
中国可持续能源项目
The China Sustainable Energy Pro

能 源 基 金 会
The Energy Foundation

项目成果报告系列
Technical Report



**中国北方农村地区建筑节能
发展方向战略研究**
**Strategic Study on Buildings
Energy-efficiency Development in Northern
Rural Areas of China**

重庆大学
2012年4月

项目信息

项目资助号 G-1103-13856

Grant Number G-1103-13856

项目期 (03/01/2011 - 02/29/2012)

Grant period (03/01/2011 - 02/29/2012)

所属领域: 建筑

Sector Construction

项目概述: 北方农村生活能耗占全国建筑总能耗的 20%, 推进北方地区农村建筑节能关系到我国整体建筑节能工作的成效, 涉及到国家的能源战略和经济社会的可持续发展。开发以生物质能源和其他可再生能源为主的新的农村能源系统, 同时大幅度改进农村建筑的保温性能和采暖方式, 才能更好地满足农村的建筑用能需求, 实现满足可持续发展要求的社会主义新农村建设。调研摸清中国北方农村地区用能现状, 对预测未来北方农村地区的用能需求以及未来北方农村地区的政策制定有着至关重要的作用。推进农村建筑节能的目的, 不是要限制农村的用能需求的增长, 降低或维持当前农村的建筑能耗水平, 而是要统筹资源、环境和经济发展, 鼓励农村地区因地制宜地采用高效合理的生物质能等先进技术, 给农村提供清洁高效的用能方式, 更好地满足农民建筑用能增长需求, 提高农民的生活品质。改变农村目前的能源消费模式, 鼓励农村发展太阳能、生物质等清洁能源, 引导农村用能可持续增长以及北方农村地区用能结构科学转型, 不仅可以把农民的消费从煤炭、液化气等商品能源的购买中解放出来; 而且可以发展生物质能产业, 利用农产品及其废弃物生产新型能源, 拓展了农产品的原料用途和加工途径, 为农业提供了一个产品附加值高和市场潜力无限的平台, 延伸农业产业链条, 提高农业效益, 拓展农村剩余劳动力转移空间, 在促进区域经济发展、增加农民收入等方面大有可为。如何引导中国北方农村地区用能结构的科学转型, 对国家的能源战略和经济社会的可持续发展有着重要意义。

Project Description: According to "China Rural Statistical Yearbook of 2006", annual household energy consumption for life in rural areas in 30 provinces (municipalities and autonomous regions) in China has reached 320 million tce, accounting for 20% of total building energy consumption in China. Promoting building energy-saving work northern rural areas is critical to the result of China's overall building energy efficiency and is related to national energy strategies and sustainable economic and social development. Development of biomass energy and other renewable energy-based new rural energy systems and significantly improving the

insulation performance and heating ways of rural buildings will better meet the energy needs of rural buildings and achieve socialist new rural construction that could meet requirements of sustainable development. Mastering energy consumption situation in Chinese northern areas will be critical for prediction of future energy use demands in northern rural areas and policy formulation for northern rural areas in future. The purpose of rural building energy efficiency is to coordinate resources, environmental and economic development, encourage rural areas to take highly effective and reasonable biomass and other advanced technology according to local conditions and provide clean and highly efficient energy consumption way in rural areas, so as to meet the increasing demands of farmers for building energy consumption and improve life quality of farmers, instead of limiting demand for energy use increase in rural areas and decreasing or maintaining current building energy consumption level in rural areas. Changing the current energy consumption patterns in rural areas, encouraging rural development of solar energy, biomass and other clean energy sources and guiding sustainable energy use in rural areas and scientific transformation of energy use structure in northern rural areas will not only liberate farmers' consumption from purchase of coal, gas and other commercialized energy; but also develop biomass energy industry, use agricultural products and wastes to produce new energy and expand the use and processing ways of agricultural raw materials, so as to provide agricultural products with a platform of high added value and unlimited market potential, extend the industrial chain of agriculture, increase agricultural efficiency and extend space for rural surplus labor, playing a great role in promoting regional economic development and increasing rural incomes. How to guide China's energy structure in northern rural areas will be great of significance for national energy strategy and economic and social sustainable development.

项目成员：丁勇、任宏、刘猛、李沁、刘兴民、王春

Project team: DING Yong, REN Hong, LIU Meng, LI Qin, LIU Xingmin, WANG Chun

关键词：农村能源，节能，灰预测模型，生物质，博弈分析

Key Word: Rural energy, energy consumption, gray prediction model, biomass, game analysis

摘要

北方农村生活能耗占全国建筑总能耗的 20%，推进北方地区农村建筑节能关系到我国整体建筑节能工作的成效，涉及到国家的能源战略和经济社会的可持续发展。开发以生物质能源和其他可再生能源为主的新的农村能源系统，同时大幅度改进农村建筑的保温性能和采暖方式，才能更好地满足农村的建筑用能需求，实现满足可持续发展要求的社会主义新农村建设。

一是调研分析北方农村地区用能现状。

通过对北方农村地区的用能现状调研，归纳整理了中国北方农村地区能源消耗模式现状，分析其用能结构和存在的问题，通过中国北方农村地区用能调查，了解了现在中国北方农村地区的用能现状，分析研究中国北方农村地区的用能需求，得出目前北方农村存在取暖设施效率低及能源利用率低，室内环境质量差采暖等问题。

二是预测北方农村地区用能需求。

收集整理了生物质气化采暖技术、太阳能建筑一体化技术等北方农村地区的应用的基础理论和实际工程应用案例。通过设定三个情景，运用灰预测模型进行预测，分析不同情景下中国北方农村地区用能趋势的变化，得出生物质气化采暖系统不仅可以减少污染物排放，改善室内空气质量，充分利用生物质资源，节省燃料，变废为宝；同时可以提高农民的生活质量，提高室内空气品质，实现节能减排，促进社会主义新农村建设。开发以生物质能源和其他可再生能源为主的新的农村能源系统，同时大幅度改进农村建筑的保温性能和采暖方式，才能更好地满足农村的建筑用能需求，实现满足可持续发展要求的社会主义新农村建设。这需要大量的技术创新和各级政府的政策、机制及经费支持，更需要从科学发展观出发的全面的科学规划。

三是研究中国北方农村地区用能结构调整的激励政策。

通过对相关利益主体的行为进行博弈分析，对在农村地区推广生物质能建筑应用的激励对象、激励方式、激励程度和激励策略进行了定性分析，设计了比较完善的经济激励政策，可有效推动生物质能在农村地区建筑中的应用。

推进农村建筑节能的目的，不是要限制农村的用能需求的增长，降低或维持当前农村的建筑能耗水平，而是要统筹资源、环境和经济发展，鼓励农村地区因地制宜地采用高效合理的生物质能等先进技术，给农村提供清洁高效的用能方式，更好地满足农民建筑用能增长需求，提高农民的生活品质。改变农村目前的能源消费模式，鼓励农村发展太阳能、生物质等清洁能源，引导农村用能可持续增长

以及北方农村地区用能结构科学转型，不仅可以把农民的消费从煤炭、液化气等商品能源的购买中解放出来；而且可以发展生物质能产业，利用农产品及其废弃物生产新型能源，拓展了农产品的原料用途和加工途径，为农业提供了一个产品附加值高和市场潜力无限的平台，延伸农业产业链条，提高农业效益，拓展农村剩余劳动力转移空间，在促进区域经济发展、增加农民收入等方面大有可为。这将引导中国北方农村地区用能结构的科学转型，对国家的能源战略和经济社会的可持续发展有着重要意义。

Summary

According to "China Rural Statistical Yearbook of 2006", annual household energy consumption for life in rural areas in 30 provinces (municipalities and autonomous regions) in China has reached 320 million tce, accounting for 20% of total building energy consumption in China. Promoting building energy-saving work northern rural areas is critical to the result of China's overall building energy efficiency and is related to national energy strategies and sustainable economic and social development.

- Study on Current Energy Consumption Pattern in China's Northern Rural Areas

We conducted research on energy consumption structure in China's northern rural areas, design a Questionnaire on Energy Use in China's Northern Rural Areas, which will be modified based on opinions of experts from various universities and energy efficient research institutions and representatives from authorities in charge of building energy efficiency in some northern areas. With backward heating and cooking energy consumption way, rural areas in northern China take direct combustion of firewood and coal-based energy as the main energy consumption way with only 10% to 20% conversion efficiency of bio-energy direct combustion, resulting in energy shortages in rural areas which has been increased by the widespread use of furnace with less than 10% heating efficiency in northern rural areas. The direct combustion of firewood and coal also caused the fact that the indoor carbon monoxide levels of peasant family are many times greater than the national air quality standards, and such pollution is more serious in the winter, resulting in long-term exposure of most rural population in health-harmful pollution and increasing asthma and respiratory diseases since childhood.

- Study on energy demands in China's northern rural areas

Analyzing the case of the biomass gasification heating technology in rural areas in the north rural, it concludes that the development of biomass energy and other renewable energy-based new rural energy systems and significantly improving the insulation performance and heating ways of rural buildings will better meet the energy needs of rural buildings and achieve socialist new rural construction that could meet requirements of sustainable development. By building three scenes, we use grey prediction model, the energy use of rural north China has been forecasted. Develop the biomass energy and other renewable energy can meet the needs of new

socialist countryside construction better. But it requires technical innovation and government policy and fund support.

- Study on energy use structure adjustment strategy for China's northern rural areas

Through the game analysis of the behavior of relevant stakeholders, a qualitative analysis about the incentive targets, incentive ways, incentive levels and incentive strategies for promoting the biomass energy application in rural buildings was carried out. Also the relative economic incentive policies which would effectively promote the biomass energy application were designed.

The purpose of rural building energy efficiency is to coordinate resources, environmental and economic development, encourage rural areas to take highly effective and reasonable biomass and other advanced technology according to local conditions and provide clean and highly efficient energy consumption way in rural areas, so as to meet the increasing demands of farmers for building energy consumption and improve life quality of farmers, instead of limiting demand for energy use increase in rural areas and decreasing or maintaining current building energy consumption level in rural areas. It will guide China's energy structure in northern rural areas will be great of significance for national energy strategy and economic and social sustainable development.

目 录

一、	中国北方农村地区用能现状	Error! Bookmark not defined.
1.	总体情况	Error! Bookmark not defined.
2.	农房建设	Error! Bookmark not defined.
3.	围护结构类型	Error! Bookmark not defined.
	(1) 墙体	Error! Bookmark not defined.
	(2) 门窗	Error! Bookmark not defined.
	(3) 屋顶	Error! Bookmark not defined.
	(4) 地面	Error! Bookmark not defined.
4.	农房室内温度和用能方式	Error! Bookmark not defined.
	(1) 北方农村各种采暖方式及建筑用能情况	Error! Bookmark not defined.
	(2) 照明和家电用电	Error! Bookmark not defined.
	(3) 炊事用能	Error! Bookmark not defined.
	(4) 生活热水能	Error! Bookmark not defined.
	(5) 夏季降温措施	Error! Bookmark not defined.
	(6) 能源消费存在问题	Error! Bookmark not defined.
5.	存在问题分析	Error! Bookmark not defined.
	(1) 住房围护结构热工性能欠佳	Error! Bookmark not defined.
	(2) 遮阳设施使用不合理	Error! Bookmark not defined.
	(3) 缺少统一科学规划	Error! Bookmark not defined.
	(4) 取暖设施效率低及能源利用率低, 室内环境质量差采	Error! Bookmark not defined.
	defined.	
二、	中国北方农村地区用能需求及趋势	Error! Bookmark not defined.
1.	我国农村能源消费的总体特征	Error! Bookmark not defined.
2.	北方农村建筑用能需求现状分析	Error! Bookmark not defined.
3.	可再生能源新技术研究现状	Error! Bookmark not defined.
	(1) 农村可再生能能源现状	Error! Bookmark not defined.
	(2) 太阳能利用技术推广速度快	Error! Bookmark not defined.
	(3) 沼气在农村地区的应用	Error! Bookmark not defined.

(4) 生物质技术逐步进入农户	Error! Bookmark not defined.
(5) 生物质秸秆气化采暖技术在农村地区的应用 ...	Error! Bookmark not defined.
4. 北方农村建筑用能趋势预测情景分析	Error! Bookmark not defined.
(1) 情景分析法概述	Error! Bookmark not defined.
(2) 灰色预测理论的提出	Error! Bookmark not defined.
(3) 情景假定	Error! Bookmark not defined.
(4) 影响因素分析	Error! Bookmark not defined.
(5) GM(1, 1) 预测模型 ^[10]	Error! Bookmark not defined.
(6) GM(1, n) 模型	Error! Bookmark not defined.
(7) 情景分析结果	Error! Bookmark not defined.
5. 北方农村建筑节能潜力分析	Error! Bookmark not defined.
三、 中国北方农村地区用能结构调整战略	Error! Bookmark not defined.
1. 中国农村地区现有政策情况	Error! Bookmark not defined.
(1) 在农村地区推广生物质能建筑应用的政策依托。	Error! Bookmark not defined.
(1) 新农村能源工程	Error! Bookmark not defined.
(2) 农村沼气工程	Error! Bookmark not defined.
(3) 生物质能产业	Error! Bookmark not defined.
(4) 小水电代燃料工程	Error! Bookmark not defined.
(5) 可再生能源中长期发展规划	Error! Bookmark not defined.
2. 引导中国北方农村建筑用能可持续增长的目标及策略	Error! Bookmark not defined.
3. 制度设计原则及政策激励的着力点选择	Error! Bookmark not defined.
(1) 可行性原则	Error! Bookmark not defined.
(2) 有效性原则	Error! Bookmark not defined.
(3) 灵活性原则	Error! Bookmark not defined.
(4) 全局性原则	Error! Bookmark not defined.
(5) 最优性原则	Error! Bookmark not defined.
4. 在农村地区推广生物质能建筑应用中相关利益主体的博弈分析	Error! Bookmark not defined.
(一) . 相关的利益主体	Error! Bookmark not defined.
(1) 政府和生物质气化炉设备生产商之间的博弈分析	Error! Bookmark not defined.

(2) 消费者和政府之间的博弈分析	Error! Bookmark not defined.
5. 在农村地区推广生物质能建筑应用的激励机制设计.....	Error! Bookmark not defined.
(一) 激励对象	Error! Bookmark not defined.
(二) 激励方式	Error! Bookmark not defined.
(三) 激励程度	Error! Bookmark not defined.
(四) 激励策略	Error! Bookmark not defined.

正文

2011年12月27日，中央农村工作会议在北京召开，温家宝总理针对目前新农村建设工作中的问题指出：社会主义新农村建设是贯穿我国现代化建设全过程的一项重大任务。目前我国最大的发展差距仍然是城乡差距，最大的结构性问题仍然是城乡二元结构。城镇化的快速发展，为解决好“三农”问题创造了有利条件，但并不会自然带来农村面貌的较快改变。要全面推进农村各项建设，建设好农民幸福生活的美好家园。农村建设应保持农村的特点，有利于农民生产生活，保持田园风光和良好生态环境。不能把城镇的居民小区照搬到农村去，赶农民上楼。要长期坚持把国家基础设施建设的重点放到农村。建设部门要加强对村庄规划和农村建房的指导，提高农村民居设计和建设水平。

我国农村地区人口约8亿，农村民用建筑面积约为240亿 m^2 ，占全国房屋建筑面积的60%以上。据调查，寒冷地区农村住房建造水平低、保温措施少，大部分住房未进行保温处理，房屋外门窗热工性能和气密性较差，墙体和屋顶未采用保温材料建造，传热系数过大，散热量高，节能效果差。同时采暖设备简陋、热效率低，冬季采暖能耗约占生活耗能的80%，不仅造成大量能源浪费，而且室内热环境恶劣，舒适度差。随着农村经济的发展和农民生活水平的提高，农村住房的建造质量和居住舒适度逐步得到重视，进行寒冷地区农村住房节能改造，为寒冷地区农民营造一个健康舒适的室内环境，同时不造成能源消耗的大幅增长，是亟待解决的问题。

本报告通过对国内外各研究人员的研究调研结果进行总结，并结合2011年课题组针对中国北方农村地区建筑节能现状的调研，分析得出目前中国北方地区

住房现状，对中国北方农村居民用能节能潜力进行分析，提出农村住房节能方面存在的问题及改造措施。

一、 中国北方农村地区用能现状

1. 总体情况

有研究指出从 1979 年至 2007 年，农村总能耗基本保持持续增长。以 4.22% 的年增长率，从 1979 年的 307.19Mtce（百万吨标准煤）增至 2007 年的 977.14Mtce。人均能耗则以 4.35% 的年增长率从 1979 年的 388.78kgce 涨至 1979.14kgce。中国农村总能耗在 1979 至 2007 年间可分为三个阶段：第一阶段是从 1979 年至 1995 年，该阶段总能耗保持平稳上升，在 1995 年达到第一个高峰，649.52Mtce；第二阶段为 1996 至 1999 年，该阶段总能耗保持相对稳定；2000 年以后为第三阶段，该阶段总能耗保持快速增长。在九十年代末，相对于经济的增长，能耗却在下降，这是可能是得益于能效的提高。[1]

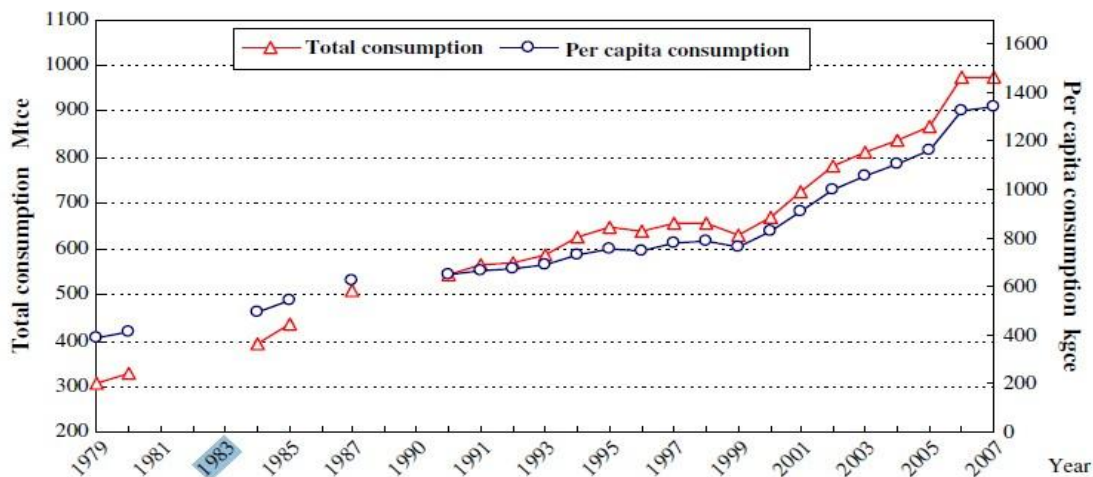


图 1.1 1979-2007 年中国农村地区能耗及人均能耗

图 1.2 给出了农村地区生产用能与住宅生活用能的比例。生活用能占总能耗的比例从 1979 年的 83.13% 降至 2007 年的 55.8%，但仍然超过了 50%。在上

述时期内生活用能在数量上从 255.38 升至 545.2Mtce，相对于农业机械化生产和工业活动，生活用能是低水平的。

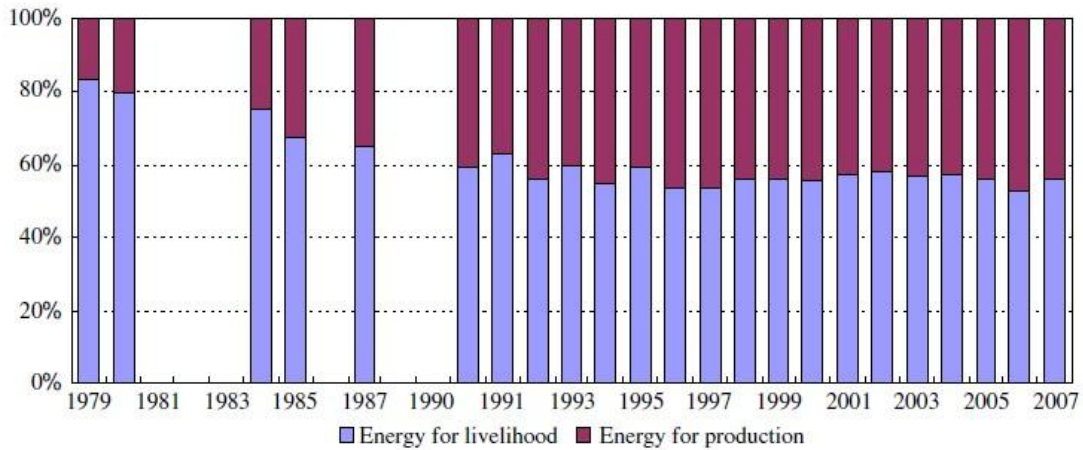


图 1.2 1979-2007 年中国农村地区生产用能与住宅生活用能的比例

从 1979 年至 2007 年间，中国农村能耗模式由传统能源使用模式向更商业化、工业化的能源模式转变。1979 年农村地区能耗中，煤炭占 18.30%，油料占 4.65%，电力占 5.4%，秸秆占 37.01%，柴火占 33.78%，沼气占 0.24%。2007 年，煤炭占 43.31%，油料占 8.15%，电力占 10.44%，液化石油气占 6.3%，秸秆占 16.35%，柴火占 14.6%，沼气占 0.75%。最明显的趋势是生物能使用比例下降以及电能、油料、液化石油气等能源使用比例的上升。但在农村地区秸秆、木柴等生物能源和煤炭仍然是用能组成中的主要部分，占总能耗的 70%以上。

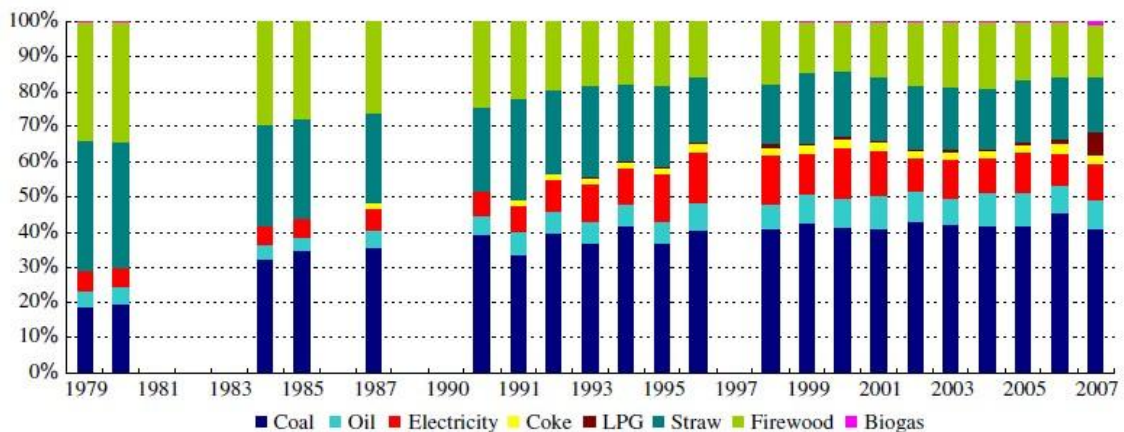


图 1.3 1979-2007 年中国农村地区各类能源消耗结构

由于我国幅员辽阔、地形地貌复杂多变，随着各地纬度、地势和地理条件不同，气候环境也发生较大的变化。为了研究建筑与气候两者之间的相互关系和不同建筑类型对自然条件的适应情况，从建筑热工设计的角度将全国建筑热工设计划分为五个地区：严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区。全国建筑热工设计分区及设计要求如表 1。

表 1.1 全国建筑热工设计分区及设计要求

分区名称	分区指标		设计要求
	主要指标	辅助指标	
严寒地区	最冷月平均温度 $\leq -10^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $\geq 145\text{d}$	必须充分满足冬季保温要求，一般可不考虑夏季防热
寒冷地区	最冷月平均温度 $0\sim -10^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $90\sim 145\text{d}$	应满足冬季保温要求，部分地区坚固夏季防热
夏热冬冷地区	最冷月平均温度 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 最热月平均温度 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $0\sim 90\text{d}$ ，日平均温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数 $40\sim 110\text{d}$	必须满足夏季防热需求，适当坚固冬季保温
夏热冬暖地区	最冷月平均温度 10°C 最热月平均温度 $25\sim 29^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数 $100\sim 200\text{d}$	必须满足夏季防热需求，一般不考虑冬季保温
温和地区	最冷月平均温度 $0\sim 13^{\circ}\text{C}$ 最热月平均温度 $18\sim 25^{\circ}\text{C}$	日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $0\sim 90\text{d}$	部分地区应考虑冬季保温，一般不考虑夏季防热

资料来源：民用建筑热工设计规范 GB50176-93，北京，北京计划出版社，1993

而中国北方采暖地区主要包括三个地区，分别是东北、华北、西北地区，累计年日平均温度低于或等于 5°C 的天数，一般都超过 90 天，时间最长的满洲里可达 211 天。这一地区也称为寒冷地区，其面积约占我国国土面积的 70%。

北方采暖地区的气候特征有：

1. 北方采暖地区冬季较长且寒冷干燥，年较差、日较差均较大。年日平均气温低于或等于 5°C 的天数占全年的 25%~40%，年最高温度大于或等于 35°C 的天数占全年的 22%，平原地区的极端最高温大多可超过 40°C ，极端高温范围在

35~44℃之间。年均日较差为 7~14℃。

2.北方采暖地区多为干旱少雨地区。年平均相对湿度为 50%~70%，年降雨日数为 60~100 天，年降水量为 300~1000mm，日最大降水量大多为 200~300mm，个别地方日最大降水量超过 500mm，年降雪日数为 15 天以下。

3.北方采暖地区的太阳辐射较强。年太阳总辐射照度为 150~190W/m²，年日照时数为 2000~2800 小时，年日照百分率为 40%~60%。

因此，进行北方农村住宅节能以及室内环境改善一个必不可少的前提就是掌握北方农村住宅围护结构以及室内环境的现状。只有在了解了这些信息的前提下我们才能明确课题的出发点、实施的途径以及预期的目标。而了解现状一个十分行之有效的手段就是文献整理加实地调研。通过调研，实际掌握北方村镇建筑围护结构、采暖方式、室内热环境及可再生能源利用状况等资料，为下一步进行村镇建筑围护结构节能和采暖方式优化等研究奠定基础。

课题组对黑龙江、北京、内蒙古等 15 个北方省市的农村地区进行了调研，共获得有效问卷 1782 份。各地区调查数据分布如图 1.4，图 1.5。

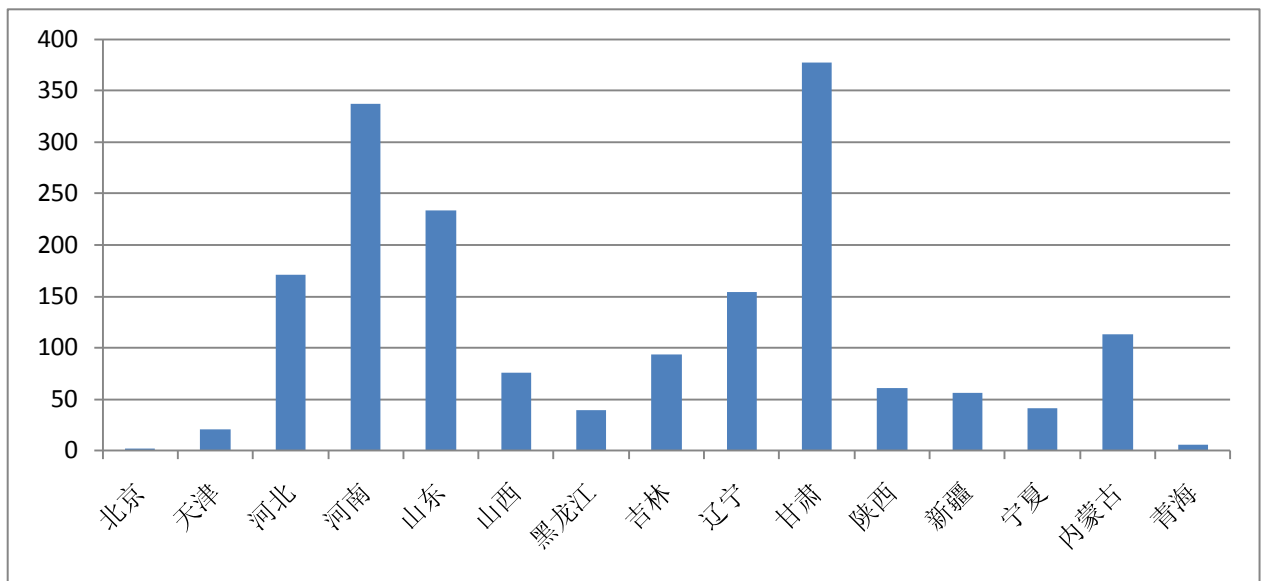


图 1.4 各地区调查问卷数据分布

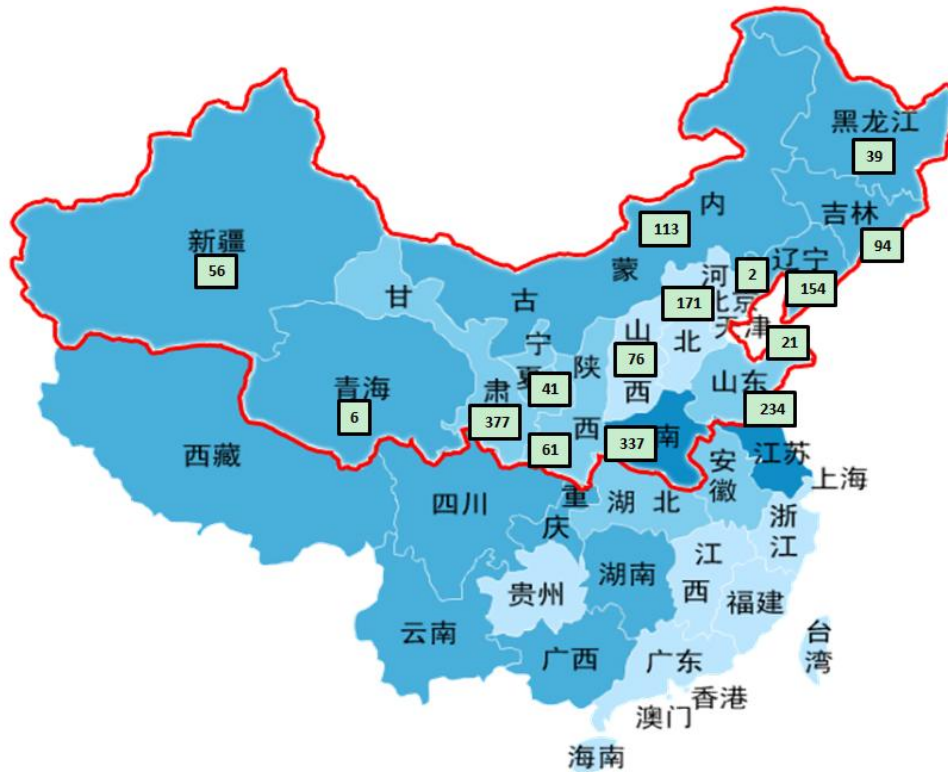


图 1.5 各地区调查问卷数据分布地图

2. 农房建设

北方农房基本为单户独栋建筑，以平房为主，二层及多层房屋较少；平原地区的农房一般较集中，而丘陵、山区、高原地区的农房相对较分散。20 世纪 90 年代以后建造的农房占的比例大，仍有很大一批 80 年代以前房屋正在使用，处于旧房到新房的过渡状态，有些老房屋已经年久失修，基本处于废旧状态，但也有部分结构稳定的老房屋仍在使用。农房的建筑面积较大，普遍在 80~150m²，人均建筑面积 20~40m²，院落面积 200~500m²。随着农村经济条件的好转，农民有更多资金开始修建房屋，追求房屋的大面积。老房屋的建筑材料多为自有或少量购买，80 年代以前建造的农房多采用自有的建筑材料，如以土坯和夯土为墙体材料，以自家种植的树木来制作屋架和门窗等，需要购买的材料多为砖、水泥和玻璃等，新建农房的建筑材料几乎全部购买。房屋建造费用逐年升高。1980

年以前建造的房屋购买建筑材料少，价格低，一般是以村民互相帮忙建造为主，人工费用较少，建造费用大约在 0.2 万元以下，甚至几百元；1990 年以后，随着农房面积、档次的提高，建筑材料价格提升，人工费增加，农房的建造费用逐年开始增长。我国北方农村一般没有专业的建筑施工队伍，但有大量零散的建筑工匠。城市边缘的村镇会有一些专业的施工队伍，但比例不大；经济条件较好的农户选择专业施工队施工，形式多为包工不包料，建筑材料由农户购买，施工队只负责施工；经济条件相对较差的农户则选择自建房屋，另外，很少使用机械设备，基本靠人力来完成。

3. 围护结构类型

根据调研结果，北方农村目前以平房居多。围护结构包括墙体、门窗、屋顶等，它是影响农村建筑热工特性的主要因素。

(1) 墙体

外墙是建筑的重要组成部分，在独立式住宅中外墙是最主要的承重和传热部件，对住宅使用寿命、采暖能耗和舒适性的影响尤为重要。目前我国北方农村地区主要存在的墙体材料如下图。

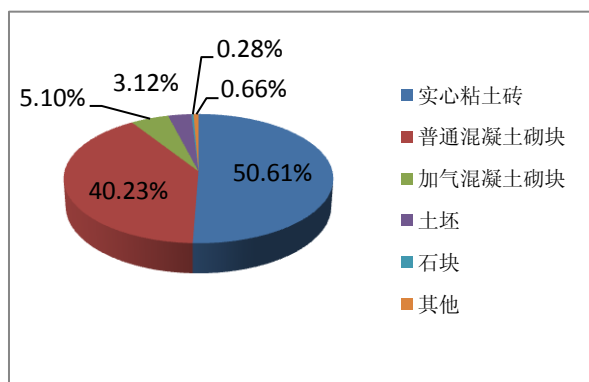


图 1.6 墙体类型

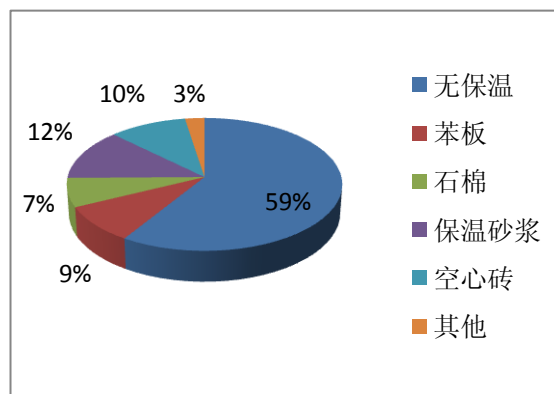


图 1.7 墙体保温

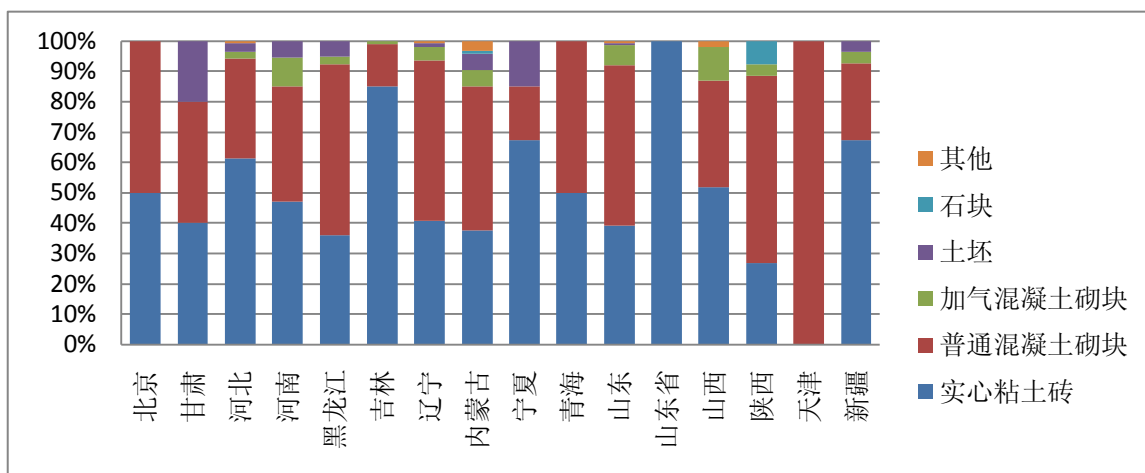


图 1.8 各地区农村住宅墙体材料构成

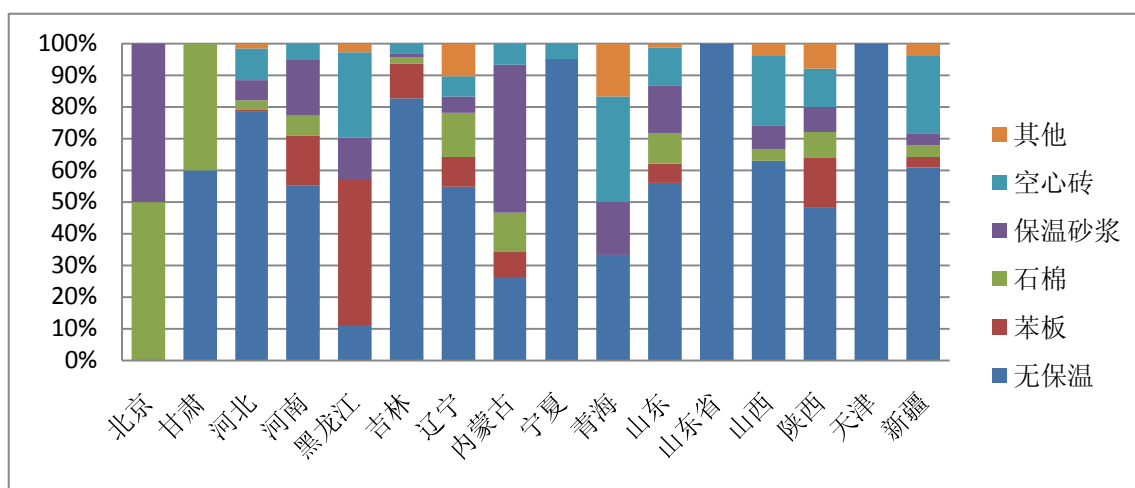


图 1.9 各地区保温材料使用构成

从图 1.7-1.9 中可以看出：

(1) 目前我国农村住宅的主要材料有实心粘土砖、普通混凝土砌块、加气混凝土砌块、土坯等墙体材料。实心砖墙仍占有重要地位。在调研的 1059 户农宅中，50.61%为实心粘土砖，40.23%为普通混凝土砌块，5.1%为加气混凝土砌块。41%的农户采取了一定的保温措施，内保温、外保温方式使用较多。其中使用保温砂浆的为 12%，10%采用空心砖。其他保温材料如苯板、石棉等使用的比例较小。随着国家“禁实”不断推进，新建农房逐渐开始使用非粘土实心砖、多孔砖或空心砖，土墙是老房屋的主要墙体类型，有土坯墙和夯土墙两种形式。在老

房屋的石墙和砖墙中,为了降低造价和提高保温效果,多采用石材和土坯复合墙、砖和土坯复合墙,砖(石)设在外层。其它墙体类型为混凝土砌块、草砖、木材等,应用比例很少。外墙承重,厚度为240mm~500mm,外饰面为水泥砂浆、灰浆刷白、水刷石,条件好的外饰瓷砖。外墙基本无外保温,保温隔热效果差,冬季室内热损失严重。

(2) 黑龙江、辽宁、陕西、内蒙古主要以普通混凝土砌块墙为主,同时也存在加气混凝土砌块墙的使用,不过比例较小。山西、河南使用加气混凝土砌块的比例比其他地区高。

(3) 西北地区土坯墙的使用较多。

(4) 北京、黑龙江、内蒙古地区外墙采取保温措施的比例较大。北京、甘肃使用石棉较多,黑龙江、河南使用苯板较多。山东、宁夏、吉林地区采取保温措施的比例还较小。

(2) 门窗

门窗是建筑能耗又一大源头,由于门窗的传热系数一般都高于其他围护结构,所以它是建筑保温的薄弱环节。

① 窗材料及类型

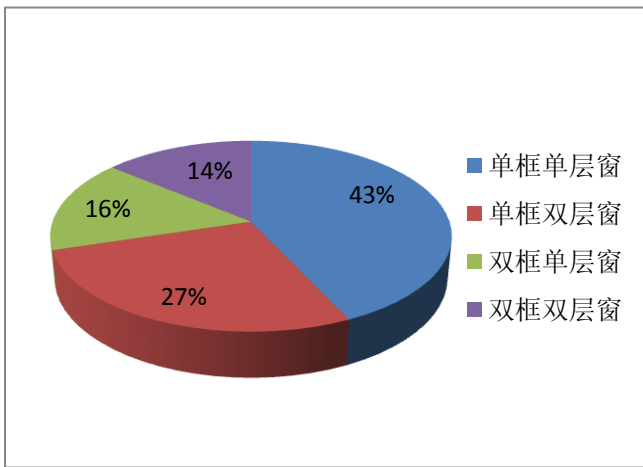


图 1.10 窗户类型



图 1.11 各地区窗户类型构成

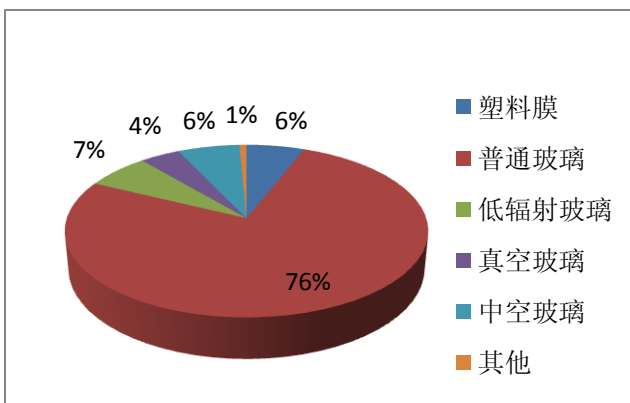


图 1.12 玻璃类型

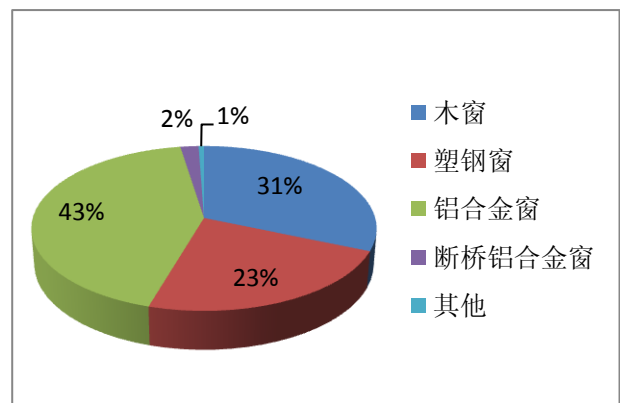


图 1.13 窗框材料

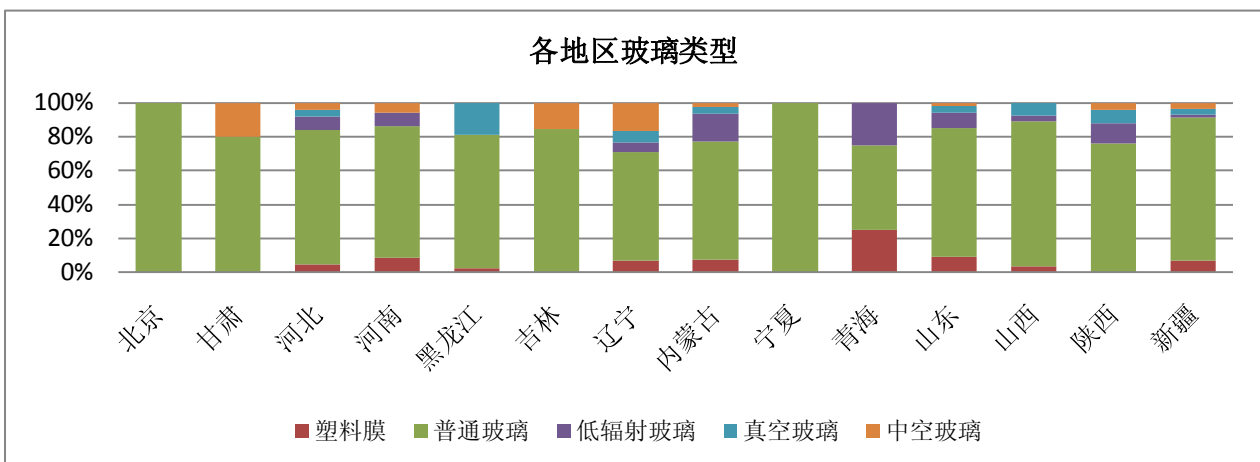


图 1.14 各地区玻璃类型

通过实地调研分析得到：以前的北方农房的外窗主要为木窗，而近年来新建农房多采用铝合金窗和塑钢窗。木窗的耐久性较差，随着使用时间增加，易变形，关闭不严，并且木窗的制作施工安装工序繁琐。近年来，经济条件好的新建农房开始使用铝合金窗和塑钢窗。铝合金窗由于材料质量的问题和安装的不规范，致使窗户的传热系数较高，密封性能较差，现已经逐渐被塑钢窗所替代。农房中使用的塑钢窗多为为单框双玻塑钢窗，推拉开启方式，平开窗价格比推拉窗高15%~20%，应用较少。农村建筑的窗户形式主要为平开窗和左右推拉窗。窗户的窗框材料主要为铝合金、木窗、塑钢，普通玻璃的应用较普遍所占比例为76%，新型节能玻璃的使用比例还很低。使用最多的为单框单层窗，占总比例的43%，其次为单框双层窗，占27%。

(1) 在东北地区，由于天气寒冷，使用双层窗、双框窗较多，虽然普通玻璃仍占主导地位，但新型节能玻璃的应用比例比其他地区更高。黑龙江使用真空玻璃较多，吉林、辽宁更多使用中空玻璃。

(2) 在西北地区，宁夏的窗户类型及材料比较落后，多采用单层单框窗，且新型玻璃的使用比例最低。青海地区使用低辐射玻璃、塑料膜的比例最高。在冬季，为了减少外窗的冷风渗透，农民会采用一些简易的保温措施，例如糊窗缝、在窗户里面或外面加一层塑料薄膜等。外门采取门上加盖棉门帘和门外加门斗两种保温措施，但随着塑钢门窗的应用，这些措施也在逐渐减少。

② 门材料与类型

北方农村建筑外门的材料主要为木门、铝合金、铁门以及塑钢。90年代以

前的农村住宅外门材料多为木质，木门密闭性差，冷风渗透较严重；90年代后开始使用铝合金门，铝合金门和塑钢门密闭效果较好；90年代末以后，经济条件好的新建农宅逐渐开始使用塑钢门和金属门。

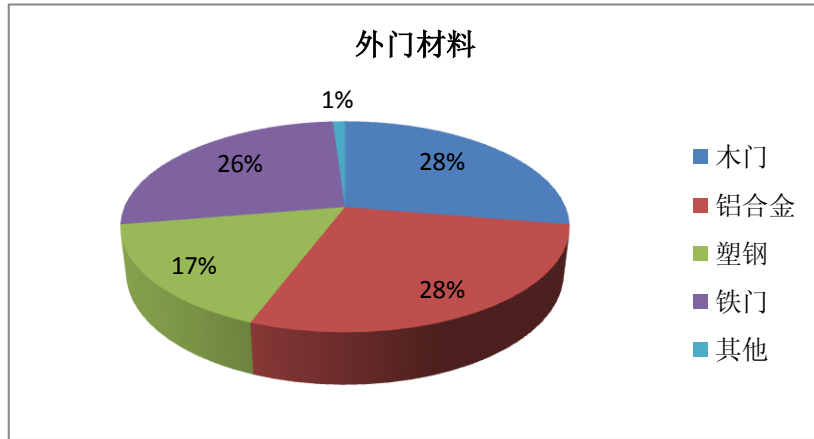


图 1.15 外门材料

木门强度低，容易变形和破坏，在东北严寒地区，常用铁皮包木门，增加木门的机械强度，延长使用寿命。开启方式为平开，有单扇门平开，也有双扇对开门。有研究指出，20世纪90年代中期以后逐渐开始使用铝合金门，严寒地区多采用双层铝合金门，寒冷地区多采用单层铝合金门。2000年以后，经济条件好的农户逐渐开始使用塑钢门和金属门，甚至是防盗门。

(3) 屋顶

屋顶是建筑物最上层起覆盖作用的承重和围护部分，由于农村住宅多为单层建筑，屋顶占外围护结构面积的比例较大，是主要的围护结构传热部分，农村住宅的屋顶形式主要有两种：坡屋顶和平屋顶。根据本次调研的结果，平屋顶所占比例更多，为53%，坡屋顶为45%。有研究指出，大量20世纪90年代前建造的农房采用木屋架，2000年以后建造的平屋顶农房中，大多采用现浇混凝土屋面。坡屋顶的屋面材料为各种瓦材和彩钢板，老式房屋筑多采用泥瓦。平屋面屋面材料为油毡和粘土。坡屋面的保温材料采用草木灰、草板、木屑、稻壳、膨胀

珍珠岩等，通常设在坡屋架的水平棚板上，也有采用秸秆、稻草、粘土保温，设于木屋架上，近几年新建农房也有采用聚苯板代替原始的保温材料。

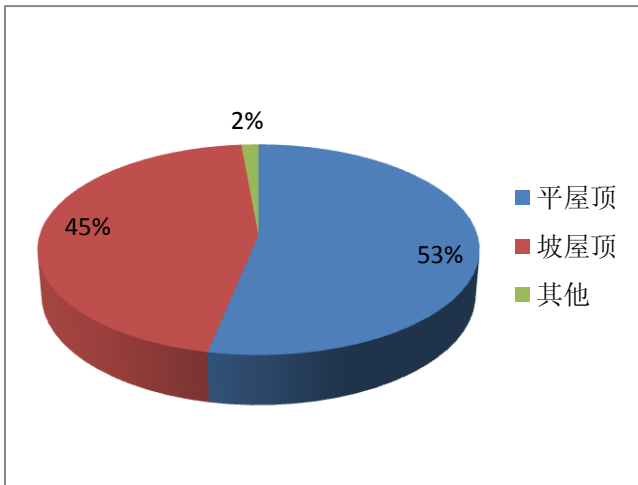


图 1.16 屋顶形式

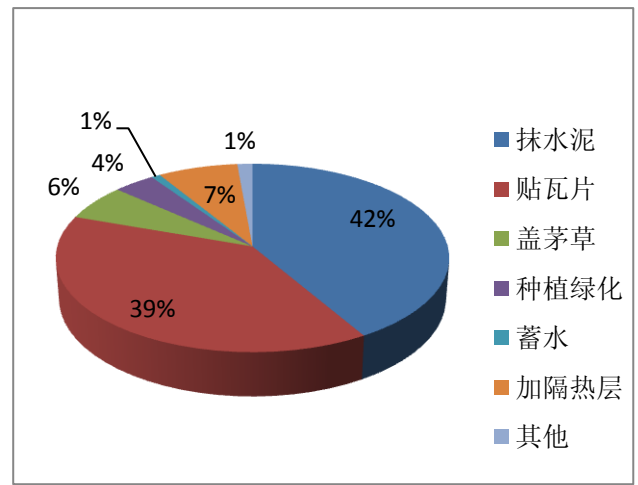


图 1.17 屋顶状况

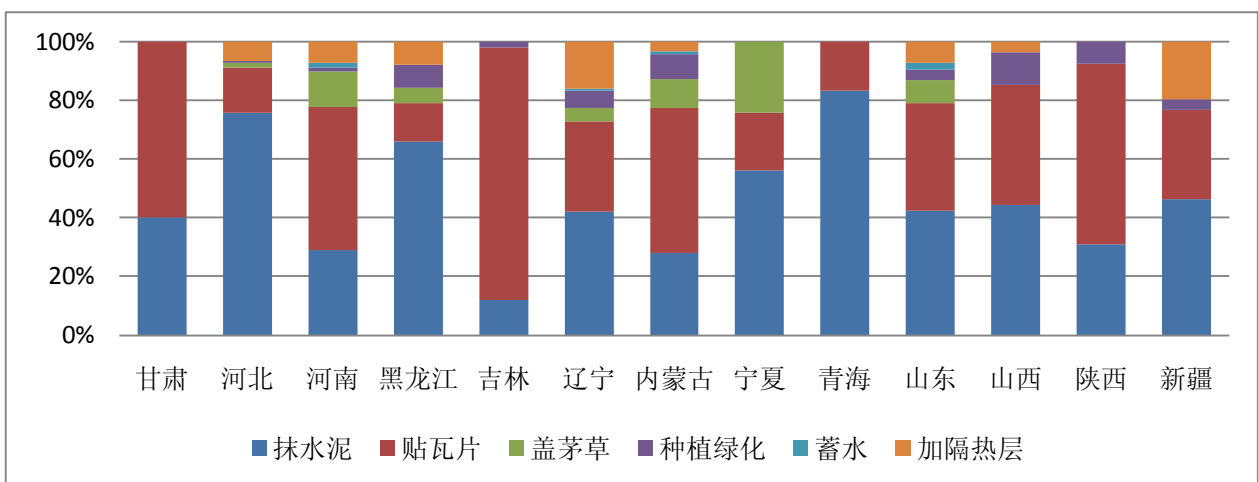


图 1.18 各地区屋顶情况

屋顶主要采用抹水泥、贴瓦片的方式，青海、河北抹水泥的比例约为 80%，吉林贴瓦片的比例超过 85%。宁夏、河南地区屋顶加盖茅草的比例比其他地区高，新疆、辽宁屋顶加隔热层的比例最高。这些传统的屋面形式保温效果较差，达不到屋面传热系数限值的要求，部分房屋室内有吊顶，但吊顶上铺设保温材料的较少。

(4) 地面

北方农房的地面为硬土夯实，水泥抹面或瓷砖贴面，基本无保温。20 世纪 80 年代以前的农房地面多没有面层，后发展为水泥地面、铺砖地面、水磨石地面等。新建农房多采用地砖、理石和木地板等作为地面装饰面层材料。地面基本没有保温，严寒地区的新建农房开始在地面设保温层，保温材料大多为炉渣。山东、河北省农村住房室内地面主要有素土夯实、水泥地面和砖铺地面 3 种类型，基本无保温措施，热阻无法满足地面保温需求。

4. 农房室内温度和用能方式

目前，我国北方农村民用建筑生活用能主要包括冬季室内采暖、炊事、照明及家电、生活热水等，最突出的是冬季采暖用能。由于在热工分区上来讲我国北方地区即指严寒与寒冷地区，其冬季时间比较长，采暖期为3个月，因此生活用能中采暖耗能占有更大比例。据调查统计，北方农村能源消耗占全国农村总能源消耗量的56%，且超过80%的农村能源消耗用于采暖需求^[2]。农村住宅冬季采暖，如果像城市那样采用集中供热的话，既不经济，也不现实。北方农村常规生物质能源很多，且易获取，尤其是秸秆等收获庄稼的剩余物更是能起到废物利用的作用。根据资料显示，我国农村每年产生的秸秆、薪柴等生物质能源总量约6亿吨，其中约60%用作燃料供采暖与炊事^[3]。因此，北方农村常见的火炕、火墙等可采用生物质能源的采暖方式更符合农村生活习惯，也较为科学合理保证了供热采暖要求。其中，火炕是应用最广泛的采暖形式。据农业部统计，2004年底中国大约有6685万铺炕，近4364万户农村家庭使用(约 1.75亿人口)，平均每户约有1.5铺炕^[4]。2006年清华大学对北方农村地区家庭能源与环境状况调研也发现，华

北地区炕使用率为73.3%，西北地区为86.3%，东北地区达96.2%^[5]。

(1) 北方农村各种采暖方式及建筑用能情况

① 北方农村各种采暖方式

人们为满足生产与生活时的热舒适，首先要求保持一定的室内温度，而室内温度的高低在于建筑物得失热量的多少。在冬季，当失热量大于得热量时，就需要通过室内设置的供暖系统以一定方式向室内补充热量，以维持所需要的室温，在该室温下达到得热量与失热量的平衡。其次，环境辐射温度也是影响人们生产与生活时热舒适性的一个主要原因，因此维持一定的室内平均辐射温度也是很重要的。在冬季，为了使室内平均辐射温度达到一定的高度，就需要通过室内设置的供暖系统提供某一面或某几面的较高温面。我国北方冬季寒冷，要研究其农村传统民居的冬季室内热环境，就必须从研究其采暖方式入手。

1) 火炕采暖

在我国北方寒冷地区，利用火炕采暖是广大劳动人民智慧的结晶，多年来，人们逐渐形成了以火炕为中心的生活方式。火炕和房屋建筑密不可分，充分地利用了做饭炉灶余火产生的烟在炕洞内回旋时的热能将炕烧热，从而使室内得到一定的温度。即使室外零下 30 °C ~ 40 °C 的温度，只要室内有一面火炕，即可保持室温，又成本低廉。火炕是北方农村民居常用的采暖设施，是一种巧妙地重复利用能源的方式，如图 1.1。传统的火炕一般是用泥坯与砖块砌成，炕头连接灶，内设烟道，通过煮饭炒菜的余温加热炕。这其中，炕和灶分别充当储热空间和燃

烧空间。经济条件稍充裕的人家在炕的一侧直接生火炉，一方面直接取暖，同时可以通过炕洞跑烟，最后从屋顶烟囱出气，一路用余热加热炕。火炕充分利用了炉灶出口烟气的余热，其热过程物理模式类似于自然通风。炊事时，厨房空气在热压作用下进入炉灶，同时室内空气中的污染物及泄漏烟气也由气流通过炉灶带出，热烟、气流经炕体烟道加热炕板，最后由烟囱排出室外。非炊事期间，积蓄在炕体内的热量以对流和辐射的方式通过炕体表面传入室内，这时常用烟插板将烟道出口封死，阻止烟气流动，进而减少炕体内部热量的损失。火炕用的燃料种类甚多，在山区多用元木或窑柴。燃料除木柴以外有很多种类。例如，一切五谷的蒿秆类和其它可燃性物品都可用做烧炕的材料，特别是在东北地区，用五谷蒿秆类来烧炕不但经济，同时，也可对当年的茅草与秆类进行一次清除，一举两得。

火炕的种类甚多，如果按照位置分别，在正房前面的叫做南炕，在北面的叫北炕。满族住宅正房内有西炕，名为“卍”字炕。“卍”字炕是由南炕和北炕接连的小炕，其中做为火道的通路。厢房内火炕的叫法按方位分东炕、西炕。此外，在房少人多的住宅中，多沿着山墙建设长炕俗称“顺山火炕”，顺山火炕在旅店使用比较多，因为它可容纳很多人。在蒙古族人家，将西炕和北炕接连起来而不设南炕，这种形式称为“拐巴炕”，这是当地蒙古族的习惯。还有达斡尔族“介子房、蔓字炕”、朝鲜族“满地炕”等。

2) 火墙采暖

火墙在中国有着悠久的历史，陕西西安阎家村汉代建筑遗址的炉灶，其排烟道则先曲折，后直上，通于户外，近似现代的火墙。火墙与火炕类似，是北方传统民居冬季采暖的一种方式，在冬季利用炉灶内的烟气通过并加热立砖砌成的空

心短墙，从而提高平均辐射温度与室内温度，进行采暖。

火墙运用热空气密度轻上升的原理，通过灶炉产生烟气，将热量带入火墙体的中空层。热烟气通过蜿蜒的烟道在墙内流程时间越长，则火墙体蓄热时间越长，其对热量的热效率就会越高，而且加热墙体会更均匀。由于火墙体材料热阻值相对较低，其从烟气中获得的热量通过对流与辐射的方式传递给室内空气与其他各表面。

比起火炕，火墙供热对室内空间更加立体，而墙体的构造要求也更高。因此室内空间布局不合理，或者外围护结构的保温做的不够，以及火墙材料选取的不合适都会对火墙使用时对人的热舒适产生影响。

火墙与火炕一样，能充分利用炉灶出口烟气的热量改善室内热环境。炉灶内的空气经加热成为高温气体，经火墙体内烟道加热墙体，墙体再以对流与辐射的形式将热量传递到室内，最后热气在炕体烟道内过一圈将大部分热量传出之后从烟囱排出室外。因此，火墙与火炕的传热机理是一样的，同样扮演一个“热量传递员”的角色，墙体内表面与烟道内高温气体换热得热，然后将得到的热量经墙体外表面传递给室内。

3) 土暖气采暖

土暖气是一种不用任何动力设备，依靠自然循环作动力的暖气系统。专业说法叫自然(重力)循环热水供暖系统:系统由一个加热中心(锅炉)与一个冷却中心(散热器)，用供、回水路将散热器与锅炉连接起来。其原理是依靠水在循环流动过程中，供水与回水由于温度差的存在所产生的密度差作为循环动力的。北方农村家用土暖气是各户利用生火做饭的余热，加热炉灶内设置的土锅炉内的水，而

后使加热过的水流至各房间的散热器上，从而使房间达到取暖效果的重力循环热水供暖系统。因此可以说土暖气是重力循环采暖工程的微型化，适合单家独户烧火采暖。它具有投资小、不用集中管理和使用灵活等优点。与农村其他采暖方式比，不仅可改善室内卫生条件，也可以防止室内火炉产生的烟尘等污染物危害人体健康。

土暖气也与火炕一样，能充分利用炉灶出口烟气的热量改善室内热环境。家用土暖气一般是各户利用生火做饭的余热，加热炉灶内设置的土锅炉内的水，而后使加热过的水经热水管道流至各房间的散热器内，经散热器内加热散热片，散热片再主要以对流的形式将热量传递到室内空气，提高室内空气温度。热水在散热器内流一圈将大部分热量传出之后，再通过回水管道流回锅炉重新加热，循环反复。

4) 火炉采暖

火炉采暖一般是采用煤炉和柴炉来取暖，是利用煤炉、柴炉烧水，产生的热量一部分通过加热水与室内空气进行热交换，另一部分烟气热量由自制的铁皮管道表面散向室内，最后经过管道末端排到室外。其火炉部分类似土暖气中的锅炉的作用，为提供热量的部件，铁皮管道类似于土暖气中的散热器的作用。它们的区别在于土暖气是通过水流的原理，而火炉取暖是依靠水蒸气的散发；土暖气提供热源的部件即锅炉，是放在需采暖房间的外部，而火炉取暖的火炉是放在需采暖房间的内部，因为其本身也作为一个热源直接向室内散发热量。

5) 吊炕采暖

炕的设计和搭建主要源于经验，“架空炕”是目前最具代表性的先进的火炕形式，是新式炕模式的代表，俗称“吊炕”（见图1.19）。

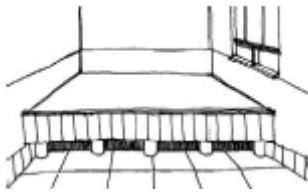


图1.19 吊炕

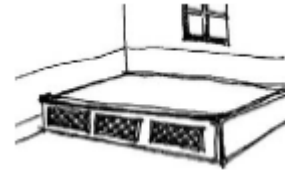


图1.20 苏式火炕

新式炕的炕灶按照燃烧和传热的科学原理，合理地进行设计：对炕灶的热平衡和经济运行进行了优选，改革了炉膛、锅壁与灶膛之间相对距离和吊火高度、烟道和通风、炕内结构等，并在炕灶方面增设了保温措施，提高了余热利用效果，扩大了火炕的受热面和散热面。因此，新式炕灶结构合理，通风良好，柴草燃烧充分，炉灶上火快，传热和保温性能好，炕灶热能利用率达到 50 % 左右。吊炕的特点：增加下表面散热，使下表面散热能对人体舒适性做出贡献。强化侧墙表面散热，不与人体直接接触，温度可较高，散热强度高、升温快。辐射散热直接作用在人体，解决炕下冻腿的问题。有的地方还将炕的侧面设置散热罩，大大增强了热辐射效果（见图1.20）。吊炕的设置：吊炕不宜过大，尽可能 3 面或 2 面通风，进而使下表面散发的热量进入人员活动区。吊炕热得快凉的也快，宜布置在热负荷较小房间。落地炕烟道下部宜铺 20 mm ~ 30 mm 干土，起保温隔热作用。其中，极具代表性的是吉林省扶余县弓棚子镇广发村的苏向君发明的“苏式火炕”，开创了当地农村民居建筑的一种新模式。其采暖最具特点，屋里火炕的炕沿下墙面，留出了一条过烟通道，在屋外掏了一个灶口，天冷时，只需把农村随处都有的玉米秸杆、花生皮、碎稻草等填入灶口点燃即可，20多分钟后，不仅炕热，而且屋

内温度达 15 °C 以上，整个冬天不用烧暖气取暖，可节约 1 t多煤，农作物的废弃物变成了“宝”，既清洁又省钱，炕内宽敞，排烟通畅，结构合理，炕温能做到按季节所需调解，温度适宜，不仅热效率高，而且外形美观，型为床式，深受广大农民群众的欢迎，被称为农民家中的“席梦思”。

综上所述，新式炕主要有以下特点：

(1) 热效率高，节能显著。经有关单位测试，“吊炕”的灶热效率由 14 % ~ 18 % 提高到了25 % ~ 35% ，炕灶综合热效率由45 % 左右提高到了 70 % 以上。每铺“吊炕”年节约 1 210 kg 薪柴或 1 382 kg 秸秆，相当于691 kg 标准煤。以每亩薪柴林在正常采薪的情况下，年产柴 500 kg 计算，建一铺“吊炕”相当于保护0.16 公顷薪炭林。

(2) 炕温均匀，能做到按季节所需适度调节，增加热舒适度。由于对炕、灶、烟囱采取了一系列技术改进措施，可以有效克服老式炕炕面温度不均、冬天凉得快、夏天散热慢的弊端，使炕温均匀，冬天保温效果好，热效长；夏天散热快，炕温低。

(3) 增加散热面，提高室温。由于炕底部架空、内部结构改进，炕体由原来的上部单面散热改为上、下、侧面等 3~5 面散热，有利于提高室内温度。据实测，在相同环境条件下，“吊炕”比落地式火炕能提高室温 4 °C ~ 5 °C 。

(4) 外形美观、卫生，可带动改厨、改院、村屯整治，提高农家生活环境质量。“吊炕”改变了老式炕灶粗陋不堪、烟熏火燎，柴草乱堆，木灰飞扬的状况，有利于乡村整洁工程的推进。

(5) 使用效果好，降低劳动强度。“吊炕”施工技术简单，搭砌容易，并且解决了老式炕灶不好烧、维护不便、年年扒砌、费工、耗柴等问题，节约砍柴工，

降低农民特别是农村妇女的劳动强度。

(6) 造价较低，原材料易获取。可根据自身经济条件及本地红砖、水泥、石料等炕板原材料生产情况，自由选材，依据原材料的不同，“吊炕”单体投资约 350 元~450 元，可持久使用；而老式炕灶虽然一次投资仅 260 元左右，要低于“吊炕”的投入，但基本上需要年年重建，总投入远高于“吊炕”。

6) 综合分析

分为以下几点来综合比较以上四种采暖方式：

(1) 能源利用率

火炕、火墙的能源利用率约为 60%，比火炉与土暖气的 40% 要高。火炉与土暖气能源很大一部分用于提升水的温度，而且需要很长的管道连接到室内，这当中损失也较大。

(2) 建筑空间利用

土暖气与火炉基本不用占用太多的地面空间与墙面空间；火炕占用一部分的地面空间，但它作为床的功能来使用，相当于在原本放床的位置放置火炕，对于空间的利用还是比较高的；火墙是这当中建筑空间占用最大的，因为火墙的高温，在火墙布置的一侧，家具等物件均需离开火墙一段距离布置，一般布置在其他非火墙面。综合以上分析，土暖气、火炉和火炕在建筑空间利用上的可采用性比火墙要高

(3) 安全性

土暖气由于操作和设计不当较易引起爆炸，火炉采暖操作不当较易引起煤气中毒，而火炕与火墙的采暖方式比较安全。综上分析，火炕与火墙在安全方面的

可采用性高于土暖气与火炉。

(4)对热环境的改善

它们作为热环境的一部分，都为热环境的改善做出了贡献。其中火炕与火墙不仅通过其较高温的炕面或墙面与室内空气对流提高室内空气温度，而且炕面或墙面本身对人还有热辐射的作用，也就是说火炕与火墙既能提高室内空气温度，又能提高室内平均辐射温度，而这两样是人对热舒适感觉的直接评价因素；土暖气与火炉虽然存在一定量的辐射效应，但由于其面积较小，只有在贴近暖气片或火炉的时候才能感觉到热量的辐射作用。因此在对热环境的改善方面，火炕与火墙更有优势。

传统火炕的缺点很多.如室内没有火炉，只有炕面的温度适宜居住，屋内其他各处的温度仍然很低.夏季火炕几日不烧火，炕内非常潮湿，日久可使火炕因潮湿而损坏.炕面和炕沿、炕面和墙的交接处，因干燥易于裂缝，且自缝内露烟污染室内空气，也可导致室内空气过于干燥.同时传统炕灶也存在通风不合理，锅台高，吊火高，添柴口大、灶膛大、进烟口大，无炉篦、无炉门、无挡火圈，无灶眼插板等缺点，常常导致炕不好烧，炕不热，屋不暖；要使炕热屋子暖，就得多搭炉灶，多烧燃料，造成费煤、费柴、费工、费时.

② 北方农村用能情况

目前北方农村建筑用能最突出的问题是冬季采暖用能。北方寒冷地区各省大多以煤为主要燃料，采暖方式多种多样，其中以煤炉居多占 37%。一些经济较好的地区也采用集中供热、电暖气等方式取暖。传统的火炕所占比例有所减少只有 18%。根据能源利用率、建筑空间利用、安全性、对热环境的改善等方面进行的

分析，火炕是这几种采暖方式当中最有优势的形式，尤其是现在新式炕模式的研究，比如架空炕等，对采暖方式的改善有重要意义。

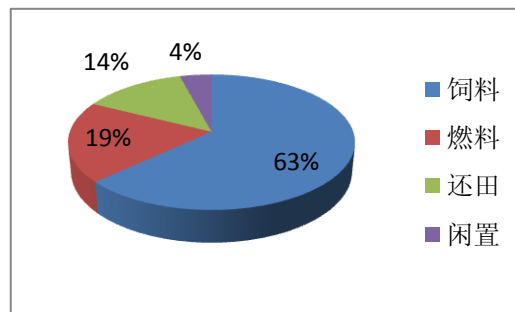


图 1.21 秸秆的主要用途

本次调研的农村地区家庭常住人口数主要为 4~6 人，主要种植农作物为玉米、小麦。当前农村秸秆生产量很大，除了用做饲料、炊事、粉碎还田，往往是丢弃或焚烧，不仅造成能源的浪费，而且破坏了环境。如果能将这些秸秆作为燃料使用，不仅能减少农村商品能源消耗，而且能有效利用资源，减少污染。秸秆固化成型燃料技术等新型可再生能源技术的应用可有效解决这一问题。

采用火炕采暖的农房内，常配合其它采暖方式共同使用，其中火炕与火炉联合使用的农户占的比例较大，农房冬季采用土暖气采暖的比例也比较大。电暖器、电锅炉等类的电采暖设施作为辅助加热热源，具有较大的上升趋势。东北、西北和华北地区的农村冬季基本靠火炕采暖；黑龙江、吉林、辽宁和河北四省区冬季采暖还有一定比例农户采用火墙，火墙大多与火炕配合使用；河南大多地区是非采暖的，农户很少采用火炕，主要以火炉和电采暖作为采暖设施。

山东、河北省农村住房多使用的取暖设施是火炕和煤炭炉，也有少部分土暖气。火炕主要使用农作物秸秆或枯枝作为取暖能源，煤炭炉和土暖气主要采用煤炭。近几年用电能取暖的农户有增多趋势，取暖电器类型有空调、电暖气、电暖风等。使用火炕的农户多是依靠炊事余热来维持室内温度，而其他农户多数只

在最冷的月份才启用取暖设施，靠煤炭炉或电器来保证整个室内大空间的温度，无法达到室内热舒适和空气质量要求。

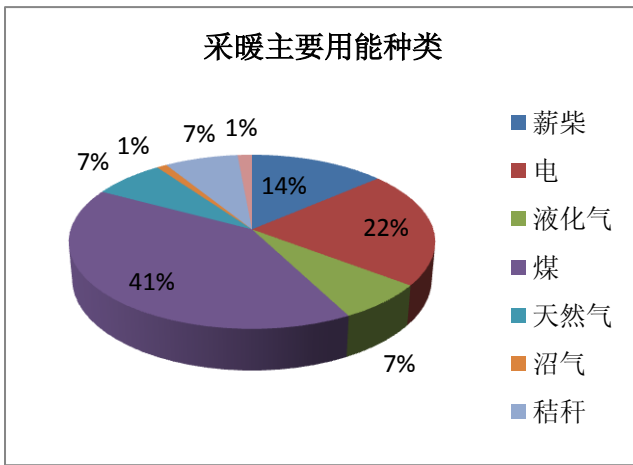


图 1.22 采暖主要用能种类

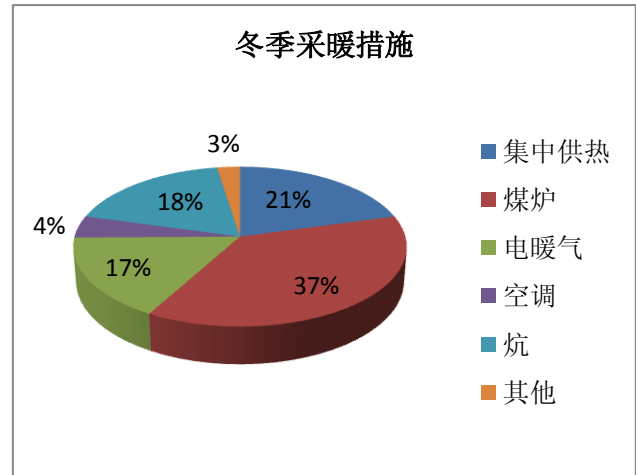


图 1.23 冬季采暖措施

据调查，目前北方农村采暖还存在许多问题，比如室内温度过低，污染严重等，并且农户在采暖上背负着沉重的经济负担。有研究指出，北方地区农房冬季室内温度普遍偏低，并且室内温度波动大，白天温度高于夜晚温度，不同农户的室内温度差距大。冬季大部分农户卧室白天温度范围为 5~10°C 和 10~13°C，如图 1.24 所示。大部分农户卧室晚上温度范围为 5~10°C 和 5°C 以下。室内温度高于 16°C 的农户较少；农房内卧室温度最高，客厅稍低，厨房温度最低。

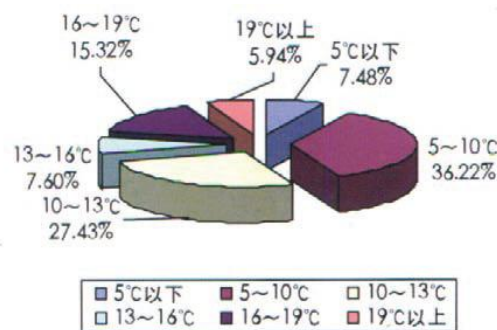


图 1.24 卧室白天温度分布比例

当采用燃煤作为采暖主要燃料时，由于建筑保温性能的恶劣和采暖系统的低效，尽管室温远低于城市，但耗煤量却比城市高。因此需要花较多采暖费用。大

部分农户每年花费 500 元以上用作采暖。而且根据调查，大部分农户在购买采暖设备考虑的主要因素是价格。

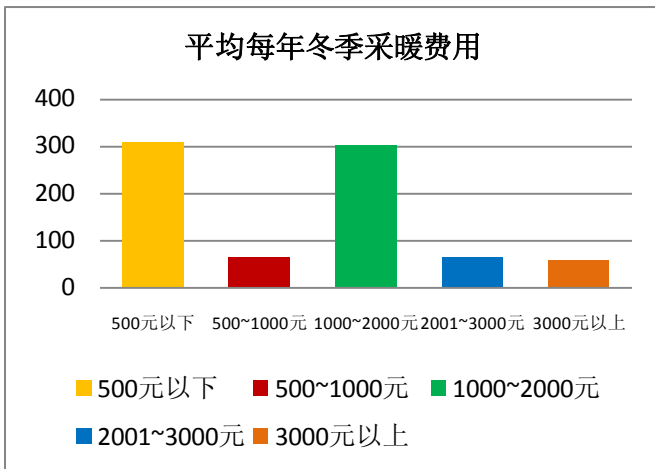


图 1.25 平均每年冬季采暖费用

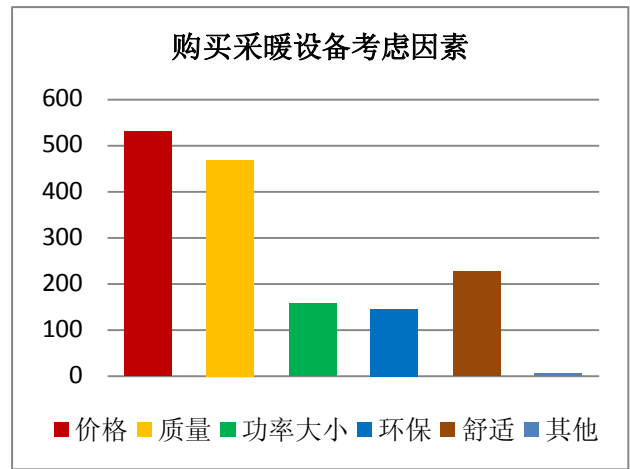


图 1.26 购买采暖设备考虑因素

因此，根据北方农村的特点，为了更好地解决采暖问题，需要解决以下问题：

1) 改造农村住宅，降低采暖负荷。改造建筑物形式，改造建筑的外墙材料，改善门窗和通风形式。改善建筑的热工性能是解决北方农村采暖问题的基础。

2) 采暖系统的问题。北方原有的火炕采暖方式目前有正逐渐被各种火炉所取代之势。然而，燃煤式火炉也同时带来过高的燃料负担和室内外空气的污染等问题。低燃烧效率也导致采暖煤耗量大大高于城镇建筑。但是按照城镇发展全村的集中供热显然是农村经济状况所不能支撑的，也是我国能源供应所不可承受的。因此在传统方式上推陈出新，既改善效果并解决空气污染问题，又能结合农村实际情况和经济水平，发展新型住宅采暖方式，是解决北方采暖问题的关键。

（2） 照明和家电用电

建筑照明和各类家电是农村建筑用电的主要形式。除个别边远地区采用太阳能发电、风力发电外，农村建筑用电主要依靠我国电网系统，随着农民生活水平的提高，照明和家电用量也在逐步提高。根据调研结果，接近 50%的农户平均每月用电量超过 60 度。然而，由于各种原因，目前农村建筑照明设施中白炽灯的使用率远高于城市，造成照明效率低，增加了农民的用电负担。因此应该把绿色照明工程适当向农村倾斜，对节约用电、减轻农民负担，都非常有效。

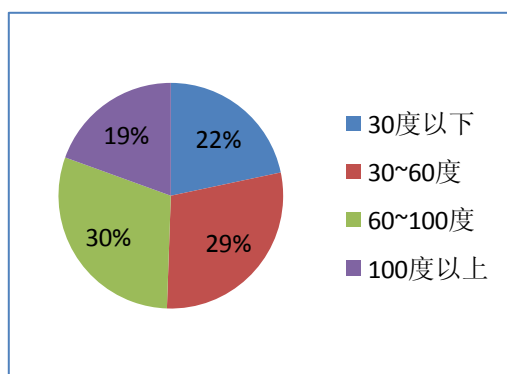


图 1.27 平均每月用电量分布

另外，继续鼓励因地制宜的小水电、风电发电，用这些分布式电源替代部分电网用电，对改善农村用电结构也有重要意义。

（3） 炊事用能

在一些地区炊事用能和采暖用能是结合在一起的，对大多数省份的农村家庭而言，炊事用能呈现多样化的趋势。目前农民厨房中的普遍现象是“三管齐下”，有烧柴的大灶，有烧煤的炉子，还有液化石油气炉具。液化石油气费用太高，而烧柴灶和燃煤炉的用能效率很低，并且造成严重的室内外空气污染。不同地区农户的炊事柴灶一年消耗的秸秆和薪柴量有很大差别，目前柴灶的能源利用效率非常低，低效的同时也造成对室内外环境的严重污染。

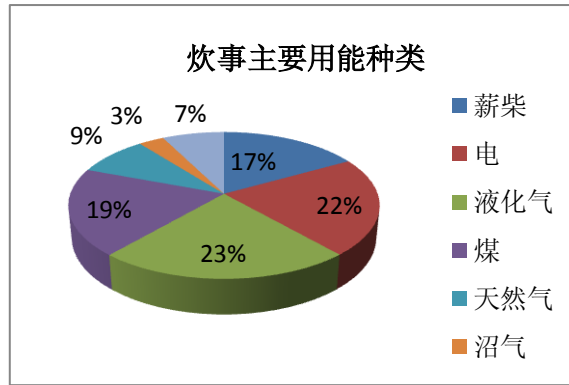


图 1.28 炊事主要用能种类

但是由于生物质在农村是免费能源，尽管能源利用低下，仍然是北方地区主要炊事用能方式。根据本次调研，薪柴秸秆的使用占比例最高，共 24%。由调研统计数据可以看出，商品能在农村炊事用能中的比例也较高。这与当地经济水平密切相关。在北京、天津等经济条件较好的地区，液化气已经成为当地主要的炊事燃料。

(4) 生活热水能

农村生活热水目前用量还比较低，且大多通过太阳能热水方式获得，根据调研结果，其他能源的使用形式也很丰富，但还是以商品能源居多。尤其是可再生能源在这方面的应用比例还很低。

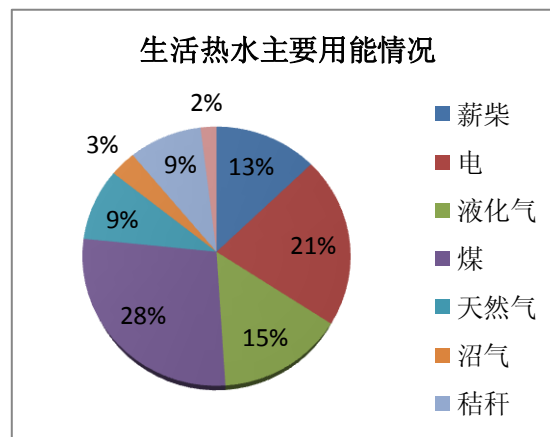


图 1.29 生活热水主要使用能源种类分布比例

(5) 夏季降温措施

目前北方农村夏季降温方式以电风扇为主，并辅以空调、开窗通风等方式，农村空调安装数量明显增多，但大多农户安装的空调台数在 3 台以下。对于北方农村，夏季降温能耗所占生活用能的比例很小。

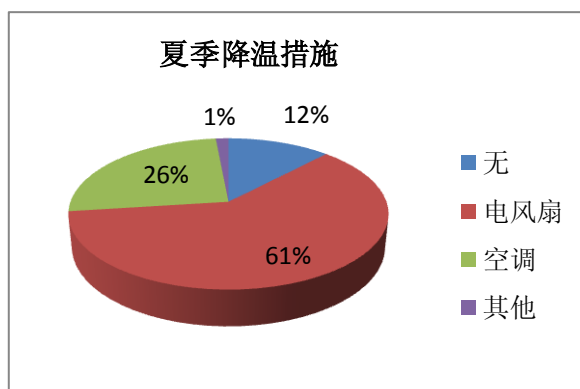


图 1.30 夏季降温措施

(6) 能源消费存在问题

经过调研及分析可以发现，目前我国农村建筑不仅能源消耗量大而且商品能所占比例较高。根据《中国农村能源统计年鉴》的数据显示，20 世纪 80 年代时，我国农村使用薪柴和秸秆等生物质能的比例还能占到 80% 以上，随着农村居民居住面积和收入水平的逐年增加，有能力购买一定数量的商品能源，是薪柴和秸秆等非商品能源逐渐被取代。长此下去，农民将不再满足于当前室内的舒适水平，如果还保持当前的围护结构状况，将室内采暖温度提高，商品能耗总量将大大提高，这无疑会对我国经济和社会的可持续发展带来沉重的压力。

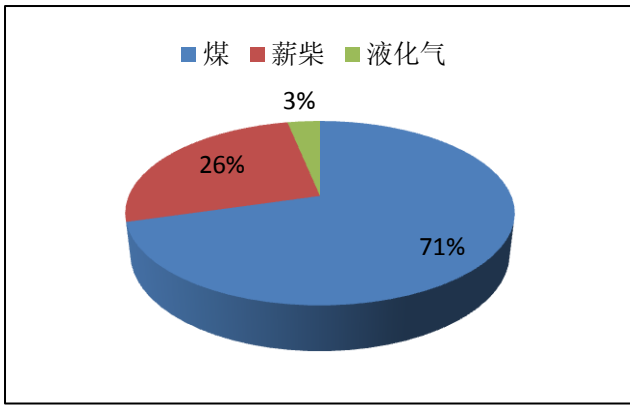


图 1.31 生物质消费比例

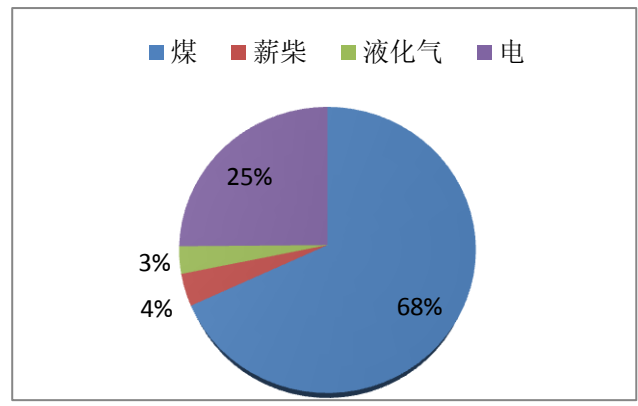


图 1.32 平均每月购买能源分布

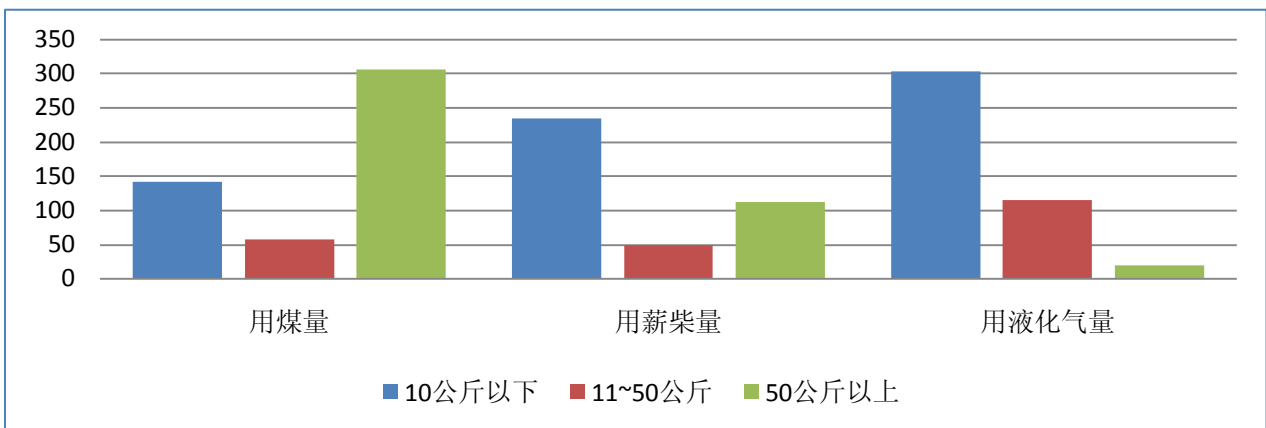


图 1.33 平均每月能源用量

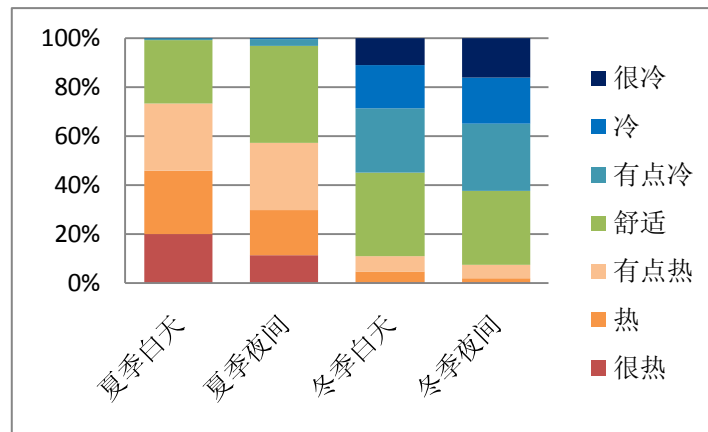


图 1.34 冬夏季室内热感觉

虽然农村建筑消耗了大量各类能源，但并没有得到舒适的室内环境，夏季的热感觉以及冬季的冷感觉仍然占大部分比例。一方面，由于我国北方地区农村住宅以独立式单体建筑为主，体形系数大，再加上保温不良以及采暖方式落后，冬

季室内空气温度过低成为室内环境的突出问题。另一方面，农宅存在大量非清洁能源的低效燃烧和不良生活习惯，比如煤炭、薪柴的直接燃烧，功能房间布局不合理，对农民的身体健康也造成一定伤害。大量商品能的消耗还给整个室外环境造成严重影响。

5. 存在问题分析

(1) 住房围护结构热工性能欠佳

在我国北方地区大量的农户采用实心粘土砖、普通混凝土砌块，且大部分墙体无保温。由于所使用的墙体本身保温性能较差，所以导致农宅冬季采暖能耗高且室内热环境较差。大部分农户的屋顶只做了抹水泥、贴瓦片等基本处理，由于北方气候寒冷，应考虑铺设保温材料，不仅可以降低采暖能耗，节约能源，也可以提高室内的热舒适性。根据调研结果，使用单框单层窗的比例最高，单层窗户传热系数大，造成了很大的建筑热损失。并且大量农户仍然采用普通玻璃，新型节能玻璃由于各种原因并未得到推广。导致北方农房冬季室内温度普遍偏低，居住舒适性差；室内污染严重，空气质量差；室内温度波动大，夜间温度低；室内湿度较大；冬季室内漏风；夏季室内通风效果差，室内温度较高，但夜间较为凉爽。部分住房门窗等质量较差，缝隙较大，冷风渗透严重，导致冬季室内温度低。寒冷地区农村住房室内温度波幅较大，早晚温度很低，通常在 10℃ 以下，夜间低至 5℃ 以下，即使采暖的卧室温度也只能维持在 10℃ 左右，有的农户甚至没有采暖设施，室内温度跟与室外温度相差无几。

(2) 遮阳设施使用不合理

大多数农户选择窗帘作为遮阳设施，这种内遮阳方式并不能有效阻挡太阳辐

射，改善夏季室内热舒适性，只是对室内最热时刻的延迟起到一定作用。而采用外遮阳的效果就比较好，尤其是在农村多以平房为主，树木、遮阳棚等方式较为有效。

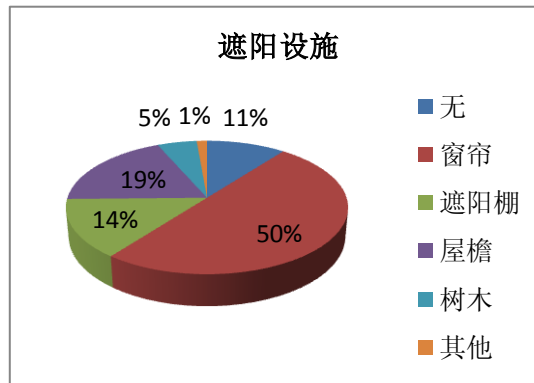


图 1.35 遮阳措施分布

（3） 缺少统一科学规划

北方地区村庄普遍缺少统一规划，整个村庄杂乱无章，基础设施的建设水平严重滞后于经济发展水平，村庄环境有待改进；农民缺乏建筑节能知识，导致建房仅趋于习惯，而不科学，出现新房子老样式，缺少节能保温措施。农房普遍由村民自建或雇佣零散的技术工匠进行施工，很少有专业从事农房建造的施工队，技术手段较低，施工质量得不到保障。农房的设计水平低，户型设计没有明显的改变，空间变化小，功能分区不明确；大量土坯结构房屋及 20 世纪 90 年代建造砖木结构存在安全隐患；大多数的农房窗墙面积比不合理；墙体材料单一，普遍采用实心粘土砖，新型墙材使用率极低。

（4） 取暖设施效率低及能源利用率低，室内环境质量差采

北方寒冷地区农村使用最多的是火炕、煤炭炉、土暖气、电暖气等分散式取暖方式，取暖设施存在热效率低、污染环境、使用不方便等缺点。当采用煤作为

取暖的主要燃料时，由于住房保温性能差和取暖系统效率低，不但室温远低于城市建筑，而且耗煤量比城市取暖能耗高约一倍；使用农作物秸秆或枯枝作为取暖能源时，燃料占地面积大，且造成室内脏乱。另外，目前农村地区使用的炉具和采暖系统设计不合理，致使室内空气环境污染严重。因此，根据北方寒冷地区农村住房特点，进行取暖设施节能改造，提高传统采暖方式的采暖效率，降低能耗，或采用洁净新能源供暖以提高能效并保护环境，是农村建筑节能领域需要研究的重要课题。

二、 中国北方农村地区用能需求及趋势

随着我国经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高，能源和环境问题日渐突出。北方农村能源消耗占全国农村总能耗量的 56 % ，且超过 80 % 的农村能源消耗用于采暖需求。炕作为北方农村地区最重要的采暖设施，炕在热效率、热性能等方面的技术突破，将对北方地区，尤其是寒冷的农村地区能源消费结构与生活方式产生深远影响，新式炕居模式的研究对于实现节约能源、降低污染，改善农村冬季居住条件提供了有效途径，具有一定的实践价值和经济效益。

1. 我国农村能源消费的总体特征

1) 中国农村地区的能源消费总量在不断增长，生活用能消费约占消费总量的55%左右。根据农业部的统计，2005 年消费总量为8.74 亿吨标煤，与2000 年相比，年增长率为5.4%。2006 年中国农村地区能源消费总量为9.17 亿吨标煤，比2005年增长4.9%，其中生活用能5.02 亿吨标煤，生产用能4.15 亿吨标煤。根据农业部的统计，2007 年中国农村地区能源消费总量为9.03 亿吨标煤，其中

生活用能为4.83 亿吨，生产用能为4.20 亿吨标煤。

2) 商品能源在农村能源消费的比重在不断提高，2007 年商品能源占消费总量的比例为67%，煤炭为主要的消费品种。农村商品能源消费约占全国商品能源消费总量的30%。

3) 秸秆和薪柴等传统生物质能仍然是农村生活能源消费中的主要来源。2007 年，在农村生活用能消费中，秸秆和薪柴二者之和所占比例为52%，煤炭占34%，电力占6.4%，沼气和太阳能热水二者之和所占比例为2.7%。

4) 农村生活用能消费的能源品种结构因地理区域和经济发展程度不同而存在较大差异。在经济较发达的地区，生活用能消费中清洁能源品种（如电力、液化石油气等）所占比例较高。5) 2005 年农村地区人均能源消费总量为0.96 吨标煤，其中生活用能消费为0.54 吨标煤。2007 年农村地区人均能源消费约1.0 吨标准煤，其中生活用能消费0.54 吨标煤。

2. 北方农村建筑用能需求现状分析

根据课题组对北方农村进行问卷调查，农户未来打算使用的能源以天然气、沼气居多。除了西部地区有丰富的天然气资源外，其他北方地区天然气资源不够丰富，基础建设花费较大。而广大农村拥有丰富的作物秸秆、禽畜粪便，将这些有机物转化成沼气，是一种利用生物质制取清洁能源的有效途径，同时又能使废弃物得到有效处理，有利于农业生态建设和环境保护。

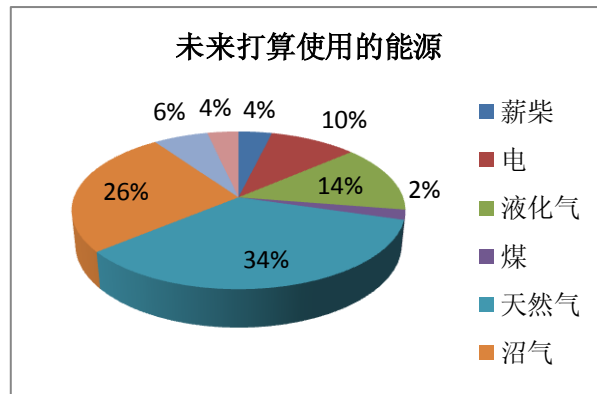


图 2.1 未来打算使用的能源种类分布情况

经过上述分析，北方农村用能现状形势非常严峻。但是受经济条件和能源供给能力的限制，在未来一定时间内，仍以化石燃料、生物质燃料为主要生活能源。与城市相比，我国农村拥有更广阔的空间，相对低廉的劳动力，丰富的生物质能源，反之，由于用能密度低，输送成本高，常规商品能源的成本又比城市高，因此农村能源采取的措施必须基于当地生产的秸秆薪柴等生物质能源的清洁高效利用，配合太阳能、风能和小水电等无污染可再生能源，再辅助少量电能，可以发展出一条可持续发展的农村能源解决途径。

近年来，随着农业的发展，农村农户分散养殖日益减少，规模养殖逐渐增加，以禽畜粪便为主要发酵原料的农村户用沼气建设受到了一定制约。为有效解决农村沼气池发酵原料不足等问题，农业部组织开发了秸秆沼气技术，以稻草等农作物秸秆为发酵原料。此技术虽然应用比例很小，但作为一项新技术推广前景还比较乐观，目前在河南、内蒙古已有部分应用。

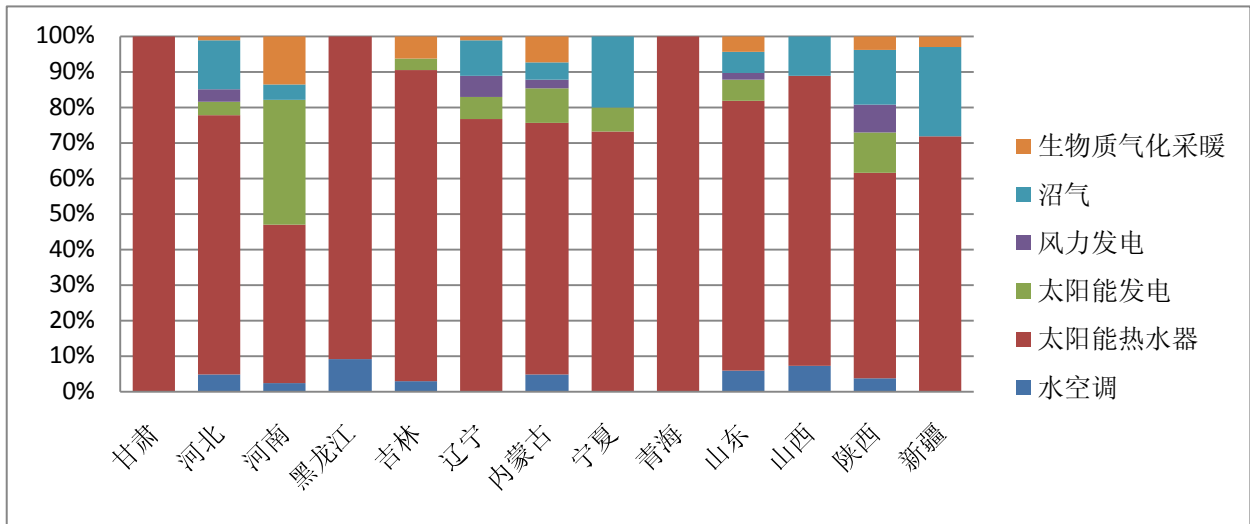


图 2.2 各地区可再生能源使用现状

可再生能源发展

经过调研，94%的农户愿意使用可再生能源，但是目前可再生能源的使用仍然存在很多问题，束缚其在广大农村地区的大力发展。

(1) 加大资金投入力度

根据调研结果，农户未使用可再生能源技术的最主要原因是成本高。这制约了各种可再生能源的大力发展。目前农村能源投资总量不足，且方向单一，主要支持农户沼气技术，其他农村能源开发利用技术专项投入较少。国家应加大对农村能源建设的资金投入力度。

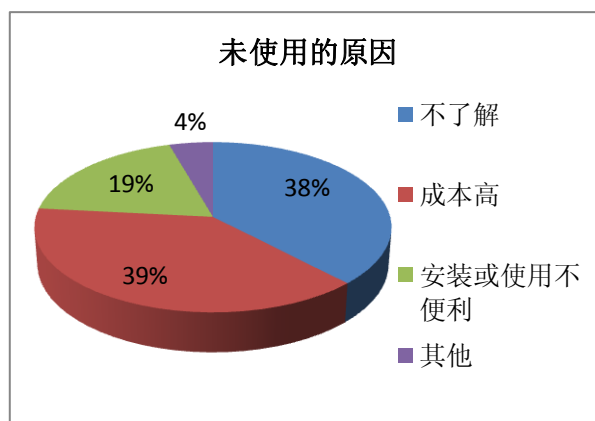


图 2.3 未使用可再生能源的原因分布

(2) 大力普及农村沼气

沼气以投资小、见效快、适应广、功能多的优势在我国迅速推广，秸秆沼气技术的突破又扩大了沼气适用范围。但是根据调查结果，沼气技术使用比例只有 8%，还很小，需要加大沼气应用体系的建设力度。

(3) 加大宣传力度，提高可再生能源技术的普及

由本次调研发现，大家对太阳能的了解较多，而生物质能、地热能等新兴的可再生能源了解还不够充分。农业农村节能减排工作意义重大，要充分利用各种宣传媒体，提高农户对可再生能源的认识。

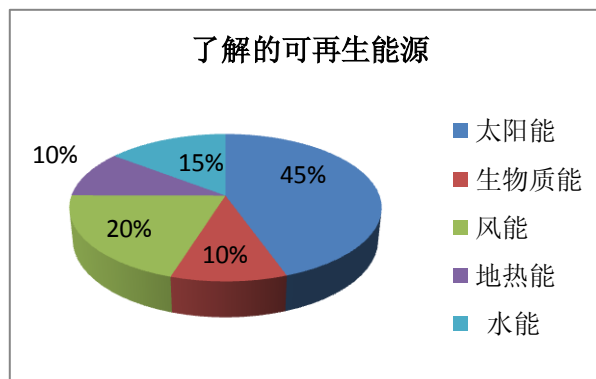


图 2.4 所被农村居民了解的可再生能源分布比例

3. 可再生能源新技术研究现状

北方地区幅员辽阔，农村可再生能源差异很大。在农区主要使用秸秆，牧区主要使用牲畜粪便，山地和林区主要使用薪柴。太阳能、风能、水能等也有鲜明的区域富集性，但开发程度低。

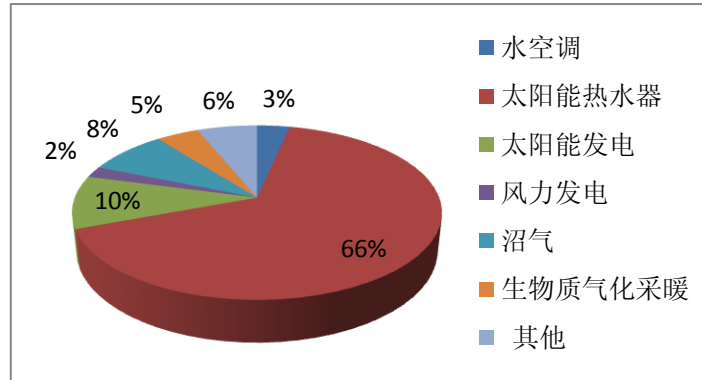


图 2.5 农村居民正在使用的可再生能源技术分布比例

(1) 农村可再生能源现状

1) 近年来，农村沼气建设受到中央政府的高度重视，将其列入国债项目给予重点支持。2006 年底，全国农村户用沼气总数已达到 2200 万户，占全国总农户的 9% 左右，年产沼气约 85 亿立方米，7500 万农民直接受益。

2) 我国有着十分丰富的太阳能资源。太阳热水器的生产和使用自 20 世纪 90 年代后期迅速发展，2006 年，全国太阳能热水器生产能力达到 1800 万平方米，累计使用量达到 9000 万平方米。目前，太阳能热水器技术的推广应用在中国已经完全商业化，生产能力和使用面积居世界第一。太阳能热水器已进入农村家庭，2006 年农村地区使用面积约 4000 万平方米，受益人口超过 1.2 亿人。

3) 目前，全国约有 20 万台小型风力发电机用于边远地区居民用电，总容量约 2.5 万千瓦。到 2006 年底，全国已建成约 80 个风电场，装机总容量达到 260 万千瓦。按照全国平均 2000 小时的风电等效满负荷运转计算，2006 年风电上网电量约为 25 亿千瓦时。

4) 到 2005 年底，全国农村水电装机达到 4380 万千瓦，年发电量 1380 亿千瓦时，占全国水电发电量的 34.9%。

5) 2006 年底，全国生物质发电累计装机容量 220 万 kW，其中蔗渣热电联

产170 万kW；农林废弃物、农业沼气、垃圾直燃和填埋气发电50 万kW。

全国可再生能源建筑应用示范县分布图



图2.6全国可再生能源建筑应用示范县分布图（2011年止）

表2.1：可再生能源建筑应用示范推广面积情况(截至2011年10月)

年份	太阳能光热建筑应用面积	地源热泵建筑应用面积	太阳能光热与地源热泵结合系统	太阳能浴室	被动式太阳房
2009	6540	4516	2037	427	44
2010	8120	4947	1515	325	92
2011	6307	3757	2900	228	84
合计	20967	13221	6453	980	220

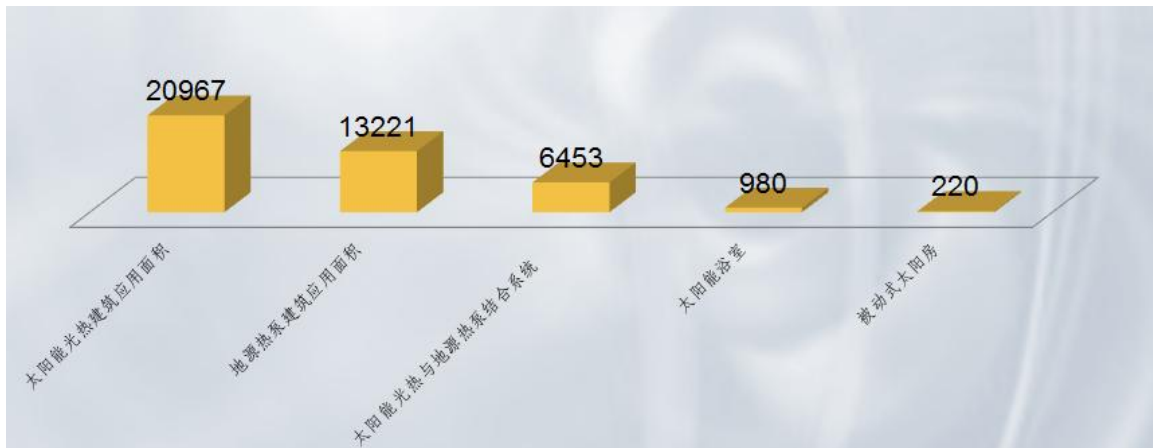


图2.7 2009-2011年可再生能源建筑应用示范应用面积统计（万平方米）

根据农业部统计数据，2006年各省区农村可再生能源开发利用情况如表 2.1 所示。

表2.2：各省农村地区可再生能源建筑应用情况

省 区	沼气		太阳 热水器 (万 m ²)	太阳房 (万 m ²)	太阳灶 (台)	太阳电池 (kW)	微水电 (kW)	小风电 (kW)
	(万 m ³)	其中： 沼气工程						
北 京	583	359	49	11	2764	2028	0	0
天 津	291	1177	23	0	0	0	0	0
河 北	65268	1078	439	153	5206	239	30	0
山 西	6533	348	374	0	353	0	0	121
内 蒙	2519	69	15	158	12557	0.49	4775	0
辽 宁	10313	305	109	402	891	200	16	0
吉 林	1324	218	17	216	411	1.6	44	0
黑 龙 江	2209	39	21	175	296	230	148	0
陕 西	15446	2	66	13	5411	0	14	19978
甘 肃	6257	45	42	181	578023	241	590	15560
青 海	1019	0	0	42	110810	665	131	8780
宁 夏	3037	24	16	6	114254	207	255	0
新 疆	3076	26	33	10	1747	229	2515	57
山 东	22075	8317	576	20	12858	21	472	72
河 南	73246	5699	146	1	10	0.56	21	8396

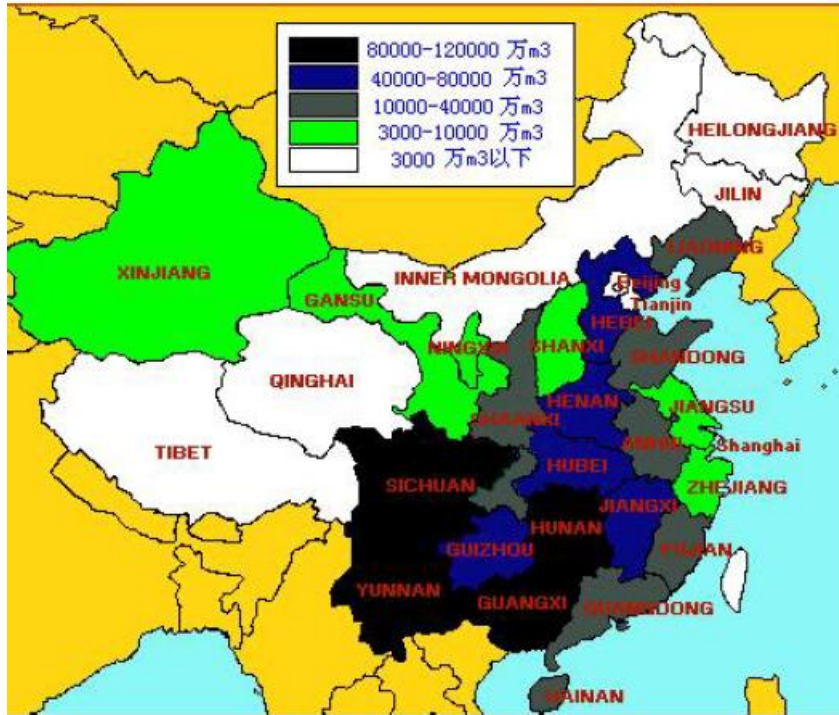


图2.8 农村沼气开发利用分省分布图（按2006年沼气产量）

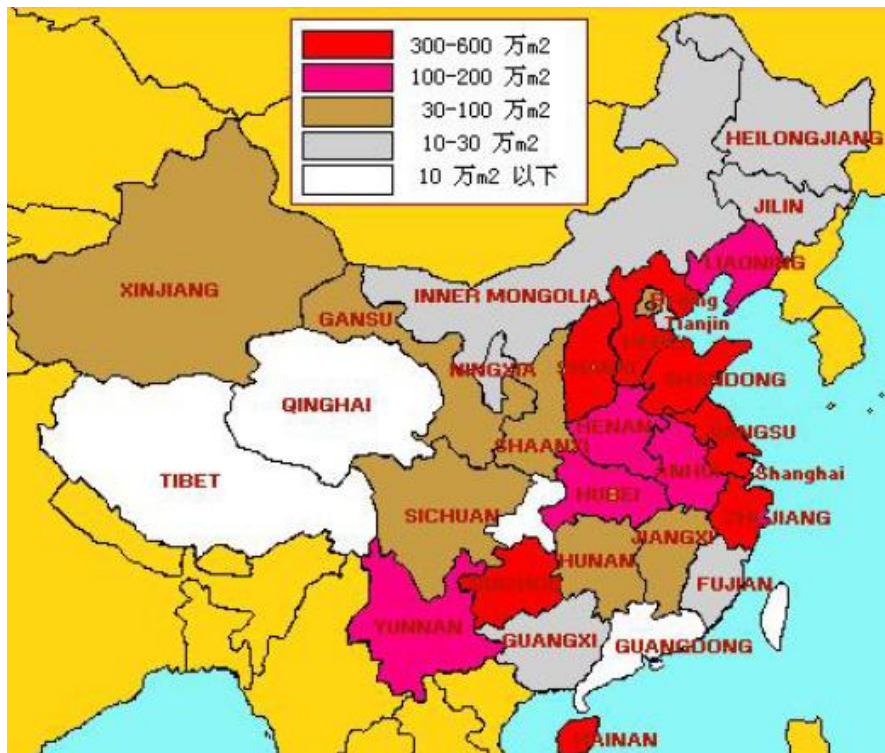


图2.9 农村太阳能热水器利用分省分布图（按2006年使用面积）

(2) 太阳能利用技术推广速度快

我国幅员广大，有着十分丰富的太阳能资源。据估算，我国陆地表面每年接受的太阳辐射能约为 $50 \times 10^{18} \text{kJ}$ ，各地的太阳年辐射总量达 $335 \sim 837 \text{kJ/cm}^2 \cdot \text{a}$ ，中值为 $586 \text{kJ/cm}^2 \cdot \text{a}$ 。

我国太阳能资源分布的主要特点有：太阳能的高值中心和低值中心都处在北纬 $22^\circ \sim 35^\circ$ 这一带，青藏高原是高值中心，四川盆地是低值中心；太阳年辐射总量，西部地区高于东部地区，而且除西藏和新疆两个自治区外，基本上是南部低于北部；由于南方多数地区云雾雨多，在北纬 $30^\circ \sim 40^\circ$ 地区，太阳能的分布情况与一般的太阳能随纬度而变化的规律相反，太阳能不是随着纬度的增加而减少，而是随着纬度的增加而增长。

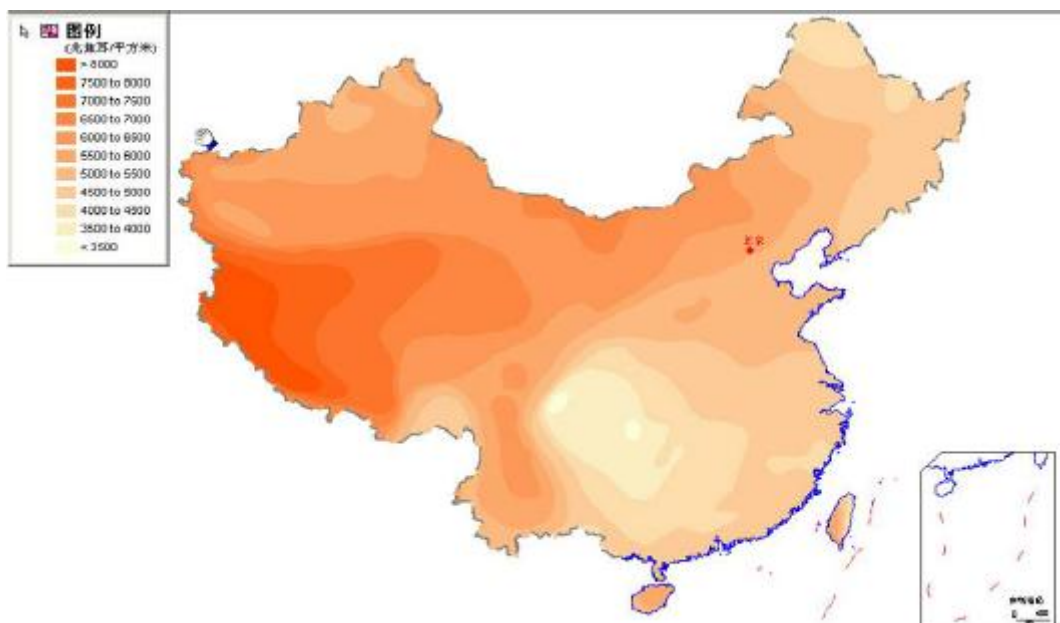


图2.10 中国太阳辐射密度分布图

根据调研结果可以发现，太阳能的使用较广泛，尤其是太阳能热水器，占的比例为 66%。国家通过市场拉动，积极推动太阳能热利用，有效扩大了太阳能热水器市场，使它得到了快速普及。

① 太阳热水器

我国太阳热水器的生产和使用自 20 世纪 90 年代后期迅速发展，产量由 2001 年的年生产量 820 万平方米增长到 2005 年的 1500 万平方米，年均增长 18.7%；总保有量由 2001 年的 3200 万平方米增长到 2005 年的 7500 万平方米，年均增长 22.6%。

太阳能热水器技术在中国已经完全商业化，生产企业有上千家，从业人员在 15 万以上。2005 年中国太阳热水器产业总销售额近 200 亿元，生产能力和保有量均居世界第一，产品已远销欧洲、东南亚、非洲等 30 多个国家和地区，出口额已由 2001 年的 600 万美元增加到 2005 年的 2000 多万美元。

② 太阳房

我国到 2005 年底已建成被动式太阳房 1,500 多万平方米，主要是被动太阳房；主动太阳房仅在北京、辽宁等个别地区进行试点，尚未批量建造。随着今后绿色节能建筑的发展，太阳房的应用将会得到进一步发展。

表 2.3 中国已建成被动式太阳房数量表

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
使用面积 (万 m ²)	970	1010	1105	1250	1360	1514	1395

数据来源：中国农村能源行业发展报告 2007--中国农村能源行业协会

③ 太阳灶

太阳灶目前在我国西部偏远地区仍有一定的市场，在今后一段时间内还会有一定发展，但需要设计制造出质量好、寿命长、使用更方便的农村用太阳灶。2005 年全国太阳灶使用和保有量约为 70 万台。

表 2.4 中国太阳灶使用保有量表

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
保有量(万台)	33.2	50	52.1	54.2	57.7	68.6	86.5

数据来源：中国农村能源行业发展报告 2007--中国农村能源行业协会

(3) 沼气在农村地区的应用

目前，农村沼气生产的主要资源是禽畜粪便。通过厌氧发酵技术，禽畜粪便

在制取沼气的同时，也转化为更加高效、优质的有机肥料。通过当地自然地理条件和农村经济发展条件等方面的因素进行综合分析，全国分散性的畜禽养殖农户中适宜发展沼气的约为 1.48 亿户，约占总农户数的 60%，其沼气生产的潜力超过 500 亿立方米/年。近年来，中国政府将农村沼气建设作为农村“六小工程”之一，加大了支持力度。2003 年以来，中央将农村户用沼气建设列入国债项目给予支持。2005 年中央继续以国债项目投资 10 亿元，在全国 27 个省(自治区、直辖市)及新疆建设兵团和黑龙江农垦的 721 个县 9,144 个村安排实施项目，有 104 万农户受益。

按地区类别计算(含重复部分)，退耕还林地区安排了 644 个项目县，投入资金占中央投资 88.6%；西部地区安排 363 个项目县，投入资金占中央投资的 55.37%；血吸虫等疫区安排 62 个项目县，投入资金占中央投资 16.11%。在沼气国债项目的示范带动下，全国农村沼气建设呈现加速发展态势。

1) 户用沼气池

2005 年全国新增户用沼气池 315 万户，实际利用数 1,715.9 万户，总产气量 70.6 亿立方米，年户均产气量 411.4 立方米；综合利用户数 1,124.96 万户。

2) 生活污水净化沼气池

2005 年运行数量 14.6 万处，总池容 636.91 万立方米，年处理污水 6 亿吨。

生活污水净化沼气池的推广，促进了农村和小城镇的环境治理，达到了不耗能、省投资、管理方便和达标排放的效果。

3) 大中型沼气工程

2005 年运行数量达 3,764 处，总池容 172.4 万立方米，年处理废弃物 1.2 亿吨，年产气量 3.4 亿立方米，发电 4 千万度，供气 138.4 万户。沼气工程的建设不仅促进了农业废弃物的综合利用，而且为农村居民和村办工业提供了能源，实现了沼液的综合利用，减轻了环境污染。

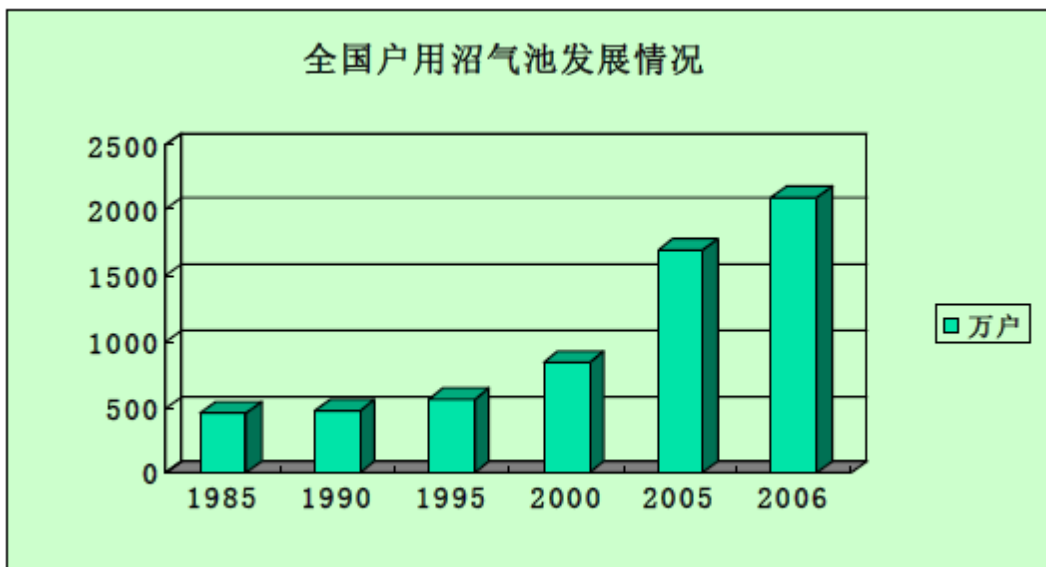


图2.11 中国户用沼气池发展情况

(4) 生物质技术逐步进入农户

生物质能作为可再生能源的一个重要组成部分，是仅次于石油、煤炭和天然气的世界第四大能源。中国是一个农业大国，每年的农作物秸秆加工剩余物的量极大丰富，生物质能在中国农村生活能源消费中占 60%以上^[1]。秸秆主要有五个方面的用途：一作燃料，二作饲料，三作肥料，四作工业原料，五作食用菌基料，简称“五料”。

1) 生物质秸秆资源

根据《中国生物质资源可获得性评价》，1995 年我国农作物秸秆年产出量为 6.04 亿吨，其中玉米秸秆 2.24 亿吨，小麦秆 1.40 亿吨，稻草 1.15 亿吨，油料作物秸秆 4500 万吨，豆类秸秆 2681 万吨，其它杂粮秸秆 1669 万吨，薯类 1631 万吨，棉花秆 1430 万吨。除直接还田和收集损耗约占 15.0%外，秸秆可获得量为 5.134 亿吨，用途大致分为三类：工业原料（主要用于造纸）约占总量的 2.3%；牲畜饲料约占总量的 24.0%；直接作为燃料使用的秸秆约占总量的 31.5%。；剩 28 余的秸秆约占总量的 27%，多数被闲置浪费或就地焚烧。

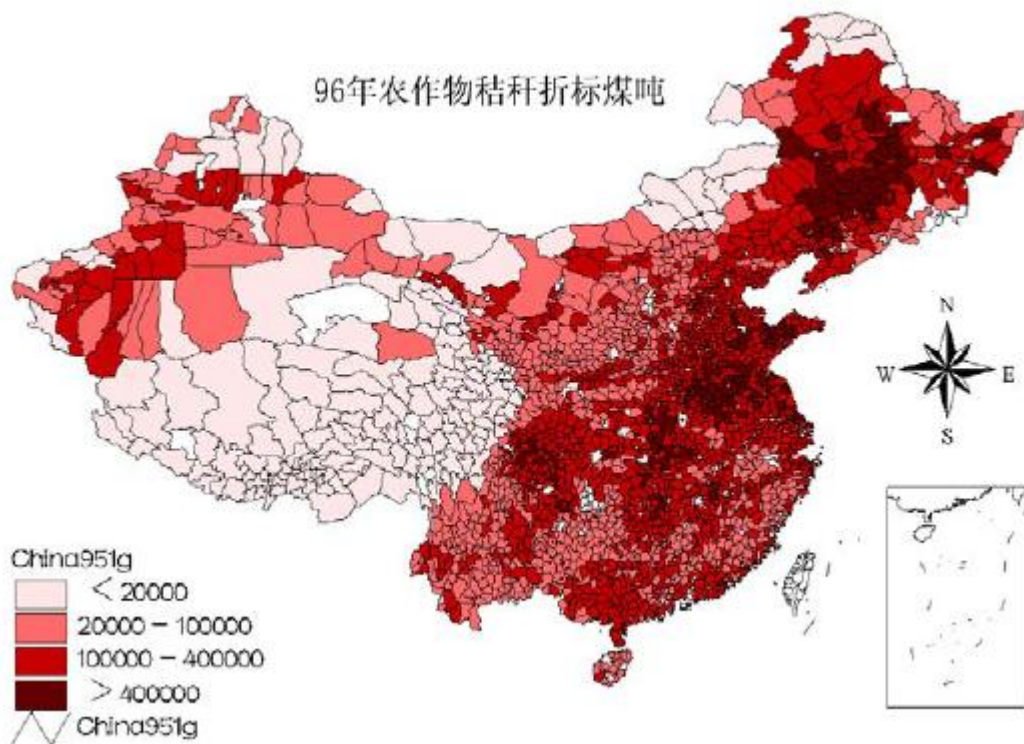


图2.12 中国农作物秸秆分布情况

2) 薪柴资源

1997 年，我国的森林覆盖率仅为 13.9%，人均有林地面积仅 1.7 亩，在世界上排第 120 位以后。目前中国每年消耗于薪柴的数量约占森林总消耗量的

32.5%，但薪炭林资源只能供应所需薪材总量的 75%，薪柴采伐超过合理采樵量的 30%。

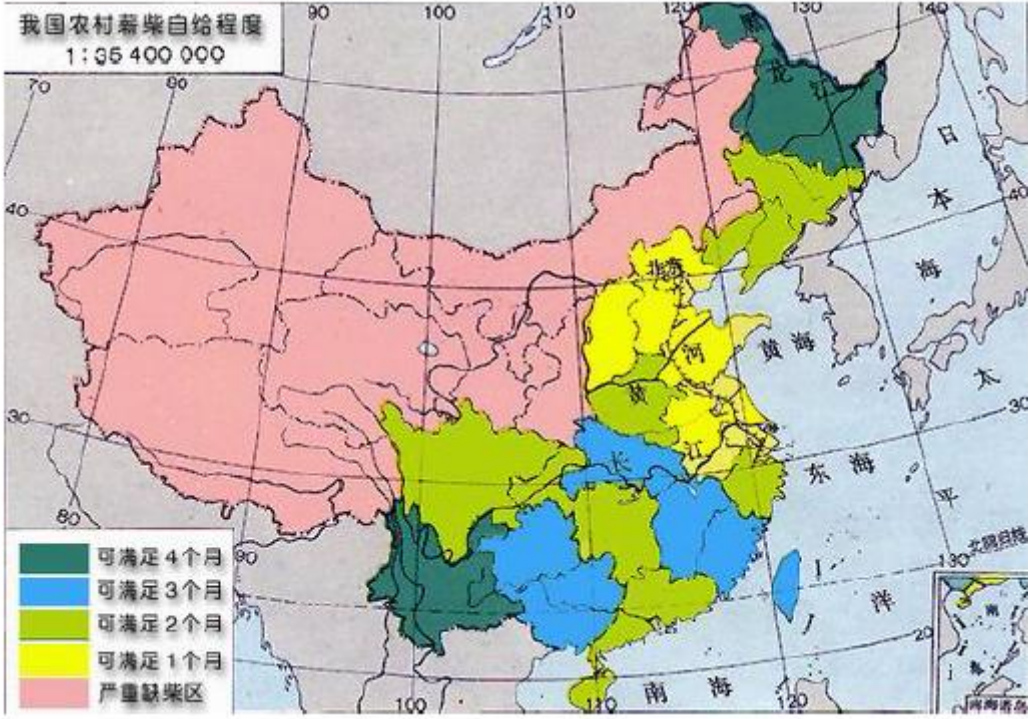


图2.13 中国农村薪柴自给成分布图

过度的薪柴消耗，致使森林植被大面积破坏，水土流失严重，引起区域性气候、环境恶化；大量秸秆被燃用而无法还田，使得土壤有机质减少，土地生产能力下降；生物质能作为燃料过度消耗，引起生态环境的严重恶化。

3) 生物质能开发利用技术现状

到 2006 年底，全国生物质发电累计装机容量 220 万 kW，其中蔗渣热电联产 170 万 kW；农林废弃物、农业沼气、垃圾直燃和填埋气发电 50 万 kW。2006 年，国家和各地共核准 39 个生物质直燃发电项目，总计装机容量 128.4 万 kW，投资预计 100.3 亿元。2006 年完成生物质气化及垃圾填埋气发电 3 万 kW，

在建的有 9 万 kW。

一是生物质气化。我国已开发出多种固定床和流化床小型(兆瓦级以下)气化炉，以木屑、稻壳、树枝、秸秆等为原料生产燃气，热值为 4~10 兆焦/立方米。目前用于木材和农副产品烘干的有 800 多台，村镇级秸秆气化集中供气系统近 600 处，年产生物质燃气 2,000 万立方米。兆瓦级生物质气化发电系统已推广应用 20 多套。

二是生物质液体燃料。我国从上世纪末开始发展生物燃料乙醇。“十五”期间，在 4 个试点省生物燃料乙醇年产量达到 102 万吨，目前已发展到 9 个省销售车用乙醇燃料。为扩大原料来源，国内自主开发了以甜高粱茎秆为原料生产燃料乙醇的技术。近年来，在全国各地试种的杂交甜高粱，均获得高糖高产。其茎秆产量每亩 4 吨以上，茎秆汁液锤度 (Brix) 18 以上，籽粒产量 600~800 斤以上。目前全国已经有数十家生物柴油生产企业，年产量超过 10 万吨。

三是生物质成型燃料。生物质固化成型燃料是将作物秸秆、稻壳、木屑等农林废弃物粉碎后，送入成型器械中，经外力作用压缩成需要的形状，然后作燃料直接燃烧，也可进一步加工形成生物木炭。固化成型的燃料便于存贮和长途运输，易于实现大规模产业化生产和供应等特点，用户使用较为方便。我国研究和开发出的生物质固化成型机也已应用于生产，生产的致密成型燃料，也已应用于取暖和小型锅炉。

四是生物质直燃发电。2003 年以来，国家发展改革委先后批复了江苏如东、山东单县和河北晋州 3 个国家级秸秆发电示范项目。据不完全统计，到 2006 年底，全国在建农作物秸秆发电项目 34 个，分布在山东、吉林、江苏、河南、黑龙江、辽宁和新疆等省(区)，总装机容量约 120 万千瓦；山东单县、江苏宿迁

和河北威县三座发电站已投产发电，总装机容量 8 万千瓦。

但是，随着农村人口不断增加和生活水平不断提高，北方农村居民逐渐告别冬季传统的采暖方式，商品能的普及率大幅提高，使得秸秆过剩的现象严重。2005 年，我国秸秆总产量 84183 万吨，其中可收集利用秸秆量占 81.48%；秸秆田间残留量占 18.52%。2005 年在我国可收集利用秸秆总量中，直接燃用量占 34.90%；饲用量占 25.74%；废弃和焚烧量占 20.70%；直接还田量占 9.81%；工业加工利用量占 6.71%；食用菌栽培利用量占 1.46%；新能源开发利用量占 0.69%^[2]。大部分被直接燃用和焚烧，能源利用效率低且产生大量的废气污染物向大气排放。在常规能源总量约束条件下，如果中国农村延续城市的发展模式，以城市居民的能源消费为模板，七亿多的农村居民的能源消耗将导致中国经济难以为继。

(5) 生物质秸秆气化采暖技术在农村地区的应用

生物质气化采暖技术主要分为两个部分：生物质颗粒燃料制造、生物质气化采暖系统。生物质颗粒燃料制造过程主要包括秸秆粉碎和挤压造粒。生物质气化采暖系统主要通过生物质颗粒燃料在炉体里面气化产生大量可燃气体，可燃气体的燃烧提供热源。



① 某农房生物质气化采暖系统能耗分析

1) 农房概况

该农房位于甘肃省榆中县，地处甘肃中部。建筑的供暖面积为 60.24 平方米，

客厅与卧室一，砖混结构，共一层，墙体未做保温，外墙传热系数为 $k=1.9W/(m^2 \cdot k)$ ，门窗采用铝合金中空双玻窗。生物质气化炉位于农房的厨房内，仅对客厅与卧室一进行供暖，如图 1 所示。

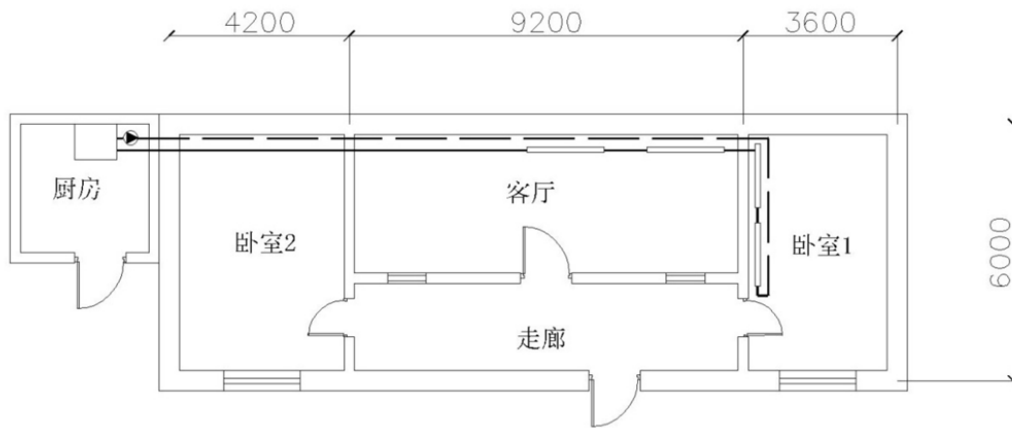


图2.14 某农房建筑采暖平面图

2) 建筑热负荷

表 2.5 房间采暖负荷统计

房间	面积 (m ²)	设计温度 (°C)	总热负荷 (W)	总采暖指标 (W/m ²)
客厅	33.12	19	1865.77	56
卧室 1	21.6	20	2693.55	125
汇总	54.72	\	4559.32	\

3) 生物质颗粒生产能耗

当地玉米秸秆在加工过程中，除去秸秆中的水分及尘土后，1kg 秸秆原料可产生 0.9kg 秸秆颗粒燃料。秸秆粉碎机的单位功率生产量：生产 1000kg 秸秆颗粒，秸秆粉碎机的耗电量为 34kWh。颗粒制粒机的单位功率生产量：生产 1000kg 秸秆颗粒，颗粒制粒机的耗电量为 86kWh。

即生物质颗粒生产能耗 $W_T = \text{秸秆粉碎能耗} + \text{颗粒制粒能耗} = 120$ (kWh/吨)

② 测采暖系统能耗

对该农房冬季采暖运行情况进行了实测，随机选取其中一天的系统运行情况进行分析。该天白天室内外温度变化情况如图 2.16 所示，可以看出客厅室内温度在 18℃上下变动，基本满足冬季热舒适温度要求。而卧室室内温度在 18℃至 19℃之间，在冬季供暖条件下 80%的人感到舒适的温度范围为 17.0 - 19.2℃，故认为该系统满足冬季热舒适温度的要求。该日生物质气化炉的供回水温度变化情况如图 3 所示，平均供回水温差大致为 8℃左右。

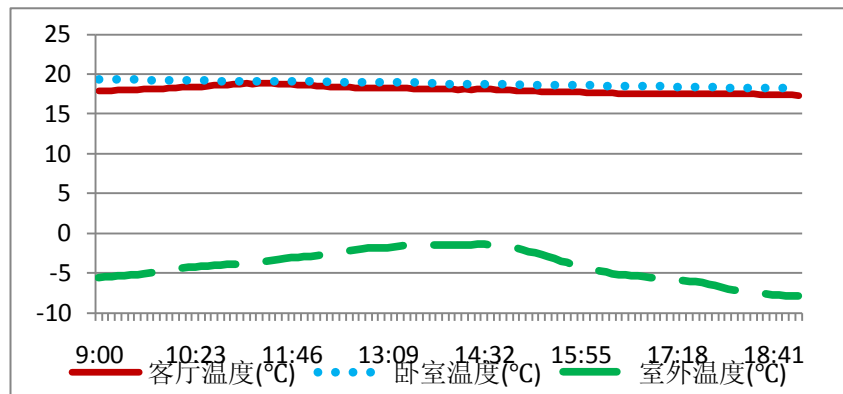


图 2.15 室内外温度

如水的比热取 $4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，气化炉的水流量为 $0.5\text{m}^3/\text{h}$ ，此时供回水的温差为 8°C ，秸秆颗粒的燃料热值为 $16800\text{kJ}/\text{kg}$ 。每小时燃烧秸秆颗粒为 2kg 。

生物质秸秆气化炉此时的制热量为

$$Q = cm\Delta T = \frac{4.18 \times 0.5 \times 1000 \times 8}{3600} = 4.64\text{kWh}$$

则生物质气化炉此时运行的热效率为

$$\eta = \frac{Q}{W} = \frac{4.18 \times 0.5 \times 1000 \times 8}{2 \times 16800} = 49.7\%$$

按照上述计算过程，可以得出各时刻气化炉的运行热效率，如图 2.17 所示。

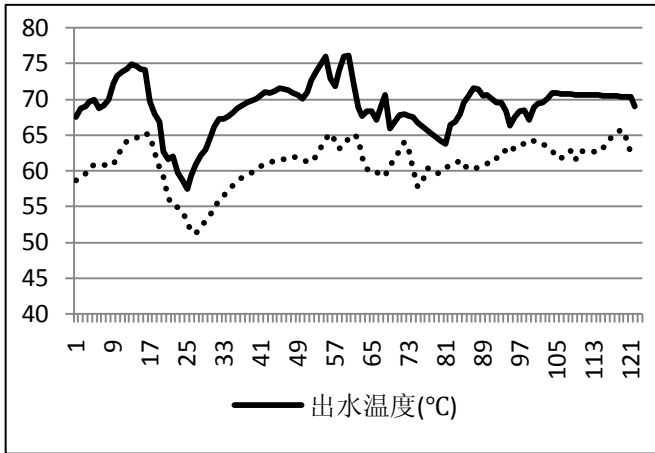


图 2.16 气化炉某天供回水温度变化情况

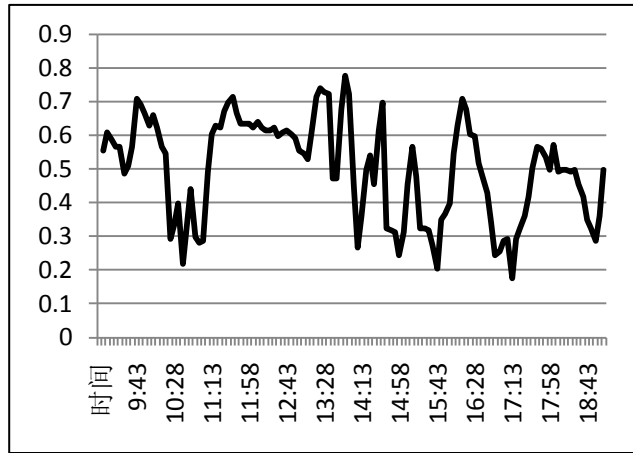


图 2.17 气化炉某天热效率变化曲线

③ 生物质气化采暖技术在北方农村推广的技术经济环境分析

1) 技术经济分析

该农房冬季采暖每小时需颗粒燃料约 2kg，系统 24 小时运行，冬季采暖期为 132 天，建筑面积大约 100 平方米的一户农家一个采暖季大致要消耗秸秆颗粒 $m = 2 \times 24 \times 132 = 6336\text{kg} \approx 6.3$ 吨。秸秆颗粒成本价约为 260 元/吨，平均每吨颗粒燃料销售价格 500 元。每人拥有秸秆 0.46 吨，一户人口约为 4 人，故一户拥有 1.84 吨，需要购买颗粒燃料 4.46 吨，需花费为 2230 元。

生产 1000kg 秸秆颗粒，秸秆粉碎机的耗电量为 34kWh，即单位功率生产量为 29.4kg/kWh；颗粒制粒机的耗电量为 86 kWh，即单位功率生产量为 11.6 kg/kWh。故生产 1000kg 秸秆颗粒共需耗电 120 kWh，即单位功率生产量为 8.33 kg/kWh。每度电 0.47 元，故 1000kg 秸秆颗粒需 56.4 元。

进出水温差取为 8°C ，则生物质秸秆气化炉每小时的制热量为 4.64 kwh ，则整个采暖期的需热量为 $Q = 4.64 \times 24 \times 132 = 14700\text{ kwh}$ 。每度电 0.47 元，如果用电提供相同热量需要 6909 元。若按标煤计算，需要标煤 1.806 吨，燃煤燃烧效率取 50%，价格为 1200 元/吨，实际需要 3.6 吨标煤，需 4300 元。若采用天然气，天然气价格 1.8 元/ Nm^3 ，取天然气的热值 $36\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ，需要天然气 1470Nm^3 ，需 2646 元。

表 2.7 生物质气化采暖与其他采暖方式的经济比较

采暖方式	生物质秸秆气化炉	燃气壁挂式采暖炉	煤炉	电采暖
初投资 (元)	3000	5000	1000	4500
每年采暖费用 (元)	2080	2646	4300	6909

如上表所示，生物质秸秆气化炉比其他采暖方式的运行采暖费用低，其初投资仅高于煤炉。生物质秸秆气化炉相对于煤炉，一年便可以收回初投资。

2) 环境效益分析

型煤的发热量为 $26.5\text{MJ}/\text{m}^3$ ，生物质颗粒燃料发热量为 $17.39\text{MJ}/\text{m}^3$ 。型煤所产煤气的热值为 $5.41\text{MJ}/\text{m}^3$ ，灰渣含碳量为 28.5%。生物质颗粒燃料灰渣含碳量为 12%。

表 2.8 生物质颗粒燃料和型煤的质量指标 (%)

	挥发分	固定碳	含硫量	含水量	灰分
生物质颗粒燃料	70.76	17.62	0.11	3.46	8.16
型煤	6.4	70	0.49	2.45	21

因此 1kg 生物质颗粒燃料中固定碳含量 C_1 为 0.1762kg。

表 2.9 生物质颗粒燃料和型煤的产气比例 (%)

	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
生物质颗粒燃料	12	1	20	9	12	52
型煤	7.5	0.24	22.24	16.2	2.3	5.52

设 1kg 的生物质颗粒燃料产气量为 $V \text{ m}^3$,其中所含的组分 CO₂ ,O₂ ,CO , H₂ , CH₄ , N₂ 的量各为 $V(\text{CO}_2)$, $V(\text{O}_2)$, $V(\text{CO})$, $V(\text{H}_2)$, $V(\text{CH}_4)$, $V(\text{N}_2)$ 。可以求得

生物质颗粒燃料产生燃气总固定含碳量为

$$\begin{aligned} C_2 &= 0.005356 \times (V(\text{CO}_2) + V(\text{CO}) + V(\text{CH}_4)) \\ &= 0.005356 \times V(12 + 20 + 12) \\ &= 0.2357V \text{ kg} \end{aligned}$$

应用杜勃罗霍托夫经验系数确定焦油中碳含量 ,焦油中碳量等于燃料中的氢量^[4] , 生物质颗粒燃料的中的氢含量为 9% , 那么 1kg 生物质颗粒燃料所产焦油中含碳量 C_3 则为 0.09 kg。假设生物质颗粒燃料煤气带出物料量按 5% 计算 , 消耗 1kg 原料煤时带出物中固定碳含量 C_4 为 : $C_4 = (1 \times 5\%) \times 17.62\% = 0.0018\text{kg}$ 。

消耗 1kg 生物质颗粒燃料 , 生物质气化炉产灰量 A^f 为 0.0816kg。灰渣中固定碳含量 C_5 为 :

$$\begin{aligned} C_5 &= \text{产灰量} \times \left[\frac{\text{灰渣含碳量}}{(1 - \text{灰渣含碳量})} \right] \\ &= 0.0816 \times [12\% \div (1 - 12\%)] = 0.01113\text{kg} \end{aligned}$$

根据碳平衡^[1] , $C_1 = C_2 + C_3 + C_4 + C_5$ 。

生物质颗粒燃料的碳平衡为 $0.1762 = 0.2357V + 0.09 + 0.0018 + 0.01113$,

所以 $V = 0.31 \text{ m}^3$ 。

故生物质颗粒燃料的气化率为 $0.31 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。而型煤的气化率为 $3.27 \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[5]。燃烧 1kg 生物质颗粒燃料产生排放的气体含碳量 0.07kg。燃烧 1kg 型煤产生排放的气体含碳量 0.56kg。整个采暖期需要燃烧生物质颗粒燃料 4.46 吨，而如换成燃烧型煤需要 3.6 吨。故如采用生物质颗粒燃料采暖的总碳排放量为 312.2 kg，而用型煤采暖的总碳排放量为 2016 kg。可以看出如果用生物质颗粒燃料代替型煤进行采暖的碳减排率为 84.5%。

表 2.10 监测到的生物质颗粒燃料和煤炭的废气污染物排放情况

	烟尘 (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)	NO (mg/m ³)
生物质颗粒燃料	89.5	664	202	208
型煤	156.9	255	434	215

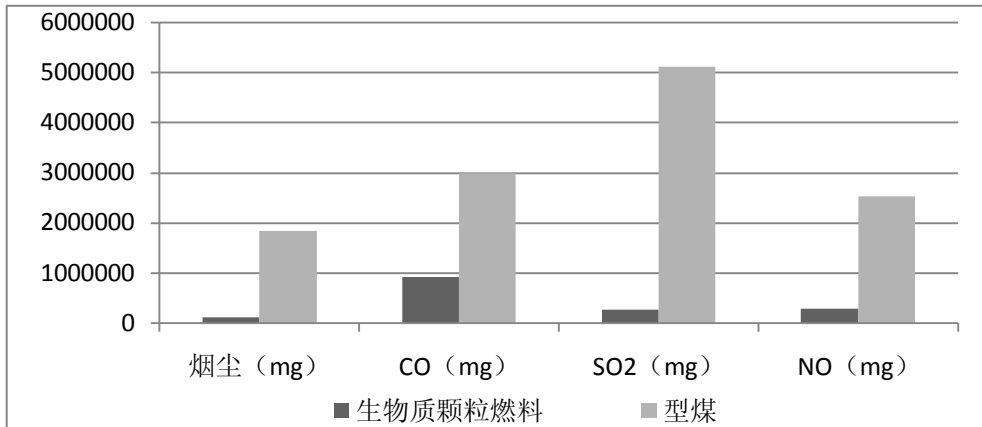


图 2.18 采暖期生物质颗粒燃料和型煤污染物排放量比较

从上图可以看出在整个采暖期生物质颗粒燃料各种污染物的排放量远低于型煤。

结论：根据技术经济环境效益分析，生物质秸秆气化炉比燃气壁挂式采暖炉、煤炉、电采暖炉运行费用低且初投资较低，一年内便可以收回投资；使用生物质秸秆颗粒采暖比使用型煤污染物排放低，对环境污染小。综上所述，生物质气化

技术应用于中国北方农村的采暖具有可行性，其比其他采暖方式更加经济、环保，且有效利用了我国北方农村地区的秸秆资源，为我国农村地区未来能源的使用方向指出了一个新的方向。

4. 北方农村建筑用能趋势预测情景分析

本文所采用的研究方法为情景、灰色理论相结合的综合预测分析方法。灰色理论用于预测未来北方农村生活用能的增长。情景分析法所设定的几种情景将最终预测的数据以预测中国北方农村生活用能需求情况。

(1) 情景分析法概述

情景分析法是在假定某种现象或者趋势持续到未来的前提下，对可能出现的情况或引起的后果做出评估的方法。情景分析法的意义不在于准确地预测研究对象的未来状态，而是对不同趋势条件下可能出现的状态进行考察、比较和研究。未来的发展总是存在着多种可能性。情景分析法可以对影响未来发展的各种不确定因素的相互作用进行综合和系统的分析，研究不同的政策或措施对未来发展趋势产生的影响和效果。情景分析法是探讨和制订未来发展战略、对策、规划计划、政策措施的比较有效的方法，在国际上被广泛应用于能源、环境、经济、社会、军事等领域。为了使情景分析法能够客观地反映现实中各种因素相互作用的因果关系，在进行情景分析时，通常需要对过去已经发生的事件进行回顾和评价，分析其中的内在关系和规律性，然后对影响发展趋势的不确定性因素进行合理的假设，以得出未来的发展趋势。执行假设时要具有经济、技术、社会等多方面的合理性。通过深入地分析和比较，实现不同假设条件将出现的结果，就可以在面对未来的各种不确定性因素时，选择需要采取的措施，使未来朝着所选择的方向发

展。情景分析法是本文采用的主要研究方法。在进行情景分析的过程中，对影响能源需求的宏观社会经济因素和未来可能的演变趋势进行了定性分析，并在定性分析的基础上对人口发展、产业结构、部门结构进行了量化。对于设定的情景，本文借助模型工具对不同情景下部门结构调整、能源消费结构调整、技术进步可能的发展情况进行了模拟计算，力图对北京市能源发展的途径和能够达到的程度进行客观和深入的分析。

（2）灰色预测理论的提出

灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授 1982 年 3 月在国际上首先提出来的，在国际期刊《SYSTEM AND CONTROL LETTER》刊物上发表，题为“Control Problem of Grey System”，引起了国际上的充分重视。在灰色系统理论的研究中，将各类系统分为白色、黑色和灰色系统。“白”指信息完全已知；“黑”指信息完全未知；“灰”则指信息部分已知、部分未知，或者说信息不完全，这是“灰”的基本含义。灰色系统理论认为任何随机过程都是在一定幅值范围、一定时区内变化的灰色量，称随机过程为灰色过程，在处理技术上，灰色过程是通过原始数据的整理来寻找数的规律的，这叫数的生成，这是一种就数找数的现实规律的途径。而基于概率统计的随机过程，则是按统计规律，按先验规律来处理问题，作这种处理，要求数据越多越好，或者说他是建立在大样本量的基础上的。事实上，即使有了大样本量也不一定能找出规律，即使有了统计规律也不一定是典型的，而非典型过程是难以处理的，终端能源的消费需求变化亦是而非平稳的随机过程。」而灰色过程则无此限制，事实上将许多历史数据作累加处理后便出现了明显的指数规律。这是由于尽管客观系统表象复杂，数据离乱，但它总是有整体功能的，总是有序的，因此它必然潜藏着某种内在规律。关键在于要用适当方式去挖掘它，然后利用它。

比如说数据处理后呈现出指数规律，由于大多数系统都是广义的能量系统，而指数规律便是能量变化的一种规律。由于生成的数据列有了较强的规律，有可能对变化过程作较长时间的描述，因此有可能建立微分方程模型。灰色系统预测具有要求历史数据少、不考虑分布规律、不考虑变化趋势、运算方便、短期预测精度高、易于检验等优点，因此在社会、经济、能源、农业、工业过程的预测控制等各领域得到了广泛的应用，并取得了较好的预测效果。

在建立预测模型时，若数据量太少，不宜建立传统的回归分析或其它时间序列模型，采用灰色动态模型(Grey Dynamic Model，GM)所需的数据量少，且可以达到满意的预测精度。本文采用灰色理论建模。

(3) 情景假定

随着农村经济发展，新农村建设的推进，如何更有效地解决农村不断增长的采暖、炊事、生活热水需求将是我们必须解决的问题。从能源供给上看，可以有“混合型”(是指‘商品能+传统生物质’)、商品能源、可再生能源供应为主的三种可能的能源供给形式。

情景一（基准情景）：

政策干预措施为在 2010 年以前的基础上趋势外推，政策影响表现为农村和城市建房速度快，但能效水平不高。依旧以秸秆、煤炭的直接燃烧为主，利用效率低。农村居民普通家用电器的普及率提高。在引导老百姓选择高效、环保消费方式方面,政府的影响较弱。推广沼气、太阳能，继续增强电力稳定性，居民生活电气化率较低。农村居民主要用能为商品能加生物质能汇合使用。

	商品能源	煤炭	液化石油气	电	非商品用能	薪柴	秸秆	沼气、太阳能
生活用	66.8	46.9	11.1	2.8	33.2	14.1	17.7	1.4

能百分比 (%)								
能源效率	/	0.4	0.6	1	/	0.15	0.15	/

情景二 (悲观情景) :

随着经济的发展，农村建筑用能逐渐转变为以煤炭等商品能源为主的能源消耗方式，农村居民生活依然沿用传统低能耗的用能设备及系统，建筑围护结构没有得到改善，保温隔热性能差。且随着人均住房面积的增长，普通家电普及率大幅提高，居民生活用电量明显增长加快。

	商品能源	煤炭	液化石油气	电	非商品用能	薪柴	秸秆	沼气、太阳能
生活用能百分比 (%)	71.21	60.9	1.66	8.64	28.79	12.09	16.7	0
能源效率	/	0.35	0.6	1	/	0.15	0.15	/

情景三 (乐观情景) :

政策干预措施为 2010 年以后制定的能源政策，中华人民共和国节约能源法，中国可再生能源发展的“十二五”规划等，政策干预措施为加大清洁能源的推广力度，制定更高的生活设备能耗指标，注重建筑节能，推广节能照明，采用先进高效的可再生能源建筑应用技术，生活用能结构向清洁能源演变。

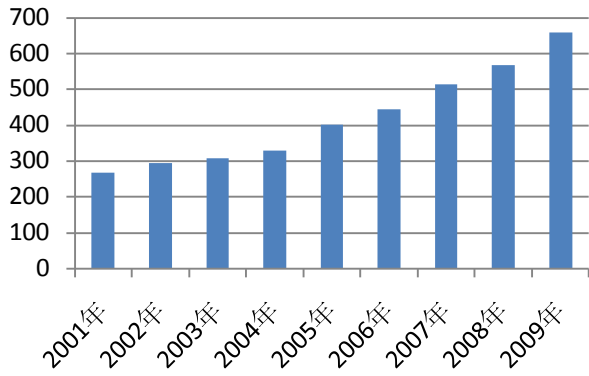
	商品能源	煤炭	液化石油气	电	非商品用能	薪柴	秸秆	沼气、太阳能
生活用能百分比 (%)	58.7	39	6.5	13.2	41.3	15.9	21.3	4.1
能源效率	/	0.6	0.6	1	/	0.5	0.5	/

(4) 影响因素分析

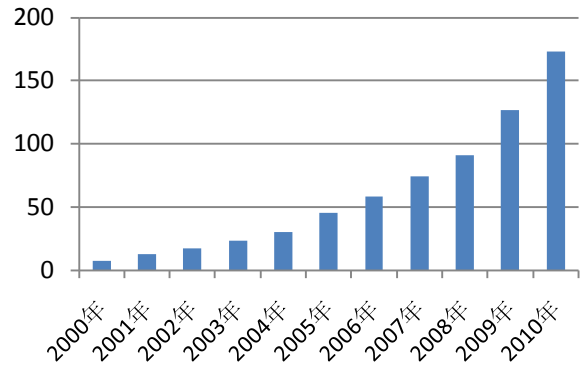
中国北方农村家庭能源消费与当地的资源，经济，生活条件和能源供应息息相关，通过它可以确定可行的和稳定的人均能源消费水平。假设到 2020 年，建立三种满足中国北方农村建筑用能的可能情景，对可能的结果进行预测。不同情景之间的差别主要是技术进步情况和用能结构调整。以 2000 年为基准年，根据 2000-2009 年的生物质资源量，乡村人口、人均收入、住房面积、农村居民家庭平均每百户电冰箱年末拥有量、农村居民家庭平均每百户家用电脑拥有量、太阳能热水器安装面积、农村居民家庭平均每百户彩色电视机拥有量、农村居民家庭平均每百户空调拥有量、太阳灶台数等数据利用灰预测模型和 LEAP 模型进行情景分析，预测到 2020 年的趋势。

	人均能源消费 (kg 标煤)	人口	农村居民家庭平均每百户拥有量				农村居民家庭钢筋混凝土结构住房(平方米/人)	农村居民家庭年末砖瓦平房住房面积(平方米/人)	农居人均纯收入(元)	太阳能热水器(万平方米)	农村太阳灶(万台)
			电冰箱(台)	彩色电视机(台)	电脑(台)	空调(台)					
2004	120.86	33075.3	329.8	1234.95	30.48	82.05	3.50	15.47	3181.66	1302.1	57.66
2005	133.22	32006.5	400.8	1390.08	45.24	123.99	4.15	16.51	3362.59	1442.6	68.36
2006	129.82	31679.7	444.3	1477.57	58.57	141.5	4.04	17.36	3869.88	1926.3	84.56
2007	130.50	31201.9	513.8	1546.44	74.53	157.04	4.34	18.00	4287.81	2112.4	104.75
2008	128.09	30745.3	567.6	1585.5207	91.12	174.59	4.86	18.31	4912.52	2365.1	122.57
2009	145.51	28886	658.3	1633.54	126.41	190.24	5.35	18.90	5315.96	2558.7	134.07

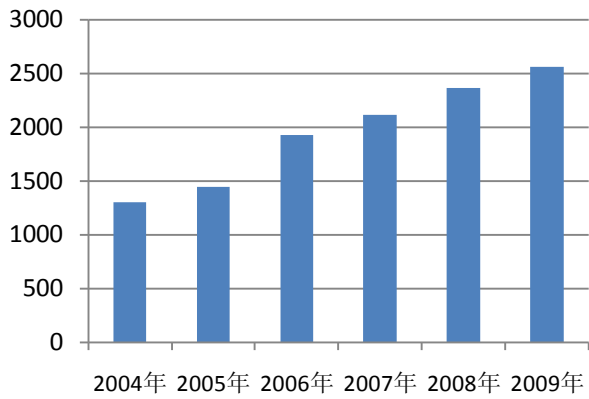
中国北方农村居民家庭电冰箱年末拥有量(台/百户)



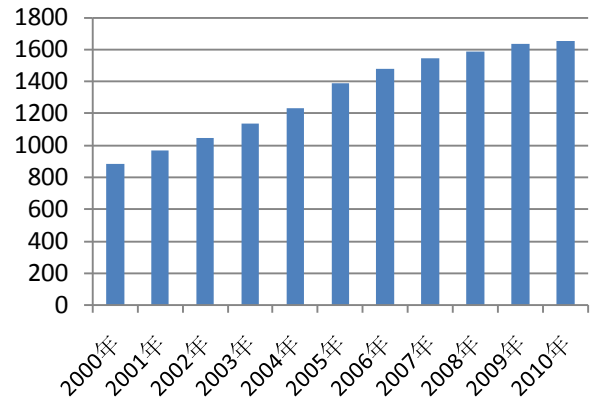
中国北方农村居民家庭平均每百户家用电脑拥有量(台)



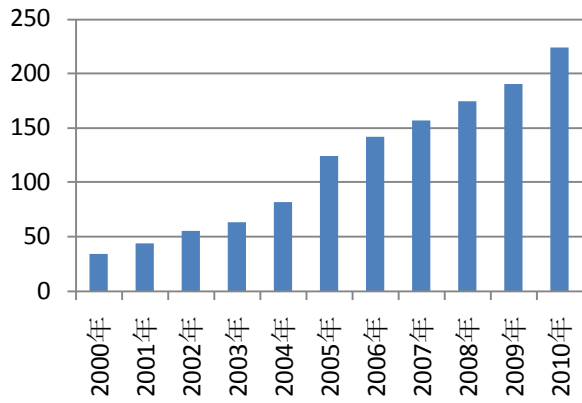
中国北方农村太阳能热水器(万平方米)



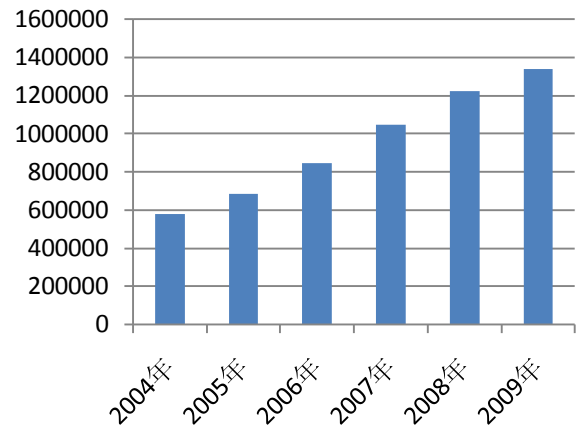
中国北方农村居民家庭平均每百户彩色电视机拥有量(台)



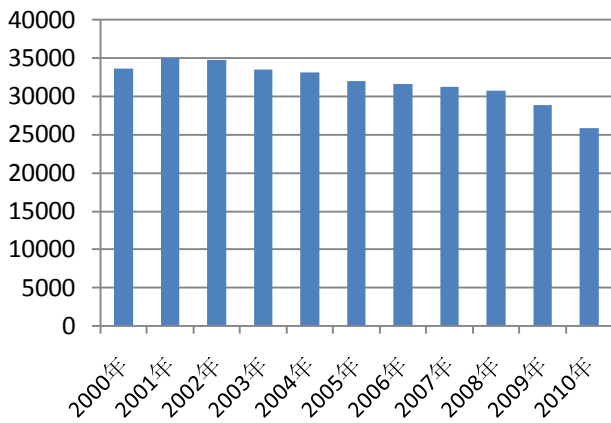
中国北方农村居民家庭平均每百户
空调拥有量(台)



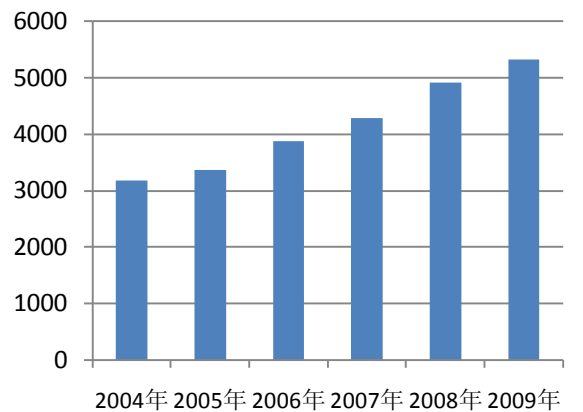
中国北方农村太阳灶(台)

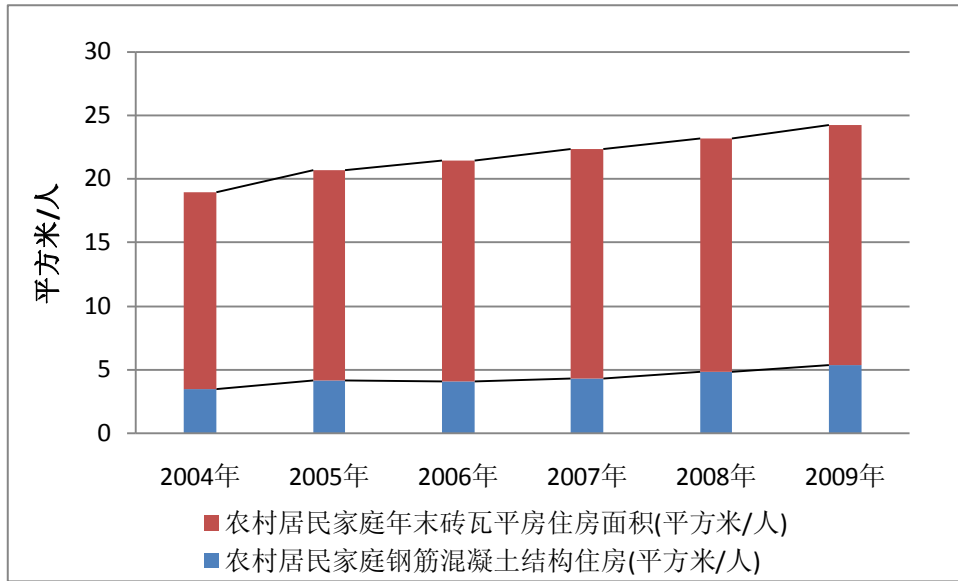


(万人) 中国北方农村人口数



农居人均纯收入(元)





为了确定各因素变化与北方农村人均用能需求变化的关联程度，本文采用斜率关联度分析法进行分析。

设 $X(t)$, $Y(t)$ 为自然数列函数，则两数列在各时刻的关联系数：

$$\xi(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\Delta x(t)}{\sigma_x} - \frac{\Delta y(t)}{\sigma_y} \right|}$$

式中 $\Delta x(t) = x(t+1) - x(t)$; $\Delta y(t) = y(t+1) - y(t)$;

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2}。$$

则关联度
$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} \xi(t)$$

用斜率关联度分析法对表 2 和表 3 的数列进行关联系数计算，见表 4。然后进一步计算关联度，结果见表？，可看出各影响因子对中国北方农村人均能源消费的影响关联度。

表？ 影响中国北方农村人均能源消费与其各影响因子的关联系数

	农村居民家庭年末砖瓦平房住房面积(平方米/人)	人口	农村太阳能热水器(万平方米)	农村太阳灶(万台)	农居人均纯收入(元)	农村居民家庭平均每百户彩色电视机拥有量(台)	农村居民家庭钢筋混凝土结构住房(平方米/人)	农村居民家庭电冰箱年末拥有量(台/百户)	农村居民家庭平均每百户空调拥有量(台)	农村居民家庭平均每百户家用电脑拥有量(台)
R	0.9355	0.9226	0.9138	0.8999	0.8917	0.8878	0.8797	0.8109	0.7973	0.7312

(5) GM(1,1)预测模型^[10]

GM(1,1)建模，经一次累加生成有规律的时间序列，同时弱化原序列的随机性，然后采用一阶单变量 GM(1,1)进行拟合，将求出来的生成数回代计算值，作累减还原运算，最后对还原值进行精度检验，随后用于预测。具体过程中为：

GM(1,1)模型的微分方程为： $\frac{dx}{dt} + ax = b$

设 $x^0 = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$ 为一列原始数据，作一次累加生成

[I-AGO]： $x^{(1)}(K) = \sum_{m=1}^K x^0(m)$ ； $x^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)]$ ；

$$z^{(1)}(K) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$$

$x^{(1)}$ 可建立下述白化形式的微分方程： $\frac{dx}{dt} + ax = b$

参数 a, b 按最小二乘法求解： $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$

其中 $B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$ ； $Y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$ 。

上述白化形式的微分方程解（即时间响应函数）为：

$$x^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} ; x^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k)$$

建立了预测模型，可以得出预测值，但预测结果是否可用，还需要检验。本

文采用后验差检验。主要步骤如下：

$x^{(0)}(k)$ 为原始数据列， $\hat{x}^{(0)}(k)$ 为模型的拟合值($k=1,2,\dots,n$)， C 为后验差比值， P 为小误差频率：

$$q(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) ; C = \frac{S_2}{S_1} ;$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [q(k) - \bar{q}]^2 ; S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2 ; \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q(k) ; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) ;$$

$$P = P\{|q(k) - \bar{q}| < 0.6745 S_1\}。$$

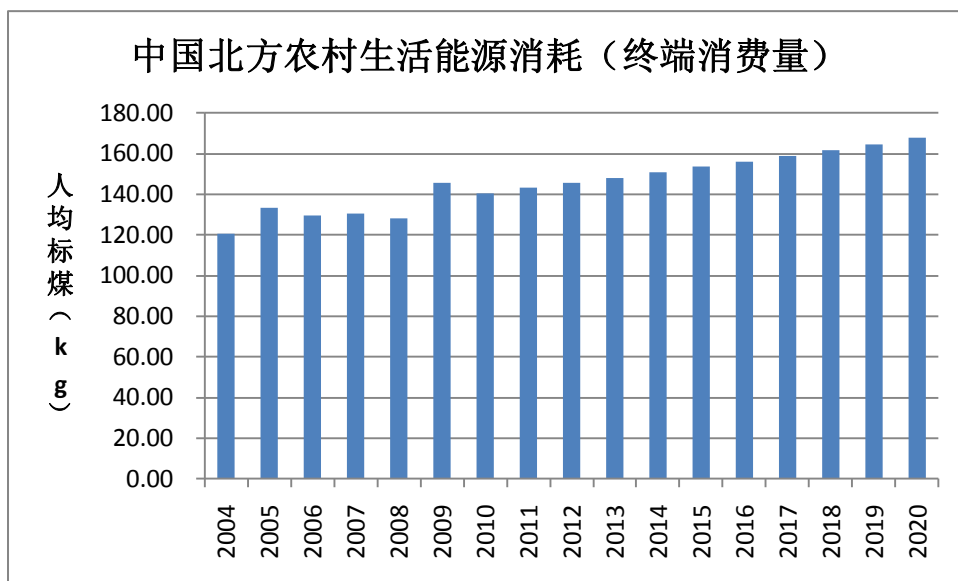
当后验差比值 $C < 0.35$ ，小误差频率 $P \geq 0.95$ 时，认为模型满足精度好。

当后验差比值 $0.45 < C < 0.50$ ，小误差频率 $0.95 \geq P \geq 0.80$ 时，认为模型满足精度合格。

当后验差比值 $0.50 < C < 0.65$ ，小误差频率 $0.80 \geq P \geq 0.70$ 时，认为模型满足精度勉强。

当后验差比值 $0.65 < C$ ，小误差频率 $0.7 \geq P$ 时，认为模型满足精度不合格。

① 生活能源消耗

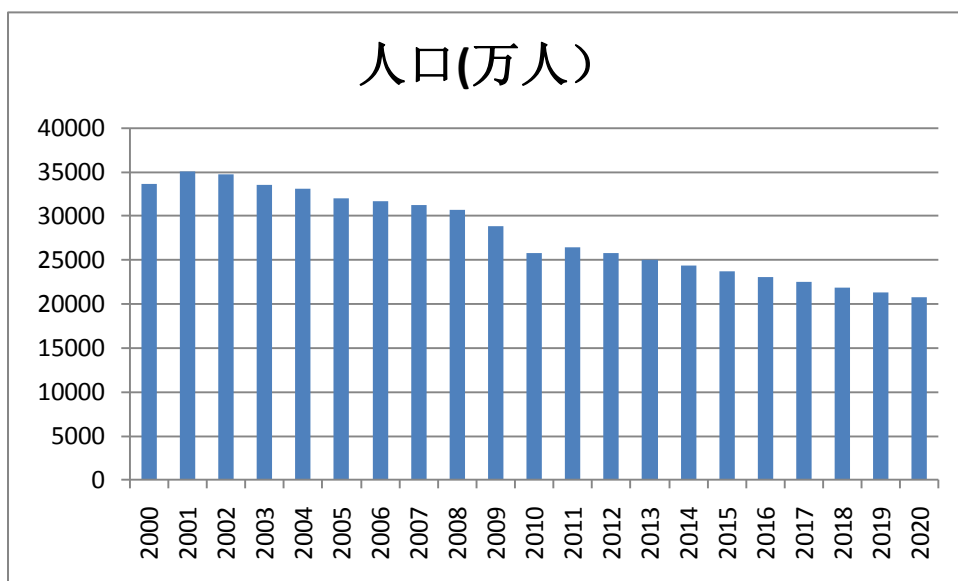


(注：根据中国能源统计年鉴数据计算所得)

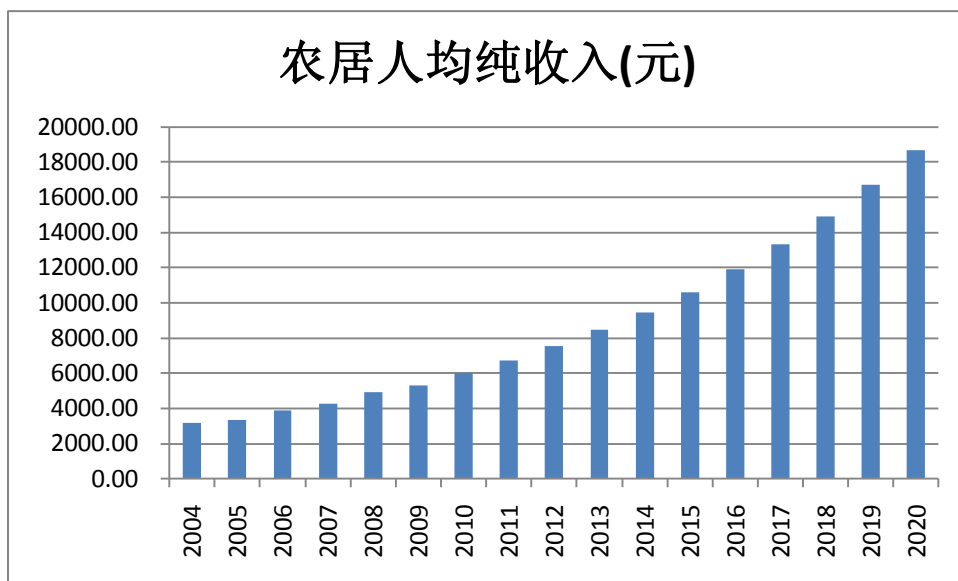
预测模型方程式为（其中 $t=0,1,2,\dots,n$ ）：

$$X_0^{(1)}(t+1) = 12648.53 e^{0.09483t} - 11302.5$$

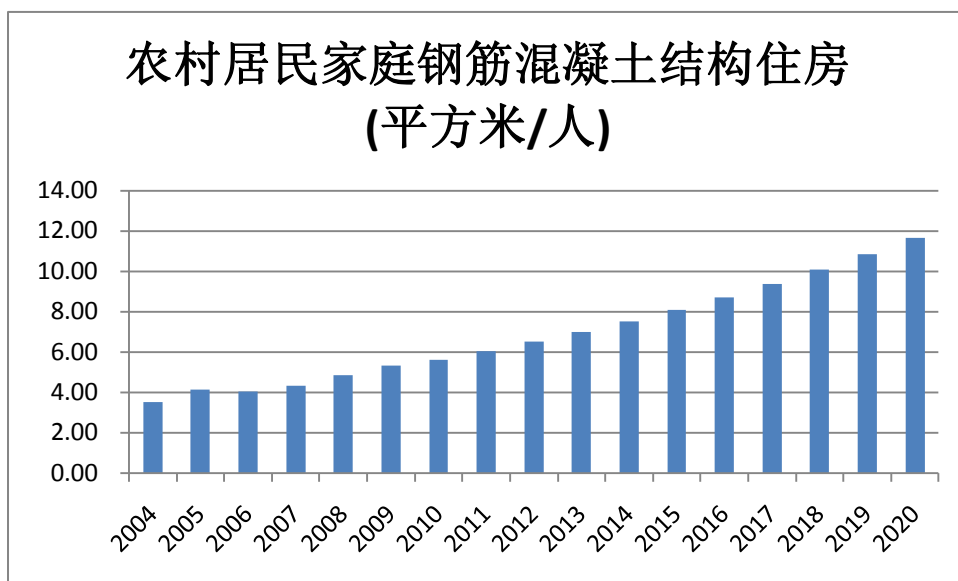
② 人口



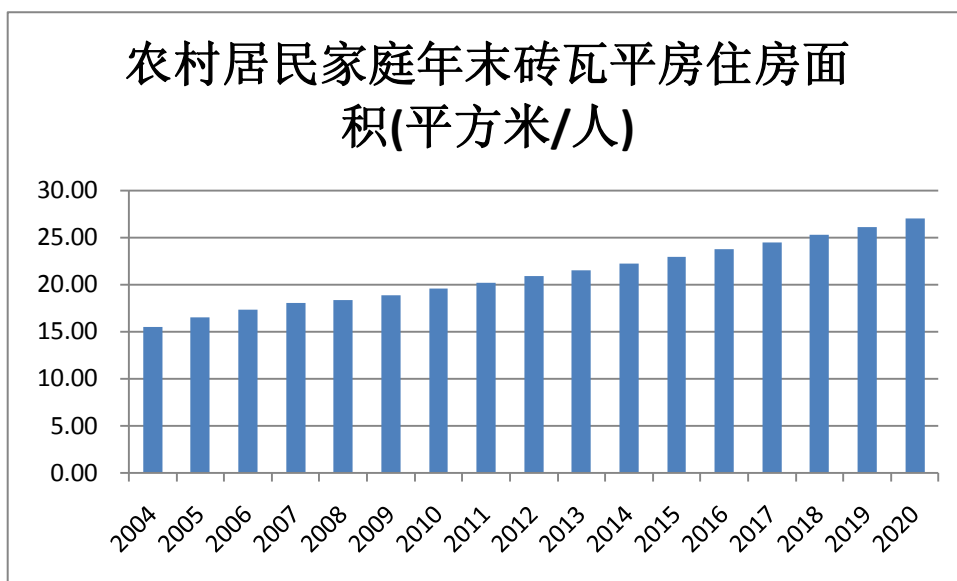
③ 人均收入



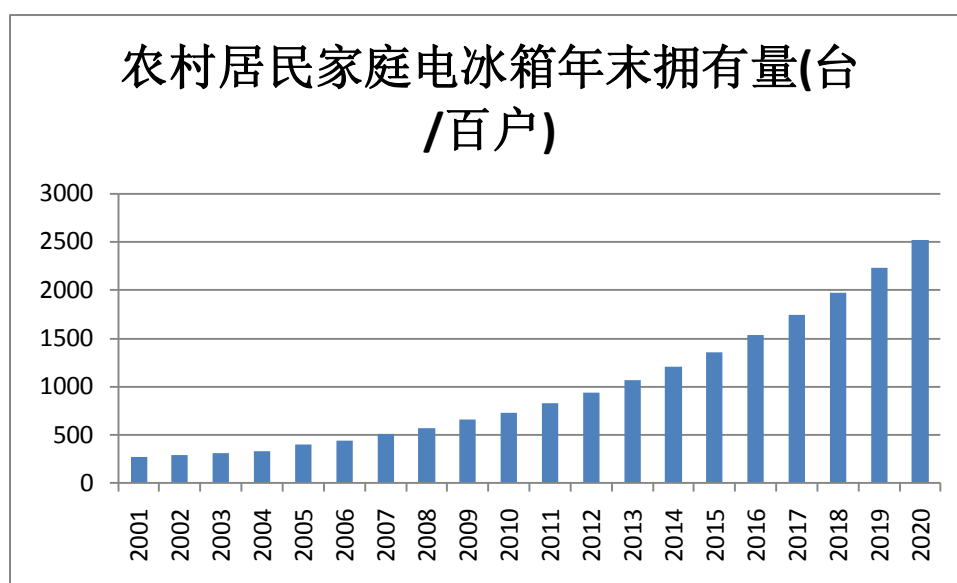
④ 住房面积



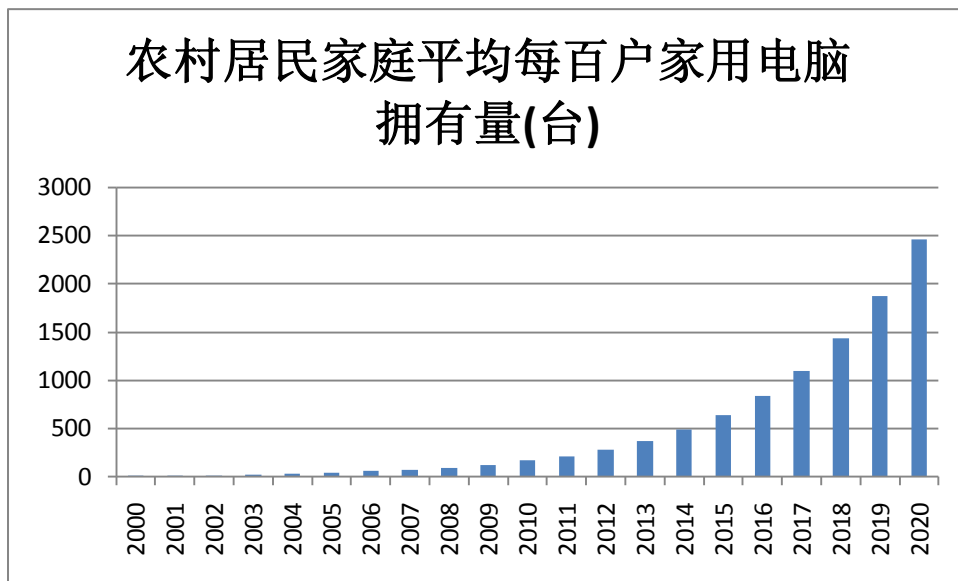
农村居民家庭钢筋混凝土结构住房(平方米/人) 农村居民家庭年末砖瓦平房住房面积(平方米/人)



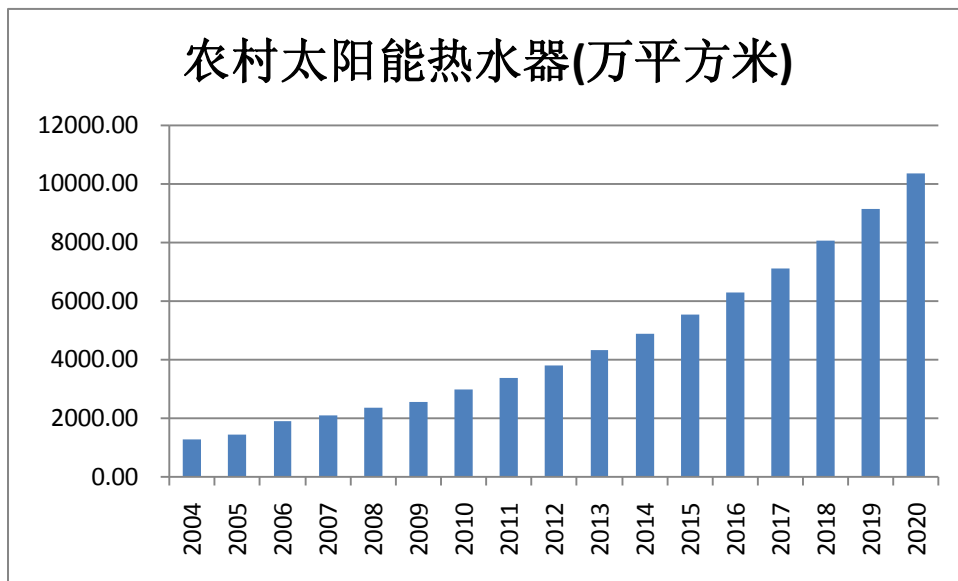
⑤ 农村居民家庭平均每百户电冰箱年末拥有量



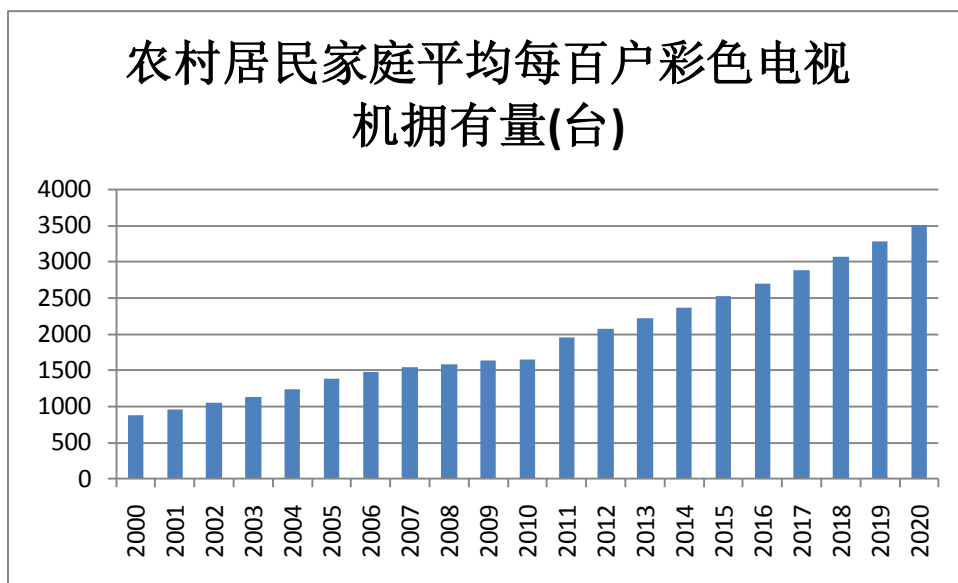
⑥ 农村居民家庭平均每百户家用电脑拥有量



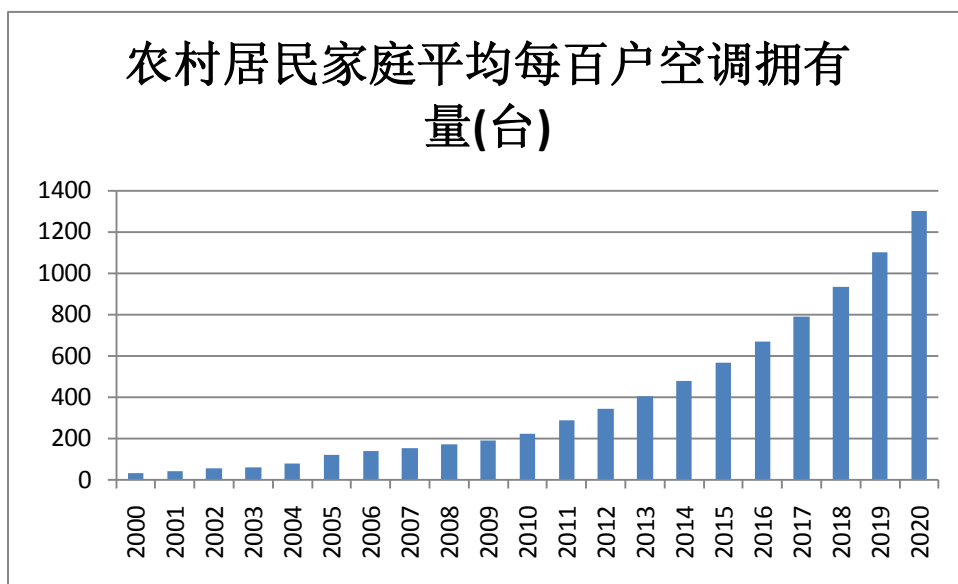
⑦ 太阳能热水器安装面积



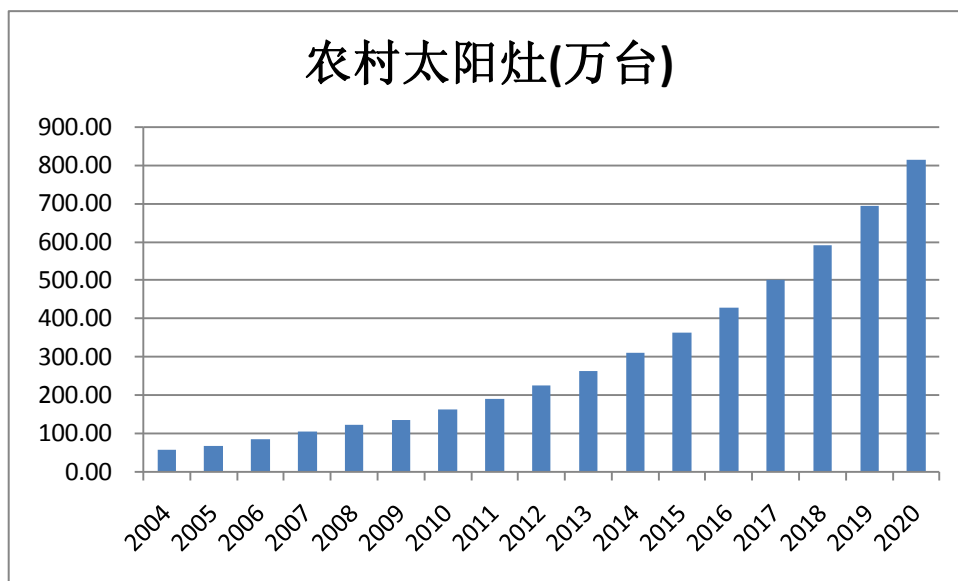
⑧ 农村居民家庭平均每百户彩色电视机拥有量



⑨ 农村居民家庭平均每百户空调拥有量



⑩ 太阳灶台数



	人均能源消费(kg 标煤)		乡村人口数(万人)		农村居民家庭电冰箱 年末拥有量(台/百户)		农村居民家庭平均每百户 彩色电视机拥有量(台)		农村居民家庭平均 每百户家用电脑拥 有量(台)		农村居民家庭平均每 百户空调拥有量(台)		农村居民家庭 钢筋混凝土结 构住房(平方米 /人)		农村居民家庭年 末砖瓦平房住房 面积(平方米/ 人)		农居人均纯收入(元)		农村太阳能热水器(万平 方米)		农村太阳灶(万台)	
	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值
2000			33632.01				884.78		7.39		34.06											
2001			35063.85	35683.26	268.43		965.83	1014.92	12.88	14.61	44.13	55.34										
2002			34760.3	34727.97	293.78	273.28	1047.43	1083.31	17.19	19.13	55.86	65.34										
2003			33516.83	33798.27	309.3	309.20	1135.92	1156.30	23.84	25.06	63.45	77.15										
2004	120.86		33075.3	32893.45	329.8	349.85	1234.95	1234.22	30.48	32.81	82.05	91.10	3.50		15.47		3181.66		1302.1		57.66	
2005	133.22	128.76	32006.58	32012.85	400.8	395.84	1390.08	1317.38	45.24	42.97	123.99	107.57	4.15	3.91	16.51	16.69	3362.59	3420.32	1442.6	1596.74	68.36	72.56
2006	129.82	131.05	31679.71	31155.83	444.3	447.87	1477.57	1406.15	58.57	56.28	141.5	127.01	4.04	4.20	17.36	17.23	3869.88	3830.47	1926.3	1808.62	84.56	85.25
2007	130.50	133.38	31201.92	30321.75	513.8	506.74	1546.44	1500.90	74.53	73.71	157.04	149.98	4.34	4.52	18	17.80	4287.81	4289.81	2112.4	2048.63	104.75	100.17
2008	128.09	135.75	30745.3	29510.00	567.6	573.36	1585.5207	1602.04	91.12	96.53	174.59	177.09	4.86	4.86	18.31	18.37	4912.52	4804.23	2365.1	2320.49	122.57	117.69
2009	145.51	138.17	28886	28719.98	658.3	648.72	1633.54	1709.99	126.41	126.42	190.24	209.10	5.35	5.23	18.9	18.97	5315.96	5380.33	2558.7	2628.42	134.07	138.28
2010		140.62	25827.179	27951.12		734.00		1825.21		165.56		246.90		5.63		19.59		6025.51		2977.21		162.47
2011		143.13		27202.83		830.49		1948.20		216.82		291.54		6.05		20.23		6748.07		3372.29		190.90
2012		145.67		26474.58		939.66		2079.47		283.96		344.25		6.51		20.88		7557.27		3819.79		224.29
2013		148.26		25765.83		1063.18		2219.59		371.88		406.48		7.00		21.56		8463.50		4326.68		263.53
2014		150.90		25076.04		1202.94		2369.15		487.02		479.96		7.53		22.27		9478.41		4900.84		309.63

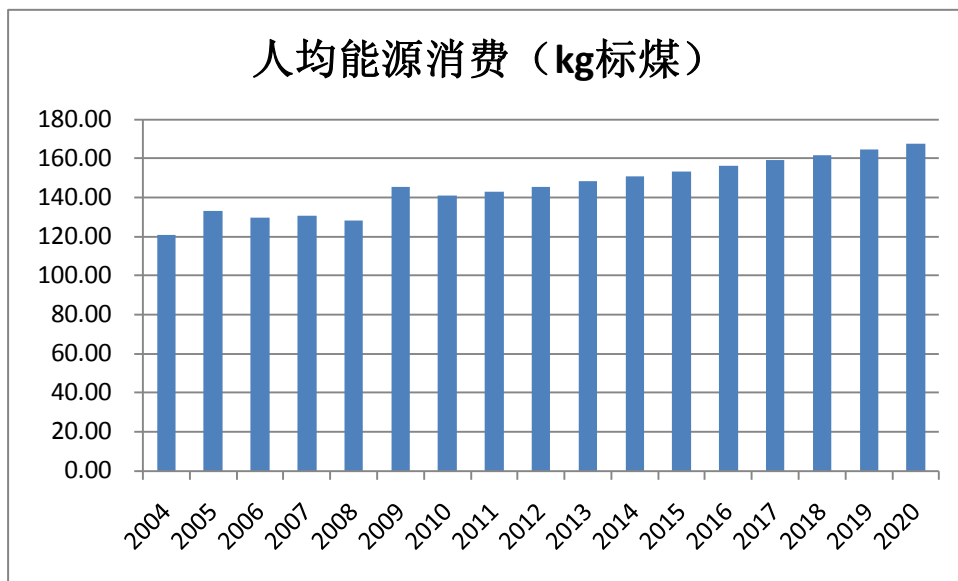
	人均能源消费(kg 标煤)		乡村人口数(万人)		农村居民家庭电冰箱 年末拥有量(台/百户)		农村居民家庭平均每百户 彩色电视机拥有量(台)		农村居民家庭平均 每百户家用电脑拥 有量(台)		农村居民家庭平均每 百户空调拥有量(台)		农村居民家庭 钢筋混凝土结 构住房(平方米 /人)		农村居民家庭年 末砖瓦平房住房 面积(平方米/ 人)		农居人均纯收入(元)		农村太阳能热水器(万平 方米)		农村太阳灶(万台)	
	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值
2015		153.58		24404.73		1361.07		2528.79		637.82		566.73		8.10		22.99		10615.02		5551.19		363.80
2016		156.32		23751.39		1539.98		2699.19		835.31		669.18		8.71		23.74		11887.93		6287.84		427.45
2017		159.10		23115.53		1742.42		2881.07		1093.94		790.16		9.37		24.51		13313.48		7122.24		502.23
2018		161.93		22496.70		1971.47		3075.20		1432.66		933.01		10.08		25.31		14909.98		8067.37		590.09
2019		164.81		21894.44		2230.62		3282.42		1876.26		1101.68		10.84		26.13		16697.92		9137.91		693.32
2020		167.74		21308.30		2523.85		3503.59		2457.20		1300.84		11.66		26.98		18700.27		10350.52		814.61
后验 差比 值C		1.1243		0.1283		0.0111		0.0410		0.0064		0.0566		0.1133		0.0177		0.0092		0.0553		0.0261
小误 差频 率		0.4		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1
精 度		不满足		一级		一级		一级		一级		一级		一级		一级		一级		一级		一级

(6) GM(1,n)模型

由上述模型预测值可看出虽然碳排放量的 GM(1,1)模型具有一级精度，程度好，其后验差比值较其三个主要影响因子的其中居民家庭用水的后验差比值大，而且并没有反映出影响因子碳排放的相互关系。为了得到精度更高的、反映相互关系的模型，下面建立碳排放量的 GM(1,n)模型。

$$\text{GM}(1,n)\text{模型白化形式的微分方程为: } \frac{dx_1^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} = b_1x_2^{(1)} + b_2x_3^{(1)} + \dots + b_{n-1}x_n^{(1)}$$

首先用 GM(1,1)分别预测影响因子的未来数值，然后用 GM(1,n)模型预测碳排放量。具体建模过程与 GM(1,1)建模过程相似，在此不再详述。

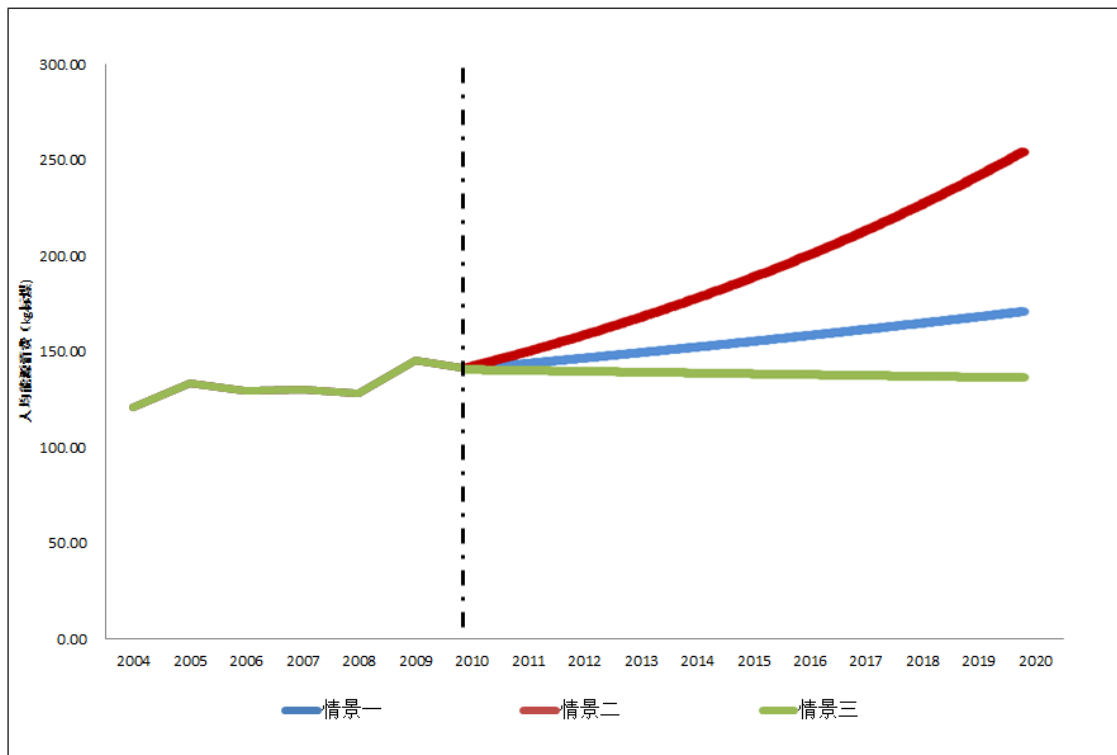


从表？中的两个模型的预测值可以看出，虽然 GM(1,1)模型简单，而且其中只有一个精度不合格，其他的精度都很好，但由于数据有限，其一级程度不高，预测值偏大。而 GM(1,n)模型，考虑了影响因子的影响，利用精度较高的影响因子 GM(1,1)模型，建立 GM(1,n)模型，预测结果更为合理，更为可靠。

项目	人均能源消费 (kg 标煤)			乡村人口数(万人)	农村居民家庭电冰箱年末拥有量(台/百户)	农村居民家庭平均每百户彩色电视机拥有量(台)	农村居民家庭平均每百户家用电脑拥有量(台)	农村居民家庭平均每百户空调拥有量(台)	农村居民家庭钢筋混凝土结构住房(平方米/人)	农村居民家庭年末砖瓦平房住房面积(平方米/人)	农居人均纯收入(元)	农村太阳能热水器(万平方米)	农村太阳灶(万台)
	实际值	GM (1, 1)	GM(1, N)										
2005	133.22	128.76	141.34	32012.85	395.84	1317.38	42.97	107.57	3.91	16.69	3420.32	1596.74	72.56
2006	129.82	131.05	130.04	31155.83	447.87	1406.15	56.28	127.01	4.20	17.23	3830.47	1808.62	85.25
2007	130.50	133.38	130.50	30321.75	506.74	1500.90	73.71	149.98	4.52	17.80	4289.81	2048.63	100.17
2008	128.09	135.75	128.16	29510.00	573.36	1602.04	96.53	177.09	4.86	18.37	4804.23	2320.49	117.69
2009	145.51	138.17	145.00	28719.98	648.72	1709.99	126.42	209.10	5.23	18.97	5380.33	2628.42	138.28
2010		140.62	140.77	27951.12	734.00	1825.21	165.56	246.90	5.63	19.59	6025.51	2977.21	162.47
2011		143.13	143.05	27202.83	830.49	1948.20	216.82	291.54	6.05	20.23	6748.07	3372.29	190.90
2012		145.67	145.60	26474.58	939.66	2079.47	283.96	344.25	6.51	20.88	7557.27	3819.79	224.29
2013		148.26	148.19	25765.83	1063.18	2219.59	371.88	406.48	7.00	21.56	8463.50	4326.68	263.53
2014		150.90	150.82	25076.04	1202.94	2369.15	487.02	479.96	7.53	22.27	9478.41	4900.84	309.63
2015		153.58	153.50	24404.73	1361.07	2528.79	637.82	566.73	8.10	22.99	10615.02	5551.19	363.80
2016		156.32	156.24	23751.39	1539.98	2699.19	835.31	669.18	8.71	23.74	11887.93	6287.84	427.45
2017		159.10	159.01	23115.53	1742.42	2881.07	1093.94	790.16	9.37	24.51	13313.48	7122.24	502.23
2018		161.93	161.84	22496.70	1971.47	3075.20	1432.66	933.01	10.08	25.31	14909.98	8067.37	590.09
2019		164.81	164.72	21894.44	2230.62	3282.42	1876.26	1101.68	10.84	26.13	16697.92	9137.91	693.32

2020		167.74	167.65	21308.30	2523.85	3503.59	2457.20	1300.84	11.66	26.98	18700.27	10350.52	814.61
------	--	--------	--------	----------	---------	---------	---------	---------	-------	-------	----------	----------	--------

(7) 情景分析结果



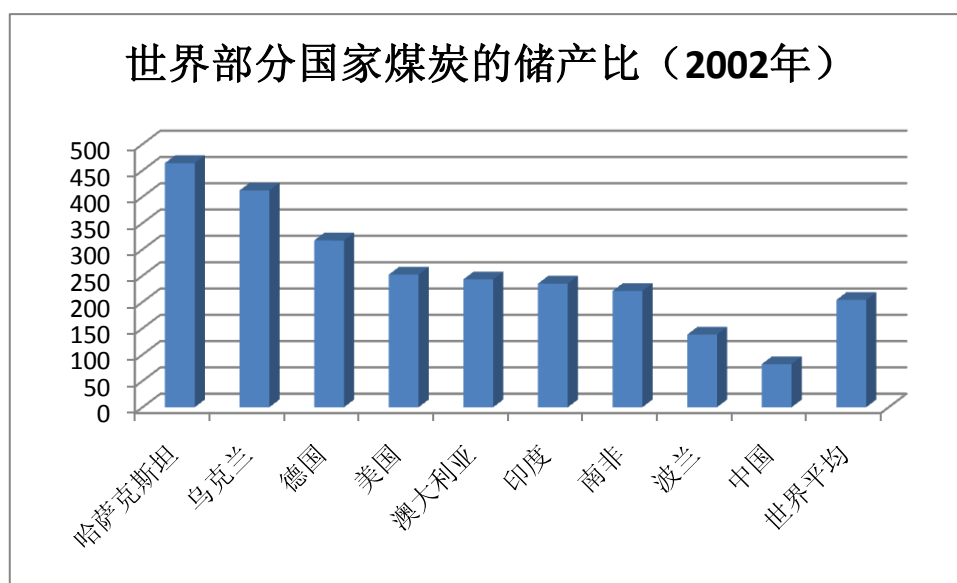
随着农村经济发展，新农村建设的推进，如何更有效地解决农村不断增长的采暖、炊事、生活热水需求将是我们必须解决的问题。如上图，随着农村建筑的发展和水平的提高，农村的建筑能耗必然增加。开发以生物质能源和其他可再生能源为主的新的农村能源系统，同时大幅度改进农村建筑的保温性能和采暖方式，才能更好地满足农村的建筑用能需求，实现满足可持续发展要求的社会主义新农村建设。这需要大量的技术创新和各级政府的政策、机制及经费支持，更需要从科学发展观出发的全面的科学规划。

根据目前国家和农村居民的经济承受能力，在我国北方寒冷农村地区让所用农户使用清洁燃料并不可能。但在相对富裕的地区可以推广沼气和气化技术，同时还应继续大力推广节能架空炕和改良灶，在提高生物质燃料能效和利用率的同时，提高农村居民的生活质量。

炕居是千百年来形成的北方农村主要的生活方式.它充分利用了炉灶燃烧的余热,并具有成本低廉的特点.但随着社会的进步,农民已不再满足传统热炕的方式,开发和推广新式炕不仅可以延续传统生活习惯,实现节约能源、降低污染的目的,而且还可以实现供暖费用的降低,具有一定的实践价值和经济效益,为北方寒冷地区农村提供了一种新的可持续发展的供暖方式,对我国社会主义新农村建设具有积极意义。

三、 中国北方农村地区用能结构调整战略

农村能源由于量多面广而且接近自然,有着得天独厚的优势,其生态化发展对改善我国的生态环境有着不可估量的价值和意义,农村能源的生态化是一个系统工程,也是关系到建筑和环境的重要一环,能源使用种类、数量的多少以及效率的高低将会直接影响到建筑的舒适水平和室内外环境的好坏。讨论一个国家是否煤炭储量丰富,应该用“储产比”这一概念,即某年的剩余开采储量与生产量之比。如图?,可以看到中国的煤炭储产比低于世界平均水平。



(注:数据来自《洁净煤技术》姚强.北京:化学工业出版社,2005)

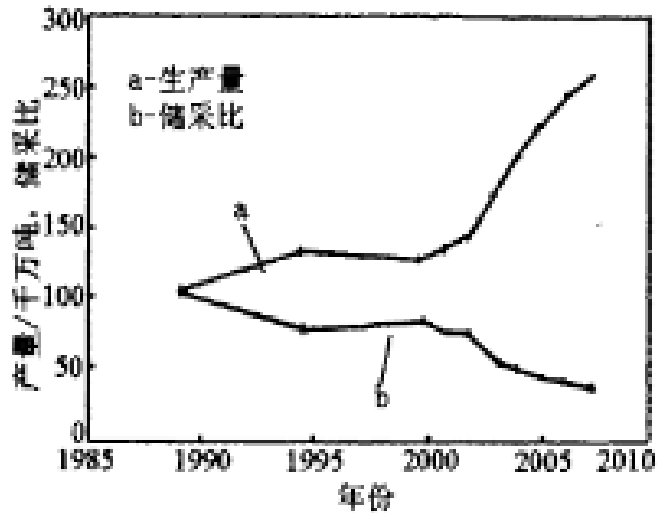


图 7 中国煤炭生产量与储产比状况^[6]

在化石能源里，虽然我国的煤炭资源相对较多，但储产比却逐年下降，如果再不改变以煤为能源消费中的主要地位，且任由农村地区也逐渐用煤代替生物质能源的消耗，将会难以为继。

考虑到农村的实际情况，适宜的建筑节能策略应该分两个层次来解决：

首先，主要靠被动式节能技术，例如加强房屋保温、防风，增加被动式太阳能利用等，这些技术不仅实施起来简单易行，而且效果明显。

其次，在被动式节能基础上，采取部分主动式节能技术，包括发展符合农村实际的采暖方式，提高现有采暖效率等。

此外，在有条件的地区应大力推广生物质能等可再生能源的高效清洁利用，逐步减少农村对常规商品能源的依赖，这样可以促进我国新农村建设的发展和农民生活水平的进一步提高，并大大缓解农村生活水平和用能水平提高对我国能源供应的压力。

北方寒冷地区传统农村住房量大面广，存在巨大的节能潜力，进行住房节能改造，其经济效益、环境效益和社会效益都非常显著。从宏观角度来说，开展农

村住房节能改造，可降低能耗，减少环境污染；从农民切身利益的角度来讲，开展农村住房节能改造，可改善居住条件，提高住房舒适度。同时对于改善民生，减少城乡差距具有重要意义。

1. 中国农村地区现有政策情况

近年来，随着我国农村经济发展和居民生活水平的提高，农村地区建筑用能迅速增加，尤其是北方农村地区，建筑采暖以生物质能源为主的模式，正逐渐被以煤炭等化石能源为主的模式所替代，农村建筑节能形势严峻。广大的农村地区太阳能、浅层地能等可再生能源资源丰富、应用条件优越、发展空间巨大。在农村地区加快推进可再生能源建筑应用，可节约与替代大量常规化石能源；可以加快改善农村民房、农村中小学、农村卫生院等公共建筑供暖设施，保障与改善民生；可以带动清洁能源等相关产业发展，促进扩大内需与调整结构。2009年，为引导农村住宅、农村中小学等应用清洁、可再生能源，住房城乡建设部会同财政部印发了《关于加快推进农村地区可再生能源建筑应用的实施方案的通知》，组织实施农村地区可再生能源建筑应用的示范推广，当年中央财政拨付补助资金6.84亿元，支持启动了第一批38个可再生能源建筑应用县级示范。

但是在现行的政策中，重点推广的是太阳能光热建筑一体化应用技术和浅层地能建筑制冷制热技术（包括土壤源热泵、地表水源热泵、地下水源热泵和污水源热泵），作为可再生能源建筑应用三大技术类型之一的生物质能并没有被明确列入重点推广的技术目录。而我国农村地区生物质能资源丰富，约4亿吨可作为生物质能的原料，生物质气化技术可靠、经济适用，因此，建议将生物质能气化技术建筑应用列为可再生能源建筑应用农村地区县级示范政策的支持内容，地方政府以此政策为依托，积极申请国家的示范补助资金，从而构建以生物质能等可

再生能源的清洁高效利用为核心的可持续发展的建筑用能模式。同时，考虑到中央财政资金是切块下达到地方，并没有对资金的具体使用方式做出规定，因此，地方政府应该积极地创新资金的使用方式，设计合理的激励政策机制，发挥财政资金最大效应，推进生物质气化技术在农村地区建筑中的应用。

表 2010 年 2020 年中国可再生能源利用发展目标

类别	2005 年 实际	2010 年	2020 年	2005-2010 年均增量	2010-2020 年均增量	2005-2020 年平均	
						年均增量	增速(%)
水电 (亿 kW)	1.2	1.8	3.0	0.12	0.12	0.12	10
风电 (万 kW)	126	500	3000	75	250	192	152
生物质发电 (万 kW)	200	550	3000	70	245	187	93
光电 (万 kW)	7	30	180	5	15	12	165
太阳热水器 (亿 m ²)	0.8	1.5	3.0	0.14	0.15	0.15	18
沼气 (亿 m ³)	80	160	240	16	8	11	13
燃料乙醇 (万吨)	102	200	1000	20	80	60	59
生物柴油 (万吨)	5	20	200	3	18	13	260

① 新农村能源工程

根据国家发改委的规划，“十一五”期间，将按照“因地制宜，多元发展”的原则，在继续加快小型水电和农网建设的同时，大力发展适宜村镇、农户使用的风电、生物质能、太阳能等可再生能源。到 2010 年，村镇小型风机使用量达到 30 万台，总容量 7.5 万千瓦；户用沼气 4000 万户，规模化养殖场沼气工程达到 4700 处，全国农村沼气产量达到 160 亿立方米；农村太阳能热水器保有量达到 5000

万平方米，太阳灶保有量达到 100 万台。

② 农村沼气工程

根据农业部制定的《全国农村沼气工程建设规划(2006-2010 年)》,“十一五”期间 ,全国将新建农村户用沼气 2300 万户 ,规模化养殖场大中型沼气工程 4000 处。到 2010 年 ,全国户用沼气达到 4000 万户 ,占沼气适宜农户的 30% 左右 ,规模化养殖场大中型沼气工程达到 4700 处 ,达到适宜畜禽养殖场总数的 39%左右。

届时 ,全国 4000 万户沼气池每年将产生约 154 亿立方米的沼气 ,相当于替代 2420 万吨标准煤的能源消耗和 1.4 亿亩林地的年蓄积量。沼渣、沼液的使用减少 20%以上的农药和化肥施用量 ;降低农产品农药残留 1% ;改良土壤 5000 万亩。有效治理畜禽养殖场粪污污染 ,实现粪便资源化利用和废水达标排放 ,保护水源。每个沼气池年均为每个农户节约燃料费、电费、化肥和农药等直接支出约 500 元。全国 4000 万户沼气可为农民年增收节支 200 亿元。按照技工与建池数 1:50、每个技工配备 3 名辅助工的要求 ,每万口沼气池建设与维护 ,可吸纳农村劳动力 800 人左右 ,全国每年可为农村劳动力提供约 36.8 万个就业机会。农林废弃物沼气利用技术可以为农村地区提供生活用燃气 ,解决农村废弃物和工业生产废弃物的环境污染问题。因此 ,“十一五”期间 ,国家将继续扩大农村地区的户用沼气、特别是与农业生产结合的沼气技术的应用 ,城镇地区则发展大型畜禽养殖场沼气工程和工业废水沼气工程 ,实现集中供气或并网发电。

③ 生物质能产业

根据目前我国生物质能利用技术状况，生物质能利用重点将是生物质发电、沼气和生物质液体燃料等。生物质发电主要有农林废弃物发电、垃圾发电和沼气发电。根据有关规划，除沼气外，生物质能利用重点将是生物质发电和生物质液体燃料等。在“十一五”期间，生物质发电全国将形成 500 万千瓦的装机能力，在资源丰富区，建设区域型的兆瓦级的以秸秆、稻壳、蔗渣、灌木林和木材废弃物为原料的生物质发电厂；在经济较发达、土地资源稀缺地区建设垃圾焚烧发电厂；在规模化畜禽养殖场、工业废水处理和城市污水处理厂建设沼气工程，合理配套安装沼气发电设施等。

在生物质能源液化技术方面中国尚处于探索和试验的阶段，主要开发和利用的技术是乙醇燃料技术和生物油技术，即利用非粮食原料(主要为甜高粱、木薯以及木质纤维素等)生产燃料乙醇技术和以麻疯树为原料制取生物柴油，并建设规模化原料供应基地，建立生物质液体燃料加工企业。到 2010 年，燃料乙醇的年生产能力达到约 200 万吨，生物柴油的年生产能力达到 20 万吨，总计年替代 200 万吨成品油。

④ 小水电代燃料工程

水电作为我国最重要的可再生能源，在今后二三十年内仍将是可再生能源发展的重要领域。我国水电资源十分丰富，分布广泛，遍及全国 30 个省(区、市)的 1600 多个县(市)，65%的小水电集中西部地区。西南地区的小水电资源占全国的 50%以上。目前，国家正在西部地区实施以退耕还林和天然林保护为目的的“小水电代柴”计划，小水电具有很大的发展潜力。根据《全国小水电代燃料生态

保护工程规划》，全国拥有小水电资源可发展代燃料工程的有 1600 多个县，可开发的小水电资源有 8061 万千瓦、年发电量 2749 亿千瓦时，完全能够满足代燃料区农民的生活燃料需要。到 2010 年，通过代燃料工程，可解决生态环境特别脆弱、当前急需的 970 万户 3730 万农村居民的生活燃料问题。其中，“十五”期间重点在西部地区完成 286 万户 1100 万农民；“十一五”期间，重点从西部扩展到其他重点地区，再完成 684 万户 2630 万农民。根据规划，到 2020 年，通过小水电代燃料工程，将解决 2830 万户 1.04 亿农村人口的生活燃料问题。届时，将新增小水电代燃料装机 2403.8 万 kW，年发电量 781.2 亿 kWh，由此每年减少薪柴消耗 1.49 亿立方米，保护森林 3.4 亿亩，减少排放二氧化碳 2 亿吨、二氧化硫 92 万吨，有效地巩固生态建设成果，基本解决我国退耕还林区内居民的生活燃料和农村能源问题。

⑤ 可再生能源中长期发展规划

根据规划，到 2020 年，水电总装机容量将达到 2.9 亿千瓦，开发程度达到 70%左右，生物质发电达到 2000 万千瓦，风电达到 3000 万千瓦，太阳能发电达到 200 万千瓦，力争使可再生能源发电装机占总电力装机容量的比例达到 30%以上；到 2020 年太阳能热水器总集热面积达到 3 亿平方米，年替代化石能源约 4000 万吨标准煤；农村生物质能开发利用将作为发展现代农业、建设社会主义新农村的重要措施，继续推广户用沼气和禽畜养殖场沼气工程，加快生物质成型颗粒燃料的推广应用，到 2020 年沼气年利用量达到 240 亿立方米、生物质成型颗粒燃料年利用量达到 5000 万吨左右，同时积极发展以能源作物为主要原料的生物质液体燃料，到 2020 年达到年替代石油 1000 万吨的能力。

根据规划，到 2020 年，可再生能源将占到能源耗费总量的 16%，可再生能源的发电比例将达到 15%以上。其中，水电总装机将达到 3 亿千瓦，风电装机和生物质发电目标都是 3000 万千瓦，太阳能发电装机力争达到 180 万千瓦；燃料乙醇和生物柴油年生产能力分别达到 1000 万吨和 200 万吨；沼气年利用量达到 443 亿立方米，太阳能发电达到 180 万千瓦，太阳能热水器总集热面积达到 3 亿平方米。

2.引导中国北方农村建筑用能可持续增长的目标及策略

(1) .定位

① 作为涉及国家可持续发展战略组成部分去定位

能源是国家经济生命线，能效是可持续发展能源政策的基石。未来 20 年中国将实行“节能优先、结构优化、环境友好”的可持续能源发展战略，节约资源已经提升到了基本国策的高度。我国的建筑能耗由于长期快速增长的趋势和增量在能源需求增长中的主导地位确定了其中中国能源战略中的核心地位。三北地区农村拥有 80 亿平方米的建筑面积，仅采暖一项每年就消耗 13580 万 tec，占全国建筑总能耗的 20%，在我国建筑能耗体系中占据重要位置。推进三北地区农村建筑节能关系到我国整体建筑节能工作的成效，涉及到国家的能源战略和经济社会的可持续发展。

② 作为提高农民生活质量的重大民生问题去定位

目前，农村的采暖、炊事等用能方式落后，以使用柴草和煤炭直接燃烧为主的用能方式，造成农民家庭室内一氧化碳浓度数倍于国家规定空气质量标准，在

冬季这种污染程度更为严重，导致大部分农村人口长期暴露在损害人体健康的污染之中，并由此而引起孩童时期的哮喘和呼吸系统疾病增多。根据世界卫生组织与联合国开发计划署发表的调查，农家炊烟、采暖造成的室内空气污染，已经成为危害人们健康的主要原因。因此，改善农村的采暖、炊事用能方式，引导农村建筑用能的高效清洁化发展，减少环境污染，建造出健康、环保、高舒适度的居住环境，是提高广大农民生活质量的重大民生问题。

③ 作为带动扩大农民消费的举措去定位

改变农村目前的能源消费模式，鼓励农村发展太阳能、生物质等清洁能源，引导农村用能可持续增长，一方面可以把农民的消费从煤炭、液化气等商品能源的购买中解放出来；另一方面，发展生物质能产业，利用农产品及其废弃物生产新型能源，拓展了农产品的原料用途和加工途径，为农业提供了一个产品附加值高和市场潜力无限的平台，延伸农业产业链条，提高农业效益，拓展农村剩余劳动力转移空间，在促进区域经济发展、增加农民收入等方面大有可为[3]。

（2）目标

① 提高农房的保温隔热性能

当前三北地区农村建筑能耗高，热舒适度差是普遍存在的问题，造成这种现象的一个很重要的原因是农房普遍没有采取适当的保温措施，门窗漏风严重，因此提高农房的保温隔热性能是解决能耗高舒适性差的最有效措施。例如，清华大学建筑节能研究中心在北京市房山区开展了农房节能改造示范工程，结果显示，所有改造的农房的综合节能效率最低可达 55%，最高的可达 70%，改造效果非

常明显。

② 满足农民建筑用能合理增长的需求

目前农村的能源消费水平整体还是比较低，但随着农村经济发展，农民对生活的品质的要求越来越高，农村建筑用能的增长有很大潜力。我们推进农村建筑节能的目的，不是要限制农村的用能需求的增长，降低或维持当前农村的建筑能耗水平，而是要统筹资源、环境和经济发展，采用合理先进技术，给农村提供清洁高效的用能方式，更好地满足农民建筑用能增长需求，提高农民的生活品质。

③ 保持并逐步提高农村可再生能源应用比例

我国农村建筑用能结构的突出问题是，煤炭等商品能的比例逐渐升高，可再生能源应用比例过低。而我国的石油、天然气资源贫乏，单纯依靠化石能源难以实现经济、社会和环境的协调发展。在农村生物质能、太阳能资源丰富，技术已经成熟或接近成熟，具有大规模开发利用的良好前景。大力推广高效生物质能、太阳能在建筑中的应用，降低煤炭在能源消费中的比重，是实现我国农村建筑用能可持续增长的重要目标。

（3）策略

① “两手抓”

一手抓以提高农村建筑保温隔热性能为导向的农村新型节能建筑、节能建材和节能技术的研发、推广与普及，大力推广烧结非粘土多孔砖、加气混凝土、ESP板、中空玻璃等节能材料，加强外墙、门窗、屋顶、地面的节能技术的应用，提

高农村房屋的保温隔热效果；一手抓以可再生能源建筑应用为导向的建筑用能方式，大力发展生物质能、太阳能等可再生能源建筑应用，优化农村的建筑用能结构。

② 延续传统

延续传统的基于生物质能的用能结构，延续传统的绿色建筑形式和生活方式。我国农村地区生物质能丰富，实现农村建筑用能可持续增长，应该延续传统的以生物质能为主的用能方式。同时注重效率，大力发展生物质气化、沼气等高效的生物质能利用技术，将低品位能源转化为高品位能源以满足农村的建筑能耗需求。

③ 两低两高

农村经济条件较差，农民节能意识不足，推进农村建筑节能阻力相对较大。因此，在引导农村建筑节能的策略选择上，我们要统筹考虑成本、技术和市场方面的可行性，优选技术方案和推广方法，关键要做到“两低两高”，即建设和运行的低成本、技术和市场的低风险，以及市场的高可推广性和技术的高可靠性、可维护性。

④ 因地制宜

首先，要注意城乡差别，不能将城市中采用的建筑节能模式、技术、标准一刀切地应用于农村。其次，要考虑各地经济条件、气候资源条件，因地制宜地发展适用技术。如，在秸秆等生物质能丰富的地区可以优先考虑秸秆气化技术进行采暖、炊事；在太阳能资源丰富的地区可以考虑太阳能供热技术进行炊事和采暖。

⑤ 政府引导、市场推动

采取“政策引导，市场推进”的机制，特别是要完善经济激励政策，通过引导和刺激需求端的消费，运用市场化的机制促进企业参与和投入，最终形成相对完善的全产业链发展模式。

（4） 制度设计原则及政策激励的着力点选择

① 制度设计原则

设立和制订农村建筑节能经济激励政策时，因遵循下列原则，以确保经济激励政策的实施能促进农村建筑节能工作的快速发展。

1) 可行性原则

对于涉及到的相关主体而言，经济激励政策首先应具备可行性，政策的制定应做到符合市场经济运行机制、适合建筑节能和社会经济发展现状以及充分考虑到实施过程中可能遇到的风险及解决办法，确保能够在实践中得以顺利推行。

2) 有效性原则

政策即是为达到某一特定目标而采取的各项举措。如果政策所发挥的作用是无效的，那么预期目标将无法实现，因此必须确保经济激励政策是有效的，即通过政策的实施能够有步骤、按计划地达到农村建筑节能的阶段性目标，以期最终实现社会的可持续发展。

3) 灵活性原则

由于建筑节能涉及众多生产、消费环节和领域，且与建筑物所处地区的自然、经济、社会条件等因素密切相关，因此建筑节能经济激励政策应具备灵活性和多样性，能够随着公众节能意识、节能技术和产品、节能投资等因素的变化及政策实施效果的反馈，及时进行调整和修改，结合建筑节能市场的不同阶段，充分发挥经济杠杆的积极作用。

4) 全局性原则

以往的建筑活动是以牺牲生态利益为代价来实现经济和社会利益的，现今在以科学发展观和可持续发展为各项活动指导思想的基础上，必须从“能源—经济—环境”一体化系统协调发展的角度来设计和制订建筑节能经济激励政策，才能确保经济效益、社会效益和生态效益的共同实现，即政策的设计和制订应从整体性、全局性的角度来考虑问题。

5) 最优性原则

由于实现目标的手段是多种多样的，农村建筑节能经济激励政策的设计过程中也会存在多项备选方案，因此需要对备选方案进行比较和分析，从中选择最优的政策方案，以加快建筑节能的步伐、促进预期目标的早日实现 [4]。

② 政策激励着力点选择

1) 激励对象

不同的激励对象，激励效果是不同的。而农村建筑节能表现为消费的正外部性，用户采用节能技术和对高效节能产品的使用带来的能源节约、环境保护等外部效益，不能通过有效的形式转化为用户的私人收益，从而大大抑制消费行为，最终影响农村建筑节能的需求。鉴于此，农村建筑节能应该建立需求端导向的激励政策，把用户（农户、学校、卫生院等）作为激励对象，充分发挥利益驱动效应，推动农村建筑节能。

2) 激励环节

障碍环节重于其他环节。在现实中可以看到，一些建筑节能工作中长期难以解决的问题，成为推进建筑节能的卡脖子环节。经济激励政策应当作用于克服这些关键障碍[5]。在农村建筑节能中，节能产品的推广应用是个关键环节，推进农村建筑节能应该应用端作为重点激励环节。

3) 激励力度

激励力度要不断变化，根据技术进步、成熟程度等因素，激励力度要有一个由强到弱的变化，起初政策的力度应该大一点，鼓励早用、快用等。随着技术进步，市场认知度的提高，要逐步让市场机制发生作用，政策逐步弱化。

4) 激励时机

按照时间周期，激励时机的选择可分为期前激励、期中激励和期末激励。针对不同的激励策略应选择不同的激励时机，考虑到农村建筑节能前期启动的困难，为充分调动用户参与的积极性，激励时机应以前期激励为主，同时根据工作的实施效果辅以期末激励。

③ 建立农村建筑技术标准和监管体系

1) 技术标准体系的建立

目前，用于指导农村建筑节能的技术标准体系缺失。2009年6月住房城乡建设部印发了《严寒和寒冷地区农村住房节能技术导则（试行）》，下一步应上升为节能设计标准，并形成以标准为主体的技术法规体系，纳入工程建设强制性标准予以执行。同时配套相应的技术政策、技术指南，建立适时公布推广、限制、淘汰技术目录的制度，这样建立完善的技术标准体系，引导农村建筑节能的健康发展。

2) 农村新建建筑的监管

按照有效性原则，有步骤有计划地推进农村新建建筑监管体系的建设。实施引导-备案-监管三步走策略，有步骤、按计划地推进农村新建建筑监管，对农村学校、医院等公共建筑应先行一步纳入现行的管理体系。

5. 在农村地区推广生物质能建筑应用中相关利益主体的博弈分析

(1) 相关的利益主体

所谓生物质能建筑是指满足生物质能技术和建筑的一定的结合度，通过秸秆气化等生物质能技术为居民提供采暖、炊事、生活热水等用能需求的一体化应用。在农村地区推广生物质能建筑应用涉及三个主要相关的利益主体——政府、生物质气化炉设备生产商(注：生物质能建筑应用中的设备主要包括，生物质气化炉、秸秆粉碎机及颗粒加工机，其中生物质气化炉是最关键的设备，本文以其作为讨论的对象)和消费者(包括农户以及农村卫生院、中小学等)。政府作为公共利益的代表是政策的制定者和积极推动者。生物质气化炉设备生产商受政府激励政策引导，其投资决策直接关系到设备的质量和价格，进而影响消费者需求。消费者是生物质气化炉的直接使用者，其需求量就是整个生物质能建筑应用的推广空间，消费者通过市场机制与生物质气化炉生产商相互影响，同时受政府激励政策的引导。三方相互之间的关系如图 1 所示。

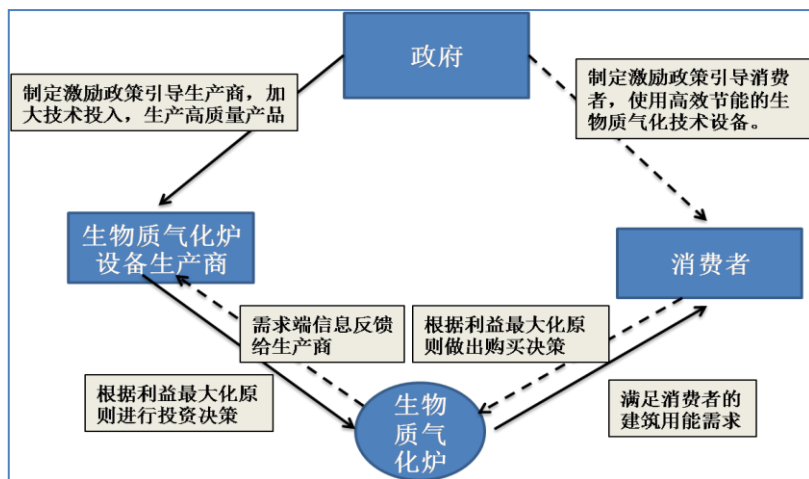


图 1 政府、生产商、消费者三方主体关系图

① 政府和生物质气化炉设备生产商之间的博弈分析

政府和生物质气化炉设备生产商的博弈分析符合完全信息动态博弈模型，如图 2 所示。

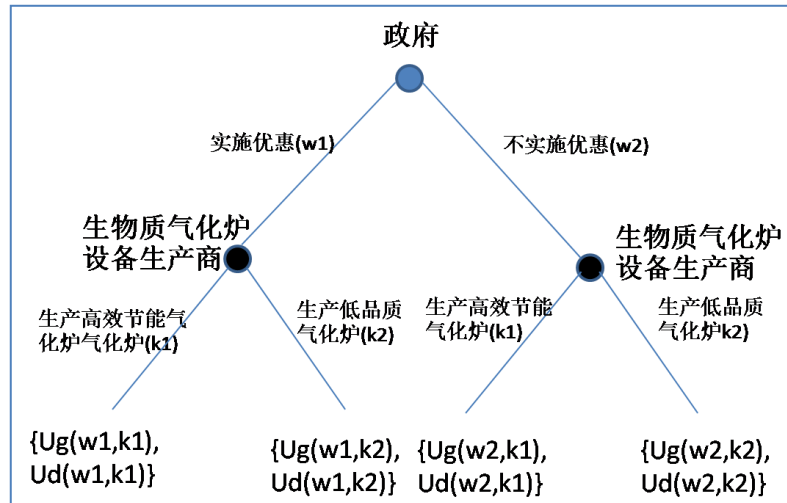


图 2 政府和设备生产商之间的博弈

博弈论情形假定：

(1) 参与的双方为政府和生物质气化炉设备生产商，W 表示政府是否对生物质气化炉设备生产商实施经济激励， $W=\{w1,w2\}=\{ \text{实施}, \text{不实施} \}$ ；K 表示设备生产商生产何种设备， $K=\{ k1,k2 \}=\{ \text{生产高效节能气化炉}, \text{生产低品质气化炉} \}$ 。

(2) 政府实施经济激励政策，所获得的经济收益为 π_e ，主要是税收收入；社会效益为 π_s ，包括农村环境的改善以及农民生活质量的提高等。激励总收益 $\pi=\pi_e+\pi_s$ 。付给生物质气化炉设备生产商的经济激励政策额度，即激励成本为 r ，主要包括直接价格补贴、贷款贴息补助等，另外还包括政策制定成本和监督成本[3]。 π 和 r 由政府实施的激励方案和生物质气化炉设备生产商采取的生产策略共同决定，即 $\pi=\pi_e+\pi_s=\pi(w_i,k_i), r=r(w_i,k_i)$ ，其中 $i=1,2$ 。

(3) 生物质气化炉设备生产商生产设备的成本为 $C=c(k_i)$ ，其中 $i=1,2$ 。

(4) 政府的效用函数为 U_g ，生物质气化炉设备生产商的效用函数为 U_d ， U_g 和 U_d 由政府实施的激励方案和生物质气化炉设备生产商的采取的策略共同决定，即 $U_g = U_g(W_i, k_i)$, $U_d = U_d(W_i, k_i)$ ，其中 $i=1,2$ 。则政府的效用函数和生物质气化炉设备生产商的效用函数分别为：

$$U_g = U_g(W_i, k_i) = \pi(w_i, k_i) - r(w_i, k_i)$$

$$U_d = U_d(W_i, k_i) = r(w_i, k_i) - c(k_i)$$

(5) 政府实施的经济激励方案,只有使激励对象设备生产商生产高效节能设备所得到的净收益大于生产低品质设备产品得到的净收益,经济激励方案才能发挥作用,才能调动生产商的积极性,激励方案必须满足激励相容约束,即 $r(w_1, k_1) - c(k_1) \geq r(w_1, k_2) - c(k_2)$ 。

(6) 消费者的行为不影响企业和政府的决策。

模型求解：

可运用逆向归纳法求解子博弈精炼纳什均衡^[4]。

(1) $\pi(w_1, k_1) > r(w_1, k_1)$ 时

① 第二阶段，生物质气化炉设备生产商的最优选择

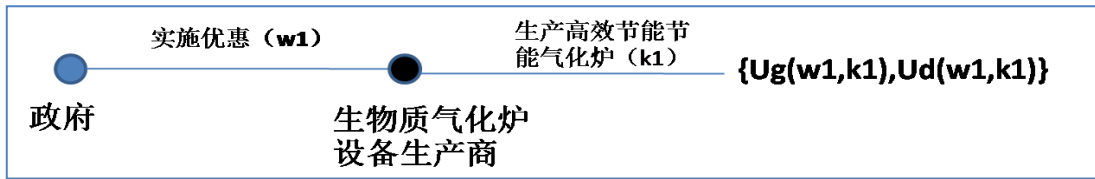
针对 w_1 : $\max\{U_d\} = \max\{U_d(w_1, k_1), U_d(w_1, k_2)\}$, 得到最优解 $K^*(w_1) = k_1$ ，即设备生产商的最优选择是生产高品质设备。

针对 w_2 : $\max\{U_d\} = \max\{U_d(w_2, k_1), U_d(w_2, k_2)\}$, 得到最优解 $K^*(w_2) = k_2$ ，即设备生产商的最优选择是生产低品质设备。

② 第一阶段，政府的最优选择

$\max\{U_g\} = \max\{U_g(w_1, k_1), U_g(w_2, k_2)\}$, 得到最优解 $W^* = w_1$, 所以第一阶段中央政府的最优选择是实施经济激励政策。

由此得到的精炼纳什均衡路径：



(2) $\pi(W1, K1) \leq r(W1, K1)$ 时

① 第二阶段，生物质气化炉设备生产商的最优选择

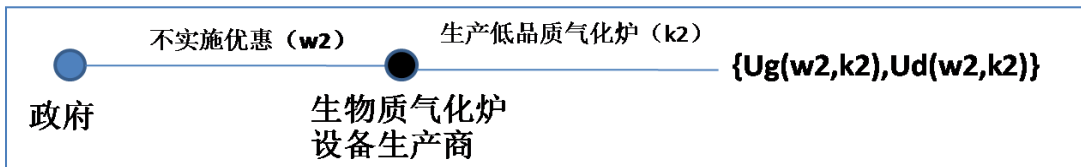
针对W1：得到最优解 $K^*(w1)=k1$ ，生物质气化炉设备生产商的最优选择是生产高效节能设备。

针对W2：得到最优解 $K^*(w2)=k2$ ，生物质气化炉设备生产商的最优选择是生产低品质设备。

② 第一阶段，政府的最优选择

得到最优解是 $W^* = w2$ ，第一阶段中政府的最优选择不实施经济激励政策。

由此得到的精炼纳什均衡路径：



结果分析：

可见，经济激励效果是政府是否对设备生产商实施经济激励政策的关键影响因素。

在 $\pi = \pi_e + \pi_s = \pi(w_i, k_i) \geq r(w_i, k_i)$ 的情况下，政府选择对设备生产商进行激励是博弈的均衡，因此，政府应该综合考虑整个行业发展状况，选择是否对设备生产商进行激励。一旦选择激励，政府应该设计合理的激励方案，确保激励政策的实施效果，引导生产商在技术研发上投入更多资金，不断提高设备质量和节能效率。应该指出的是，当前的生物质气化炉设备生产市场还相当混乱，技术发展良莠不齐，

鱼目混珠的情况时有发生，因此，政府的政策引导对整个行业的发展至关重要。

② 消费者和政府之间的博弈分析

政府和消费者之间的博弈分析也符合完全信息动态博弈模型，如图 3 所示。

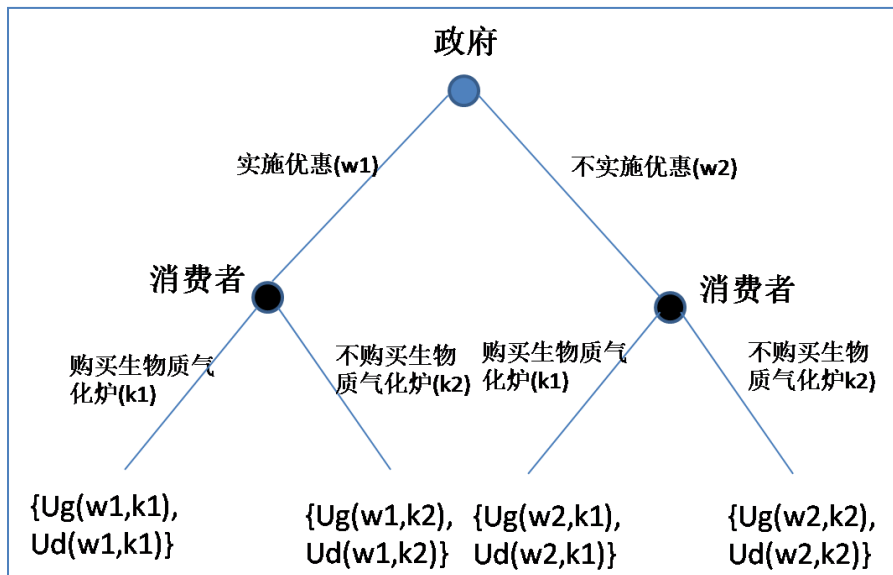


图 3 政府和消费者之间的博弈

博弈论情形假定：

(1) 参与的双方为政府和消费者， W 表示政府是否对消费者实施经济激励， $W=\{w1, w2\}=\{ \text{实施}, \text{不实施} \}$ ； K 表示消费者购买设备的情况， $K=\{ k1, k2 \}=\{ \text{购买生物质气化炉}, \text{不购买生物质气化炉} \}$ 。

(2) 政府实施经济激励政策，所获得的激励收益为 π ，主要来自于农村资源环境的改善以及农民生活质量的提高；激励成本为 r ，主要是政府对消费者的经济补贴指出以及政策法规的制定成本、监督成本。 π 和 r 由政府实施的激励方案和消费者的购买选择共同决定，即 $\pi=\pi(w_i, k_i), r=r(w_i, k_i)$ ，其中 $i=1, 2$ 。

(3) 消费者的购买生物质气化炉的花费为 $C=c(k_i)$ ，其中 $i=1, 2$ 。

(4) 政府的效用函数为 U_g ，消费者的效用函数为 U_d ， U_g 和 U_d 由政府实施

的激励方案和生物质气化炉设备生产商的采取的策略共同决定，即

$U_g = U_g(W_i, k_i), U_d = U_d(W_i, k_i)$ ，其中 $i=1,2$ 。则政府的效用函数和消费者的效用函数分别为：

$$U_g = U_g(W_i, k_i) = \pi(w_i, k_i) - r(w_i, k_i)$$

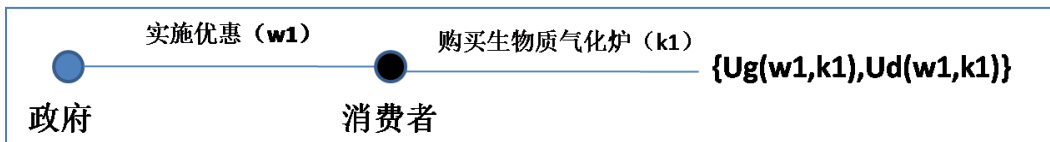
$$U_d = U_d(W_i, k_i) = r(w_i, k_i) - c(k_i)$$

(5) 政府实施的经济激励方案,只有使得激励对象消费者购买生物质炉所得到的净收益大于不购买生物质气化炉时得到的净收益,经济激励方案才能发挥作用,才能调动消费者的市场需求,激励方案必须满足激励相容约束,即 $r(w_1, k_1) - c(k_1) \geq r(w_1, k_2) - c(k_2)$ 。

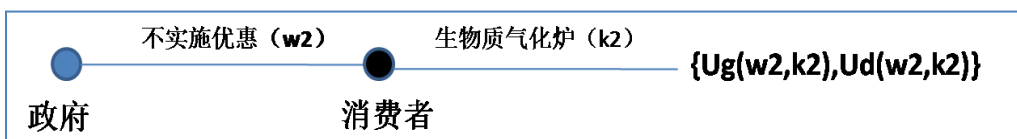
(6) 消费者的行为不影响企业和政府的决策。

因此，同理我们对此模型进行求解得到精炼均衡路径为：

当 $\pi(w_1, k_1) > r(w_1, k_1)$ 时，



当 $\pi(w_1, k_1) \leq r(w_1, k_1)$ 时，



结果分析：

可见，政府选择实施经济激励政策的条件是激励收益（包括农村资源环境的改善以及农民生活质量的提高）大于激励成本（主要是政府对消费者的经济补贴支出以及政策法规的制定成本、监督成本），政府应该根据行业发展状况，选择是否对消费者进行激励。一旦选择激励，政府应该设计合理的激励方案，选择正

确的激励方式和激励程度来确保政策收益。应该指出的是，目前，农村的购买力相对不足，特别是对生物质气化炉还存在一些认识上的偏见，造成生物质气化炉需求市场发展缓慢，需要政府的经济激励政策引导。

（2）在农村地区推广生物质能建筑应用的激励机制设计

① 激励对象

激励对象的选择有两种观点，供应端激励和需求端激励，政府应该根据产业的发展状况做出激励选择，同时选择合适的激励方案，确保激励收益 π 大于激励成本 r 。当前的生物质气化技术产业的发展状况是，一方面，在供应端存在生产厂商规模普遍较小、技术研发投入不足的问题，同时，目前生物质气化技术设备市场混乱，存在很多低质量产品，严重扰乱了正常的市场秩序；另一方面，在消费端，农村的购买能力相对不足，且对生物质气化技术设备的认识不全面，影响了生物质气化技术设备在农村的推广。

鉴于以上分析，政府应该采取双向激励的策略，以供应端的生物质气化炉设备生产商为激励对象，通过行政手段和经济激励手段相结合的方式，推动生物质气化技术发展，引导设备生产商生产高效节能气化炉，使政府和生物质气化炉设备生产商之间达到 $\{U_g(w_1, k_1), U_d(w_1, k_1)\}$ 的博弈均衡；以需求端的消费者为激励对象，通过对消费者的经济补贴，直接引导用户的需求。这样建立一个联动的激励机制，推动生物质气化技术在农村地区建筑中的应用。

② 激励方式

目前政府常用的激励方式包括，财政补贴、税收政策、价格政策、贴息贷款、

押金返还、投资基金、购买性支出等，政府需要根据实际的情况选择最合适的激励方式，以获得最大激励收益。在农村推广生物质能建筑应用的同时，我们更要综合兼顾资源、环境、经济等多个目标，同时按照“丁伯根法则”，政策工具的数量或控制变量数至少要等于目标变量的数量的原则，我们在设计激励方式时应综合考虑以下经济政策。

1) 财政补贴。

财政补贴是指国家财政为了实现特定的政治经济和社会目标，向企业或个人提供的一种补偿。财政补贴有两种方式，一是对产品(生物质气化炉)进行补贴，即根据产品的质量对设备生产商进行补贴，这种补贴能够刺激生产商不断更新技术、提高产品质量、降低产品成本，从而提高企业的经济效益；二是对消费者进行补贴，即对购买生物质气化炉的农户进行补贴，促进生物质气化炉在农村地区的推广应用。

财政补贴政策的实施要解决好两个问题：一是补贴资金来源问题，在可再生能源建筑应用县级示范政策中，中央政府已经安排了相应的补助资金，同样地方政府也要根据自己的财政承受能力安排相应的补助资金；二是补贴的策略问题，即选择什么样的运行机制进行补贴，如在对消费者补助时，可以直补到用户，直接降低用户的购买成本，也可以在使用过程中对用户进行补助，降低用户的使用成本。对生产商进行补贴时，应该采取公开招标的方式选取补贴对象，由产品质量监督单位对生物质气化炉技术设备进行质量鉴定，确保财政补助资金的正确使用。

2) 设立农村可再生能源建筑应用投资基金

政府的财政资金毕竟有限，特别是农村地区财政资金相对贫乏，因此要充分发挥财政资金的“杠杆”作用，积极吸收社会资金的投入，设立农村可再生能源建筑应用投资基金，建立推动农村可再生能源建筑应用融资机制。在投资基金的资金来源上，主要包括政府的直接财政投资和民间资金，政府投入部分追求保值，不要求回报。民间资金要考虑融资渠道的可行性、资金来源的稳定性等多种因素。在基金管理模式上，需要在政府和独立机构模式中总结经验，设计一种符合我国实际情况的管理机构模式。这种管理模式应既能利用政府部门宏观调控作用，又能发挥不同专业机构管理特长的模式，是一个由多个机构组成的、在管理上形成互相合作又相互监督的、体现公平、高效的管理模式。投资基金可以对外直接投资，作为项目的资本金，也可以向企业提供担保，为企业的投资融资进行担保。

3) 政府采购

将包括生物质气化炉等设备纳入政府采购目录范围，这样利用买方需求来刺激增加这些产品的供给，引导市场转向生产和消费能效更高的产品。在政府采购中可采取两项措施，一是政府采购要集中于能效高、质量好的产品，以鼓励企业对生物质气化节能设备或技术的开发；二是政府公布采购标准，引导企业向高标准迈进，从而提高农村建筑采暖设备的整体能效。

③ 激励程度

在财政资金有限的情况下，要选择适中的激励程度，偏小则达不到激励效果，偏大则造成财政紧张。根据激励机制理论，激励机制的设计首先要确保经济主体

参与的积极性，其次要满足激励相容约束，促使经济主体的自立行为资源实现制度的目标。

参与性约束可表述为被激励者（生物质气化炉设备生产商和消费者）在激励作用下采取的行为（生物质气化炉生产商生产高效节能设备和消费购买设备）的期望效用 U_d 应不小于不作为时（生物质气化炉生产商生产低质量设备和消费者不购买设备）的期望效用 U_{\sim} 。

$$\text{即满足 } U_d = r(w_1, k_1) - c(k_1) \geq U_{\sim} = r(w_2, k_2) - c(k_2)$$

激励相容性约束可表述为激励政策实施时，激励对象努力工作得到的收益应不小于偷懒得到的收益即满足，

$$r(w_1, k_1) - c(k_1) \geq r(w_1, k_2) - c(k_2)$$

在满足参与性约束和激励相容约束的前提下设计激励力度，即可达到激励的目的，使得被激励者根据自利原则做出的最优选择与政府期望的目标一致。同时激励力度要注意随着技术的进步和成熟有一个由强到弱的变化，要随着技术进步、市场认知度的提高，建立激励逐步退出机制。

④ 激励策略

在推广生物质能建筑应用的激励机制设计中，要注重策略选择，根据目前农村建筑用能的发展情况，应该坚持“三个优先”和“一个模式”的推广策略。“三个优先”即，优先在农村卫生院、中小学等公共建筑建筑中推广应用，优先在新农村建设示范的项目中推广应用，优先在秸秆等生物质能丰富、经济条件相对较好的地区推广，这样优先在这些农村地区的建筑推广应用，为进一步的全面推广积累经验。“一个模式”即，“炉子到户，颗粒机到村”的推广模式。在生物质气化炉的

推广应用过程中要注重颗粒加工机的配套，在生物质气化炉到用户的同时，以村为单位配置颗粒加工机，确保用户取料的便利，这样稳步地以村为单位推进生物质能的建筑应用。

⑤ 结论

(1) 国家出台政策支持农村地区可再生能源建筑应用，生物质能建筑应用技术成熟、可靠，应该把此技术列入可再生能源建筑应用农村地区县级示范的支持范围。

(2) 通过相关利益主体的博弈分析，指出经济激励效果是政府是否实施经济激励的关键，同时指出政府应该设计合理的激励方案，选择正确的激励方式和激励程度来确保政策收益。

(3) 政府应该采取双向激励的策略，以生物质气化炉设备生产商和消费者为激励对象，建立联动激励机制，更有效地推进农村地区生物质能建筑应用。

(4) 通过财政补助、设立投资基金、政府采购等激励方式，创新资金使用方式，发挥财政资金的最大效应。

(5) 要确保财政资金使用效应，还要把握好的激励程度，指出政府应该在满足

$$r(w1,k1)-c(k1)\geq r(w2,k2)-c(k2) \text{ 和}$$

$r(w1,k1)-c(k1)\geq r(w1,k2)-c(k2)$ 的前提下设计激励力度。同时设计了“三个优先推广”和“炉子到户，颗粒机到村”的推广模式，稳步推进生物质能建筑应用。

总结：

农村既是能源消费者，也是能源生产者；既是污染物排放源，也是污染物消纳地。随着农村经济发展，新农村建设的推进，如何更有效地解决农村不断增长的采暖、炊事、生活热水需求将是我们必须解决的问题。开发以生物质能源和其他可再生能源为主的新的农村能源系统，同时大幅度改进农村建筑的保温性能和采暖方式，才能更好地满足农村的建筑用能需求，实现满足可持续发展要求的社会主义新农村建设。这需要大量的技术创新和各级政府的政策、机制及经费支持，更需要从科学发展观出发的全面的科学规划。根据目前国家和农村居民的经济承受能力，在我国北方寒冷农村地区让所用农户使用清洁燃料并不可能。但在相对富裕的地区可以推广沼气和气化技术，同时还应继续大力推广节能架空炕和改良灶，在提高生物质燃料能效和利用率的同时，提高农村居民的生活质量

发展农村能源，治理农业面源污染，不仅能够缓解国家能源压力、优化能源结构、保障国家能源安全，而且有效减少污染物排放，改善农村生产生活环境。农村节能减排是国家节能减排工作的重要组成部分。

参考文献

- [1] L. Zhang, Z. Yang, B. Chen, G. Chen. Rural energy in china: Pattern and policy [J]. Renewable Energy **2009**, 34(12): 2813-2823.
- [2] Y. Xudong, J. Yi. Energy and environment in chinese rural housing: Road to sustainability [C]. The First International Conference on Building Energy and Environment, Dalian, China, **2008**.
- [3] J. Li, A. Zhou, J. Bai, Z. Su. Assessment of biomass resource availability in china [J]. China Environmental Science Press **1998**.
- [4] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告(2008) [M]. City. 中国建筑工业出版社. **2008**.
- [5] 清华大学北方农村能源与环境调研组. 2006 年清华大学北方农村能源与环境调研工作总结报告 [R]. City: 清华大学, **2007**.
- [6] 石元春. 决胜生物质 [M]. City. 中国农业大学出版社. **2010**.
- [7]
- [8] Leach , G. The energy transition [J]. Energy Policy **1992**, 20(2): 116-123.
- [9] 陆慧, 卢黎. 农民收入水平对农村家庭能源消费结构影响的实证分析 [J]. 财贸研究 **2006**(3): 28-34.
- [10] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. City. 华中科技大学出版社. **2002**.