

## 第五届“认证杯”数学中国

### 数学建模网络挑战赛

#### 承 诺 书

我们仔细阅读了第五届“认证杯”数学中国数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们允许数学中国网站([www.madio.net](http://www.madio.net))公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛队号为： 2528

参赛队员（签名）：

队员 1：赵东方

队员 2：赵小敏

队员 3：张 益

参赛队教练员（签名）： 邓磊

参赛队伍组别：本科组

## 第五届“认证杯”数学中国

### 数学建模网络挑战赛

#### 编号专用页

参赛队伍的参赛队号：（请各个参赛队提前填写好）：

2528

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

---

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

# 2012 年第五届“认证杯”数学中国 数学建模网络挑战赛

题 目 白 屋 顶 计 划

关 键 词 城市峡谷模型 制冷能耗 取暖能耗 污染物 减排量

## 摘 要：

为缓解城市热岛效应，有专家提出“白屋顶计划”。但有人对此提出反对意见。本文旨在建立数学模型，评估“白屋顶计划”对降低城市热岛效应起到的作用。文章分以下两步解决该问题：

定性分析：建立城市峡谷模型，定性分析“白屋顶计划”对城市热岛效应所起的作用。

定量分析：查找并分析数据，计算单位面积白屋顶节约的制冷能耗，取暖能耗，节约的能耗成本和污染物的减排量，定量的评估白屋顶计划对缓解城市热岛效应的作用。

城市峡谷模型把城市抽象为屋顶、墙壁和地面构成的峡谷系统，并结合已有的全球气候模型<sup>[1]</sup>，利用这种耦合建模的方法来研究。

定量分析时，通过查找和分析数据，建模计算单位面积白屋顶节约的制冷能耗 $E(x, y)$ 、取暖能耗 $G(x, y)$ 、能耗成本 $C(x, y)$ 和污染物的减排量 $P(x, y)$ ，绘制各项指标的光栅图，分析图像，得出结论。

城市峡谷模型说明：从全球范围内考虑，实施白色屋顶计划是降低城市热岛效应的有效途径，并且热岛效应降低的程度取决于屋顶在其它影响因素中的重要程度。但这种方法对高纬度地区的冬季并不是很有效。定量分析得出了类似的结论，定量分析还得出全美 236 个城市单位面积白屋顶节约的制冷能耗范围、取暖能耗范围、能耗成本范围、污染物的减排量的范围，并对这些结果进行对比讨论。

对于白色屋顶计划，可以适当做出大胆的想法。例如，夏季，将屋顶涂成白色，冬季涂成黑色，以最大限度的降低城市热岛效应。可以把本文的城市峡谷模型进行推广，对这种新的白色屋顶计划进行了评估。模型的定量分析，为白屋顶计划的实施提供了数据保证，使其大面积推广有了理论依据。

参赛队号 2528

参赛密码 \_\_\_\_\_  
(由组委会填写)

所选题目 B

## Abstract

Increasing the albedo of urban surfaces has received attention as a strategy to mitigate urban heat islands. White roofs - roofs that stay cool in the sun by minimizing solar absorption and maximizing thermal emission, lessen the flow of heat from the roof into the building, reducing the need for space cooling energy in conditioned buildings. Cool roofs may also increase the need for heating energy in cold climates. For a building, the decrease in annual cooling load is typically much greater than the increase in annual heating load.

The effects of globally installing white roofs are assessed using an urban canyon model coupled to a global climate model.

At high latitudes in winter, the increase in roof albedo is less effective at reducing the heat island due to low incoming solar radiation, the high albedo of snow intercepted by roofs, and an increase in space heating that compensates for reduced solar heating.

Global space heating increased more than air conditioning decreased, suggesting that end use energy costs must be considered in evaluating the benefits of white roofs.

This study combines building energy simulations, local energy prices, local electricity emission factors, and local estimates of building density to characterize local, state average, and national average cooling energy savings, heating energy penalties, energy cost savings, and emission reductions per unit conditioned roof area.

The annual heating and cooling energy uses of four commercial building prototypes—new office (1980+), old office (pre-1980), new retail (1980+), and old retail (pre-1980)—were simulated in 236 US cities. Substituting a weathered cool white roof (solar reflectance 0.55) for a weathered conventional gray roof (solar reflectance 0.20)

## 一、问题重述

20 世纪 60 年代，由于人造卫星的出现，使人类得以利用人造卫星从高空用红外线拍摄地球，这种拍摄的最初目的，是作气象测量用途，用以分析雨云的构成。可是，后来人类从红外线的影像发现了照片中的城市地区的温度有着很明显的差异，看起来城市部份就好像在周边地区的一个浮岛，这就是热岛效应的由来，定性分析，就是无论从早上到日落以后，城市地区的气温都比农村地区异常的高，并且夏天的城市气温往往格外炎热。

有专家提出，将城市建筑的屋顶漆成白色，减小对阳光的吸收率，可以使城市的气温降低，进而达到节能和环保的效果。包括美国能源部长、诺贝尔物理学奖获得者朱棣文在内的一些专家都对这个方案表示支持。

白屋顶计划也可称为浅色屋顶计划或凉爽屋顶计划，浅色屋顶降温的原理十分简单，太阳光线照射到屋顶上，释放光和热，深色屋顶容易吸收热，而浅色屋顶则不容易吸收热，这种热量吸收的多和少，取决于屋顶对太阳光的反射能力，即反射率，白色屋顶的反射率较高，因此，白色屋顶吸收的太阳能比灰色屋顶小。

据《纽约时报》报道，白色屋顶在热带地区已经有几百年的历史了。20 世纪中叶之前没有空调，南佛罗里达的人们普遍使用白色或者奶油色的锡屋顶。伴随空调而来的是深色屋顶，其主要成分是沥青。这些灰色屋顶材料会吸收 90% 的太阳能热量，而白色屋顶只吸收 10–15%。使用这种反射率较高的表面可以反射更多的太阳辐射，从而降低表面温度。

1995 年，Sailor<sup>[1]</sup>等人建模研究了洛杉矶城市反射率的改变对城市温度的影响，他们指出对于洛杉矶来说，城市反射率的增加降低了洛杉矶夏季温度中高达 1.5℃ 的峰值量。

1999 年，Taha<sup>[2]</sup>等人指出，大规模增加表面反射率，使美国的十个城市夏天日间地表气温减少 0.5 至 1.5℃，并且缓解了高峰电力需求的 10%。

2008 年，Synnefa<sup>[3]</sup>等人发现在雅典、希腊大规模增加屋顶反射率平均降低夏季热岛效应强度 1—2℃。

2009 年，Akbari<sup>[4]</sup>等人对全球城市的屋顶和路面进行建模，研究了屋顶和路面反射率的改变对气候的影响，他们推断出，由于全球城市中屋顶和路面的反射率的增加而产生的负辐射强度可抵消 44 亿吨的 CO<sub>2</sub> 排放量，其效果相当于减少全世界道路上所有车辆 11 年排放的 CO<sub>2</sub> 总量。

一般来说，这些已进行了的中尺度气象模型适用于有着大型反射率变化的个别城市，对于反射率改变较小的城市，得到的结果误差很大。

本文旨在建立合理的数学模型，评估“白屋顶计划”对降低城市热岛效应起到的作用。

## 二、符号说明

$\lambda_{\text{roof}}$  : 导热系数 ( $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ )。

$C_{\text{roof}}$  : 容积热容量 ( $\text{Jm}^{-3}\text{k}^{-1}$ )。

$R, r$  : 屋顶反射率。

$E(x, y)$  : 单位面积白屋顶节约的制冷能耗。

$G(x, y)$  : 单位面积白屋顶节约的取暖能耗。

$C(x, y)$  : 单位面积白屋顶节约的能耗成本。

$P(x, y)$ ：单位面积白屋顶减少的污染物排放量。

以上为文中使用的主要符号，其它的符号说明在模型建立时逐一说明。

### 三、模型建立与求解

#### 定性分析：城市峡谷模型

##### 【数据来源】

- 1、土地和大气成分数据：来自柯林斯等人的区域气候系统模型（CCSM）<sup>[5]</sup>，主要包括土地和大气成分的相关属性。
- 2、城市特征参数：T. Jackson 等人的全球气候模型里用到的城市特征参数，由美国地理学家纪事协会<sup>[6]</sup>提供。
- 3、城市规模的四个密度集：Dobson 等人的 LanScan 人口密度数据<sup>[7]</sup>
- 4、系统中用到的世界上 33 个地区与热、辐射、和建筑形态相关的参数，由 CLMU<sup>[8]</sup>的 3.5 版本提供，主要有热容量，反射率，建筑物高宽比，屋顶所占比例，平均建筑高度和大峡谷的透水性。

##### 【模型假设】

- 1、设定城市密度性质是中密度类型。
- 2、把城市定义为一个数据集，这个数据集包括城市规模和城市属性。基本数据集定义为现今普遍存在的城市规模和城市属性，即屋顶反射率没有改变时的城市。
- 3、屋顶反射率是在理想情况下进行设定的，即忽略了老化、障碍物和屋顶上的表面开口（如加热和冷却通风口）等各种因素的影响。

##### 【模型原型】

峡谷系统指城市屋顶、墙壁和地面构成的形如峡谷的抽象的城市模型。结合已有的全球气候模型构建城市峡谷模型，利用这种耦合建模的方法来研究白色屋顶对热岛效应的影响。

在城市峡谷模型中，墙壁分为向光和背光两种；谷底有透水（绿地）和不透水（路面）两种；“城市峡谷”中建筑物的高度和街道的宽度用来描述城市。

室内建筑规定了最低和最高气温，它们决定了屋顶和墙壁的边界传热条件，从而明确了 HAC（heating and air conditioning）通量。在计算城市热量估算时，将 HAC 系统产生的余热考虑在内。

用大量的气团表示位于大气中的城市冠层，峡谷表面（包括屋顶）的热量和水汽通量可以通过城市冠层相互交流。

城市峡谷会产生湍流和辐射通量，这些通量与非城市表面（例如植被和湖泊）共同提供大气模型中网格单元的平均通量。

本文建立的城市峡谷模型，通过改变不同环境参数进行了五次实验：

**实验一（CON）**：使用上面构建的城市峡谷模型中的基本数据集。

**实验二（ALB）**：在基本数据集的基础上，将屋顶涂上白色涂料，使屋顶的反射率增大到最大值 0.9。虽然由于老化、障碍物和屋顶上的表面开口（如加热和冷却通风口）等各种因素的影响，在现实中就很难达到这种反射率。但是，我们这里的目的是提供一个模型，以确定屋顶反射率对热岛效应的影响力。

**实验三（CON\_0）**：同实验一，使用构建的城市峡谷模型中的基本数据集，但是不考虑位于大气中的城市冠层的影响。

**实验四（ALB\_0）**：同实验二，将屋顶涂上白色涂料，使屋顶的反射率增大到最大

值 0.9。但不考虑位于大气中的城市冠层的影响。

**实验五 (CON\_0\_NHAC)：**同实验三，但排除 HAC 系统产生的余热。

### 【模型结果描述】

#### 1、基本结果分析

由于用来实验的空间分辨率并未细化，所以在城市模型中网格内的部分都很小。同时，由屋顶反射率增加引起的网格单元表面的平均气候变化在统计学上并没有意义，所以这里没有显示。

屋顶反射率的改变主要影响城市近地表气候。在下面的图 1 中，城市的温度是城市冠层空气温度。农村的温度是在网格单元中“农村”表面（植被和裸露表面）两米的平均空气温度。

图中白色部分显示的土地是模型中的非城市的网格。由图 1 可知，通过增加屋顶反射率，几乎在城市地区的每一个网格单元都减少了年平均热岛效应。在解决了所有市区的模型后，CON 实验中年平均热岛效应大约是  $1.2^{\circ}\text{C}$ ，而在 ALB 实验中年平均热岛效应下降了 33%，最终达到了  $0.8^{\circ}\text{C}$ 。

热岛效应变化有较大的空间变异性。通过对图 1 进行线性回归分析，确定了这种变化的主要原因。图中年平均热岛效应的变化 (ALB - CON) 与城市吸收太阳辐射 ( $R=0.70$ ,  $P<0.01$ ) 的变化呈正相关。其吸收太阳辐射的变化量是一个与传入的太阳辐射量和城市特性相关的函数。举例来说，更多的太阳辐射反射在市区较大的屋顶，同时在屋顶的反射率增幅也会较大（在 CON 实验的反射率较低）。在阿拉伯半岛和巴西等地区控制仿真和大型屋顶方面，就存在一些市区的屋顶反射率相对较低。

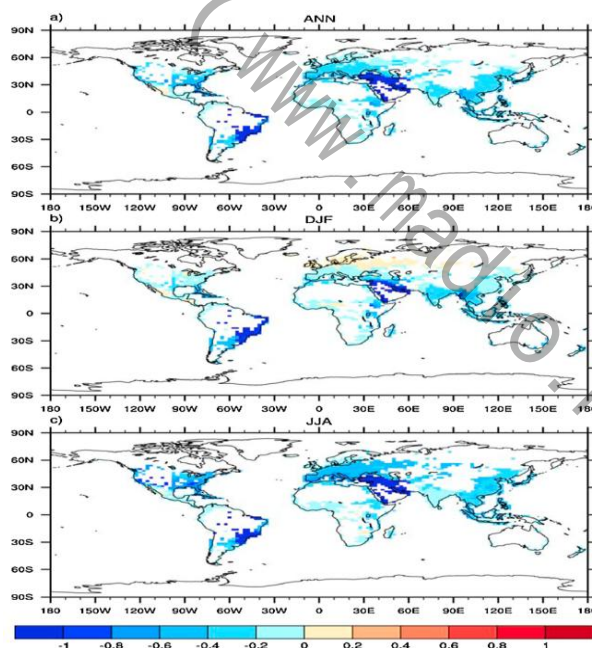


图 1. 1980 - 1999 年城市和农村的 ALB 和 CON 空气温度实验 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

(a)年度 (ANN); (b)十二月 - 二月 (DJF); (c)六月 - 八月 (JJA)。

在图 2 中，展示了屋顶反射率的增加是如何影响城市能源预算，以及城乡空气温度对比图。这些关于空气温度和能量平衡的城乡对比是所有模型如何呈现这些表面的典型。图中显示了在清晨，城市和农村的空气温度是差不多的，但热岛效应是从早上九点过后开始并在下午两点过后开始加剧的。相比之下，农村地区比城市地区冷却得更快。最大的热岛效应发生在日落附近 ( $4.3^{\circ}\text{C}$ )。城市的潜热

通量在白天远远低于农村，这种情况有助于使城市温度保持在温暖的范围。市区在白天明显存储着更多的热量，这些热量在晚上得到释放，维持接近零或正热感通量，使得市区在任何时候都比农村更温暖。

在这一特殊的网格单元中的 CON 实验与 ALB 实验相比，两者大气压强没什么变化，其农村的能源平衡和空气温度在两个实验中几乎不变（图 2）。其中，将屋顶反射率从 CON 实验中的 0.32 提升至 ALB 中的 0.90，使城市平均热导减少了大约  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。同时在当地中午城市的净辐射每平方米减少约 200 瓦，白天存储热通量也有减少。这使得白天的温度降低，但夜间气温却只是稍稍变凉，因为还有大量的热量在夜晚的城市表面释放。

在图 2 所示的例子中，屋顶反射率增加的主要作用是使白天最高气温的减少量明显大于夜间气温的减少量。这种现象在全球范围也是一样的，适于所有城市地区，在市区日最高温度的减少量 ( $0.56^{\circ}\text{C}$ ) 是日最低气温减少量 ( $0.26^{\circ}\text{C}$ ) 的两倍左右。这样的结果使得市区昼夜温差在  $-3^{\circ}\text{C}$  以内。

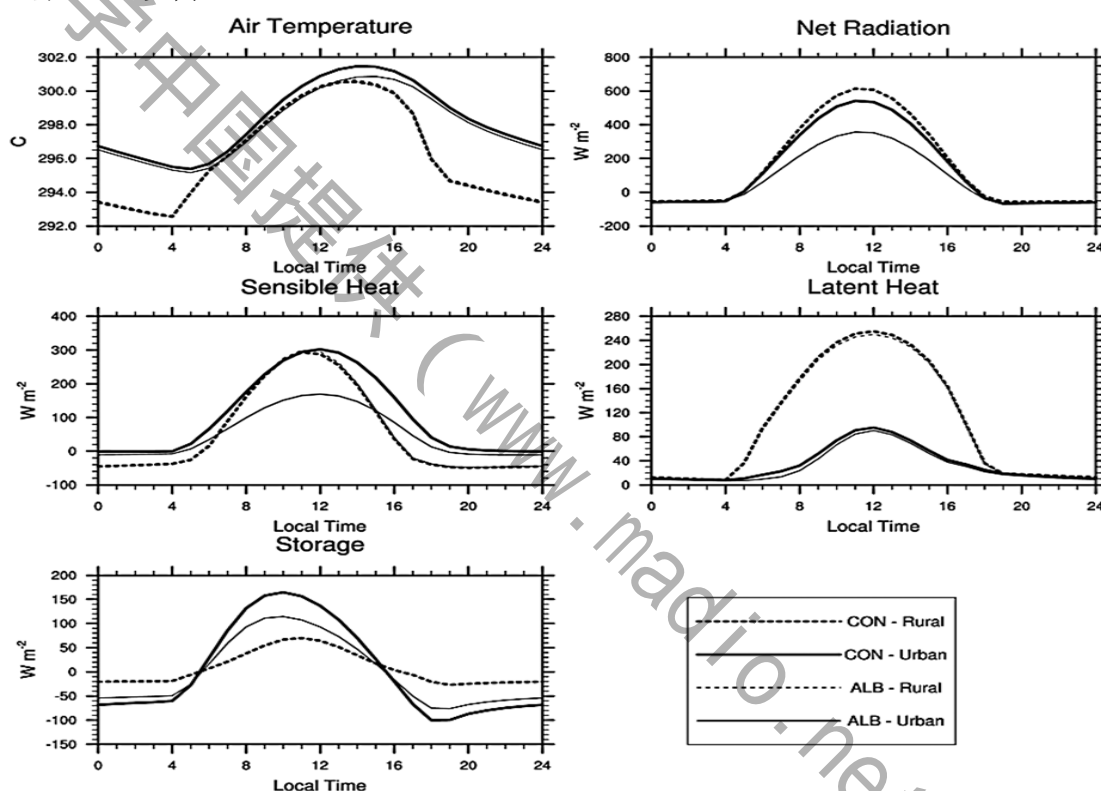


图 2. 夏季 (JJA) 气候 (1890 - 1999) 在美国东北部 ( $40.7^{\circ}\text{N}$ ,  $287.5^{\circ}\text{E}$ ), 用 ALB 和 CON 实验网格单元中城市与农村的空气温度及能量平衡的昼夜循环。

屋顶作为城镇体系中的储存和释放热量的贡献者，同时它也是一种热岛效应发生改变的变化源。热岛效应变化与屋顶热纳呈正相关 [ $\sqrt{\lambda_{\text{roof}} C_{\text{roof}}}$ ，其中  $\lambda_{\text{roof}}$  是导热系数 ( $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ )，而  $C_{\text{roof}}$  是容积热容量 ( $\text{Jm}^{-3}\text{k}^{-1}$ ) ] ( $r=0.39$ ,  $p<<0.01$ )。拥有大型热纳的薄屋顶允许热量更容易进入建筑物内部，这样就导致在屋顶白天和夜间释放热量比较小。因此，在太阳能吸收减少的情况下，其夜间热岛效应仍然大致相同。墨西哥和萨赫勒地区就存在这种情况，尽管城市地区吸收太阳辐射大幅减少，但其热岛效应变化不大。在拥有指定属性集的城市屋顶材料中，存在着很少的具有高热导纳的金属或绝缘金属。总之，这两个因素（城市吸收太阳辐射和屋顶热纳的变化，按重要性顺序排列）可以解释 81% 在空间差异中年平均



热岛效应的变化 ( $r^2 = 0.81$ ,  $P < 0.01$  从多元线性回归分析)。

## 2、特殊情况分析

在冬季北半球的寒带，屋顶反射率的增加并不能有效地减少热岛效应。尤其在之前的图 1 中的欧洲北部和欧亚大陆，其热岛效应会保持不变甚至更大。相反，在这些地区的夏季热岛效应会减少  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，甚至更多。这在很大程度上是由于低入射的太阳辐射，引起屋顶反射率的增加，从而有效降低了城市温度。另外由于积雪具有较高的反射率，使得增加屋顶反射率并不能够得到预期中的效果。该模型的代表性空间加热也发挥了重要作用。在一些地区，就存在利用冬季城市热岛效应的部分能量加热空间，以保持建筑室内温度高于最低的舒适程度。图 3 比较了在离线 CON\_0 和 CON\_0\_NHAC 实验中的热岛效应。图 3a 中在北纬  $20^{\circ}$  的地方，空间加热和相关余热显著增加了热岛效应。在下面图 4 的 ALB 实验中，高屋顶反射率降低了热量到建筑内部的传导，空间供暖也因此增加，同时也保持了室内建筑温度。类似的情形可以看出，在南半球由于空间供暖的增加，热岛效应的减少量会比夏季小。

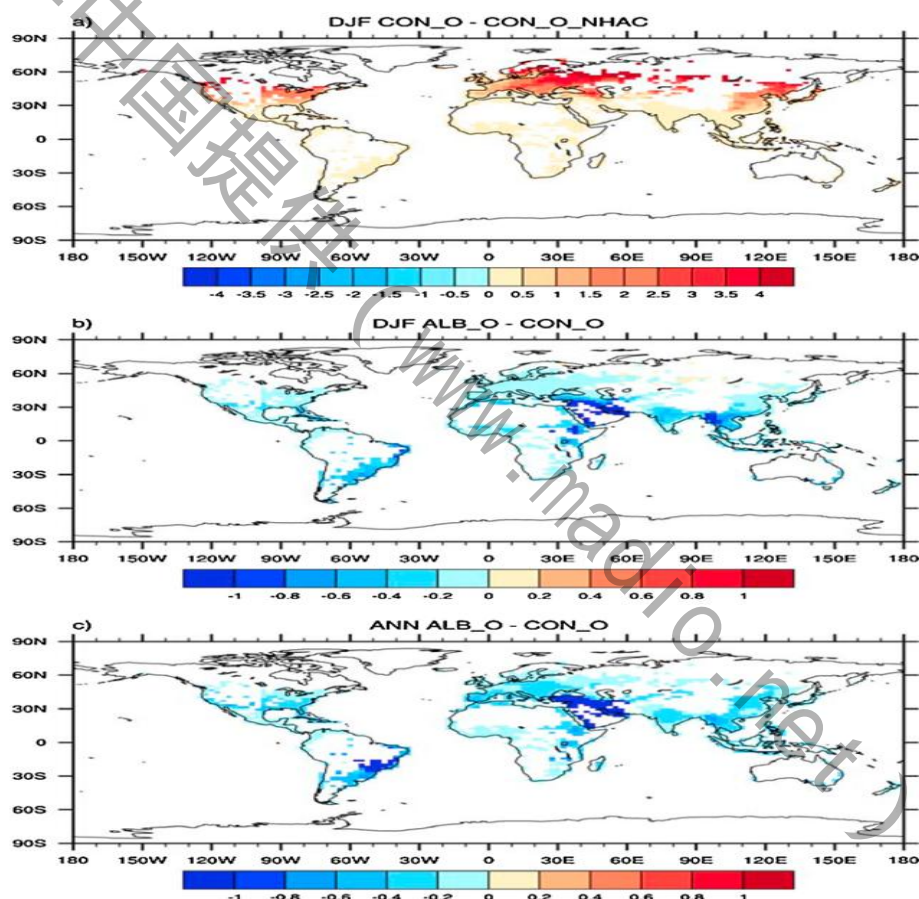


图 3. (a)DJF CON\_0 与 CON\_0\_NHAC 中城市和农村的空气温度差异 ( $^{\circ}\text{C}$ )。  
(b)DJF ALB\_0 与 CON\_0 中城市和农村的空气温度差异 ( $^{\circ}\text{C}$ )。  
(c)ANN ALB\_0 与 CON\_0 中城市和农村的空气温度差异 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

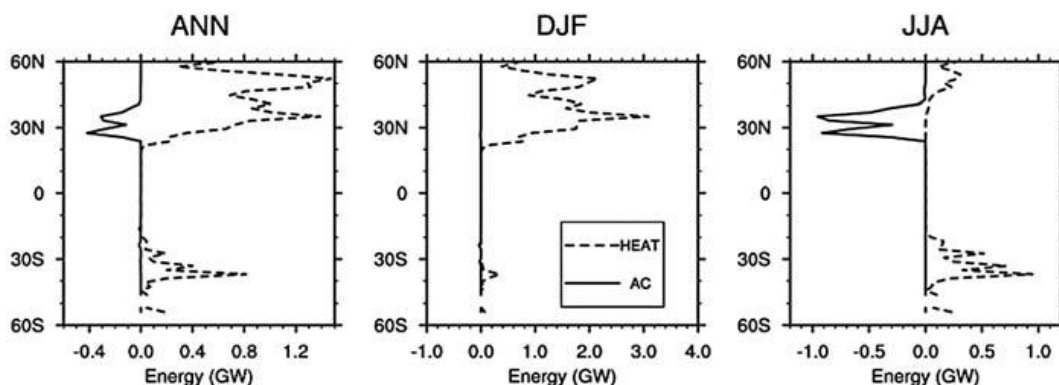


图 4. 为 1980 - 1999 年度, DJF 和 JJA 气候, 用分区 ALB 与 CON 实验城市空间供暖 (HEAT) 和空调能源 (WKW)。

在大气模型中, 两个实验的内部变异导致大气温度的差异, 从而引起一些北半球冬季热岛效应在欧亚大陆北部的增加。即使大气温度并无数值上的明显变化, 但实际上这一地区 ALB 实验温度为  $0.4 - 0.6^{\circ}\text{C}$ , 比 CON 实验中的更冷。这种大气温度的变化降低了农村和城市的近地表的空气温度。然而, 由于城市空间供暖的增加, 农村的温度会比城市的降得更多。这也使得在 ALB 实验中热岛效应会比 CON 实验中的稍大。

相比较而言, 在图 3b 的离线实验 ALB\_0 和 CON\_0 中, 大气温度是相同的, 同时欧亚大陆北部城市的热岛效应几乎是不变的。因此, 在耦合模式下, 大气模型在高纬度地区实验的变化是由其内部差异引起的。通过比较图 3c (离线实验相同的大气压强观测约束) 与图 1a (耦合实验) 可知, 由于空间格局的相似, 使得最终结果与实验气候的偏差并无明显关系。

空气调节模型主要利用美国的情况进行假设, 由于太阳能吸收的减少, 导致空气调节通量下降。全球每年平均空调通量由在 CON 实验中的  $0.09\text{TW}$  下降到 ALB 实验中的  $0.02\text{TW}$ , 而空间供热通量则从  $5.61\text{TW}$  上升到了  $6.30\text{TW}$ 。因此, 空间供暖和空调通量的总和增加了  $0.62\text{TW}$  (从  $5.70\text{TW}$  到  $6.32\text{TW}$ )。

### 3、总结

由以上分析可得到:

- (1) 增加了屋顶的反射率是减少城市热岛效应的有效途径。
- (2) 热岛效应降低的程度取决于屋顶在影响城市热岛效应的其它众因素 (即建筑物的墙壁和地板峡谷) 中的重要程度。
- (3) 这种方法在冬季高纬度地区并不是很有效。因为在这些高纬度地区, 夏季热岛效应减少所能获得的效益, 往往被冬季供热成本的增加所抵消。
- (4) 对于具有高热导纳的薄屋顶, 由于其较低的热存储容量, 使得即使增加屋顶的反射率, 其效果也不会很好。
- (5) 在全球范围内, 取暖能耗的增加大于制冷能耗的减少, 说明了白色屋顶导致了 HAC (heating and air Conditioning) 通量的净增加。虽然空调在全球市场中得到很大的发展, 但是在减少空调通量这方面, 白色屋顶会发挥更大的作用。

城市峡谷模型说明: 白色屋顶计划能有效地降低城市热岛效应。下面结合具体数据计算四种建筑模型单位面积白屋顶节约的制冷能耗, 取暖能耗, 能耗成本和污染物的减排量, 进一步评估白色屋顶计划对城市热岛效应的影响。

### 定量分析

## 【六个模型原型】

### 1、白屋顶节约的制冷能耗和取暖能耗评估原型

模型概述：2005 年，Akbari 和 Konopacki 用 DOE-2.1E<sup>[9]</sup> 建筑物能量评估模型 (DOE-2) 模拟一个典型气象年 (美国 2007 年)，他们使用四个单层商业楼宇原型，包括新的 (1980+) 和旧的 (1980 年以前) 大面积建筑和零散的小面积建筑，分别表示为 New office (A 型)，Old office (B 型)，New retail store (C 型)，Old retail store (D 型) 每个建筑物都模拟了两种不同隔热能力，新旧建筑的热阻系数分别为  $3.3\text{m}^2/\text{KW}$ 、 $1.2\text{m}^2/\text{KW}$ 。表 1 对评估原型进行了详细说明。

Geometry	New office (1980+) Single-storey, non-directional, five zones	Old office (pre-1980)	New retail store (1980+) Single-storey, non-directional, one zone (conditioned)	Old retail store (pre-1980)
Roof area and floor area ( $\text{m}^2$ )	455		753	
Roof construction	Built-up materials on flat deck			
Thermal resistance of roof insulation <sup>a</sup> ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )	3.3 [R-19]	1.2 [R-7]	3.3 [R-19]	1.2 [R-7]
Thermal resistance of wall insulation ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )	2.3 [R-13]	1.1 [R-6]	2.3 [R-13]	0.7 [R-4]
Cooling equipment	Package a/c, direct expansion, air cooled			
Cooling energy efficiency ratio (BTU/[h·W])	10	8	10	8
Heating equipment	Gas furnace			
Heating efficiency (%)	74	70	74	70
Operating hours	Weekdays 6A-7P		Weekdays 8A-9P, weekends 10A-5P	

表 1. 建筑原型的一些特征 (取自原文)

数据来源<sup>[9][10]</sup>：建筑物的常规特性一部分是调查数据，另一部分从加利福尼亚能源委员会 (CEC 1994) 得到；建筑物所在位置的特性如屋顶、墙体、窗等建造规划从美国能源信息管理委员会 (EIA 1979, 1983, 1994 年) 得到；其它的建筑物属性则从对北部和南部的加利福尼亚州的调查中得来。

模型原型<sup>[1]</sup>：Akbari 和 Konopacki 对 236 个美国城市 (如图 5 所示) 的每一个建筑原型进行两次建模：首先是传统的灰色屋顶 (太阳能反射率 0.20，热射率 0.90)，其次是白色屋顶 (太阳能反射率 0.60，热射率 0.90)。

使用 ESRI 公司的地理信息系统 (ArcGIS Desktop 9.1) 创建空间地图，第  $K$  个建筑原型节约的制冷能耗表示为： $E_k(x, y)$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ;  $1\text{ kWh}=3.6\text{ MJ}$ ]，第  $K$  个建筑原型节约的取暖能耗表示为  $G_k(x, y)$  [千卡/ $\text{m}^2$ ;  $1\text{ 千卡}=105.5\text{ MJ}$ ]。 $E_k$  和  $G_k$  的推导过程涉及到很多原始数据，本文不一一列出，详见参见文献 1。

这样可以计算得出当太阳能反射率从 0.20 增加到 0.60 时，每年节约的制冷能耗 (灰色屋顶的制冷能耗减去白屋顶的制冷能耗) 和节约的取暖能耗 (传统屋顶的取暖能耗减去白屋顶的取暖能耗)。

保守评估时，可以把白屋顶的太阳能反射率设为 0.55。

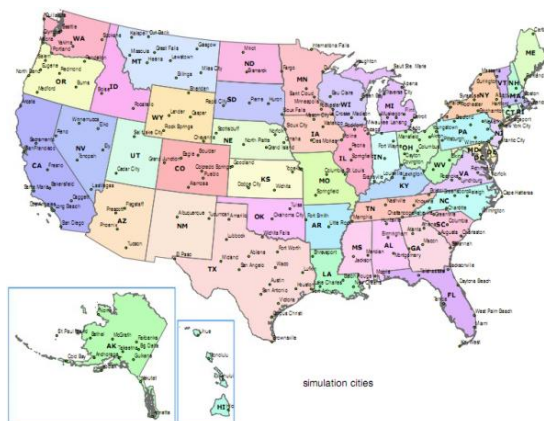


图5 236个城市原型。

## 2、负载变化率评估原型

模型概述：负载变化率定义为取暖能耗的增加除以制冷能耗的减少，现实意义就是节约的制冷能量能否抵消取暖能耗，它是评价两者能耗大小的标准。

模型原型：使用公式1计算原型k的负载变化率  $L_k(x, y)$

$$L_k(x, y) = \frac{\eta^{-1} G(x, y)}{E(x, y) \times EER \times 0.01 \text{ therm} / \text{kBTU}} \quad (1)$$

其中， $\eta$  为取暖设备能效比占制冷设备能效比的比例， $EER$  代表制冷设备能源效率比 (energy efficiency ratio)，它的单位是  $\text{BTU}/(\text{h} \cdot \text{W})$ ，(1 BTU=1.055 kJ)。

数据来源：本文的两个能效比均为从资料11中获得的定值。 $E_k$ 和 $G_k$ 均从上一个模型原型中获得。

## 3、每单位白屋顶节约的能耗成本评估原型

模型假设：能源从电和天然气中获得。

数据来源：电的平均市场价格 $D_e(x, y)$ 和天然气的平均市场价格 $D_g(x, y)$ 从美国能源信息管理委员会获得，如图6所示为各个州的电和天然气的年平均价格。

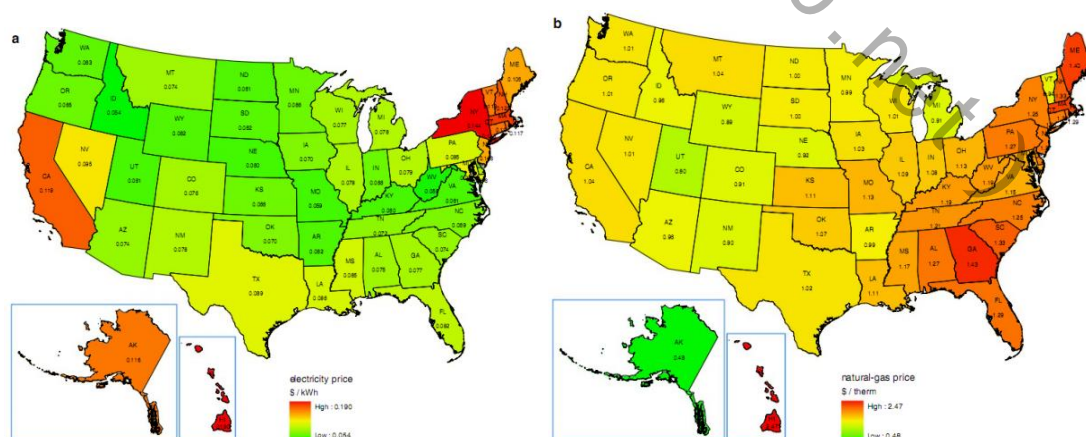


图6. 各个州的电和天然气年平均价格

模型原型：原型k每年节约的能量成本 $C_k(x, y)$ ，由公式2计算得到。

$$C(x, y) = E(x, y)D_e(x, y) - G(x, y)D_g(x, y) \quad (2)$$

## 4、每单位白屋顶减少的有害物质排放量的评估原型<sup>[12][13]</sup>



模型概述：电力排放因子是指每单位电力能源所排放的温室气体或空气污染物的重量。天然气排放因子是指每单位天然气充分燃烧所产生的温室气体或污染物的重量。

把美国全部领土分为 26 个子区域，根据每个子区域平均电力排放因子或天然气排放因子绘图。

数据来源：电力排放因子从 EGRID(The Emissions & Gneration Resource Integrated Database) 中获得，本文使用的是 EGRID2006v2.1 版本。图 7 给出了 2004 年美国的电力排放因子,表 2 给出了电力排放因子和产生的排放物组合，包括 CO2, NOX, SO2, 和 Hg 等。

天然气排放因子从美国环保局获取。其中对 NO<sub>x</sub> 排放因子获取时，用取各种 NO<sub>x</sub> 排放因子平均值的方法。表 3 给出了天然气排放因子

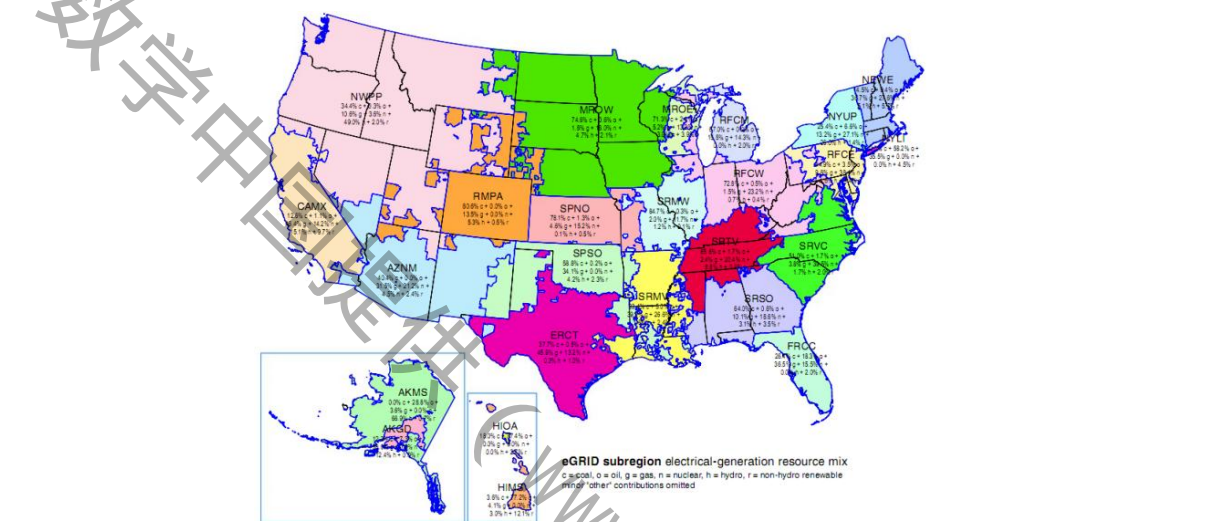


图 7 2004 年美国的电力排放因子

	CO <sub>2</sub> (kg/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	SO <sub>2</sub> (g/kWh)	Hg (ug/kWh)	Coal (%)	Oil (%)	Gas (%)	Other fossil (%)	Nuclear (%)	Hydro (%)	Non-hydro renewable (%)	Unknown (%)
AKGD	0.570	1.35	0.60	0.8	12.3	7.3	68.0	0.0	0.0	12.4	0.0	0.0
AKMS	0.218	2.96	0.30	0.0	0.0	28.8	3.6	0.0	0.0	66.9	0.7	0.0
AZNM	0.569	0.94	0.65	11.5	40.4	0.0	31.5	0.0	21.2	4.5	2.4	0.0
CAMX	0.399	0.34	0.25	1.0	12.6	1.1	46.4	0.9	14.2	15.1	9.7	0.1
ERCT	0.644	0.44	1.43	13.2	37.7	0.5	45.9	1.3	13.2	0.3	1.0	0.2
FRCC	0.602	1.02	1.64	4.1	26.4	18.3	36.5	0.3	15.5	0.0	2.0	1.0
HIMS	0.661	3.17	2.71	0.0	3.6	77.2	4.1	0.0	0.0	3.0	12.1	0.0
HIOA	0.784	1.16	1.59	7.3	18.0	77.4	0.0	1.9	0.0	0.0	2.7	0.0
MROE	0.843	1.47	3.40	13.9	71.3	2.4	5.2	0.1	13.2	3.9	3.9	0.1
MROW	0.823	1.73	2.66	19.6	74.6	0.6	1.8	0.1	16.0	4.7	2.1	0.0
NEWE	0.412	0.44	1.06	3.9	14.5	9.4	36.7	1.0	27.6	5.1	5.7	0.0
NWPP	0.418	0.73	0.57	4.4	34.4	0.3	10.6	0.1	3.6	49.0	2.0	0.0
NYCW	0.418	0.40	0.31	2.9	0.0	20.4	29.8	0.3	48.6	0.0	0.8	0.0
NYLI	0.641	0.83	2.43	2.6	0.0	58.2	35.5	1.8	0.0	0.0	4.5	0.0
NYUP	0.372	0.45	1.90	6.4	25.4	6.6	13.2	0.3	27.1	26.0	1.4	0.0
RFCE	0.497	0.77	3.64	18.7	44.9	3.5	9.6	0.7	38.4	1.6	1.4	0.0
RFCM	0.745	1.11	3.09	14.9	67.0	0.9	15.5	0.3	14.3	0.0	2.0	0.0
RFCW	0.706	1.28	4.62	19.8	72.8	0.5	1.5	0.7	23.2	0.7	0.4	0.1
RMPA	0.923	1.41	0.92	7.4	80.6	0.0	13.5	0.0	0.0	5.3	0.5	0.0
SPNO	0.894	1.80	2.74	12.4	78.1	1.3	4.6	0.1	15.2	0.1	0.5	0.0
SPSO	0.799	1.15	1.79	17.6	58.8	0.2	34.1	0.3	0.0	4.2	2.3	0.1
SRMV	0.515	0.66	1.03	5.0	23.4	5.0	39.3	1.1	26.6	1.6	2.4	0.5
SRMW	0.837	1.14	3.15	18.5	84.7	0.3	2.0	0.1	11.7	1.2	0.1	0.0
SRSO	0.676	0.98	3.83	15.8	64.0	0.6	10.1	0.1	18.6	3.1	3.5	0.0
SRTV	0.678	1.17	3.27	11.5	65.8	1.7	2.4	0.0	20.4	8.8	0.9	0.0
SRVC	0.520	0.84	2.66	9.9	51.0	1.7	3.8	0.2	39.5	1.7	2.0	0.1

表 2 电力排放因子和产生的排放物组合

CO <sub>2</sub> (kg/therm)	NO <sub>x</sub> (g/therm)	SO <sub>2</sub> (g/therm)	Hg (μg/therm)
5.281	4.14	0.026	11.4

表 3 天然气排放因子

模型原型：图一每单位面积白屋顶的减排量 $P_{i,k}(x,y)$ ，是由每个物质  $i$  和原型  $k$  通过公式 4 计算而来。

## 5、白屋顶占总陆地面积的百分比的评估原型<sup>[14]</sup>

模型假设：

我们把每栋建筑接受光照的有效面积作为它的屋顶面积，部分道路面积也作为接受光照的有效面积。

数据来源：

美国能源部提供的美国建筑物能耗统计数据库，里面存储了美国的 5, 215 栋建筑物样本。

模型原型：

为保证模型的合理性，每栋楼的屋顶面积由楼层的总建筑面积来估算，当楼层数小于 15 层时，指定为 10 层，当楼层数是 15 到 25 时，指定为 20 层；如果楼层数超过了 25，就指定为 40 层。

## 6、每单位白屋顶州平均和国家平均节约和消耗能量比率的估计<sup>[15]</sup>

运用上面各模型，可以计算得到整个城市范围内节约的制冷能耗 $\hat{E}(x,y)$ ，节约的取暖能耗 $\hat{G}(x,y)$ ，节约的能耗成本 $\hat{C}(x,y)$ ，和减少的污染物排放量 $\hat{P}(x,y)$ 。

每单位土地面积节约的制冷能耗的比率，消耗的取暖能耗的比率，节约的能源消耗成本的比率，和减少的污染物的比率都与建筑物的分布特征有关，下面讨论如何描述建筑物分布特征。

$$U_j(x,y) \equiv \begin{bmatrix} U_1(x,y) \\ \vdots \\ U_m(x,y) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中， $U_j(x,y)$  是对于建筑区  $j$  而言，可改造为白色屋顶的建筑面积占全部区域面积的比率。 $m$  是建模的区域数。由于已有的建筑物统计数据具有地域广泛的特点，例如全国建筑物普查（图 3）。我们用国家级建筑密度 $H(x,y)$ 建模（图 4），

$$U(x,y) = H(x,y)R(x,y) \quad (15)$$

其中， $R(x,y)$  是屋顶反射率，定义为：

$$R_j(x,y) \equiv \begin{bmatrix} R_1(x,y) \\ \vdots \\ R_m(x,y) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中， $R_j(x,y)$  是可改造为白屋顶的建筑区  $j$  的光反射率， $(x,y)$  是普查点，那么，在整个区域范围内节约的制冷能耗：

$$\hat{E}(x,y) = U(x,y)^T E(x,y) \quad (17)$$

整个区域范围内节约的加热能耗：

$$\hat{G}(x,y) = U(x,y)^T G(x,y) \quad (18)$$

整个区域范围内节约的能耗成本：

$$\hat{C}(x,y) = \hat{E}(x,y)D_e(x,y) - \hat{G}(x,y)D_g(x,y) \quad (19)$$

整个区域范围内减少的污染物排放量：

$$\hat{P}_i(x,y) = \hat{E}(x,y)\eta_i^{-1}F_{e,i}(x,y) - \hat{G}(x,y)F_{g,i} \quad (20)$$

## 【模型结果描述】

## 1、单位面积白屋顶节约的制冷能耗和消耗的取暖能耗

### ①节约的制冷能耗

单位面积的白屋顶节约的制冷能耗  $E(x, y)$ , 从A型建筑的  $0.1$  到  $4.1 \text{ kWh/m}^2$ , B型建筑的  $0.5$  到  $11.5 \text{ kWh/m}^2$ , C型建筑的  $0$  到  $4.7 \text{ kWh/m}^2$ , D型建筑的  $0.8$  到  $15.0 \text{ kWh/m}^2$ 。

如图8所示为四种建筑节约的制冷能耗。

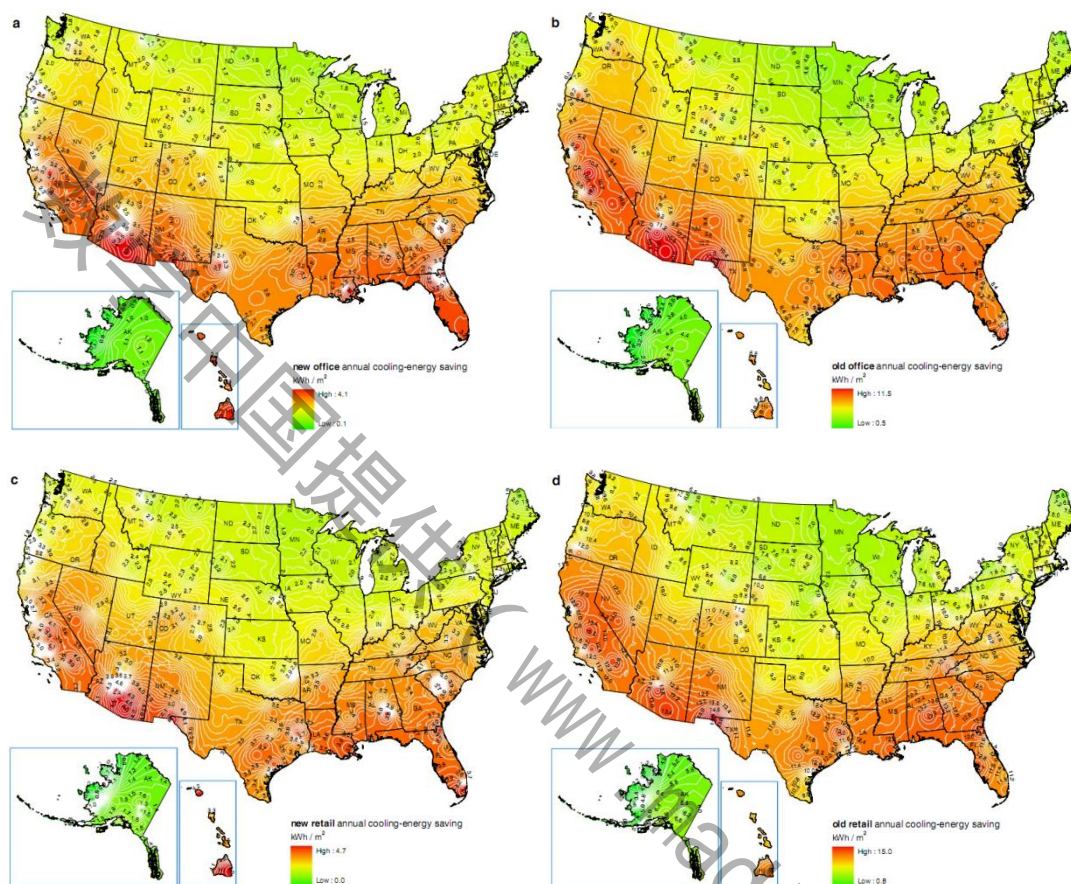


图8：单位白屋顶节约的制冷能耗

从图中可以看出：单位白屋顶节约的制冷能耗从北向南逐渐增加。对于A型建筑，除阿拉斯加这个很冷并且人口稀少的地区外，其它地区节约的制冷能耗至少为  $1 \text{ kWh/m}^2$ 。

根据公式5，计算得到：A型建筑，B型建筑，C型建筑节约的制冷能耗约为A型建筑的3.4，1.2和4.1倍。

$$\frac{E_1(x, y)}{E_2(x, y)} \cong \frac{t_1}{t_2} \times \frac{EER_2}{EER_1} \times \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

其中，标号1和2代表不同的建筑， $t$ 代表各个建筑每周有效接受光照时间。 $EER$ 代表制冷设备能源效率比（energy efficiency ratio）， $R$ 代表屋顶光反射系数。

### ②节约的取暖能耗

单位面积的白屋顶节约的取暖能耗  $G(x, y)$ , 从A型建筑的  $0$  到  $0.104$  千卡/ $\text{m}^2$ , B型建筑的  $0$  到  $0.235$  千卡/ $\text{m}^2$ , C型建筑的  $0$  到  $0.122$  千卡/ $\text{m}^2$ , D型建筑的  $0$  到  $0.264$  千卡/ $\text{m}^2$ 。

如图9所示为四种建筑节约的取暖能耗。



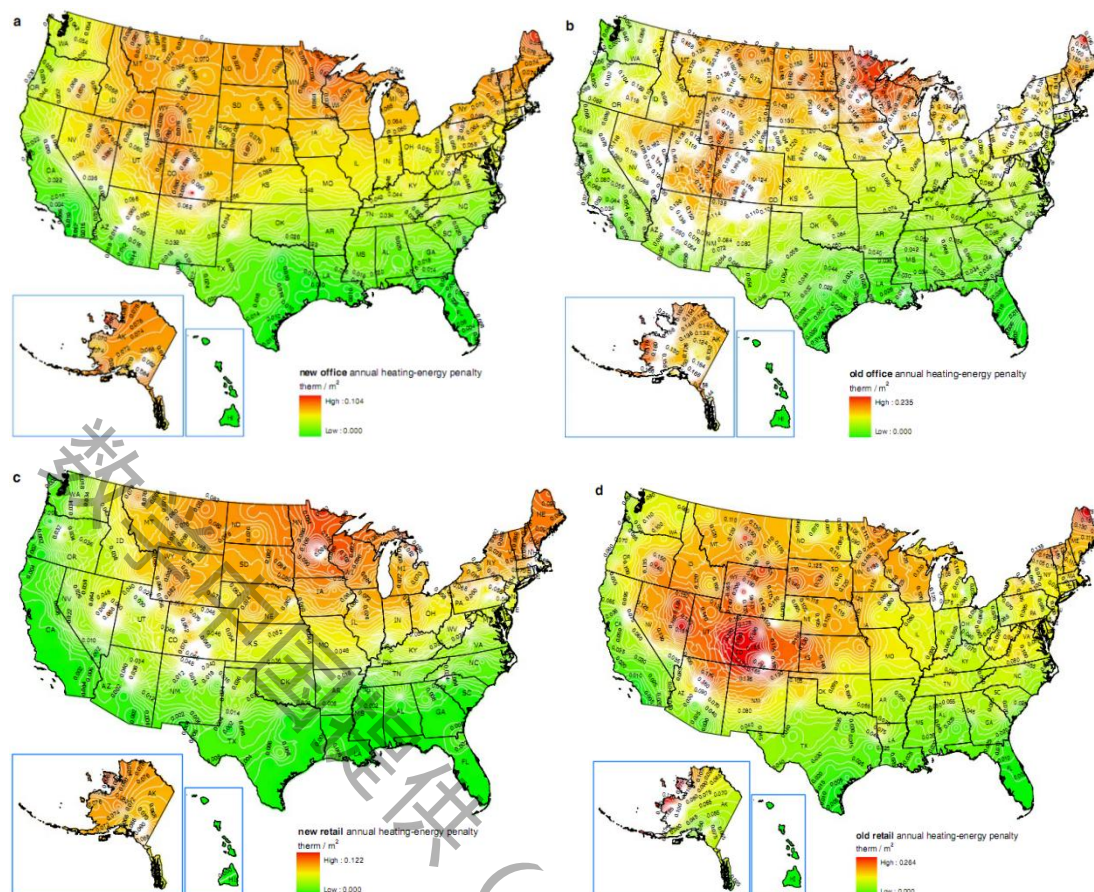


图9 单位白屋顶节约的取暖能耗

从图中可以看出：单位面积白屋顶节约的取暖能耗从南向北逐渐增加。

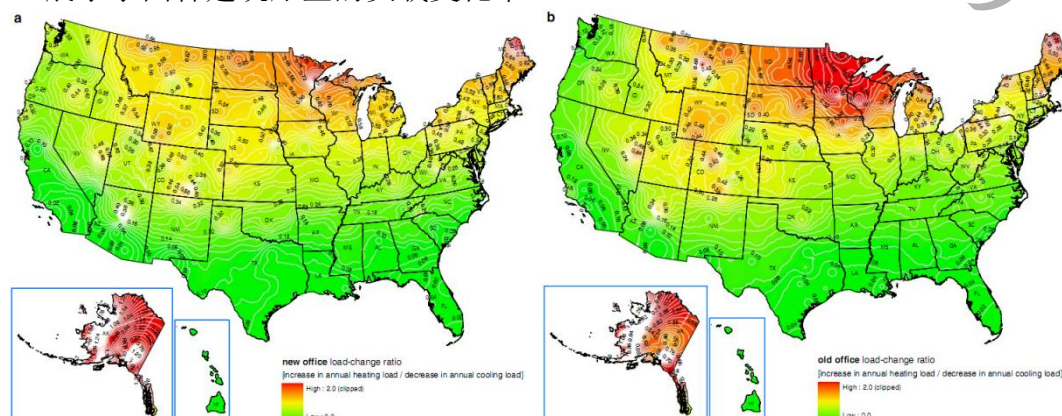
根据公式6，计算得到：A型建筑，B型建筑，C型建筑节约的取暖能耗约为A型建筑的2.9，1.1和3.8倍。

$$\frac{G_1(x, y)}{G_2(x, y)} \cong \frac{t_1}{t_2} \times \frac{EER_2}{EER_1} \times \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

其中，标号1和2代表不同的建筑，t代表各个建筑每周有效接受光照时间。EER代表制冷设备能源效率比（energy efficiency ratio），R代表屋顶光反射系数。

### ③节约能源的负载变化率

使用上一章节提到的负载变化率建模方法计算各建筑原型的负载变化率，图10展示了四种建筑原型的负载变化率。





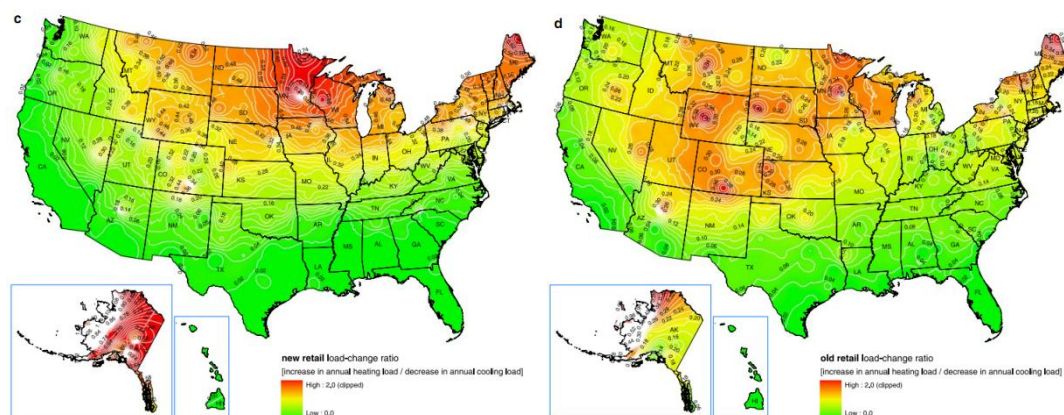


图 10 单位白屋顶节约的负载变化率

从图中可以看出：

- 除前面提到的气候寒冷并且人口稀少的阿拉斯加，负载变化率都小于全国平均水平。
- 全美的大部分地区，各个建筑原型的平均负载变化率分别为 0.5, 0.4, 0.4, 和 0.3, 也就是说，使用白屋顶节约的制冷能耗总是比取暖能耗大。

综上所述：全美绝大部分地区，节约的制冷能耗能够抵消耗费的取暖能耗。

## 2、单位面积白屋顶节约的能耗成本

白屋顶使用年限 ( $N$ ) 内节约的能耗成本可以用当前价格 ( $PV$ ) 乘以  $b$  得到， $b$  可以由公式 3 计算得到。

$$b = \sum_{i=1}^N (1+r)^{-i} = \left[ 1 - (1+i)^{-N} \right] / N \quad (3)$$

其中， $r$  是年利率。

如图 11 所示为四种类型建筑节约的能耗成本。

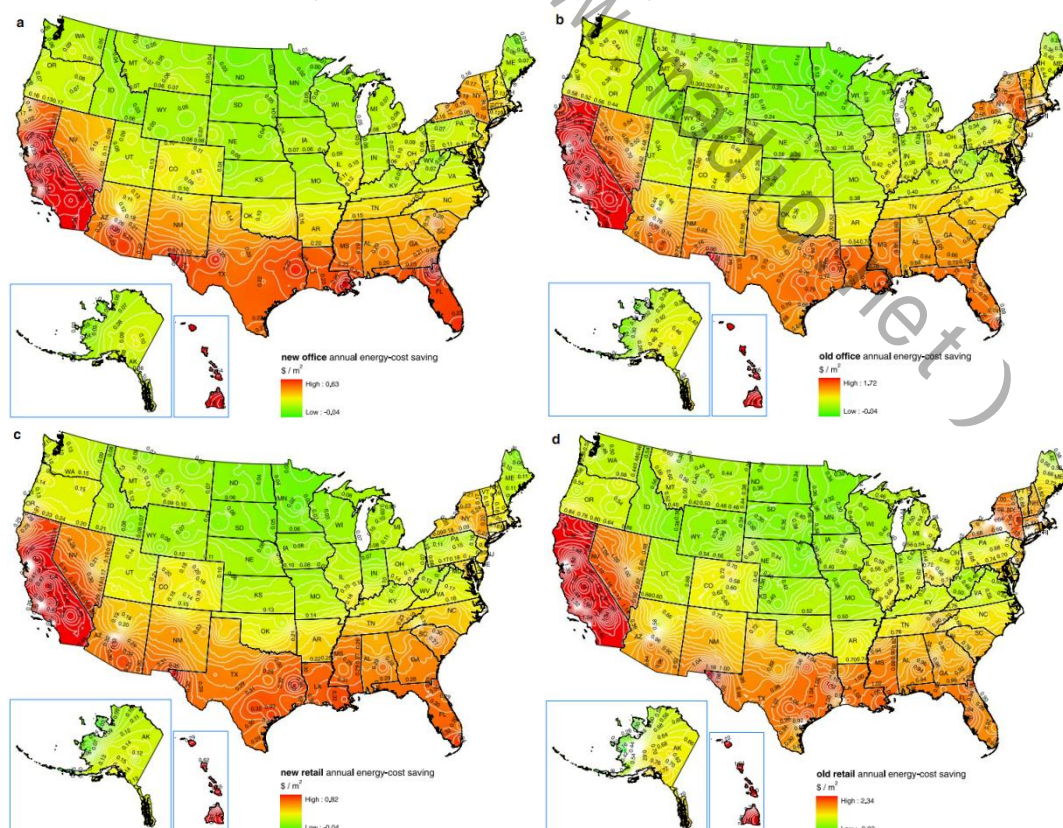


图 11 单位面积白屋顶节约的能耗成本

单位面积白屋顶节约的能耗成本  $C(x, y)$  从 A 型建筑的  $-0.04$  到  $0.63$   $\$/m^2$ , B 型建筑的  $-0.04$  到  $1.72$   $\$/m^2$ , C 型建筑的  $-0.04$  到  $0.82$   $\$/m^2$ , D 型建筑的  $-0.03$  到  $2.34$   $\$/m^2$ 。

从图中可以看出以下几点：

- 能耗成本节约最多的是夏威夷，因为它具有最高的制冷能耗，最高的电价和最低的取暖能耗；其次是加利福尼亚的中心山谷地区；
- 有些地方，因为当地的天然气能源比较廉价，能量成本同样的很低，例如位于中纬度山区的犹他州和科罗拉多州。
- 能耗成本从北向南逐渐的增高。
- 由于东西部的能源价格有着明显的差异（如图 6 所示），因此东西部的能耗成本也有明显的差异。

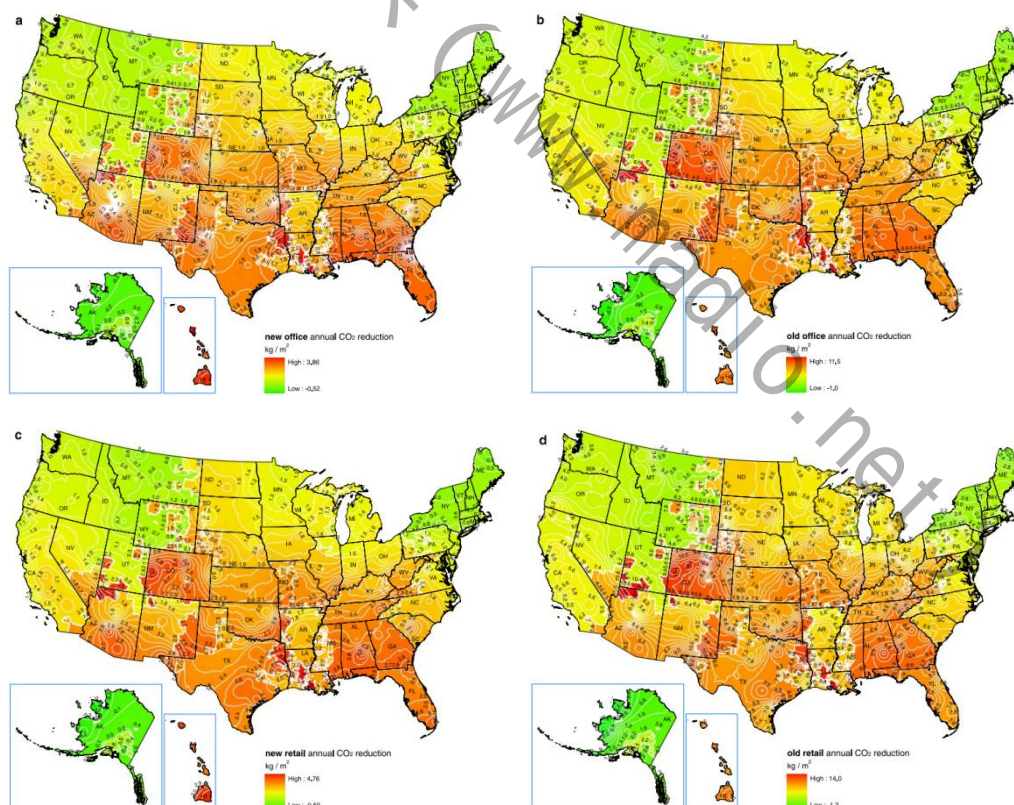
综上所述，能耗成本的确能够得到节约，即使是在电力成本最高的阿拉斯加，能量成本也能够得到节约。

### 3、单位面积白屋顶减少的污染物排放量

#### 1) 单位面积白屋顶的 CO<sub>2</sub> 减排量

单位面积白屋顶减少的 CO<sub>2</sub> 排放量  $P_{CO_2}(x, y)$ , 从 A 型建筑的  $-0.52$  到  $3.86$   $kg/m^2$ , B 型建筑的  $-1.0$  到  $11.5$   $kg/m^2$ , C 型建筑的  $-0.50$  到  $4.76$   $kg/m^2$ , D 型建筑的  $-1.2$  到  $14.0$   $kg/m^2$ 。

如图 12 所示为四种建筑单位面积白屋顶减少的 CO<sub>2</sub> 排放量。

图 12 单位面积白屋顶减少的 CO<sub>2</sub> 排放量

从图中可以看出以下几点：

- 除了气候寒冷并且人口稀少的阿拉斯加，污染物的排放量都有所减少，因为它具有最低的节约能耗量，最低的 CO<sub>2</sub> 电排放因子。



- 除了阿拉斯加以外，CO<sub>2</sub> 减排量最低的是东北地区，它们那里气候凉爽，并且可以利用水力发电。
- CO<sub>2</sub> 减排量从北向南逐渐增加，但是，因为北部中心地区 CO<sub>2</sub> 电排放因子很高，它的 CO<sub>2</sub> 减排量很高。

## 2) 单位面积白屋顶的 NO<sub>x</sub> 减排量

单位面积白屋顶减少的 NO<sub>x</sub> 排放量  $P_{NO_x}(x,y)$ , 从 A 型建筑的  $-0.1$  到  $11.0\text{g/m}^2$ , B 型建筑的  $0.9$  到  $32.0\text{g/m}^2$ , C 型建筑的  $-0.4$  到  $15.3\text{g/m}^2$ , D 型建筑的  $1.5$  到  $43.4\text{g/m}^2$ 。

图 13 所示为四种建筑单位面积白屋顶的 NO<sub>x</sub> 的减排量。

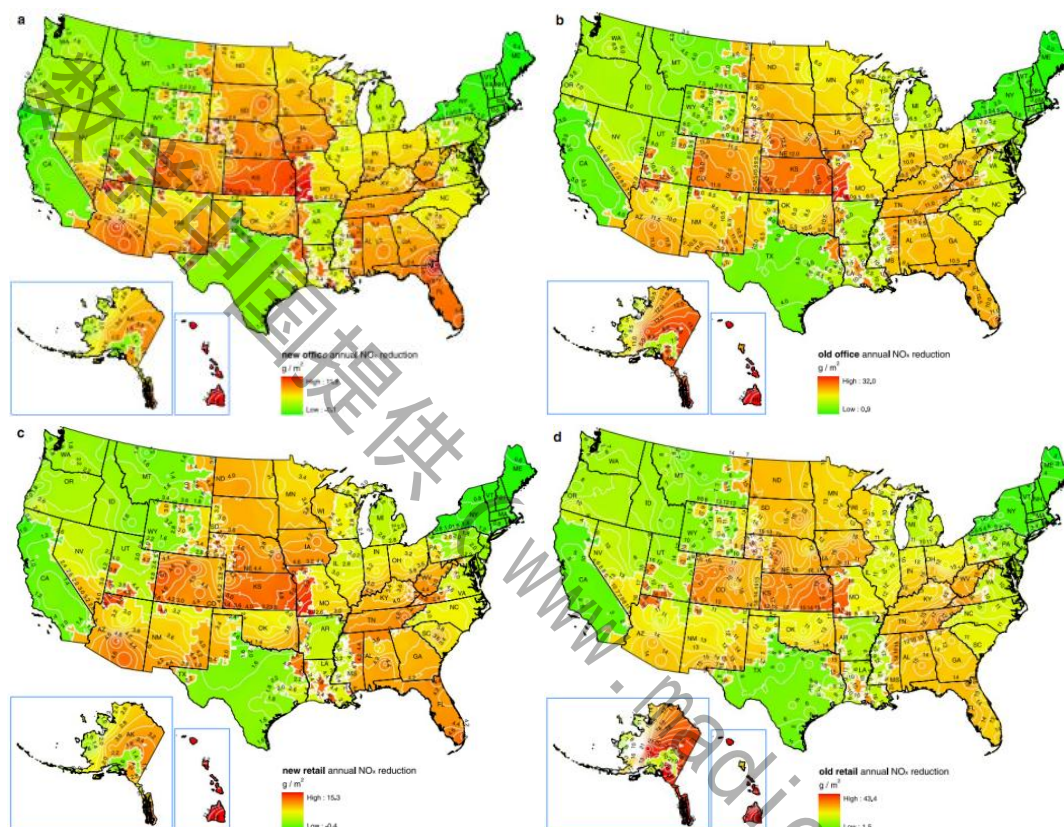


图 13 单位面积白屋顶减少的 NO<sub>x</sub> 排放量

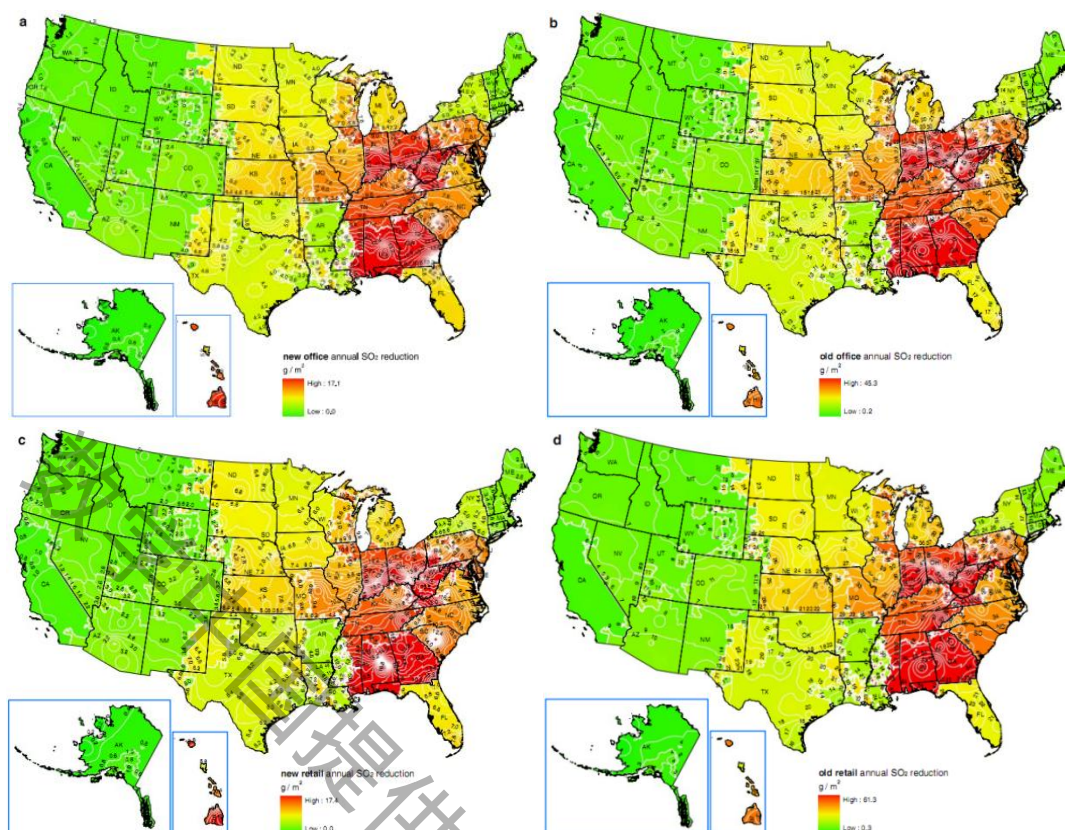
从图中可以看出：

- 白屋顶计划普遍使 NO<sub>x</sub> 排放量减少。
- 中部地区 NO<sub>x</sub> 减排量很高，这是因为中部地区的 NO<sub>x</sub> 电排放因子很高。

## 3) 单位面积白屋顶的 SO<sub>2</sub> 减排量

单位面积白屋顶减少的 SO<sub>2</sub> 排放量  $P_{SO_2}(x,y)$ , 从 A 型建筑的  $0$  到  $17.1\text{g/m}^2$ , B 型建筑的  $0.2$  到  $45.3\text{g/m}^2$ , C 型建筑的  $0$  到  $17.4\text{g/m}^2$ , D 型建筑的  $0.3$  到  $61.3\text{g/m}^2$ 。

如图 14 所示为四种建筑单位面积白屋顶减少的 SO<sub>2</sub> 排放量。

图 14 单位面积白屋顶减少的  $\text{SO}_2$  排放量

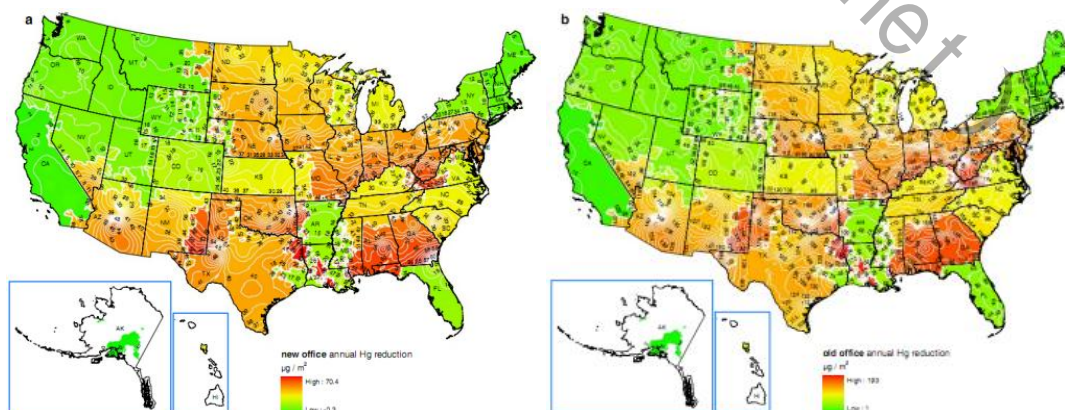
从图中可以看出：

- 白屋顶计划普遍使  $\text{SO}_2$  排放量减少
- 除纽约和新英格兰以外的美国东部地区， $\text{SO}_2$  减排量比西部地区高很多，这种变化是因为东部地区  $\text{SO}_2$  电力排放因子比西部地区大很多，甚至有数量级上的改变。

#### 4) 单位面积白屋顶的 Hg 减排量

单位面积白屋顶减少的 Hg 排放量  $P_{\text{Hg}}(x, y)$ ，从 A 型建筑的  $-0.3$  到  $70.4 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ，B 型建筑的  $1$  到  $193 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ，C 型建筑的  $-0.2$  到  $75.6 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ，D 型建筑的  $2$  到  $26 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 。

如图 15 所示为四种建筑单位面积白屋顶减少的 Hg 排放量。





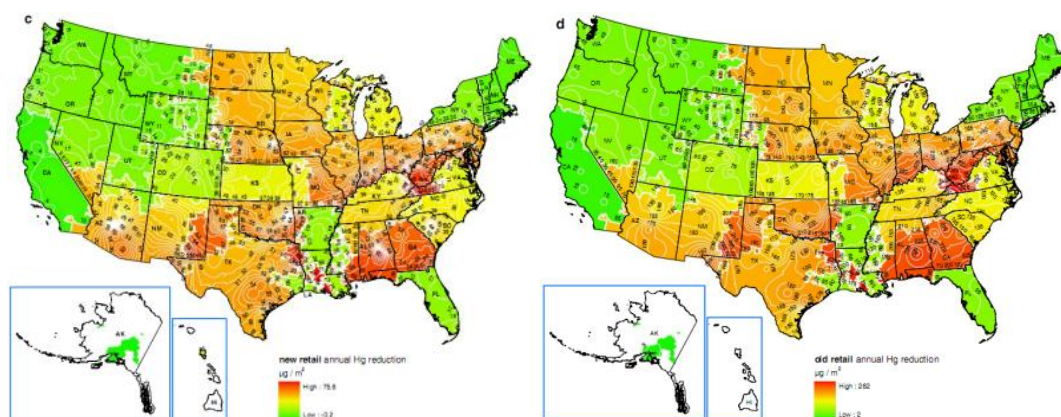


图 15 单位面积白屋顶减少的 Hg 排放量

从图中可以看出：

- 阿拉斯加和夏威夷的部分地区无法计算 Hg 的排放量，因为 EGRID 数据库没有提供 Hg 的电排放因子。
- 全美大部分地区 Hg 的排放量都有所减少，但人口稀少并且气候寒冷的阿拉斯加部分地区是个例外，因为它节约的制冷能耗很低，并且它的电力排放因子也很低。
- Hg 的减排量的变化主要取决于 Hg 的电力排放因子。因为煤资源控制了电力资源，进而影响了电力排放因子。

#### 4、模型结果总结及其讨论：

- 单位面积白屋顶节约的冷却能耗从阿拉斯加的  $3.30 \text{ kWh/m}^2$  到亚利桑那州的  $7.69 \text{ kWh/m}^2$ （全国平均  $5.02 \text{ 千瓦时/平方米}$ ）。
- 单位面积白屋顶节约的取暖能耗从夏威夷的  $0.003 \text{ 千卡/m}^2$  至怀俄明的  $0.14 \text{ 千卡/m}^2$ ，（全国平均为  $0.065 \text{ 千卡/m}^2$ ）。
- 单位面积白屋顶节约的能耗成本从西弗吉尼亚的  $0.126\$/\text{m}^2$  到亚利桑那州的  $1.14\$/\text{m}^2$  美元（全国平均为  $0.356\$/\text{m}^2$ ）。
- 单位面积白屋顶减少的  $\text{CO}_2$  排放量从阿拉斯加的  $21.07 \text{ kg/m}^2$  到夏威夷的  $4.97 \text{ kg/m}^2$ （全国平均为  $3.02 \text{ kg/m}^2$ ）。
- 单位面积白屋顶减少的  $\text{NO}_x$  排放量从纽约的  $1.70 \text{ g/m}^2$  到夏威夷的  $11.7 \text{ g/m}^2$ （全国平均为  $4.81 \text{ g/m}^2$ ）。
- 单位面积白屋顶减少的  $\text{SO}_2$  排放量从加利福尼亚的  $1.79 \text{ g/m}^2$  到阿拉巴马州的  $26. \text{ g/m}^2$ （全国平均为  $12.4 \text{ g/m}^2$ ）。
- 单位面积白屋顶减少的 Hg 排放量从阿拉斯加的  $1.08\mu \text{ g/m}^2$  到阿拉巴马州的  $105\mu \text{ g/m}^2$ （全国平均为  $61.2\mu \text{ g/m}^2$ ）。

对于结果的讨论：改造 25.8 亿平方米的美国可改造建筑，每年就能节省 10.4KWh 的制冷能耗。减少 13.3 亿千卡的取暖能耗，并且每年可以节省 73.5 亿美元的能耗成本；少排出 623 万吨的  $\text{CO}_2$ ，这些  $\text{CO}_2$  量可以抵消美国标准的 120 万辆汽车或 25.4 座美国典型的大功率的发电厂<sup>[16]</sup>；少排出 0.993 万吨  $\text{NO}_x$ ，这些  $\text{NO}_x$  量可以抵消美国标准的 570 万辆汽车或 65.7 座典型的大功率的发电厂；少排出 2.56 万吨的  $\text{SO}_2$ ，这些  $\text{SO}_2$  量可以抵消 815 座典型的大功率发电厂，每年减少汞 126 公斤。

## 四、模型评价与推广

本文通过建立城市峡谷模型，定性的分析了白屋顶计划对缓解城市热岛效应

的影响，后面通过分析具体数据，计算了单位面积白屋顶节约的制冷能耗，取暖能耗，能耗成本和污染物的减排量，定量的评估了白屋顶计划对缓解城市热岛效应的作用。

在全球范围内考虑，白色屋顶计划能有效地降低城市热岛效应。无论从能源节约还是保护环境方面都具有较大的可行性，而且，实施该计划所需的人力、财力都很少，所以适合大范围的推广。

都是具有较大的可行性。而且，实施该计划所需的人力、财力都很少，所以很适合大范围的推广。但在实际情况中，本文中的模型仍然存在一些需要注意的地方：

- 1、在现实生活中，很难将所有屋顶完全涂成白色，因每个建筑总会有通风或排气口等。
- 2、在使用白色屋顶降温的同时，应该考虑由于这样做而产生的加热建筑物的成本，所以白色屋顶最适合于全年气候都温暖的城市。
- 3、对于白色屋顶计划，还可以适当做出更大胆的假设。例如，将其中的屋顶在夏季涂成白色，在冬季就涂成黑色，以增加其适用范围。
- 4、与整个地球表面相比，屋顶表面和城市街道表面是微不足道的，所以白色屋顶计划能否对全球的温度起到作用，还需要进一步的讨论。

## 五、参考文献

- [1]Energy Information Administration (EIA), 1992 *commercial buildings energy consumption survey detailed tables*, [http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/detailed\\_tables\\_1992.html](http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/detailed_tables_1992.html), 2012.4.13
- [2]Levinson R,Akbari H, *Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants*, <http://heatisland.lbl.gov/>, 2012.4.13
- [3]K.W.Oleson,G.B.Bonan,J.Feddema, *Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model*, <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009GL042194.shtml>, 2012.4.13
- [4]Energy Information Administration(EIA), *Commercial buildings consumption and expenditures (nonresidential buildings energy consumption survey)*, <http://www.eia.gov/>, 2012.4.13
- [5]Environmental Protection Agency (EPA), *Emissions & generation resource grid integrated database (Egrid)*, <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/egrid/index.html>, 2012.4.13
- [6]California Energy Commission (CEC),*Technology energy savings volume II:Building prototypes*, <http://www.energy.ca.gov/>, 2012.4.13
- [7]DOE-2., *Lawrence Berkeley National Lab DOE-2*, <http://simulationresearch.lbl.gov/dirsoft/d2what.html>, 2012.4.13
- [8]Akbari, H., & Konopacki, S., *Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies*, *Energy Policy*, 33: 721–756, 2005
- [9]Akbari, H., Konopacki, S., Parker, D., Wilcox, B., Eley, C., & Van Geem, M., *Calculations in support of SSP90.1 for reflective roofs*, *ASHRAE Transactions*, 104(1B): 984–995, 1998.
- [10]Akbari, H., Konopacki, S., & Pomerantz, M., *Cooling-energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States*, *Energy*, 24: 391–407, 1999
- [11]Akbari, H., S. Menon, and A. Rosenfeld, *Global cooling: Increasing world-wide urban*

- albedos to offset CO<sub>2</sub>*, *Clim. Change*, 94: 275–286, 2009
- [12] Collins, W. D., et al., *The Community Climate System Model version 3 (CCSM3)*, *J. Clim.*, 19: 2122–2143, 2006
- [13] Oleson, K. W., G. B. Bonan, J. Feddema, M. Vertenstein, and C. S. B. Grimmond, *An urban parameterization for a global climate model. 1. Formulation and evaluation for two cities*, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47: 1038–1060, 2008
- [14] Sailor, D. J., *Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover*, *J. Appl. Meteorol.*, 34: 1694–1704, 1995
- [15] Synnefa, A., A. Dandou, M. Santamouris, and M. Tombrou, *On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy*, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47: 2846–2856, 2008
- [16] Taha, H., St. Konopacki, and S. Gabersek, *Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: A 10-region modeling study*, *Theor. Appl. Climatol.*, 62: 175–185, 1999