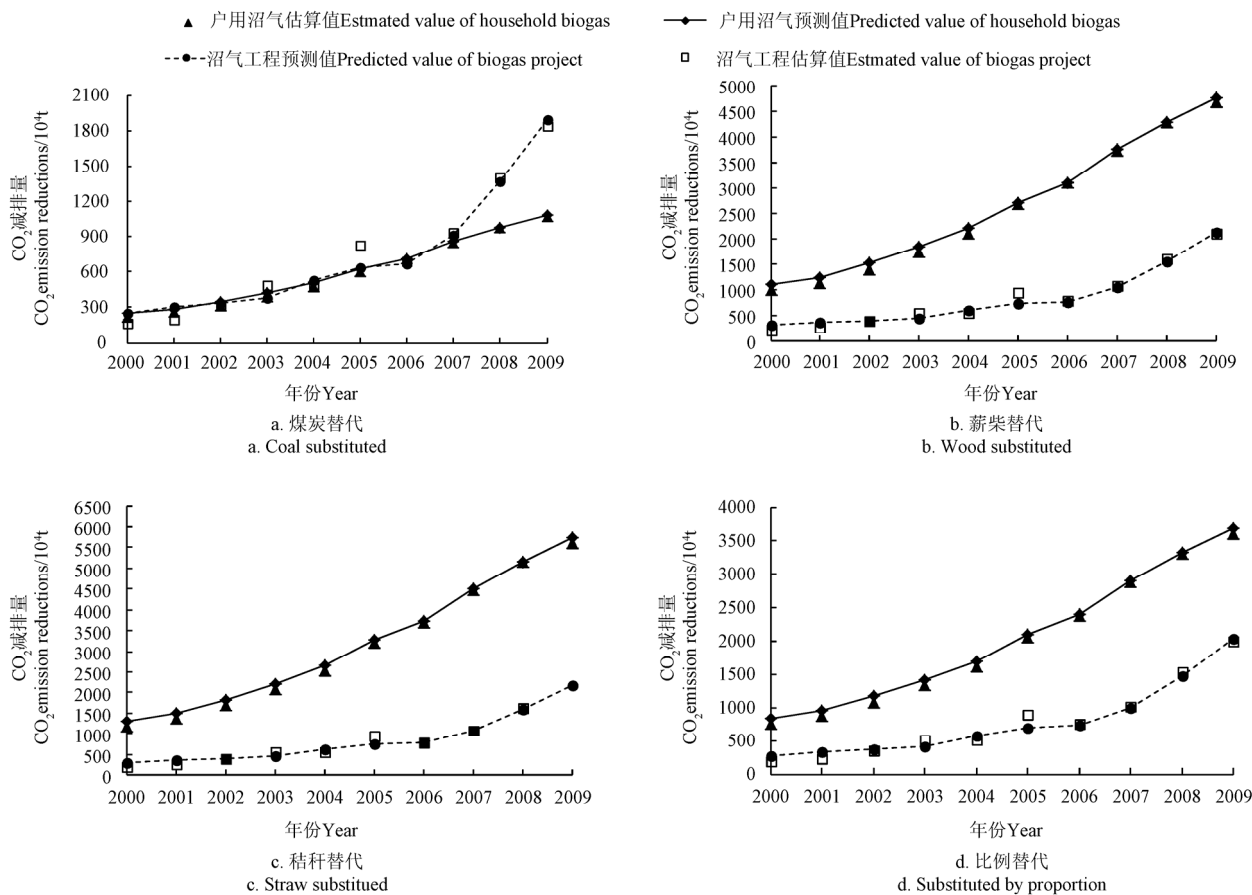


图 1 沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的预测值与估算值的比较 (2000-2009)

Fig.1 Comparison of simulated value and estimated value of CO<sub>2</sub> emissions reduction of biogas industry (2000-2009)

### 3.3 模型验证

利用上述回归模型对 2010 年中国沼气行业的 CO<sub>2</sub> 减排量进行预测，并与基于 IPCC 推荐方法的估算值进行对比 (表 6)，结果显示：回归模型对 2010 年中国沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的预测值与估算值偏差较小，其中户用沼气行业的误差率为 1.84% ~ 1.91%，大中型沼气工程行业的误差率为

1.74% ~ 2.05%，均属可信赖范围。

本文采用的复合回归模型对研究时间段内户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量和 2006-2009 年大中型沼气工程行业 CO<sub>2</sub> 减排量的预测值与估算值虽然存在一定偏差，但误差率均在可信赖范围内，关键是模拟得到的 CO<sub>2</sub> 减排量与影响因素之间的总体趋势与实际经验规律基本一致，且模拟分析得到的回归模型

对研究时间段以外的数值关系也有较好的预测功能。本研究得到的复合回归模型能够较好地反映户用沼气行业和 2006 年以后大中型沼气工程行业

CO<sub>2</sub> 减排量与影响指标之间的数值关系,可应用于户用沼气和 2006 年以后大中型沼气工程行业发展过程中 CO<sub>2</sub> 减排量的预测分析。

表 6 2010 年沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量的预测与估算值的比较

Table 6 Comparison of predicted data and estimated data of CO<sub>2</sub> emission reductions in biogas industry (2010)

| 替代情景<br>Substituted scenarios | 户用沼气 Household biogas                                     |  |                                      | 沼气工程 Biogas project                          |  |                                      |
|-------------------------------|---|--|--------------------------------------|--|--|--------------------------------------|
|                               | 估算值<br>Estimated value<br>/10 <sup>4</sup> t <sup>1</sup> | 预测值<br>Predicted value<br>/10 <sup>4</sup> t | 误差率<br>Error rate<br>/% <sup>2</sup> | 估算值<br>Estimated value<br>/10 <sup>4</sup> t | 预测值<br>Predicted value<br>/10 <sup>4</sup> t | 误差率<br>Error rate<br>/% <sup>2</sup> |
| 煤炭替代                          | 1 124.38  | 1 145.30                                     | 1.86                                 | 2 406.96                                     | 2 362.44                                     | -1.85                                |
| 薪柴替代                          | 4 924.49  | 5 015.19                                     | 1.84                                 | 2 702.03                                     | 2 649.51                                     | -1.94                                |
| 煤炭替代                          | 5 930.77  | 6 042.97                                     | 1.89                                 | 2 780.17                                     | 2 731.70                                     | -1.74                                |
| 比例替代                          | 3 806.96  | 3 879.68                                     | 1.91                                 | 2 615.26                                     | 2 561.56                                     | -2.05                                |

注: <sup>1</sup> 减排量以 CO<sub>2</sub> 计; <sup>2</sup> 误差率=(预测值-估算值)/估算值。

Note: <sup>1</sup> Emission reductions are measured by CO<sub>2</sub>; <sup>2</sup> Error rate=(Predicted value- Estimated value)/ Estimated value.

### 3.4 模型分析

根据回归系数分析,不同替代模式对户用沼气和大中型沼气工程行业的 CO<sub>2</sub> 减排量影响较大。户用沼气在情景 A 下,复合回归模型  $x_1$  回归系数为 1.73,表明其他变量恒定时,沼气池使用量 ( $x_1$ ) 每增加  $1 \times 10^4$  户,将增加  $1.73 \times 10^4$ t 的 CO<sub>2</sub> 减排量 ( $C_{ER}$ ),可分别比情景 B、C、D 高出  $0.29 \times 10^4$ 、 $1.40 \times 10^4$  和  $0.62 \times 10^4$ t。 $1/x_2$  的回归系数为 -2489.36,在其他变量恒定时户均产气量每增加 1 个单位,将带来  $4.77 \times 10^4$ t 的 CO<sub>2</sub> 减排增量,较情景 B、C、D 分别高出  $0.81 \times 10^4$ 、 $3.87 \times 10^4$  和  $1.71 \times 10^4$ t。其他 3 种情景下模型回归系数含义类似。大中型沼气工程在情景 A 下, $x_3$  回归系数为 3.56,表明单位池容 ( $10^4$ m<sup>3</sup>) 的增加,将可带来  $3.56 \times 10^4$ t 的 CO<sub>2</sub> 减排增量,分别较情景 B、C、D 高出  $0.11 \times 10^4$ 、 $0.49 \times 10^4$ 、和  $0.22 \times 10^4$ t,且各情景下单位池容 CO<sub>2</sub> 减排量的差别较户用沼气低。

通过不同情景下单位指标变化所带来的 CO<sub>2</sub> 减排增量的对比分析可发现,秸秆替代模式的 CO<sub>2</sub> 减排效应最强,其次为薪柴替代、比例替代和煤炭替代。沼气替代秸秆、薪柴燃烧将是未来一段时间内沼气领域 CO<sub>2</sub> 减排的首选方式,但随着沼气产量的不断增加以及秸秆清洁化利用工程的逐步推进,未来沼气对传统能源的替代方式将由秸秆替代、薪柴替代至比例替代,最终至煤炭替代的趋势发展。对比户用沼气和大中型沼气工程的回归系数可发现,大中型沼气的单位池容 CO<sub>2</sub> 减排效益较好,约为户用沼气的 2.4~9.41 倍。在原料资源一定的情况下,发展大中型沼气工程将获得更大的 CO<sub>2</sub> 减排效益。

### 4 预测分析

据《可再生能源发展‘十二五’规划》<sup>[32]</sup>显示,

至 2015 年中国农村户用沼气池数量将达到 5000 万户,沼气产量达到 200 亿 m<sup>3</sup>。假定按 95% 的使用量估算,至 2015 年全国约有 4750 万农户使用沼气池,户均产气量将达到 421m<sup>3</sup>/户。利用前文中所得的回归模型进行预测分析,结果显示:至 2015 年,全国户用沼气利用将可带来  $1.63 \times 10^7 \sim 8.58 \times 10^7$ t 的 CO<sub>2</sub> 减排量。

同时,规划亦指出:充分利用农村秸秆、生活垃圾、林业剩余物及畜禽养殖废弃物,在适宜地区积极推动小型沼气工程、大中型沼气工程,沼气工程的沼气产量达到 20 亿 m<sup>3</sup>,则届时沼气工程池容将至少达到 1441.7 万 m<sup>3</sup>,利用 3.2 中所得的回归模型进行预测分析,结果显示:至 2015 年,全国沼气的行业发展将可带来  $4.55 \times 10^7 \sim 5.26 \times 10^7$ t 的 CO<sub>2</sub> 减排量。

### 5 结论与建议

本文利用复合回归方法对中国沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量与生物质资源、农村用能结构以及沼气利用现状等指标之间的数值关系进行模拟分析,结果表明:

1) 中国户用沼气行业 CO<sub>2</sub> 减排量与沼气发展现状中的沼气池使用量和户均产气量之间存在显著相关性,决定系数  $R^2$  接近于 1;大中型沼气工程行业 CO<sub>2</sub> 减排量的显著影响因子为池容,决定系数  $R^2$  为 0.987。

2) 经多元线性回归和曲线拟合所得到的复合回归模型对沼气利用现状与 CO<sub>2</sub> 减排量之间的数值关系拟合较好,并经 2010 年数据验证,该模型能够有效反映沼气利用现状对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献作用。

3) 基于《可再生能源发展‘十二五’规划》设定的目标进行预测分析,2015 年,中国沼气的 CO<sub>2</sub> 减排量将达到  $6.18 \times 10^7 \sim 1.384 \times 10^8$ t。

结合 CO<sub>2</sub> 减排量与沼气利用现状的数值关系，得出几点启示：

1) 为追求 CO<sub>2</sub> 减排效益的最大化，在以秸秆、薪柴为主要生活能源的偏僻农村地区发展沼气替代传统生活能源是 CO<sub>2</sub> 减排效益最大化的首选方式。但随着沼气产业的发展，沼气对生活能源的替代逐渐由偏远农村地区扩展至经济发达的农村或城镇，沼气利用对传统燃料的替代方式亦相应由秸秆、薪柴替代为主转向煤炭替代为主，单位沼气池使用量或单位池容对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献作用将逐渐降低。

2) 在既定池容数量下，大中型沼气工程比户用沼气池的减排效益更好，且其产出的沼气对不同传统燃料进行替代所产生的 CO<sub>2</sub> 减排量差异较小，沼气利用范围更广。未来一段时间内，在继续推广户用沼气的同时加快沼气工程建设进程，扩大沼气工程普及范围，是进一步提升沼气温室气体减排效益的重要途径之一。

#### [参 考 文 献]

- [1] Hwang Jennjiang. Policy review of greenhouse gas emission reduction in Taiwan[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 1392 - 1402.
- [2] 陈健鹏. 温室气体减排政策：国际经验及对中国的启示：基于政策工具演进的视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(9) : 26 - 32.  
Chen Jianpeng. International experience of policy for greenhouse gas emission reduction and its implications for China: from the perspective of policy instruments' evolution China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(9): 26 - 32. (in Chinese with English abstract)
- [3] 邓心安, 张应禄. 生物能源发展及对未来农业的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2008, 10(2) : 1 - 5.  
Deng Xin'an, Zhang Yinglu. Development of bio-energy and its impacts on future agriculture[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008, 10(2): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)
- [4] Cai Junmeng, Liu Rouhou, Deng Chunjian. An assessment of biomass resources Availability in Shanghai: 2005 analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2008, 12(7): 1997 - 2004.
- [5] 温晓霞, 李长江, 睦彦伟, 等. 退耕区户用沼气的生态环境效益评价[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10) : 225 - 230.  
Wen Xiaoxia, Li Changjiang, Sui Yanwei, et al. Assessment of ecological environment benefit for household biogas in areas of returning farmland to forest[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(10): 225 - 230. (in Chinese with English abstract)
- [6] Poeschl M, Ward S, Owende P. Environmental impacts of biogas deployment-Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 24: 184 - 201.
- [7] 李国柱, 牛叔文, 杨振, 等. 陇中黄土丘陵地区农村生活能源消费的环境经济成本分析[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(1) : 15 - 24.  
Li Guozhu, Niu Shuwen, Yang Zhen. The Analysis on environmental and economic cost of rural household energy consumption in Loess Hilly Region of Gansu province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 15 - 24. (in Chinese with English abstract).
- [8] 蔡梅, 孙钊, 郭倩倩, 等. 规模化养殖场沼气工程温室气体减排选址优化模型研究[J]. *可再生能源*, 2011, 29(6) : 134 - 137.  
Cai Mei, Sun Zhao, Guo Qianqian, et al. A location optimization model of biogas project on large-scale farms for greenhouse gas emission reduction[J]. *Renewable Energy*, 2011, 29(6): 134 - 137. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张培栋, 王刚. 中国农村户用沼气工程建设对减排 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 的贡献：分析与预测[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(12) : 147 - 151.  
Zhang Peidong, Wang Gang. Contribution to reduction of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emission by household biogas construction in rural China: Analysis and prediction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(12): 147 - 151. (in Chinese with English abstract).
- [10] 张培栋, 李新荣, 杨艳丽, 等. 中国大中型沼气工程温室气体减排效益分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9) : 239 - 243.  
Zhang Peidong, Li Xinrong, Yang Yanli, et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(9): 239 - 243. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘宇, 匡耀求, 黄宁生. 农村沼气开发与温室气体减排[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3) : 48 - 53.  
Liu Yu, Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng. Rural biogas development and greenhouse gas emission mitigation[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(3): 48 - 53. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵站涓. 基于复合回归的 FWD 弯沉盆曲线拟合研究[J]. *重庆建筑*, 2005(6) : 64 - 68.  
Zhao Hongguan. The study of fitting curve of FWD inflection

- by composite regress[J]. Chongqing Architecture, 2005(6): 64 - 68. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张宏,李仲学. 煤炭需求影响因素及情景分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 557 - 560.  
Zhang Hong, Li Zhongxue. Affecting factors and projected scenarios for coal demand in China[J]. Journal of China coal Society, 2007, 32(5): 557 - 560. (in Chinese with English abstract).
- [14] 潘岳,纪昌明. 基于模糊回归的电价预测[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 86 - 88.  
Pan Chan, Ji Changming. Electricity price forecast by fuzzy regression[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(3): 86 - 88. (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨光辉,张鸿儒,夏禾. 列车运行引起的桥下地面振动衰减特性[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 59, 62.  
Yang Guanghui,Zhang Hongru,Xia He,The attenuation behavior of ground vibration under bridge caused by moving trains[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 59, 62. (in Chinese with English abstract).
- [16] 中华人民共和国农业部. 全国农村可再生能源统计资料 2000-2010[R].
- [17] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2011[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [18] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.
- [19] 张红兵,贾来喜,李璐. SPSS 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [20] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴(2000-2010)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000 - 2010.
- [21] 韦茂贵,王晓玉,谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32 - 44.  
Wei Maogui, Wang Xiaoyu, Xie Guanghui. Field residue of field crops and its temporal distribution among thirty-one province of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 32 - 44. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852 - 1859.  
Wang Yajing, Bi Yuyun, Gao Chunyu. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Science Agricultural Sinica, 2010, 43(9): 1852 - 1859. (in Chinese with English abstract).
- [23] 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 Yishui. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 230 - 234. (in Chinese with English abstract)
- [24] 林源,马骥,秦富. 中国禽畜粪便资源结构分布及发展展望[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 1 - 5.  
Lin Yuan, Ma Ji,Qin Fu. The structure distribution and prospect of china manure resource[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)
- [25] Zhou Xiping, Wang Fang, Hu Hongwei, et al. Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(1): 1 - 11.
- [26] Yang Yanli, Zhang Peidong, Zhang Wenlong, et al. Quantitative appraisal and potential analysis for primary biomass resources for energy utilization in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3050 - 3058.
- [27] Liu H, Jiang G M, Zhuang H Y, et al. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1402 - 1418.
- [28] 刘尚余,骆志刚,赵黛青. 农村沼气工程温室气体减排分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(7): 652 - 655.  
Liu Shangyu, Luo Zhigang, Zhao Daiqing. Greenhouse gas reduction and CDM analysis on countryside biogas engineering [J]. Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(7): 652 - 655. (in Chinese with English abstract)
- [29] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Published: IGES, Japan, 2006.
- [30] 杨静,张培栋. 中国农村生物能源利用的 CO<sub>2</sub> 排放量估算与空间分析[J]. 可再生能源, 2012, 30(10): 67 - 72.  
Yang Jiang,Zhang Peidong.Estimation and spatial analysis of CO<sub>2</sub> emissions from rural bioenergy use[J]. Renewable Energy, 2012, 30(10): 67 - 72. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李玉娥,董红敏,万运帆,等. 规模化猪场沼气工程 CDM 项目的减排及经济效益分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2580 - 2583.  
Li Yu'e, Dong Hongmin, Wan Yunfan, et al. Emission reduction and financial analysis of intensive swine farm using biogas digester to treat manure and developed as a CDM projects[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2580 - 2583. (in Chinese with English abstract)
- [32] 国家能源局. 可再生能源发展‘十二五’规划[R]. 2012.8.6



## Simulation and prediction of CO<sub>2</sub> emission reductions of biogas industry in China

Yang Yanli<sup>1</sup>, Li Guangquan<sup>2</sup>, Zhang Peidong<sup>3</sup>

(1. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266101, China; 2. Department of Management, Party School of Qingdao Municipal Committee of the Communist Party of China, Qingdao 266071, China; 3. College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** Biogas project is a key program to renewable energy construction in China. As a daily-consumed energy for livelihood, biogas can substitute traditional energy and provide clean energy for rural residents, which can reduce the emissions of greenhouse gases such as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, et al. The CO<sub>2</sub> emissions by biogas utilization are always calculated by IPCC methods, while, the CO<sub>2</sub> emissions reduction (CO<sub>2</sub> ER) by biogas utilization should be calculated by many indexes, such as living energy structure, biogas development conditions, the calorific value, used way, converting efficiency and carbon emissions coefficient of biogas and substituted fuel. It is a complicated process with large amount of manpower and material resources consumed. Therefore, it would be very useful to develop a simple and fast method to estimate CO<sub>2</sub> emissions reduction by biogas utilization. This thesis research is about the application of composite regression method in estimating the process of CO<sub>2</sub> emissions reduction by biogas utilization; the research indices include biomass resource, structure of rural living energy, and biogas development condition. The results showed that the amounts of rural household biogas digester, biogas production per household and the digester volumes of middle-scale biogas project were significant impact factors of CO<sub>2</sub> emissions reduction by biogas utilization in China. Among which, there was prominent linear relation between the amounts of rural household biogas digester and CO<sub>2</sub> emission reductions with correlation coefficient ( $R^2$ ) equal to 0.992 and error rate less than 5%, S function relations between biogas production per household and CO<sub>2</sub> emission reductions with correlation coefficient ( $R^2$ ) of 0.677 and error rate below 5%, and linear relation between the digester volumes of middle-scale biogas project and CO<sub>2</sub> emissions reduction with correlation coefficient ( $R^2$ ) of 0.977 and error rate less than 2%. It indicated that all the simulation results were trustworthy and useful, that was to say the composite regression model that composed by multiple linear regression and curve fitting could effectively reflect the numerical relations between CO<sub>2</sub> emissions reduction and influencing factors, also could be applied to predict the CO<sub>2</sub> ER by biogas utilization. According the 12 th Five Year Development Program for Renewable Energy, the prediction results based on the method above indicated that the CO<sub>2</sub> emissions reduction of biogas utilization could reach  $6.18 \times 10^7 - 1.38 \times 10^8$  t in 2015. It is an effective way for keeping important station of reducing greenhouse gas emissions to strengthen research on biogas utilization technology, and promoting biogas project development in livestock farms.

**Key words:** biogas, regression analysis, emission control, CO<sub>2</sub> emissions reductions, simulation analysis

(责任编辑：秦学敏)