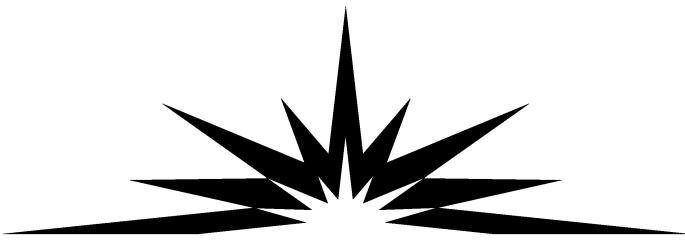

中国可持续能源项目

The China Sustainable Energy Program

能 源 基 金 会

The Energy Foundation



项目成果报告系列

Technical Report

中国冷屋面节能与碳减排效果研究

Research of Energy Efficiency and Carbon Emission Reduction of Cool Roof in China

广东省建筑科学研究院

2012 年 8 月

项目信息

项目资助号: G-1108-14591

Grant Number: G-1108-14591

项目期: 8/1/2011 - 7/31/2012

Grant period: 8/1/2011 - 7/31/2012

所属领域: 建筑节能

Sector: energy efficiency of building

项目概述: 项目旨在研究量化中国城市区域冷屋面节能和 CO₂ 减排的方法, 对冷屋面在中国的推广应用提供理论和数据支持。

Project Description: The project aims at quantifying the method of energy efficiency and CO₂ emission reduction of cool roof in urban regional of China, and providing the theory and data support.

项目成员: 杨仕超, 吴培浩, 周荃, 林长青, 江飞飞, 程瑞希, 王丽娟, 张伟生, 张庆波, 刘轩, 余凯伦

Project team: Yang Shichao, Wu Peihao, Zhou Quan, Lin Changqing, Jiang Feifei, Cheng Ruixi, Wang Lijuan, Zhang Weisheng, Zhang Qingbo, Liu Xuan, Yu Kailun,

关键词: 冷屋面, 节能, 碳减排

Key Word: cool roof, energy efficiency, carbon emission reduction

摘要

本项目旨在研究量化中国城市区域冷屋面节能和 CO₂ 减排的方法，对冷屋面在中国的推广应用提供理论和数据支持。一是通过调研分析获得国际广泛认可冷屋面节能和 CO₂ 减排计算方法，糅合中国的气候和环境等影响因素，探寻适合中国城市区域的计算方法。二是计算典型城市的冷屋面节能和 CO₂ 减排效果，与绿化屋面和太阳能光伏屋顶对比，分析冷屋面在我国不同地区的推广价值。三是编制我国主要城市冷屋面节能和 CO₂ 减排效益计算软件，为推广冷屋面提供计算工具。

（1）国外冷屋面 CO₂ 减排计算原理和方法调研

国外冷屋面 CO₂ 减排计算原理和方法调研方面，我们广泛搜集整理了在正式学术刊物和学术会议上公开发表的相关论文和报告，特别对美国劳伦斯国家实验室 Menon , Akbari 等近年发表的相关论文进行了全文翻译，对文中的引用的数据进行了认真考证，了解了相关计算原理和方法。

冷屋面 CO₂ 减排包括太阳反射比增强的等效 CO₂ 减排和节能直接 CO₂ 减排两个方面。冷屋面的直接 CO₂ 减排原理和方法比较简单，是利用建筑能耗模拟手段，计算冷屋面降低的建筑能耗，根据当地单位能源的 CO₂ 排放水平换算减排的 CO₂。

冷屋面等效 CO₂ 减排的计算原理和方法则较为复杂，是基于人类活动引起的地表太阳反射比降低和大气层温室气体浓度升高都使地表辐射强迫升高，因此推论出增强地表太阳反射比引起的辐射强迫降低就等效于抵消部分 CO₂ 排放引起的辐射强度增加。基于相同的辐射强迫变化，就可以建立地表太阳反射比增强与大气 CO₂ 浓度降低的等效关系，进而计算冷屋面的等效 CO₂ 减排量。

（2）国内主要城市气候、能源构成、空气质量等基础数据调研

气候、能源构成、空气质量等数据是计算不同地区冷屋面 CO₂ 减排能力的基础，为此我们向相关管理部门和科研单位咨询，现已

获取了我国主要城市，如北京市、上海市、重庆市、南京市、广州市、沈阳市、福州市、武汉市、南宁市、昆明市、成都市、西安市，拉萨、乌鲁木齐、海口市等 15 个城市典型年太阳辐射、温度、降雨量、云量、能源生产、能源消费等统计数据。

（3）我国冷屋面综合 CO₂ 减排计算方法

参照国外计算方法，我国冷屋面综合 CO₂ 减排计算亦考虑等效 CO₂ 减排和节能直接 CO₂ 减排两个方面。冷屋面的直接 CO₂ 减排利用建筑能耗模拟手段，计算冷屋面降低的建筑能耗，根据当地单位能源的 CO₂ 排放水平换算减排的 CO₂。

全国实现冷屋面的等效 CO₂ 减排量根据国外大气环流模型模拟确定地表太阳反射比与辐射强迫的变化关系进行计算。具体城市冷屋面的等效 CO₂ 减排量则根据 Akbari 等（2009）的经验公式确定地表太阳反射比与辐射强迫的变化关系进行计算。

（4）我国城市建成区冷屋面等效 CO₂ 减排潜力估算

根据《2010 年中国统计年鉴》城市建成区面积推算，目前我国城市建成区建筑屋顶面积约为 $8 \times 10^9 \text{ m}^2$ 。我国城市区域屋顶的终饰面多为深色，平均表面太阳反射比在 0.2 左右。通过在屋顶涂饰隔热涂料进行屋顶改造，平均表面太阳反射比可以提高 0.6 左右。全国城市建成区建筑屋面表面太阳反射比提高 0.6，等效于抵消大气层中 8.8 亿 t 的 CO₂，相当于抵消排放 16 亿 t 的 CO₂。按照欧盟现行碳排放交易价格 16 欧元/t 计算，全国城市建成区建筑屋面表面太阳反射比提高 0.6，等效碳减排环境效益为 256 亿欧元，折合人民币 2090 亿元。

（5）典型城市的冷屋面节能潜力模拟计算

选择北京、南京、广州三个典型城市，计算冷屋面（太阳辐射吸收系数 0.2）与普通屋面（太阳辐射吸收系数 0.8）屋顶层的能耗水平。结果表明在我国三个主要建筑气候区，对于建筑顶层，冷屋面相比普通深色屋面能显著的降低制冷能耗（尽管冷屋面会使顶层采暖能耗略有升高），从而使全年能耗显著下降，具有良好的节能效果。北京、南京、上海冷屋面屋顶层全年单位面积能耗比普通屋

面分别降低 7.5 kWh/m^2 、 6.7 kWh/m^2 和 14.1 kWh/m^2 。

（6）典型城市的 CO_2 减排潜力估算

仍然选择北京、南京、广州三个典型城市为例，根据能耗模拟的结果计算三地每 1000 m^2 冷屋面直接 CO_2 减排量分别为 5.8 t/a 、 5.2 t/a 和 11.0 t/a 。根据 Akbari 等（2009）的经验公式分别确定三个城市地表太阳反射比与辐射强迫的变化关系，然后计算得到三地每 1000 m^2 冷屋面的等效 CO_2 减排量分别为 28 t 、 56 t 和 131 t 。在冷屋面的生命周期（暂估 10 年）里，北京、南京、广州每 1000 m^2 冷屋面综合 CO_2 减排潜力分别为 86 t 、 108 t 和 241 t 。

（7）冷屋面的推广价值分析

以北京、南京、广州三个典型城市为例，对比冷屋面与绿化屋面和太阳能光伏屋顶的建造成本和节能减排效益，分析冷屋面在我国不同地区的推广价值。结果表明相比光伏屋顶，冷屋面造价约为光伏屋顶的 2%，节能效益和碳减排效益则分别为光伏屋顶的 10% 和 18%；而相比种植屋顶，冷屋面造价为种植屋顶 25%~50%，节能效益和碳减排效益高于种植屋面，且施工和维护较为容易，因此冷屋面在我国夏热冬暖、夏热冬冷和寒冷地区都具备极大的推广价值。

（8）中国主要城市冷屋面节能和 CO_2 减排效益计算软件编制

中国地域广阔，气候复杂，不同地区冷屋面的节能减排效益各异。为此项目编制了“中国主要城市冷屋面节能和 CO_2 减排效益计算软件”，为促进各地区有效推广冷屋面提供了计算工具。

Summary

The project, Research of Energy Efficiency and Carbon Emission Reduction of Cool Roof in China, aims at quantifying the method of calculating energy efficiency and CO₂ emission reduction of cool roof in urban regional of China, and providing the theory and data support. Firstly, we plan to search for a method which has been widely accepted through investigating and analyzing the existing calculation methods of cool roof energy efficiency and CO₂ emission reduction in the world, and get one that is suitable for the urban regional conditions in China, considering the comprehensive effect of climatic and environmental factors in China. Secondly, we will evaluate the effect of energy efficiency and CO₂ emission reduction of existing practice in typical cities of China, and compare it with the green roof and solar photovoltaic roof, and also analyze the value of its popularization and application in various cities in China. Thirdly, we also want to draw up a calculation software of energy efficiency and carbon emission reduction, which can be applied for main cities in China and used as a calculation tool for popularizing the cool roof.

(1) Investigation of calculation principle and method of cool roof CO₂ emission reduction which used in foreign countries

In the aspect of investigation of foreign calculation principle and method, we widely collected data and gathered materials from papers and reports published in the academic journals and conferences. Especially, we carried out a full translation of papers which have been recently published by Menon and Akbari etc from Lawrence Berkeley National Laboratory, and a textual research into the data cited in these papers, and also we understood the related calculation principle and method which has been used in these papers.

Cool roof CO₂ emission reductions includes equivalent CO₂ emission reductions that comes from enhanced solar reflectance and direct CO₂ emission reduction that comes from energy savings. The principle and method of direct CO₂ emission reduction, that is computing the reduced building energy consumption through building energy consumption simulation according to the local CO₂ emission level per unit energy consumption, are simple, while the principle and method of cool roof equivalent CO₂ emission reduction are relatively complex. This method is based on the principle that both of decreasing of surface solar reflectance induced by human activities and the increasing of atmospheric greenhouse gas concentration can result in the increasing of surface. Consequently, we can deduce that increasing the surface solar reflectance will induce the decreasing of radiative forcing, and thus offset some increasing of radiation intensity resulted from CO₂ emission. The relationship of surface solar reflectance and radiative forcing can be discovered by general circulation model(GCM) simulation or empirical formula calculation. Study on the relationship of atmospheric CO₂ concentration and radiative forcing has been mature, and there are accurate related data. So, in order to calculate the equivalent emission reduction of cool roof, we can establish the equivalent relationship of surface solar reflectance increase and atmospheric CO₂ concentration decrease based on the same variation of radiative forcing.

(2) Investigation of basic data of main cities in China, including climate, energy source composition and air quality etc.

These data refers to climate, energy source composition and air quality etc, that are the base of computing CO₂ emission reductions as a result of using cool roof. For this reason, we consulted the relative administrative departments and scientific research institutions, and got the statistical data of solar radiation, temperature, rainfall, cloudiness, energy production, energy consumption etc of 15 typical main cities in

China, such as Beijing, Shanghai, Chongqing, Nanjing, Guangzhou, Shenyang, Fuzhou, Wuhan, Nanning, Kunming, Chengdu, Xi'an, Lhasa, Urumqi, Haikou etc.

(3) The comprehensive calculation method of CO₂ emission reductions of cool roof

Following the example of foreign countries, both of equivalent CO₂ emission and direct CO₂ emission are considered in China when computing the CO₂ emission reductions of cool roof. And the building energy consumption simulation technology can be used to compute the reduced energy consumption of cool roof, thus the converted CO₂ emission reduction can be got by reference to the local CO₂ emission level per unit energy consumption.

The equivalent CO₂ emission reductions of regions where the cool roof has been realized in an all-round way can be computed by reference to the relationship of surface solar reflectance and radiative forcing that comes from the simulation of foreign general circulation model(GCM). The equivalent CO₂ emission reductions of a specific city can be computed by reference to the relationship of surface solar reflectance and radiative forcing, that is a empirical formula proposed by Akbari etc.

(4) The evaluation of equivalent CO₂ emission reduction potential of cool roof in Urban Built-up Area of cities in China

According to the Urban Built-up Area provided by 《China Statistical Yearbook 2010》, we can estimate that the area of roof in Urban Built-up Area is about 8×10^9 m². The appearance color of roof in Urban Built-up Area of our country is mostly dark. The average surface solar reflectance is about 0.2. And the average surface solar reflectance can increase 0.6 by painting heat insulation coating on the roof. The surface solar reflectance increase 0.003, then the surface average radiation forcing will decrease 0.5 W/m², and the equivalent relationship

of CO_2 increasing in gas and surface radiation increasing will be $0.91 \text{ kW/ (t CO}_2\text{)}$. Based on the data above, we can get a fact that the surface radiation will decrease 100 kW which offset 110 t CO_2 in gas, as long as the surface solar reflectance of 1000 m^2 cool roof increase 0.6. Because 55% of CO_2 emission will remain in the gas, this equals to offset 200t CO_2 emission. The increasing of surface solar reflectance of roof in Urban Built-up Area by 0.6 equals to offset $8.8 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ that remains in the gas and $16 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ emission. According to the existing EU CO_2 emission trading price(16 £/t), if the surface solar reflectance of all roof in Urban Built-up Area increase 0.6, we will get £ 256 or ¥2090 Yuan RMB environmental benefit of CO_2 emission reductions.

(5) Energy-saving potential simulation of cool roof in typical cities

We computed the energy consumption level of cool roof (absorption coefficients of solar radiation is 0.2) and ordinary roof (absorption coefficients of solar radiation is 0.8) in Beijing, Nanjing, Guangzhou, and the results show that compared the ordinary roof whose color is dark, the cool roof can reduce the energy consumption dramatically, although the heating energy consumption of roof increases slightly. Consequently, the energy-saving effect is good that the annual energy consumption will decrease dramatically. The decrement of annual energy consumption per unit area in Beijing, Nanjing, Shanghai are 7.5 KWh/m^2 , 6.7 KWh/m^2 , 14.1 KWh/m^2 respectively, which resulted from the using of cool roof.

(6) The evaluation of CO_2 emission reduction potential in typical cities

We still choose Beijing, Nanjing, and Guangzhou as the typical cities as typical examples. The direct CO_2 emission reductions per 1000 m^2 cool roof in three cities are 5.8 t/a , 5.2 t/a , 11.0 t/a , according to the simulation results of energy consumption. The relationship of surface solar reflectance and radiative forcing in three different cities can be determined by empirical formula which is proposed by Akbari etc in 2009. And the equivalent CO_2 emission reductions per 1000 m^2 cool roof

in these three cities are 28t, 56t, 131t respectively. The comprehensive CO₂ emission reduction potential per 1000m² cool roof in these three cities are 86t, 108 t, 241t during the entire life cycle(tentative estimation is 10 years) of cool roof.

(7) Analysis of promotion potential of cool roof in typical cities

Evaluate the environmental benefits of cool roof in the typical cities and compare the environmental benefits and costs of PV-roof, green roof and cool roof in the typical cities of different weather zone. Among the three kinds of roof, the cost of cool roof is lowest, about 2% of PV-roof and 25%~50% of green roof, but its environmental benefits is higher than green roof and about 10%~18% of PV-roof. So the cool roof has great promotion potential in main weather zone in China.

(8) Development of environmental benefits calculation software of cool roof in China

For the environmental benefits of cool roof in different weather zone in China, we have developed a software to calculate the environmental benefits of cool roof in China, providing a calculation tool for different cities to promote cool roof.

目 录

项目信息	I
摘要	II
SUMMARY	V
1 概述	1
1.1 冷屋面技术定义	1
1.2 冷屋面技术研究历程	1
1.3 冷屋面节能减排的作用机理	2
2 国外冷屋面节能减排效益计算方法研究	3
2.1 增强地表反射率与辐射强迫变化的关系	3
2.2 CO ₂ 浓度与辐射强迫变化的关系	4
2.3 增强地表反射率的等效 CO ₂ 减排量	4
3 中国冷屋面的节能潜力分析	5
3.1 模型基本情况	5
3.2 计算温度	6
3.3 围护结构热工参数	6
3.4 计算结果	7
3.5 结果分析	9
4 中国冷屋面的碳减排潜力分析	10
4.1 冷屋面等效 CO ₂ 减排潜力分析	10
4.2 冷屋面的直接 CO ₂ 减排潜力分析	11
4.3 冷屋面的综合 CO ₂ 减排潜力	11
4.4 全国城市建成区冷屋面的等效 CO ₂ 减排分析	12
5 冷屋面推广价值分析	13
5.1 冷屋面产品	13

5. 2 其他节能型屋面	13
5. 3 冷屋面的推广价值分析	13
6 中国主要城市冷屋面节能和 CO₂ 减排效益计算软件	14
7、结束语	15

1 概述

1.1 冷屋面技术定义

冷屋面（Cool Roof）技术最早由美国劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）的能源和环境部提出，实质是使用具有较高太阳能反射率和表面辐射率的材料（白色浅色涂料和面砖、热反射隔热涂料等），提高屋顶室外表面的太阳能反射率和表面辐射率，将太阳能反射回天空，从而能够在降低屋顶温度和建筑顶层能耗的同时，减轻城市热岛效应，缓解地球变暖的趋势。“冷屋面”中对于“冷”的定义，至今尚没有明确的定义，在美国一般将“冷屋面”定义为太阳反射率大于 0.65 和表面辐射率大于 0.75 的屋面。

1.2 冷屋面技术研究历程

20 世纪 80、90 年代，劳伦斯伯克利国家实验室研究人员发现城区要比周围乡村地区的温度高约 $1.7\text{--}2.5$ ℃。其主要原因：一是城区比周围乡村地区植被少，这一点对城区温度升高的贡献占 56%；二是城区黑色屋面的热辐射作用，其对温升的贡献占 38%，其余为路面等占 6%。可见屋面是造成城市热岛效应的主要原因之一。为此，城市热岛效应使美国一年多支出超过 20 亿美元，相当于整个美国峰电需要的 5%~10%。热岛效应可以使居民感到很不舒服，增加了能源的费用，而且较高的温度会使空气受污染的程度增加，从而对人类的健康产生危害。为降低人类活动引发的城市热岛效应，改善城市热环境，美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)的能源和环境部进行了大量基础研究，提出了冷屋面技术并制定认证推广策略，经过数十年的发展，冷屋面技术现已得到国际社会的广泛认同。如今美国的绿色建筑规范、建筑能源计划和各州的节能规范都将冷屋面技术列为推荐的节能措施。

1.3 冷屋面节能减排的作用机理

1.3.1 冷屋面的隔热原理

太阳辐射产生的热量中紫外线（UV）占3%，可见光和近红外短波辐射占40%，红外长波辐射占57%。为了阻止屋面热量传递，传统的方法是在屋面上使用诸如玻璃纤维、岩棉，聚苯乙烯泡沫等绝热材料。然而这样，太阳辐射产生的热量还是被屋面100%地吸收并加载到最初面对太阳的表面。为了减缓到达内表面，很厚的材料被安装在外表面以控制这种热负荷。

冷屋面技术摒弃传统的高热阻绝热理论，从源头阻止太阳辐射对屋面的加热，防止热传入表面，从而减少可能传导的热量。冷屋面技术采用较高太阳能反射率和表面辐射率的材料，能反射80%以上的太阳辐射热，包括90%以上的红外线（长波）辐射、80%的短波辐射和90%的紫外辐射。剩下的可能进入到材料表面热量，再通过高的发射率将热量发射到远离使用环境的空中。所以只需很薄的材料厚度，即可达到优异的隔热效果。

1.3.2 冷屋面对建筑节能的作用

冷屋面室外表面具有较高的太阳能反射率和表面辐射率，能将太阳辐射热量反射回天空，从而能够降低屋顶温度和建筑顶层能耗的同时，减轻城市热岛效应，缓解地球变暖的趋势。经实测和能耗模拟分析，相比普通深色屋面，冷屋面夏季晴日的外表面温度、内表面温度、室内空气温度可分别降低12℃~16℃、5℃~7℃和1.5℃~2.5℃，不同气候区域冷屋面建筑顶层全年单位面积能耗可降低6.7~14.1 KWh/m²，对于改善建筑室内外热环境，降低建筑能耗，减少能源消耗，降低CO₂排放，效果显著。

1.3.3 冷屋面CO₂减排原理

冷屋面对CO₂减排的贡献不仅在于降低了建筑的空调制冷能耗

带来的直接 CO_2 减排，还在于增大了地表反射比带来的地表辐射强迫（Radiative forcing）降低从而减缓了 CO_2 浓度上升引起的全球变暖趋势的等效 CO_2 减排。全球气候变化(如地表温度变化等)，主要受地表的辐射强迫影响。人类活动引起的地表太阳反射比降低和大气层 CO_2 浓度升高都使地表辐射强迫升高，从而引发全球变暖的气候问题，因此可以推论出增强地表太阳反射比引起的辐射强迫降低就等效于抵消部分 CO_2 排放引起的辐射强度增加。

2 国外冷屋面节能减排效益计算方法研究

冷屋面能够阻止太阳辐射对屋面的加热作用，从而降低屋顶外表面和内表面温度，减少制冷能耗，从而起到节能和直接 CO_2 减排的作用。

冷屋面对 CO_2 减排的贡献不仅在于降低了建筑的空调制冷能耗带来的直接 CO_2 减排，还在于增大了地表反射比带来的地表辐射强迫（Radiative forcing）降低从而减缓了 CO_2 浓度上升引起的全球变暖趋势的等效 CO_2 减排。全球气候变化(如地表温度变化等)，主要受地表的辐射强迫影响。人类活动引起的地表太阳反射比降低和大气层 CO_2 浓度升高都使地表辐射强迫升高，从而引发全球变暖的气候问题，因此可以推论出增强地表太阳反射比引起的辐射强迫降低就等效于抵消部分 CO_2 排放引起的辐射强度增加。

2.1 增强地表反射率与辐射强迫变化的关系

美国国家航天局戈达德空间研究所 Hansen 等研究了气候模型（GCMs）对地表反射率、太阳辐射、温室气体温度、气溶胶等因素变化的响应的敏感性。根据 Hansen 等的估算，地表反射率升高 0.01，地表辐射强迫降低 2.92 W/m^2 。美国劳伦斯国家实验室 Akbari 等认为地表反射率增加引发的地表辐射强迫变化受到云量和年平均

太阳辐射强度的强烈影响，云量越高，年平均辐射强度越低，降低辐射强迫的效果越差。因此 Akbari 等引入了根据云量对 Hansen 等的估算结果进行修正。

美国劳伦斯国家实验室 Menon 等利用陆地模型耦合 GEOS-5 大气环流模型(Goddard Earth Observing System Model, Version 5)，量化分析了地表反射率变化，与引发的地表辐射压力和地表温度的变化之间的数值关系。对全球范围进行模拟，当地表平均反射率升高 0.003，地表平均辐射压力减小 0.5 W/m^2 ，地表平均温度下降 0.008 K。

2. 2 CO_2 浓度与辐射强迫变化的关系

挪威奥斯陆大学 Myhre 等研究了 CO_2 浓度变化与地表辐射强迫的分析，得到了两者关系的经验公式 $\text{RF} [\text{W/m}^2] = 5.35 \ln(1 + \Delta \text{C}/\text{C})$ (RF 为辐射强迫变化值， ΔC 为 CO_2 浓度变化值， C 为 CO_2 浓度)。据此计算，当大气层 CO_2 浓度倍增时，地表辐射强迫增加 3.71 W/m^2 ^[4]。Hansen 等研究了气候模型 (GCMs) 对地表反射率、太阳辐射、温室气体温度、气溶胶等因素变化的响应的敏感性。根据 Hansen 等的估算，当大气层 CO_2 浓度倍增时，地表辐射强迫增加 4.19 W/m^2 。

Akbari 等根据 Hansen 等研究得出的 CO_2 浓度倍增时的地表辐射强迫数据^[1]，以工业革命前的 CO_2 浓度 (275 ppm) 为计算起点，估算出大气中 CO_2 量增加 1 t，地表辐射量约增加 1 kW 的等效关系。Menon 等则根据 Myhre 等的 CO_2 浓度倍增时的地表辐射强迫数据，以现今的 CO_2 浓度 (385 ppm) 为计算起点，估算出大气中 CO_2 变量和地表辐射量的等效关系为 0.91 kW/t CO_2 。

2. 3 增强地表反射率的等效 CO_2 减排量

地表反射率变化与地表辐射强迫负相关， CO_2 浓度变化与地表

辐射强迫正相关。通过地表辐射强迫可以建立地表反射率增强与 CO_2 减排的等效关系。

Akbari 等以地表反射率升高 0.01, 地表辐射强迫降低 $1.22 \sim 2.25 \text{ W/m}^2$, 大气 CO_2 增量和地表辐射量的等效关系为 1 kW/ t CO_2 的数据为计算基准, 计算得到: 若 1000 m^2 屋顶反射率升高 0.25, 则地表辐射量降低 $31 \sim 56 \text{ kW}$, 等效于抵消大气层中 $31 \sim 56 \text{ t}$ 的 CO_2 ; 因为 CO_2 排放量只有 55% 滞留于大气层中, 故 1000 m^2 屋顶反射率升高 0.25, 相当于抵消排放 $56 \sim 102 \text{ t}$ 的 CO_2 。

3 中国冷屋面的节能潜力分析

采用 E-quest 能耗模拟软件建立相同的公共建筑屋顶层模型, 对于北京、南京、广州三地, 围护结构按照《公共建筑节能设计标准》GB 50189 设置, 满足各地所在气候区围护结构热工性能规定性指标, 计算冷屋面(太阳辐射吸收系数 0.2)与普通屋面(太阳辐射吸收系数 0.8)屋顶层的能耗水平。

3.1 模型基本情况

采用相同的公共建筑屋顶层模型, 如图 3.1 所示, 建筑尺寸为 $32 \text{ m} \times 32 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 各朝向窗墙面积比均为 0.4, 建筑层数为 1 层。对于北京、南京、广州三地, 围护结构按照 GB 50189 设置, 满足各地所在气候区围护结构热工性能规定性指标, 计算冷屋面(太阳辐射吸收系数 0.2)与普通屋面(太阳辐射吸收系数 0.8)屋顶层的能耗水平。

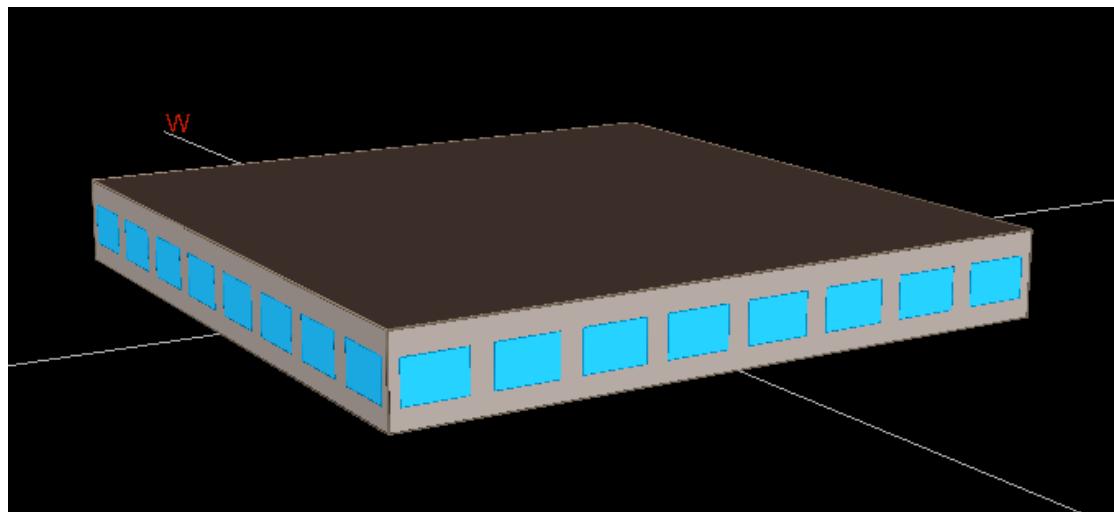


图 3.1-1 建筑模型

3. 2 计算温度

3.2-1 室内计算温度

季节	夏季	冬季
室内设计温度	26℃	20℃

3.2-2 室外计算温度

地区	夏季	冬季
室外设计温度	北京	30.2℃
	南京	32.0℃
	广州	31.1℃

3. 3 围护结构热工参数

地点	北京	南京	广州
墙体传热系数 W/(m.K)	0.5	1.0	1.5

屋面传热系数 W/(m.K)	0.45	0.7	0.9
窗传热系数	2.3	3.0	3.5
窗遮阳系数	0.7	0.5 (北向 0.6)	0.45 (北向 0.55)

注：取值参照 GB 50189《公共建筑节能设计标准》的规定性指标要求。

3.4 计算结果

3.4.1 北京

屋面吸收系数	0.8		0.2	
	制冷	采暖	制冷	采暖
全年负荷 (KW)	113967	31447	88371	34065
综合性能系数	3.0	3.0	3.0	3.0
全年能耗 (KWh)	37989	10482	29457	11355
单位面积能耗 (KWh/m ²)	37.1	10.2	28.8	11.1
全年能耗合计 (KWh)	48471		40812	
全年单位面积能耗合计 (KWh/m ²)	47.3		39.9	

3.4.2 南京

屋面吸收系数	0.8	0.2
--------	-----	-----

工况	制冷	采暖	制冷	采暖
全年负荷 (KW)	102940	70243	75702	77026
综合性能系数	3.0	3.0	3.0	3.0
全年能耗 (KWh)	34313	23414	25234	25675
单位面积能耗 (KWh/m ²)	33.5	22.9	24.6	25.1
全年能耗合计	57728		50910	
全年单位面积 能耗合计 (KWh/m ²)	56.4		49.7	

3.4.3 广州

屋面吸收系数	0.8		0.2	
工况	制冷	采暖	制冷	采暖
全年负荷 (KW)	166805	—	123346	—
综合性能系数	3.0	—	3.0	—
全年能耗 (KWh)	55602	—	41115	—
单位面积能耗 (KWh/m ²)	54.3	—	40.2	—
全年能耗合计	55602		41115	
全年单位面积 能耗合计 (KWh/m ²)	54.3		40.2	

3.4.4 节能潜力

地区		全年制冷能耗降 低 KWh/m ²	全年采暖能耗升 高 KWh/m ²	全年总能耗降 低 KWh/m ²
冷屋面节能效 果	北京	8.3	0.9	7.5
	南京	8.9	2.2	6.7
	广州	14.1	—	14.1

3.5 结果分析

对于同样满足寒冷地区围护结构热工性能规定性指标的公共建筑，相比普通屋面的顶层，北京地区分体式空调制冷和采暖（能效比 3.0）的冷屋面顶层，夏季制冷能耗降低 8.3 KWh/m²，冬季采暖能耗增加 0.9 KWh/m²，全年能耗降低 7.5 KWh/m²。

对于同样满足夏热冬冷地区围护结构热工性能规定性指标的公共建筑，相比普通屋面的顶层，南京地区分体式空调制冷和采暖（能效比 3.0）的冷屋面顶层，夏季制冷能耗降低 8.9 KWh/m²，冬季采暖能耗增加 2.2 KWh/m²，全年能耗降低 6.7 KWh/m²。

对于同样满足夏热冬暖地区围护结构热工性能规定性指标的公共建筑，相比普通屋面的顶层，广州地区分体式空调制冷（能效比 3.0）的冷屋面顶层，全年制冷能耗降低 14.1 KWh/m²。

可以看出在我国三个主要建筑气候区，对于建筑顶层，冷屋面相比普通深色屋面能显著的降低制冷能耗（尽管冷屋面会使顶层采暖能耗略有升高），从而使全年能耗显著下降，具有良好的节能效果。

4 中国冷屋面的碳减排潜力分析

冷屋面的碳减排潜力包括两个方面：一是冷屋面具有较高的表面太阳反射比，减少地表对辐射的吸收（太阳直接辐射和大气层反射回的辐射），从而降低地表辐射强迫，可以抵消 CO₂ 排放引起地表辐射强迫增加，从而等效减排 CO₂；二是冷屋面可以较明显降低建筑屋顶层的制冷负荷，降低全年能耗，从而减少化石燃料等能源的消耗，从而直接减排 CO₂。冷屋面表面太阳反射比增强的等效减排和建筑屋顶层能耗降低的直接减排构成了冷屋面的碳排放潜力。

4.1 冷屋面等效 CO₂ 减排潜力分析

由于全国不同地区地理和气候有较大差别，特别是太阳辐射强度和云量的不同，对地表太阳反射比增强与辐射强迫的变化关系影响较大。可以根据各地区太阳辐射强度和云量统计值修正地表太阳反射比增强与辐射强迫的变化关系，如式 4.1-1。

$$\Delta RF = I \times \frac{(1-c)^2}{(1-\rho c/2)^2} \Delta \rho \quad (式 4.1-1)$$

ΔRF：地表太阳反射比增强引发的地表辐射强迫降幅，W/m²；

I：年均昼间太阳辐射强度，W/m²；

C：年均云量，%；

ρ：地表太阳反射比现值；

Δρ：地表太阳反射比增加值。

以北京、南京、广州为例，按此估算三个典型城市每 1000 m² 屋顶表面太阳反射比由 0.2 升高至 0.8，即屋顶表面太阳反射比增强 0.6 的等效碳减排量如表 4.1-1 所示。

表 4.1-1 我国典型城市屋顶反射增强的等效 CO₂ 减排量

城市	云量 ^b / %	年均太阳日总辐射量 ^c /	ΔRF _{城市} / W/m ²	1000 m ² 屋面反射增强等效 CO ₂ 减
----	---------------------	--------------------------	--------------------------------------	--

		MJ/(m ² *d)		排量 / t
北京	72	11.1	14.0	28
南京	61	11.7	28.0	56
广州	45	14.2	65.4	131

注: a: 屋顶表面太阳反射比升高 0.6。

b: 数据来源于中国气象网发布的 1971~2001 年的气象统计信息。

c: 数据由西安建筑科技大学刘家平教授提供。

4.2 冷屋面的直接 CO₂减排潜力分析

根据本文冷屋面屋顶层与普通屋面屋顶层的能耗模拟的计算结果, 按照 1 kWh 耗电量等换算 0.33 kg 标准煤, 1 t 标准煤排放 2.36 t CO₂ 计算, 可以算出北京、南京、广州三地冷屋面降低建筑屋顶层能耗直接 CO₂ 减排量, 如表 4.2-2 所示。

表 4.2-2 我国典型城市冷屋面的综合 CO₂ 减排量

地区	全年总能耗降低 KWh/ (m ² *年)	1000 m ² 屋面反射增强 直接 CO ₂ 减排量/ (t/ 年)
冷屋面节能减排效果	北京	7.5
	南京	6.7
	广州	14.1

注: 屋顶表面太阳反射比升高 0.6。

4.3 冷屋面的综合 CO₂减排潜力

将冷屋面的等效 CO₂ 减排量和直接 CO₂ 减排量叠加, 即可得到冷屋面的综合 CO₂ 减排潜力。如表 4.3-3 所示。

表 4.3-3 我国典型城市冷屋面的综合 CO₂ 减排潜力

地区	1000 m ² 屋面反	1000 m ² 屋面反射	1000 m ² 屋面反射增强
----	-------------------------	--------------------------	----------------------------

		射增强等效 CO ₂ 减排量 /t	增强直接 CO ₂ 减排量 / (t/年)	生命周期 (10 年) 内综合 CO ₂ 减排量 /t
冷屋面综合减排效果	北京	28	5.8	86
	南京	56	5.2	108
	广州	131	11.0	241

注：屋顶表面太阳反射比升高 0.6。

4.4 全国城市建成区冷屋面的等效 CO₂减排分析

根据《2010 年中国统计年鉴》我国城市建成区（实际开发建设起来的集中连片的、市政公用设施和公共设施基本具备的地区）面积为 38107 km²，城市建设用地面积为 38727 km²。根据 Akbari 等的统计^[5]，城市区域中超过 60%的面积为屋顶和道路，两者比例分别 20~25% 和 29~44%。按此推算，目前我国城市建成区建筑屋顶面积约为 8×10^9 m²。

我国城市区域屋顶的终饰面多为深色，平均表面太阳反射比在 0.2 左右。通过在屋顶涂饰浅色涂料和隔热涂料）或贴浅色面砖进行屋顶改造，平均表面太阳反射比可以提高 0.6 左右。以地表太阳反射比升高 0.003，地表平均辐射强迫减小 0.5 W/m²；大气 CO₂ 增量和地表辐射增量的等效关系为 0.91 kW/ t CO₂ 的数据为计算基准（Menon 等（2010）），则每 1000 m² 屋顶表面太阳反射比升高 0.6，则地表辐射量降低 100 kW，等效于抵消大气层中 110 t 的 CO₂，因 CO₂ 排放量只有 55% 留在大气层中，故相当于抵消排放 200 t 的 CO₂。

全国城市建成区建筑屋面表面太阳反射比提高 0.6，等效于抵消大气层中 8.8 亿 t 的 CO₂，相当于抵消排放 16 亿 t 的 CO₂。按照欧盟现行碳排放交易价格 16 欧元/t 计算，全国城市建成区建筑屋面表

面太阳反射比提高 0.6, 等效碳减排环境效益为 256 亿欧元, 折合人民币 2090 亿元。

5 冷屋面推广价值分析

5.1 冷屋面产品

冷屋面材料是具有较高太阳反射比和半球发射率的材料, 可以降低屋顶太阳辐射的吸收, 增强屋顶向室外的热辐射, 减小通过屋顶达到室内的热流, 从而减少建筑制冷能耗。一般太阳表面太阳反射比小于 0.55 的材料, 具备较好的隔热性能。目前较为成熟的冷屋面产品主要有抛光铝反射板、热反射隔热涂料、浅色涂料和灰瓦。其中抛光铝反射板用于轻质屋顶, 灰瓦用于坡屋顶, 应用范围较为狭窄。热反射隔热涂料和浅色涂料具有较好的隔热性能, 可以广泛应用于各种屋面, 同时价格相对便宜, 施工方便, 是最具推广价值的冷屋面材料。

由于热反射隔热涂料和浅色涂料是有机材料, 故其耐老化、耐沾污等耐候性能相对较差。在污染严重的地区, 可能存在使用数年后涂料沾污, 隔热性能严重降低, 需要重新涂刷的现象。但在我国大部门城市热反射隔热涂料和浅色涂料用于屋顶所带来节能和 CO₂ 减排的环境经济效益, 还是相当可观的。

5.2 其他节能型屋面

除了冷屋面, 种植屋面和太阳能光伏屋面也是目前被提及和推广使用的符合建筑节能理念的屋面形式。种植屋面适用于我国南方地区, 难以全国推广。太阳能光伏屋顶, 由于技术和运营模式尚未达到普遍推广的程度, 并且由于光伏组件生产中的能耗和污染较为严重, 投入与环境效益产出比低, 其节能和碳减排效果尚待考证。

5.3 冷屋面的推广价值分析

对比冷屋面与绿化屋面和太阳能光伏屋顶的建造成本和节能减排效益（以北京、南京、广州三个典型城市的计算数据为例），分析冷屋面在我国不同地区的推广价值。结果表明相比光伏屋顶，冷屋面造价约为光伏屋顶的2%，节能效益和碳减排效益则分别为光伏屋顶的10%和18%；而相比种植屋顶，冷屋面造价为种植屋顶25%~50%，节能效益和碳减排效益高于种植屋面，且施工和维护较为容易，因此冷屋面在我国夏热冬暖、夏热冬冷和寒冷地区都具备极大的推广价值。

6.2-1 冷屋面和其他节能型屋面的造价和性能对比

	使用寿命	节能效果 kWh/(m ² * 年)	碳减排效果 kg CO ₂ /(m ² * 年)	建设成本	施工 难度	维护 难度
冷屋顶 ¹	10年	6.7~14.1	8.6~24.1	45~150元/m ²	简单	简单
种植屋顶	25年	5~9	8~15	100~600元/m ²	一般	一般
太阳能光伏屋顶	25年	65~170	50~130	6000~10000元 /m ²	高	高

注1：反射比0.8。

6 中国主要城市冷屋面节能和CO₂减排效益计算软件

中国地域广阔，气候复杂，不同地区冷屋面的节能减排效益各异。为此项目编制了“中国主要城市冷屋面节能和CO₂减排效益计算软件”，为各地区有效推广冷屋面提供了计算工具。

软件根据项目研究成果编制，输入变量为城市（关联气象数据和冷屋面单位面积年节能量等信息）和冷屋面属性（面积、材质、太阳反射比），输出结果为项目冷屋顶寿命期内的屋顶层总节能量、项目冷屋顶寿命期内的屋顶层CO₂减排量、项目冷屋顶寿命期内的年均节能量、项目冷屋顶寿命期内的屋顶层年均CO₂减排量。

软件采用网页形式表达，向社会免费开放，方便政府部门、开

发建设单位、科研单位、社会公众等人员使用。软件网络地址为 <http://www.yjkmqmc.com/coolroot/>，软件界面如图 6-1 所示。

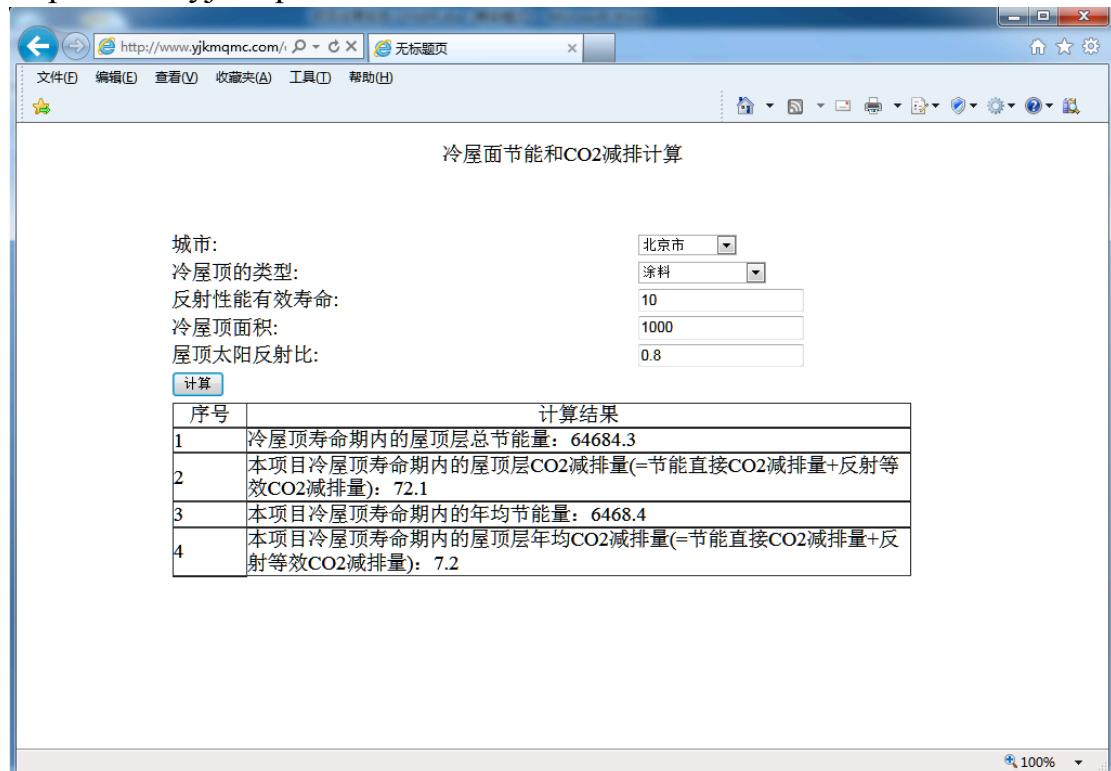


图 6-1 中国主要城市冷屋面节能和 CO₂ 减排效益计算软件界面

7、结束语

本项目解决了我国冷屋面节能和 CO₂ 减排效果的计算方法，研究了典型城市冷屋面的节能减排效益和推广价值，并且编制了中国主要城市冷屋面节能和 CO₂ 减排效益计算软件，完成了项目既定目标。

目前冷屋面的节能减排效益已得到广泛认可，但其有效使用寿命相对较短的缺陷，将成为该技术工程推广应用的难题，因此研究冷屋顶材料的耐久性评价指标和评价方法，促使厂商研发生产较高使用寿命的冷屋面产品将成为项目未来研究的一个重要方向。