

## 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：1617

参赛队员（签名）：

队员 1：张伟

队员 2：沙颖凯

队员 3：杨凤婷

参赛队教练员（签名）：

参赛队伍组别：本科

## 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）：

1617

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”对城市热岛减缓效应的综合评估

关 键 词 热岛效应 热物理属性 城市气候学

能量平衡模型 层次分析法 卫星遥感

## 摘 要：

本文从城市热岛效应和“白屋顶计划”入手，调研城市热岛效应的成因机理，“白屋顶计划”的具体方案及物理原理，在对二者有了深刻认识后，展开了以下研究：

首先从城市气候学的角度全面剖析热岛效应，发现城市地貌、人为热排放、大气污染、温室气体和局地气象条件是热岛效应的五个主导成因。为了进一步揭示屋顶在增温过程中的作用，本文运用了层次分析法，计算得出各因子对热岛增温效应的影响权重，包括屋顶在内的城市下垫面辐射排名第二，吸收效应为 20.41%，其中工业排放对城市热岛效应的贡献率最大，为 32.63%，然后是汽车尾气排放为 14.25%。其余各项的贡献都在 10% 以下。

接着从太阳辐射传播、下垫面与空气热交换等角度，运用气候学能量平衡原理，结合屋顶热物理属性等参数，在合理假设前提下，抽象概括出这一系列物理过程，构建能量平衡模型，模型使用南京站实测气象数据进行计算，得出的结论为，在全天气温最高的 14:00，实施“白屋顶计划”最多能够降低下垫面温度 14.11K (14.11℃)；全天平均降低 4.74K (4.74℃)，获得了较明显的减温效果。同时，使用 MODIS 卫星遥感数据对纽约城区温度计算结果表明，已发起“白屋顶计划”街区下垫面温度要比传统街区下降 3.26℃，从另一侧面直接验证了“白屋顶计划”的减温效应。

在基于模型计算得出的减温数据基础上，逐项分析“白屋顶计划”在环保、节能、个人舒适度和工作效率、灾害频率和公众卫生等方面的效益。发现夏季高温天气时，“白屋顶计划”能提高人体日平均舒适度 6.85 个百分点，显著改善夏日人体舒适度和工作效率，减少大量的电能消耗和温室气体排放，大幅降低夏日灾害和高温疾病的发生频率。

在结合太阳辐射、气候条件、城市化参数等多方影响因子的分析后，讨论了“白屋顶计划”可推广性及推广条件，发现在众多因素中，城市热岛对云量、风速和空气湿度的敏感度最高。并通过判断局地情况是否满足“白屋顶计划”的各项指标，帮助决策者判断通过“白屋顶计划”推广，能否降低温度，实现节能环保，避免盲目推行造成不必要的经济负担。

最后讨论分析了“白屋顶计划”可能存在的弊端，即造成潜在的光学污染，及维持屋顶持续高反照率所需的高额成本，再次审视本文建立的模型，客观的分析了模型的不足，建模过程中省略项的影响，以及模型的优化改进方向。

参赛队号 1617

所选题目 B 题

参赛密码 \_\_\_\_\_  
(由组委会填写)

### Abstract

This article starts from the urban heat island effect and ‘white roof plan’. First of all, investigate the mechanism and physical principles of the urban heat island and ‘white roof plan’, after a deep awareness, we expand the following studies:

First of all, from the perspective of urban climate analysis, we found that urban landscape, artificial heat, air pollution, greenhouse gas emissions and the meteorological conditions are the five leading causes of urban heat island. In order to further reveal the roof's role in warming process, we use analytic hierarchy process (AHP) method, calculate the weight of the influence factors on temperature effect of urban heat island. The underlying of the city, including the roof surface radiation ranked second, absorption effects 20.41%, maximum contribution rate of urban heat island is industrial emissions 32.63%, Then comes the third auto emissions 14.25%. Rest of the contribution is 10%.

Then from the perspective of sun radiation spreading, the heat exchange between the underlying surface and air, using principle of climate energy balance, using parameter of heat physical property and under reasonable assumptions, used differential equation model to abstract this series physical process. After those preparation we construct energy balance model, with Nanjing meteorological station statistics, calculate the change of temperature after changing roof white. At 14:00, the underlying surface temperature can reduce an maximum 14.11K(14.11°C), land surface temperature on average throughout the day to reduce 4.74K(4.74°C), won a significant temperature reduction effect. At the same time, using MODIS satellite remote sensing data for temperature calculation result shows that in New York City, the blocks which has implemented the “white roof plan” get a temperature decline about 3.26°C, and have directly verified “white roof plan” of the temperature reduction effect.

Calculated based on the model on the basis of temperature data, itemized analysis “white roof plan” in environmental protection, energy saving, personal comfort and efficiency, frequency of disasters and public health benefits. Found when the hot weather in the summer, “white roof plan” can improve human comfort average 6.85 percent, significantly improved summer comfort and efficiency of the human body, reduce energy consumption and greenhouse gas emissions and decrease summer of high temperature disaster and disease incidence.

In the context of sun radiation and climatic conditions, parameters such as multi-influencing factor analysis of urbanization, discussed the “white roofs program” promotion and the promotion of conditions found in many factors, urban heat island on sensitivity of cloud cover, wind speed and air humidity maximum. And by determining whether to meet “white roof plan” of indicators to help decision makers to judge by “white roofs program” promotion, can reduce the temperature to achieve energy saving and environmental protection, avoid unnecessary economic burdens of blindly implementing.

Finally, analyzing the potential drawbacks of the “white roof project”, which including the light pollution, and heavy burden to keep roof clean with high albedo. Then we considerate the model's established in this article again, analyse the inadequacy, unconsidered effect of the model objectively, and pointed out the further improvement of the model.

# “白屋顶计划”对城市热岛减缓效应的综合评估

## 目录

目录.....	1
一、背景介绍.....	2
1.1 城市热岛效应 (Urban Heat Island) .....	2
1.2 白屋顶计划 (White Roof Project) .....	2
二、问题提出.....	3
三、符号说明.....	3
常量取值.....	4
四、问题假设.....	5
4.1 屋顶增温效应评估模型的模型假设.....	5
4.2 能量平衡模型的模型假设.....	5
五、屋顶增温效应评估模型.....	5
5.1 城市热岛效应的成因机理概述.....	5
5.2 城市热岛效应的成因具体分析.....	5
5.3 运用层次分析法建立屋顶增温效应的评估模型.....	7
5.4 结果分析.....	12
六、能量平衡模型.....	12
6.1 城市系统.....	12
6.2 模型的建立与参数化.....	13
6.3 模型计算与结果分析.....	18
七、遥感视角下的白屋顶计划.....	20
7.1 纽约都会区的白屋顶建筑.....	21
7.2 NASA-MODIS 遥感数据 .....	22
7.3 数据处理与结果分析.....	22
八、热岛减缓效益及可推广性分析.....	24
8.1 热岛减缓效益分析概述.....	24
8.2 热岛减缓效益小项分析.....	24
8.3 “白屋顶计划”可推广性分析.....	28
8.4 “白屋顶计划”推广影响指标分析.....	28
8.5 小结.....	29
九、总结.....	30
9.1 对模型的总结 .....	30
9.2 白屋顶计划可能存在的弊端.....	30
十、参考文献.....	31
十一、附录.....	31

## 一、背景介绍

### 1.1 城市热岛效应 (Urban Heat Island)

城市热岛效应是指由于人类活动造成的城市气温高于周围自然环境气温的现象，它是城市不同于其以外地域的气候最明显的特征之一。其实早在 19 世纪，英国化学家卢克·霍华德 (Luke Howard 1772~1864) 就指出了伦敦市中心的气温比周围乡村的气温要高。当城市发展到一定规模的时候，由于城市下垫面的热容量大，而使城市温度明显的高于非城区温度，如图 1.1 所示，这就形成了一个“高温孤岛”。

城市热岛效应与随着城市规模的扩大而趋于显著，城市热岛效应的发展趋势与城市人口数量的增长趋势相一致。通常而言，10 万~100 万人口的大型城市能比周围乡村地区的气温高出 8~12℃。城市热岛的强度还取决于天气条件，在晴空且无风条件（晴稳条件）下，城市热岛效应最为显著<sup>[1]</sup>。



图 1.1 城市热岛效应示意图

### 1.2 白屋顶计划 (White Roof Project)

美国国家大气研究中心 (NCAR) 的科学家戈登·博兰 (Gordon Bonan) 在研究中发现，通过使用计算机模型，模拟阳光辐射量和城市表面反射量显示，如果每个城市每个屋顶都涂成白色，增加对太阳辐射反射率，将会减少对空调器需求，并且最终使每个城市气温平均下降华氏 0.7 度。“白屋顶计划”物理根据是，太阳辐射容易被深的颜色吸收，然而浅颜色能将更多太阳辐射反射回太空。据计算，该措施能节省高达 25% 的能源消耗，建筑物室内温度至少下降 2℃，减少了能源消耗，间接减少了温室气体排放产生。

在美国，推进白色屋顶的运动正在扩展，获得了美国能源部长朱棣文的支持，鼓励将联邦刺激资金用于节能项目，州能源官员和地方公用事业单位经常为“冷色屋顶”提供资金。如果屋顶材料符合环保局的能源计划的要求，建造“冷色屋顶”能获得税收优惠。沃尔玛在美国的 4,268 个商店，有 75 个百分点以上安装了反光屋顶。加利福尼亚州、佛罗里达州和佐治亚州制定了建筑规则，鼓动商业建筑安装白色屋顶。

（美国“白屋顶计划”组织 <http://whiteroofproject.org>）

（欧洲五国“冷色屋顶计划”委员会 <http://www.coolroofs-eu.eu/>）

## 二、问题提出

基于对城市热岛效应的成因机理和“白屋顶计划”的物理原理的了解，拟展开以下几方面问题的讨论。

问题一：层次分析法对屋顶增温效应在城市热岛效应中贡献量的定量分析

城市热岛效应是在城市化过程中，由众多人为因素和局地气象条件共同作用下形成的。大量的学者对其成因机理展开了定性分析，然而对于定量分析研究，却因各影响因子之间复杂的非线性关系而止步。本文采用层次分析法，基于气候学研究基础和前人的定性分析成果，通过合理假设，高度抽象简化实际情况，建模层次分析模型，定量分析屋顶增温效应在城市热岛效应中所占的比例。为下文的进一步研究打下基础。

问题二：构建能量平衡模型综合评估“白屋顶计划”对城市热岛效应的减缓作用

从大气辐射学、城市气候学与边界层气象学的观点出发，考虑不同颜色对不同波段的太阳光线的吸收作用，在城市气候学对城市热岛效应的机理研究基础上，对实际情况进行抽象简化，选用不同下垫面热物理属性的经验参数，构建出城市热岛效应的能量平衡模型，定量评估白屋顶对热岛效应的减缓作用。同时，使用 NASA-MODIS 遥感资料，定量计算纽约城区（已发起“白屋顶计划”）内“白屋顶计划”的实际减缓热岛效应的成果，作为对“白屋顶计划”实施效果的进一步验证。

问题三：“白屋顶计划”热岛减缓效益及可推广性分析

在能量平衡模型算出刷白屋顶降温数值后，为了全面地衡量热岛减缓效益，应在模型计算出“白屋顶减温数据”的基础上，全面考虑由夏季气温降低带来的在环保、节能、个人舒适度和工作效率、灾害频率和公众卫生等方面的效益。同时，在基于不同地理位置、不同气候类型接受到的太阳辐射日总量不同，以及气象要素到达一定的数值时，对热岛效应带来的影响显著加大等情况考虑，讨论了“白屋顶计划”的可推广性，判断“白屋顶计划”是否契合当地的各方面情况，避免出现盲目推行带来的不必要的经济负担。

## 三、符号说明

符号	意义	单位
$R$	净辐射通量密度	$W/m^2$
$R_s$	短波辐射通量密度	$W/m^2$
$R_l$	长波辐射通量密度	$W/m^2$
$R_m$	地表反射通量密度	$W/m^2$
$R_{l\uparrow}$	下垫面的辐射出射度	$W/m^2$
$R_{l\downarrow}$	大气逆辐射通量密度	$W/m^2$
$E$	热交换通量密度	$W/m^2$
$H$	人为活动产热通量密度	$W/m^2$
$E_A$	下垫面导热通量密度	$W/m^2$
$\alpha$	下垫面反射率	—
$\sigma$	Stefan-Boltzmann 常量	$W/m^2 K^4$
$\varepsilon$	相对发射率	—

$e$	大气水汽压	$hPa$
$e_s$	饱和水汽压	
$U_v$	相对湿度	—
$w_i$	权重向量	—
$t$	局地温度	$K$
$T$	下垫面温度	$K$
$\tau$	时间	$s$
$\lambda$	导热率	$W/m^{\circ}C$
$\lambda_{max}$	最大特征向量	—
$S$	显热交换通量密度	$W/m^2$
$L$	潜热交换通量密度	$W/m^2$
$\rho$	空气密度	$kg/m^3$
$q$	大气比湿	$kg/kg$
$c_p$	空气定压比热容	$kJ/(kg \cdot K)$
$K_t$	显热湍流交换系数	—
$K_q$	潜热湍流交换系数	—
$u$	风速	$m/s$
$\gamma_d$	干绝热减温律	$K/km$
$C_D$	动量阻力系数	—
$C_H$	热量阻力系数	—
$z_0$	下垫面粗糙度	$m$
$z_{0q}$	温度粗糙度	$m$
$z_{0t}$	水汽粗糙度	$m$
$k$	VonKarman 系数	—
$R_e$	粗糙度 Reynolds 数	—
$R_i$	梯度 Richardson 数	—
$W_i$	最终排序下向量	—
$n$	矩阵行数	—
$C.I.$	一致性指标	—
$R.I.$	平均随机一致性指标	—
$C.R.$	一致性比率	—
$A$	一致性矩阵	

## 常量取值

常量	取值范围	模型取值
空气密度	—	1.293
空气比热容	—	1.003
Stefan-Boltzmann 常量	—	$5.67 \times 10^8$
VonKarman 系数	0.4~0.55	0.4
粗糙度 Reynolds 数	0.8~1.4	1.15
下垫面粗糙度	—	1.3



## 四、问题假设

### 4.1 屋顶增温效应评估模型的模型假设

- (1) 在讨论热岛效应的增温效应问题时，假设所考虑的各项对城市热岛效应作用的影响因子具有普遍性，忽略一些热贡献量很小的其他影响因素；
- (2) 假设误差设定在合理范围之内，对数据结果的影响可忽略。

### 4.2 能量平衡模型的模型假设

- (1) 大气服从理想气体假设；
- (2) 地—气热交换过程满足经典热力学定律；
- (3) 不考虑下垫面温度的平流变化；
- (4) 大气辐射传输不受污染物影响；
- (5) 大气层结稳定；
- (6) 城市不处于极端地理条件下（地形平坦）；
- (7) 城市下垫面性质均一稳定；
- (8) 城市建筑物为规则有序排列（下垫面粗糙度近似为 1.3）。

## 五、屋顶增温效应评估模型

### 5.1 城市热岛效应的成因机理概述

概括国内外许多城市气候学家的研究成果，可以得到以下结论：城市热岛的成因是非常复杂的，影响热岛强度的因子是多种多样的；热岛不仅随时间变化，也随空间变化，变化模式多种多样。从其一般规律而言，城市热岛是在城市化的人为因素和局地天气气象条件的共同作用下形成的。其中的人为因素是指城市下垫面性质的改变、人为热、温室气体和大气污染。局地天气条件则主要是指天气形势、风、云量等气象要素。

### 5.2 城市热岛效应的成因具体分析

#### 5.2.1 成因一城市地貌

城市地貌是城市自然地貌和城市人工地貌的有机融合体，在其形成和演化过程中人类活动始终起着决定性作用。其性质和结构对城市热岛的形成具有决定性意义。

### 5.2.1.1 城市地表形态的反射效应（“白屋顶计划”主要参与项）

地表物质对太阳短波辐射的反射能力，通常用反射率  $\alpha$  来表示；在其它条件相同的情况下，城区能获得比郊区更多的太阳辐射热，原因有：城市和郊区地表组成的热物理性质和状态的巨大差异，这是直接原因；城市中人工地貌的增多，众多建筑物形成的“城市街谷”导致太阳辐射的传播路径增加；城市地表形态的破碎程度较郊区的自然地貌高得多，其受射面的反射情况也发生的很大变化。

### 5.2.1.2 城市地表物质的蒸发效应

蒸发是地表能量转换的主要方式之一，城市地表物质的组成特点是人工物质不断增加，而它的潜热蒸发量很小，接近于 0；不透水面（水泥路面、柏油路面等）不断扩展，城市的蒸发量大大减小，蒸发效应减弱，向空气团里输送的显热量多，引起城市空气的增温。

### 5.2.1.3 城市地表物质的蓄热效应

城市地表物质的蓄热效应是形成夜间城市热岛效应的重要原因之一。地表物质的热物性，即下垫面的导热率  $\lambda$ 、热容量  $C$  等因素之间的差异是导致城市和郊区地面蓄热能力不同的主要因素之一。城市地表一般是由表层人工物质（沥青、水泥等）和次表基层自然物质组成的特殊“双层结构”。这种特殊结构对能量的转换和储存具有重要影响。城市比郊区在白天能够蓄积较多热量的另一重要原因是建筑群密集，在太阳辐射下，吸热面和贮热面较多。因此，城市在夜间容易形成热岛效应。

## 5.2.2 成因一人为排放热

人为排放热来源于人类生产、生活及生物新陈代谢所产生的热量。城市中人为热主要包括工业生产废热、生活废热、汽车排放热和空调排放热等。人为热对城市热岛的影响表现在城市热岛的周变化规律，以及在中高纬度地区特别是在冬季，由于城市中为取暖而燃烧大量化石燃料所产生的人为热导致了热岛强度的升高。事实证明，它是形成城市热岛的又一不可忽视的重要因素。

## 5.2.3 成因一人为排放热温室气体

温室气体主要是指  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ，它们对地面长波辐射的选择性吸收所产生的温室效应对热岛的形成更为重要。城市中  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  主要来源于煤、石油等化石燃料燃烧，而城市中的绿化率较小，如上海市 1984 年的绿地覆盖率仅为 9.7%，所能被植物光合作用所利用的  $\text{CO}_2$  的量较郊区而言是较少的。那么  $\text{CO}_2$  对城市辐射平衡的改变是不容忽视的，必须视为城市热岛中的一个重要因素。

#### 5.2.4 成因一大气污染（夜间热岛效应的重要原因之一）

城市是工业、交通、生活源集中的地区，大量污染物如粉尘、烟等排放到大气中。这些大气污染物在白天具有散射太阳辐射的作用，减弱到达地面的太阳辐射，这被称为“阳伞效应”。它不利于白天城市下垫面的增温。而在夜间，它却能增加长波逆辐射，减少长波辐射损失，加强了夜间的城市热岛强度。

#### 5.2.5 影响因子一局地气象条件

夏季城市热岛的高温效应须在一定的天气形势下才能形成，并且得到发展。据城市气候学研究结果表明，通常情况下，晴天、少云、温度层结稳定这样的天气形势，简称为“晴稳天气”，容易为城市热岛现象产生提供有利的气象条件。而大风、频繁降水以及相对湿度大的局地气象条件，不利于城市热岛效应的发展。当气象要素的数值波动不大时，城市热岛效应的发展行为显著，但若某一项或某几项气象条件的发生改变，都可能会对局地的热岛效应的发展产生立竿见影的遏制作用。综上不难得出，城市热岛效应的发展依赖于平稳的天气形势，同样，气象要素的变化也会对局地热岛效应产生巨大影响，不容轻视。

### 5.3 运用层次分析法建立屋顶增温效应的评估模型

层次分析法（The Analytic Hierarchy Process 即 AHP）是美国运筹学家 T.L. Saaty 于 20 世纪 70 年代创立的一种系统分析与决策的综合评价方法，是在充分研究了人类思维过程的基础上提出来的，它较合理的解决了定性问题定量化的处理过程。AHP 的主要特点是通过建立递阶层次结构，把人类的判断转化到若干因素两两之间重要度的比较上，从而把难以量化的定性判断转化为可操作的重要度的比较上面。

基于以上对城市热岛效应的成因机理分析，通过对模型的合理简化，我们总结出如下的建模过程：

#### 5.3.1 递阶层次结构的建立

由于问题的复杂性，先要将问题涉及的因素条理化、层次化，构建出一个递阶层次结构模型。现在，通过分析城市热岛效应问题中各因素之间的关系，构建结构模型，共分 3 个层次，即目标层 O，准则层 C，方案层 A。每层支配若干元素，各层元素间的关系用相连的直线表示，得到层次分析的框架图，如图 5.1 所示：

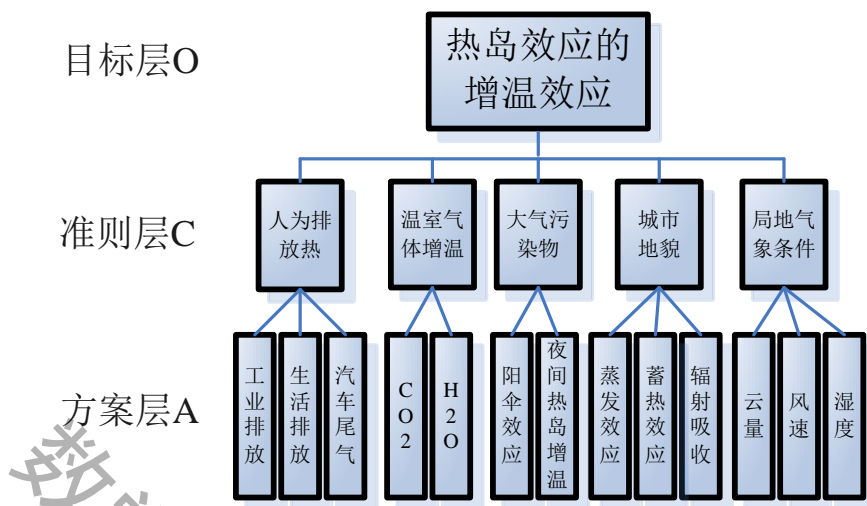


图 5.1 热岛效应的增温效应

### 5.3.2 构造成对比较矩阵

针对准则 C 所支配的因素对目标影响的大小，即综合考虑各项因子对城市的热贡献量、对接收到的热量的改变量等的影响力大小，确定因素对目标的重要性。用成对比较法比较各准则  $C_1, C_2, \dots, C_n$  对目标 O 的重要性、 $A_1, A_2, \dots, A_n$  对准则 C 的重要性，按 1~9 标度对重要度赋值，构造成对比较矩阵<sup>[2]</sup>：

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \dots \dots (5.1)$$

式 (5.1) 中

$$a_{ij} > 0 \quad a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

### 5.3.3 一致性检验

从给出的每一判断矩阵中求出被比较元素的权重向量  $w_i$ ：

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \dots \dots (5.2)$$

通过构造成对比较阵 A，用对应的  $w_i$  表示出来，若设 A 是一致性矩阵，则有：

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \dots \dots (5.3)$$

使用 MATLAB 实现矩阵 A 的最大特征根  $\lambda_{max}$  的求解，当  $\lambda_{max}$  稍大于  $n$  时，A 就具有满

意的一致性。

但是，由于人为判断不可避免的带有主观性，构造出成对比较阵 A 往往很难满足一致性，可靠程度值得怀疑，极有可能会造成决策的失误。所以，需要对判断矩阵的一致性进行检验，确定每一判断矩阵是否可被接受。具体执行步骤是<sup>[2]</sup>：

(1) 计算一致性指标 C. I. (Consistent Index)：

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \dots\dots (5.4)$$

查找萨蒂提出的平均随机一致性指标 R. I. (Random Index)：

表 5-1 平均随机一致性指标 R. I.

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R. I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

(2) 计算一致性比率 R. I. (Consistent Radio)：

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I} \dots\dots (5.5)$$

(3) 当一致性比率  $C.I. < 0.1$  时，认为成对比较矩阵 A 具有满意的一致性。运用 MATLAB 编程计算所得结果如下：

表 5-2 判断矩阵 O-C (n=5)

O	C1	C2	C3	C4	C5	w0	$\lambda_{\max} = 5.3429$ $C.I. = 0.0857 < 0.1$ $C.R. = 0.0765 < 0.1$
C1	1	7	9	3	5	0.4999	
C2	1/7	1	3	1/6	1/4	0.0555	
C3	1/9	1/3	1	1/7	1/5	0.0323	
C4	1/3	6	7	1	4	0.2846	
C5	1/5	4	5	1/4	1	0.1277	

由表可知。  $C.I. < 0.1$ ，满足条件，改判断矩阵 O-C 通过一致性检验。

### 5.3.4 层析总排序及其一致性检验

最终目的是要得到最底层中各元素对目标的排序权重，则用同样方法求出方案层对准则层的权重  $w_i^{(3)}$ ：

表 5-3 判断矩阵 C1 (n=3)

C1	A1	A2	A3	w0	$\lambda_{\max} = 3.0735$ $C.I. = 0.0368$ $C.R. = 0.0707$
A1	1	8	3	0.6527	
A2	1/8	1	1/6	0.0623	

A3	1/3	6	1	0.2851
----	-----	---	---	--------

表 5-4 判断矩阵 C2-A (n=2)

C2	A1	A2	w0	$\lambda_{\max} = 2$ $C.I = 0$ $C.R = 0$
A1	1	6	0.8571	
A2	1/6	1	0.1429	

表 5-5 判断矩阵 C3-A (n=2)

C3	A1	A2	w0	$\lambda_{\max} = 2$ $C.I = 0$ $C.R = 0$
A1	1	1/3	0.2500	
A2	3	1	0.7500	

表 5-6 判断矩阵 C4-A (n=3)

C4	A1	A2	A3	w0	$\lambda_{\max} = 3.0940$ $C.I = 0.0470$ $C.R = 0.0904$
A1	1	1/3	1/6	0.0881	
A2	3	1	1/5	0.1947	
A3	6	5	1	0.7172	

表 5-7 判断矩阵 C5-A (n=3)

C5	A1	A2	A3	w0	$\lambda_{\max} = 3.0385$ $C.I = 0.0192$ $C.R = 0.0370$
A1	1	3	5	0.6370	
A2	1/3	1	3	0.2583	
A3	1/5	1/3	1	0.1047	

以上结果中，均满足  $C.I < 0.1$ ，故均通过一致性检验，矩阵满足良好的一致性，模型构建成功。

前面已求解出准则层对目标层的权重  $w_i^{(2)}$ ，现在，根据  $W = w_i^{(2)} \cdot w_i^{(3)}$ ，即可求出最终排序向量  $W$ ：

$$W1 = (0.0090, 0.0050, 0.0048)^T$$

$$W2 = (0.0168, 0.0098)^T$$

$$W3 = (0.0035, 0.0071)^T$$

$$W4 = (0.0055, 0.0067, 0.0049)^T$$

$$W5 = (0.0081, 0.0060, 0.0044)^T$$

于是，现在得到了各因子对热岛增温效应的影响权重：

表 5-8 层次分析法热岛增温效应分析结果

目标层 0	准则层 C	方案层 A	排序权重 $W_i$
热岛增温效应	人为排放热	工业排放	0.3263
		生活排放	0.0311
		汽车尾气	0.1425
	温室气体增温	CO <sub>2</sub>	0.0476
		H <sub>2</sub> O	0.0079
	大气污染物	阳伞效应	0.0081
		夜间增温效应	0.0242
		蒸发效应	0.0251
	城市地貌	蓄热效应	0.0554
		辐射吸收	0.2041
	局地气象条件	云量	0.0813
		风速	0.0330
		湿度	0.0134

## 5.4 结果分析

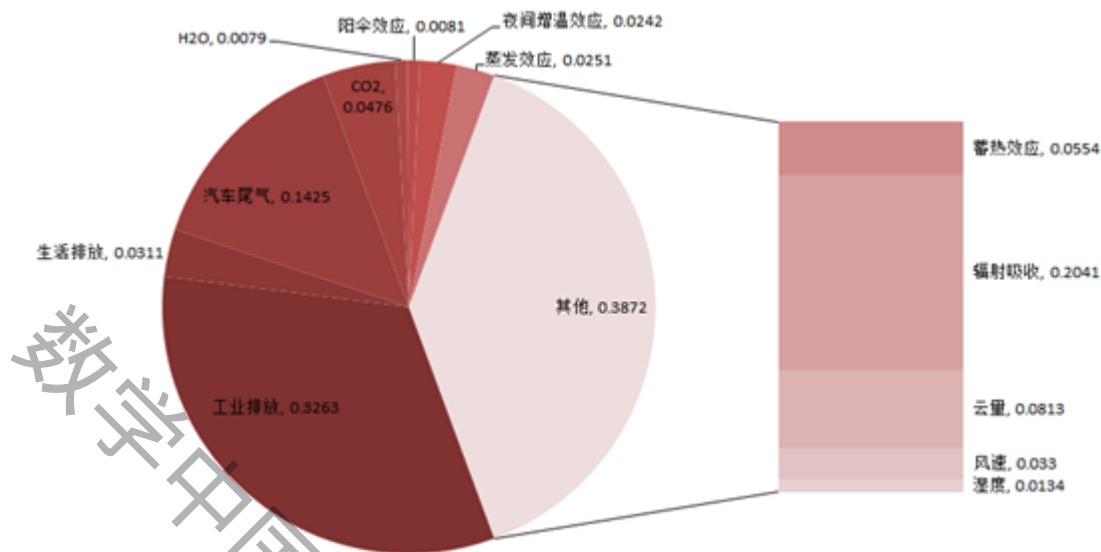


图 5.1 各方案层对城市热岛效应的贡献值

图 5.1 为层次分析法中各方案层对层次热岛效应的贡献值。由图可知，工业排放对城市热岛效应的贡献率最大，为32.63%，其次是城市下垫面的辐射吸收效应，为20.41%以及汽车尾气排放，为14.25%。其余各项的贡献都在10%以下。

从主观上看，城市热岛效应受到的影响来自多方面，且影响效力各有不同。但通过此模型的建立与定量分析可以发现，人为因素和城市地貌对城市热岛效应的贡献是最为重要的。人为因素存在很大的不确定性与不可控性，所以，改变下垫面属性，将成为消解城市热岛效应的负面影响的的重要途径，这即是第六节能量平衡模型建立的依据。

## 六、能量平衡模型

通过对屋顶增温效应评估模型的论证与总结，本文已经得出结论：下垫面属性，尤其是辐射属性，是研究城市热岛效应的重要部分，也是缓解城市热岛效应的切入点，本段论述的能量平衡模型，就是以此为基础，讨论下垫面属性与下垫面温度间对应关系的气候物理模型，同时需要指出的是，在模型建立的过程中，除下垫面属性与温度外，城市的局地气象要素也是模型关注的重点，具体包括城市的局地温度、风速、湿度等。

### 6.1 城市系统

通过对城市系统进行建模，讨论建筑物的白色屋顶在减缓城市热岛效应中所发挥的作用，首先将模型的研究区域限定为下垫面性质均一稳定，无剧烈天气现象（大气层结稳定）的小块面积区域。在现实生活中，这样的研究区域可以模拟单位面积城市系统的日常行为。



城市系统由“地表—建筑物—大气”三部分组成。下垫面与大气之间的相互作用是本次建模关注的重点，是城市热岛效应产生的重要过程，对于评估“白屋顶计划”（即白色下垫面）的效果也具有基础性意义。

## 6.2 模型的建立与参数化

利用能量平衡模型可以描述城市系统中各能量组分的定量关系。一般意义上的能量平衡方程可表示为<sup>[3]</sup>：

$$Q_n + Q_F = Q_{sum} + \Delta Q_S + \Delta Q_A \cdots \cdots (6.1)$$

式(6.1)中 $Q_n$ 为净辐射量； $Q_F$ 为人为活动产热量； $Q_{sum}$ 为下垫面与大气的热交换总量； $\Delta Q_S$ 为下垫面内部（包括地面、建筑物内部）的贮热量； $\Delta Q_A$ 为热量的平流变化量。

式(6.1)在现代城市气候学理论中被广泛采用的能量平衡方程。在衡量系统内部能量的瞬时变化情况时，上式可以表示为对应的通量密度的形式。同时考虑到：因为本小组在建模时，将热力学背景设定为性质均一的下垫面，所以流入与流出系统的能量收支相等，即平流变化项 $\Delta Q_A$ 忽略不计。综上，对建模选定的研究区域，(6.1)式的能量平衡方程最终表示为：

$$R + H = E_A + E \cdots \cdots (6.2)$$

式(6.2)中 $R$ 为净辐射通量密度； $H$ 为人为活动产热通量密度； $E_A$ 下垫面导热通量密度； $E$ 为下垫面与大气热交换通量密度。

式(6.2)对能量平衡模型而言具有基础性意义。由此，为了将能量平衡模型完全参数化，并比较不同现下垫面对城市热岛效应的影响，需要对能量平衡模型的分量逐一进行讨论。

### 6.2.1 净辐射通量密度

研究区域接收的净辐射通量密度可分为两部分，即短波辐射通量密度（ $R_s$ ）与长波辐射通量密度（ $R_l$ ），显然，二者存在关系：

$$R = R_s + R_l \cdots \cdots (6.3)$$

同时，地球上短波辐射与长波辐射的来源并不相同，二者与下垫面相互作用的机理也有差异，因此它们需要分别进行讨论。

#### 6.2.1.1 短波辐射

短波辐射的主要来源是太阳辐射，因而只存在与白天。到达下垫面的太阳辐射经过大气散射，其主要能量集中于350~1400nm波段<sup>[5]</sup>，在接触下垫面后，太阳辐射的一部分将被下垫面吸收，另一部分被反射入大气。被吸收的部分即为净辐射中的短波辐射通量密度，上述过程可用公式表示为：

$$R_s = R_0(1 - \alpha) \cdots \cdots (6.4)$$

式(6.4)中的 $\alpha$ 称为下垫面反射率，这一参数与下垫面性质直接相关，下表给出了不同性质下垫面的反射率：

表 6.1 常见下垫面反射率<sup>[4]</sup>

下垫面	沥青道路	砖墙	石墙	混凝土	瓦片	白色涂料	黑色涂料
反射率	0.05~0.2	0.2~0.4	0.3~0.4	0.2~0.35	0.2~0.35	0.7~0.9	0.02~0.25

### 6.2.1.2 长波辐射

长波辐射通量密度由两部分组成，分别是下垫面的辐射出射度 ( $R_{l\uparrow}$ ) 以及大气逆辐射 ( $R_{l\downarrow}$ )，与短波辐射不同，长波辐射无论昼夜都是存在的，并且在夜间由于不存在短波辐射，所以长波辐射的热效应就更为显著<sup>[5]</sup>。

对于下垫面的辐射出射度 ( $R_{l\uparrow}$ )，因为下垫面属于灰体，因此有公式：

$$R_{l\uparrow} = \varepsilon \sigma T^4 \dots \dots (6.5)$$

式 (6.5) 中  $\varepsilon$  称为相对发射率； $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常量； $T$  为下垫面温度，是模型的最终输出量。

相对发射率与下垫面性质有关，大致在 0.8~0.9 左右，下表给出不同性质下垫面的相对发射率数值：

表 6.2 常见下垫面相对发射率<sup>[4]</sup>

下垫面	沥青道路	砖墙	白色涂料	黑色涂料	裸地	草地	林地
发射率	0.93-0.95	0.90-0.92	0.84-0.86	0.93-0.95	0.88	0.84	0.97-0.98

对于大气逆辐射 ( $R_{l\downarrow}$ )，在晴空下是由二氧化碳和水汽产生，要得到具体的通量密度需要对大气的温度和水汽廓线进行计算，这在操作上极难实现。因此，本队选用 Brunt 经验公式<sup>[6]</sup>对大气逆辐射做近似计算，Brunt 经验公式可表示为：

$$R_{l\downarrow} = (a + b\sqrt{e})\varepsilon\sigma T^4 \dots \dots (6.6)$$

式 (6.6) 中  $a$  和  $b$  为经验常数，通常取值在 0.5 和 0.05 左右， $e$  为大气水汽压。

在已知相对湿度 ( $U_v$ ) 时，水汽压可通过饱和水汽压 ( $e_s$ ) 得到：

$$e = e_s \cdot U_v \dots \dots (6.7)$$

式 (6.7) 中的饱和水汽压 ( $e_s$ ) 是仅与温度有关的函数，可以通过 Magnus 公式计算：

$$e_s = 6.107 \times 10^{\frac{7.5t}{237.3+t}} \dots \dots (6.8)$$

式 (6.8) 中  $t$  为当地温度。

长波辐射通量密度 ( $R_l$ ) 与下垫面的辐射出射度 ( $R_{l\uparrow}$ ) 和大气逆辐射 ( $R_{l\downarrow}$ ) 存在关系：

$$R_l = R_{l\uparrow} - R_{l\downarrow} \dots \dots (6.9)$$

### 6.2.2 人为活动产热通量密度

城市中的人为活动产生的热量，由人为活动产热通量密度所决定，在整个城市热岛效应中，这一部分占有相当的比重，有第五节可知，城市中认为排放热主要来源于一下

部分：

- (1) 空调排放热
- (2) 汽车排放热
- (3) 工业生产废热
- (4) 生活废热
- (5) 城市居民的新陈代谢

人为排放热与城市局地气候等多重因素密切相关，对于能量平衡模型所选定的研究区域而言，在较短的时间尺度下，认为排放热可视为仅具有日变化，并可折算为当日太阳总辐射的等比例部份与一常数之和。

在实际计算过程中，对人为活动产热量的讨论需要因时而异，因地区而异。

### 6.2.3 导热通量密度

导热通量密度表征土壤与建筑物在模型中的热过程，土壤温度主要取决于到达地表面的太阳辐射和有效辐射的变化。其日变化中有一个最大值和一个最小值。白天，土壤表面增热效应最为强烈，且随深度增大而减小，夜晚的冷却效果也具有相同趋势。大量试验资料表明，土壤温度的日变化具有周期性，因此可以用时间的简谐函数表示土壤表面温度的周期变化<sup>[7]</sup>。

$$E_A(z, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} \dots \dots (6.10)$$

式(6.10)中 $t$ 为城市局地温度； $\tau$ 为时间； $\lambda$ 导热率。

上式中的导热率( $\lambda$ )表征下垫面的冷却速度，与下垫面性质相关，对与混凝土建筑， $\lambda$ 通常为 $1.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

对于建筑物内部，在不考虑人为因素(6.2.2节已进行考虑)的情况下，建筑物与土壤表现为相近的特征。

### 6.2.3 热交换通量密度

热交换通量密度( $E$ )是能量平衡方程的组成部分，表征地—气相互作用，它的计算需要使用气象数据完成。热交换通量密度量化了下垫面与大气进行热交换的过程，是能量平衡方程中最重要的一项。

地—气热量交换能够以显热( $S$ )和潜热( $L$ )两种方式进行，二者存在关系：

$$E = S + L \dots \dots (6.11)$$

依据湍流运动的半经验理论(K理论)，在近地表可以认为湍流垂直输送动量通量、显热与潜热交换通量为常数，利用这一特点，只要计算出相应各物理量的湍流交换系数，就能就出各物理量的数值，K理论中显热通量与潜热通量可分别表示为<sup>[7]</sup>：

$$S = \rho c_p K_t \Delta t \dots \dots (6.12)$$

$$L = \rho c_p K_q \Delta q \dots \dots (6.13)$$

式(6.12)(6.13)中 $\rho$ 为空气密度； $t$ 为当地温度； $c_p$ 为空气定压比热容； $q$ 为大气

比湿； $K_t$ 、 $K_q$ 称为湍流交换系数。

湍流交换系数可表示为：

$$K_T = \frac{uC_H}{1 + k\sqrt{C_D} \ln\left(\frac{z_0}{z_{0t}}\right)} \dots\dots (6.14)$$

$$K_q = \frac{uC_H}{1 + k\sqrt{C_D} \ln\left(\frac{z_0}{z_{0q}}\right)} \dots\dots (6.15)$$

式 (6.14) (6.15) 中  $u$  为风速； $C_D$  为动量阻力系数； $C_H$  为热量阻力系数； $z_0$  为下垫面粗糙度； $z_{0t}$  与  $z_{0q}$  分别为温度粗糙度与水汽粗糙度； $k$  为 VonKarman 系数。

对规则的城市建筑物而言，下垫面粗糙度 ( $z_0$ ) 可取为 1.3。

温度粗糙度与水汽粗糙度可利用 Garratt 经验公式<sup>[8]</sup> 计算：

$$\ln\left(\frac{z_0}{z_{0t}}\right) = 2.48R_e^{0.25} - 2 \dots\dots (6.16)$$

$$\ln\left(\frac{z_0}{z_{0q}}\right) = 2.28R_e^{0.25} - 2 \dots\dots (6.17)$$

式 (6.16) (6.17) 中  $R_e$  称为粗糙度 Reynolds 数。

对动阻力与热阻力系数 ( $C_D$ 、 $C_H$ ) 的计算是以流体力学实验为基础进行的，20 世纪 50 年代，苏联学者 Monin 与 Obukhov 对此做了大量工作，并依据流体的动力学相似得到了二者的经验表达式，在大气稳定条件（参照模型假设）下，动阻力与热阻力系数可表示为<sup>[7]</sup>：

$$C_D = C_H = \left(\frac{Z}{z_0}\right) \frac{k^2}{\left(\ln \frac{Z}{z_0}\right)^2} \frac{1}{1 + 10R_i(1 + 8R_i)} \dots\dots (6.18)$$

式 (6.18) 中  $Z$  为下垫面高度； $R_i$  为梯度 Richardson 数，是流体力学中的相似度参数，通过某一地区的气象数据，可以求得数值：

$$R_i = \frac{g}{T_0} \left(\frac{\Delta t}{Z} + \gamma_d\right) \times \left(\frac{Z}{\Delta u}\right)^2 \dots\dots (6.19)$$

式 (6.19) 中  $T_0$  为局地参考温度； $u$  为风速； $\sqrt{z_1 z_2}$  为下垫面平均高度； $\gamma_d$  为干绝热减温律。

对于干绝热减温律，联立大气热流量方程与流体静力平衡方程<sup>[9]</sup>：

$$\begin{cases} c_p dt = \frac{R_a t}{p} dp \\ \frac{dp}{dz} = -\frac{pg}{R_a t} \end{cases} \dots\dots (6.20)$$

可得：

$$\gamma_d = \frac{dt}{dz} = \frac{g}{c_p} = \frac{g}{c_{pd}(1 + 0.86q)} \approx 9.8 K \cdot km^{-1} \dots\dots (6.21)$$

由此，热交换通量密度被表示为与下垫面高度 ( $Z$ )、城市局地温度 ( $t$ )、风速 ( $u$ ) 以及比湿 ( $q$ ) 有关的方程组。对能量平衡模型各分量的描述也全部完成。

## 6.2.4 总结：模型的输入输出

根据之前对能量平衡模型的展开叙述，本队最终使用两组方程模拟热岛效应的温度并对“白屋顶计划”的可行性评估。

方程组的第二部分利用局地气象资料计算热交换通量密度：

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \rho c_p K_t \Delta t + \rho c_p K_q \Delta q \\ K_T = \frac{u C_H}{1 + k \sqrt{C_D} \ln \left( \frac{Z_0}{Z_{0t}} \right)} \\ K_q = \frac{u C_H}{1 + k \sqrt{C_D} \ln \left( \frac{Z_0}{Z_{0q}} \right)} \\ C_D = \left( \frac{Z}{Z_0} \right) \frac{k^2}{\left( \ln \frac{Z}{Z_0} \right)^2} \frac{1}{1 + 10 R_i (1 + 8 R_i)} \\ R_i = \frac{g}{T_0} \left( \frac{\Delta t}{Z} + \gamma_d \right) \times \left( \frac{Z}{\Delta u} \right)^2 \\ C_H = C_D \end{array} \right. \dots\dots (6.22)$$

需要输入的气象数据包括：下垫面高度（ $Z$ ）；当地温度（ $t$ ）；下垫面处的风速（ $u$ ）以及比湿（ $q$ ）。其中下垫面高度是发生热岛效应处与地面的高度差；温度、风速、比湿均为常规地面观测要素。

对于相对湿度（ $U_v$ ）、水汽压（ $e$ ）、比湿（ $q$ ）在满足理想气体条件时存在换算关系<sup>[9]</sup>：

$$\left\{ \begin{array}{l} e = e_s \cdot U_v \\ q = \frac{0.622e}{p + 0.378e} \\ e_s = 6.107 \times 10^{\frac{7.5t}{237.3+t}} \end{array} \right. \dots\dots (6.23)$$

因此通过湿度（ $U_v$ ）可以换算出对应的水汽压（ $e$ ）与比湿（ $q$ ）数值。

另需说明的是，城市局地温度（ $t$ ）与下垫面温度（ $T$ ）是不同的参数，前者表征当地的大气情况，后者是模型的输出，用以衡量热岛效应的强度。

方程组的第二部分利用能量平衡方程输出下垫面温度：

$$\left\{ \begin{array}{l} R + H = E_A + E \\ E_A(z, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} \\ R = R_s + R_l \\ R_s = R_0(1 - \alpha) \\ (1 - a - b\sqrt{e})\varepsilon\sigma T^4 \end{array} \right. \dots\dots (6.24)$$

需要输入的数据包括先前求出的热交换通量密度（ $E$ ）；相对湿度（ $U_v$ ）；当地温度（ $t$ ）；净辐射通量密度（ $R$ ）。“白色屋顶”与其它属性下垫面的差异体现在反射率（ $\alpha$ ）与相对发射率（ $\varepsilon$ ）的不同取值上。

### 6.3 模型计算与结果分析

利用上述模型能够输出特定条件下的下垫面温度，在模型计算时，为了模拟“白屋顶计划”对城市热岛效应的改善作用，本队选择“白色屋顶”和“黑色屋顶”两种下垫面进行计算，比较计算结果（下垫面温度）可以反映出对研究区域而言，将“黑色屋顶”更换为“白色屋顶”能够在多大程度上缓解城市热岛效应，同时，由于模型假设条件“下垫面均一稳定”在现实生活中通常无法长期存在，因此，模型计算过程在时间尺度上不易太长。本队将以气象数据（见下）为基础，以 0.5 小时为单位，模拟 24 小时的下垫面温度情况。

由先前所述，模型需要基本的气象观测数据方能进行运算，为此，本队选择南京站（58238）2008 年 6 月 1 日至 2009 年 6 月 30 日的地面观测数据（来自<sup>[11]</sup>），作为计算的输入数据。南京站（58238）自 2008 年元月起迁至南京江宁区青龙山，这一地区位于南京市城区内，其观测值能够代表城市下垫面所处的一般性气象条件。

24 小时计算的输入气象参数来自 2008 年 6 月 7 日，参照表 1、表 2，“白色屋顶”与“黑色屋顶”的反射率（ $\alpha$ ）与相对发射率（ $\varepsilon$ ）分别选定为 0.8、0.1、0.85、0.92；人为排放热通量密度设定为日太阳辐射总量的 7% 加上单位时间平均辐射的 15%；根据南京城区实际情况<sup>[10]</sup>，粗糙度 Reynolds 数选定为 1.15，人为产热量设定为当日太阳辐射总量的 7% 与平均辐射量 13% 之和。（其余常量已在参数列表中给出）

利用 MATLAB 对闭合方程组（6.22）（6.23）（6.24）进行计算并绘图，得到如下结果：

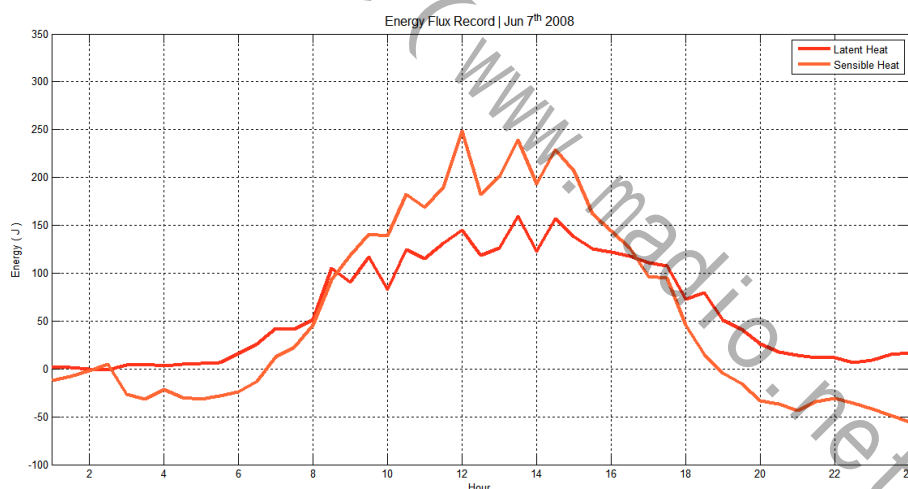


图 6.1 热交换通量密度曲线

图 6.1 为式（6.22）经输入数据计算得到的热交换通量密度（ $E$ ）曲线，由图可见，在白天（6~18 小时），热交换通量密度中的显热部分大于潜热部分，在夜间则是潜热部分大于显热部分。在能量平衡模型中，热交换项占有重要地位，对热交换的考察能够从侧面获知城市热岛效应的发展程度。

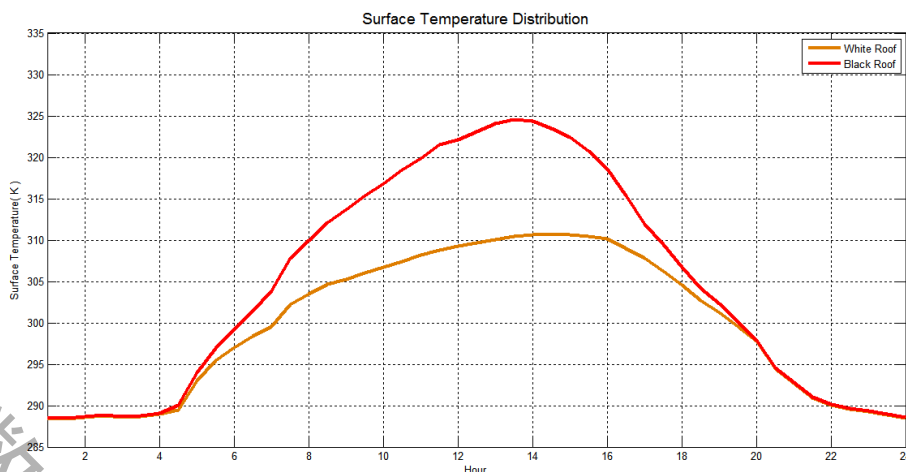


图 6.2 下垫面温度的 24 小时计算结果

图 6.2 为处于“白色屋顶”与“黑色屋顶”的下垫面条件下，能量平衡模型的输出值一下垫面温度随时间的变化曲线。

由图可知，在白天（6~18 小时）中设定为“白色屋顶”的下垫面温度相比于“黑色屋顶”明显偏低；在夜间（1~6 与 18~24 小时）“白色屋顶”与“黑色屋顶”相当，由于进行计算时，“白色屋顶”与“黑色屋顶”处于完全相同的环境中，而城市热岛效应又多发生在正午及午后，因此，上述计算表明，单纯将“黑色屋顶”更换为“白色屋顶”能够起到缓解城市热岛效应的作用。

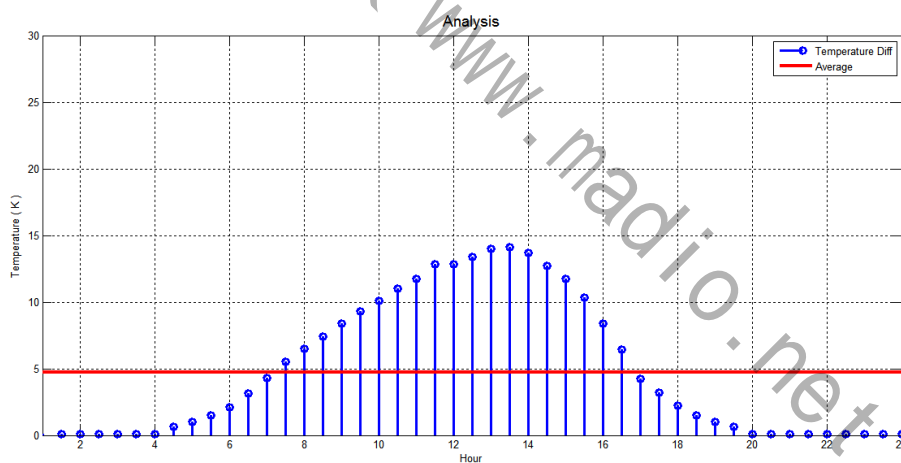


图 6.3 更换屋顶后下垫面气温变化

图 6.3 为更换屋顶后下垫面温度的下降值，红线为日平均值，由图及计算结果表明：

- (1) 更换屋顶后，在全天气温最高的 14:00，下垫面温度最多能够降低 14.11K (14.11℃)；下垫面温度全天平均降低 4.74K (4.74℃)，更换屋顶获得了明显的效果。
- (2) 更换屋顶前后，下垫面温度在夜间并无显著变化，其主要原因为，虽然“白色屋顶”与“黑色屋顶”的差别体现在反射率 ( $\alpha$ ) 与相对发射率 ( $\epsilon$ ) 上，但已有文献指出，不同材料在反射率 ( $\alpha$ ) 上的差异明显大于在相对发射率 ( $\epsilon$ ) 上的差异。

反射率 ( $\alpha$ ) 是针对短波辐射设定的物理参数, 地球上的短波辐射主要来自白天的太阳辐射, 所以“白色屋顶”与“黑色屋顶”仅在白天存在显著差异。

图 6.4 与图 6.5 给出了模型计算输入参数中辐射通量密度 ( $S_m/G_m$ )、与另一相关数据地表反射通量密度 ( $R_m/E_m$ ) 的日变化曲线, 通过比较这一曲线与模型计算结果, 能够验证上述结论。

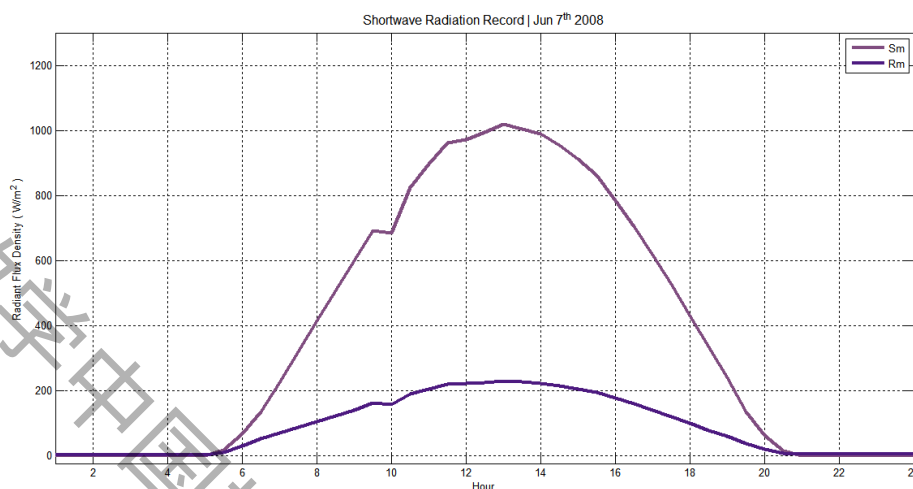


图 6.4 输入数据的短波辐射通量密度与地表反射通量密度的日变化曲线

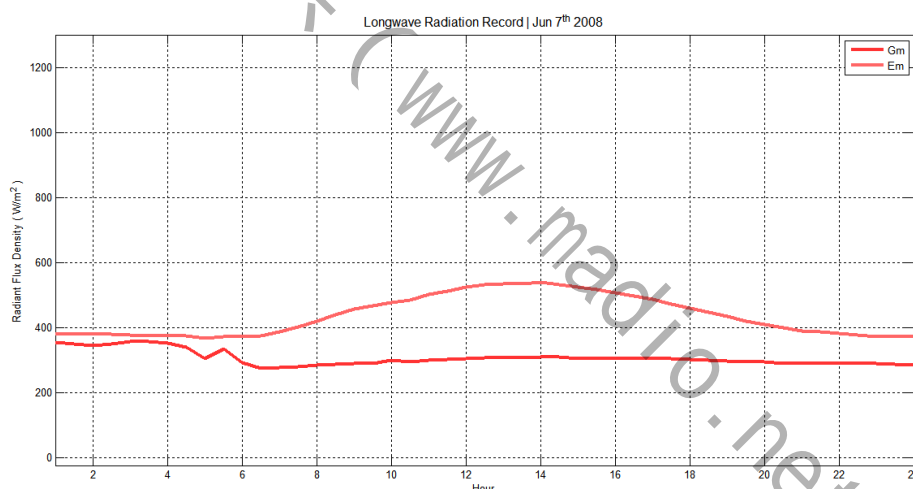


图 6.3 输入数据的长波辐射通量密度与地表反射通量密度的日变化曲线

对于“白屋顶计划”, 考虑到居民的屋顶在计划实施以前并非为纯粹黑色, 同时城市除楼房以外还存在绿地、水体等下垫面结构以及一定的热交换能力, 降温效果未必能契合模型的计算结果, 但可以肯定的是, 以能量平衡模型支持“白屋顶计划”, 以模型为出发点, 该计划能够缓解城市热岛效应。改善人居环境。

## 七、遥感视角下的白屋顶计划

在第六段中, 本队建立了能量平衡模型, 并通过计算模拟了“白屋顶计划”对城市



热岛效应的缓解，为计划提供了初步的理论支持，但在实际情况中，下垫面性质通常并非模型中所假设的均一稳定，为了进一步论证“白屋顶计划”在实际条件下产生的真实效果，本队引入遥感数据资料，通过选定两块分别代表“传统城市地区”和“包含白色屋顶的城市地区”的下垫面样本，提取遥感资料中选定区域经纬度所对应的下垫面温度并进行比较的方式，完成对“白屋顶计划”可行性的进一步论证。

## 7.1 纽约都会区的白屋顶建筑

纽约（New York）是美国人口最多的城市，也是全世界最大的都会区之一。纽约在商业和金融的方面发挥很重的全球影响力，也并评选为世界级城市。同时，纽约也是美国东海岸极为重要的港口城市。

自 2010 年“白屋顶计划”提出以来，在其市长迈克尔·布隆伯格(Michael Bloomberg)的大力支持下，纽约市民组织义工积极参与该项计划。

本队选定的下垫面样本即来自纽约都会区。本队在分析该地的遥感影像时发现了多处已有一定规模的“白屋顶”建筑群，同时也能够发现传统意义上的城市下垫面，下图即是纽约城区的局地遥感影像以及本队所划定的大致研究区域：



图 7.1 纽约（New York）及周边城区遥感影像（2011 年）

图中黄色圆形及其周边区域为曼哈顿（Manhattan）中心地区。从遥感数据及遥感图像都可以发现，该地区下垫面的反照率低于周边地区，同时，这一地区高楼林立，建筑物密集，可以归类为传统意义上的城市下垫面（以后称之为 A 地区）；与之相对应的，是位于皇后区（Queens）南部近海地区，其下垫面包含初具规模的白色屋顶建筑物，面积明显多于曼哈顿中心区，可归类为“白色屋顶”下垫面（以后称之为 B 地区）。

AB 两地的中心经纬度坐标分别为(北纬 40.7542 度 西经 73.9778)和(北纬 40.6433 度 西经 73.7819)，本队将通过遥感资料获取两地的下垫面温度，并通过对特定时刻逐点比较的方法考察 AB 两区域下垫面温度的差异

## 7.2 NASA-MODIS 遥感数据

美国宇航局(NASA)EOS 全球观测计划项目卫星 MODIS 的陆地数据产品中,MOD11\_L2 产品包含下垫面温度数据集,本队在验证时使用的数据为

MOD11\_L2.A2011152.1525.005.2011153113418 (来自<sup>[12]</sup>)

即 MOD11\_L2-2011-152-15:25 数据集。

利用 MATLAB 自带的 HDF 文件工具 (HDF Tool) 打开 MODIS 数据,以 EOS 方式浏览可观察到如下列表:

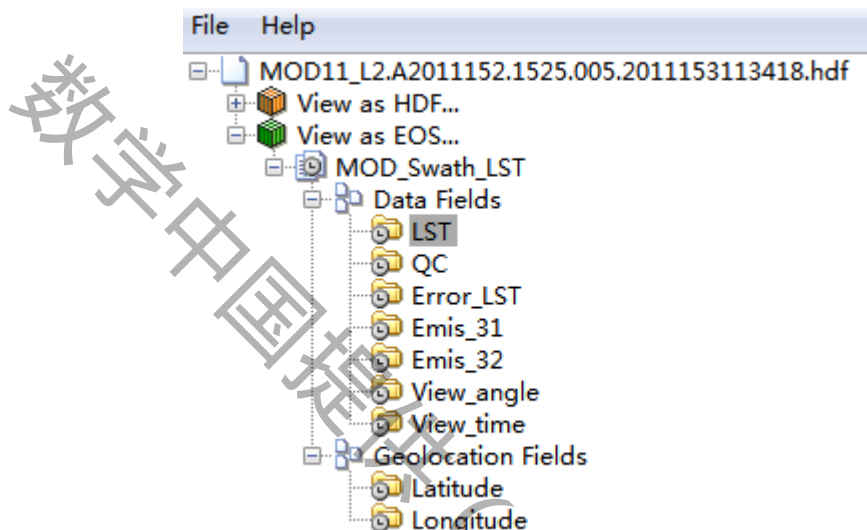


图 7.2 MOD11\_L2 数据列表

列表中的“Data Fields-LST”(Land Surface Temperature)即是用以验证“白屋顶计划”效果所需数据页,“Geolocation Field-Latitude & Longitude”是确定验证区域的经纬度数据页,分辨率 0.0055 度。

## 7.3 数据处理与结果分析

利用 MATLAB 读取上述文件的 LST\Latitude\Longitude 数据页,依据经纬度坐标选取 AB 中心点附近各 40 个数据点,绘制散点图并计算气温平均值,结果见下图:

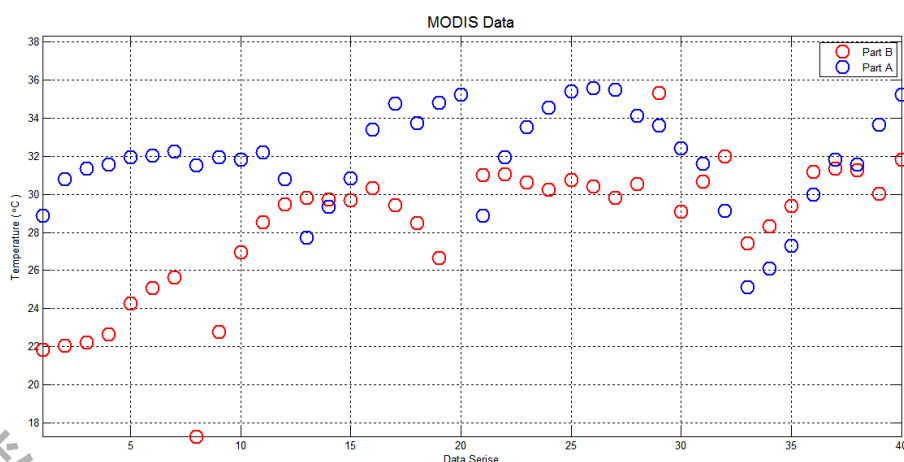


图 7.3 MODIS 数据分析结果 (1)

由图可见，除个别落入特殊下垫面的数据点外，A 地与 B 的下垫面温度较为接近，且代表“白色屋顶”的 B 地下垫面温度略低于 A 地。

为进一步分析 AB 两地数据的分布情况，本队以 B 地气温为横坐标，A 地气温为纵坐标，绘制散点图，用直线  $y=x+b$  对数据点进行拟合，结果如下：

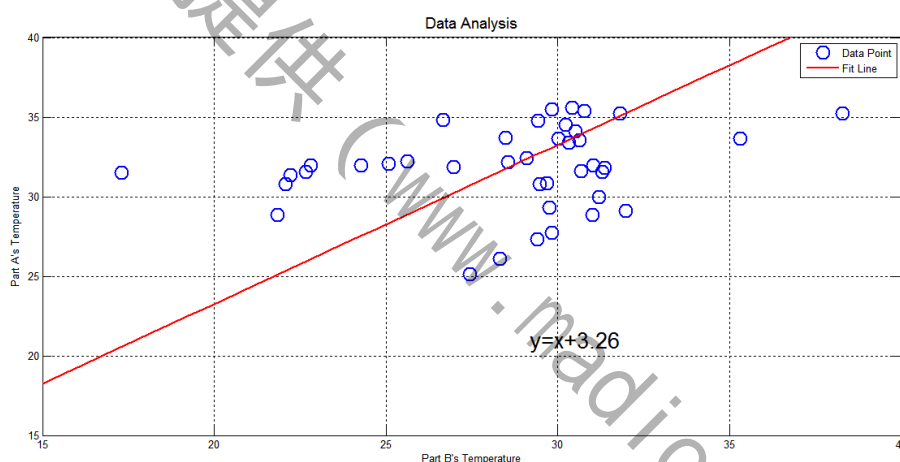


图 7.4 MODIS 数据分析结果 (2)

由图可知，在普遍情况下，A 地下垫面温度要比 B 地下垫面温度高出  $3.26^{\circ}\text{C}$ ，即代表传统城市下垫面的曼哈顿城区的下垫面温度略高于包含“白色屋顶”建筑群的伯根地区。

由先前对 AB 两地的背景叙述可知：

- (1) 两地经纬度极为接近，在观察时刻 15:25 所接受的短波辐射通量相当，所处的各气象要素也较为接近。
- (2) 两地周边的地理环境，二者皆处于高度现代化，人类活动频繁的纽约地区，毗邻大面积水体，植被规模相近。

因此在分析 AB 两地 MODIS 数据所发现的下垫面温度分布及温度的差异，有理由被认为是由下垫面性质的差异所造成的。因此，通过对已开展“白屋顶计划”的美国城市——纽约的 MODIS 数据研究的结果进一步证实了“白屋顶计划”带来的对城市热岛效应的改善。

## 八、热岛减缓效益及可推广性分析

### 8.1 热岛减缓效益分析概述

从能量平衡模型导出的白屋顶减温结果看来，在夏季大气层结果稳定的情况下，半小时减温最大值为  $14.11^{\circ}\text{C}$ ，日平均减温  $4.74^{\circ}\text{C}$ 。然而从单一的减温数据，无法客观、全面地衡量热岛减缓效益，因此本文在模型计算出“白屋顶日减温数据”的基础上，全面考虑由夏季气温降低带来的热岛减缓效益，逐项分析“白屋顶计划”的减缓作用。

### 8.2 热岛减缓效益小项分析

研究表明，城市热岛效应对建筑能耗增加有直接影响。随着城区温度上升，为维持人居环境的舒适性，室内制冷设备加速运转，大量废热的排出不仅加剧了城市热岛效应，也带来大量的能源消耗。同时，夏季城市热岛造成的高温，不仅降低人的舒适度，降低人的工作效率，还容易导致中暑和疾病事件概率增加。此外，夏季高温还会加重城市供水紧张，火灾多发，以及加剧光化学烟雾等灾害。但是，随着“白屋顶计划”的推广，通过对城市夏季高温效应的减缓，将对以上提到的现象起到不同程度的减缓作用。下面将逐项分析，由“白屋顶计划”降温带来的各项热岛效应的减缓作用。

#### 8.2.1 减缓能源消耗的定量分析

研究表明，夏季最高气温的降低会带来多方面的影响，其中包括了由室内外最高气温降低带来的能源消耗减少，集中体现在夏季建筑空调耗电量的下降；在热岛现象的影响下，冬季城区的环境温度高于郊区，从而降低城市冬季的采暖负荷，而夏季城区的环境温度高于郊区，大大增加了城市的空调负荷[2]。基于城市传热学的能量平衡原理能量公式，进行减缓城市能源消耗的定量估算，评价城市热岛减缓效益：

$$Q = C_m T \cdots \cdots (8.1)$$

其中： $c$  为某温度下空气的比热容， $C_m$  为单位空间内空气质量， $T$  为空气温度。表 8-1 给出不同温度  $T$  下的密度、比热容值：

表 8.1  $10^{\circ}\text{C}$ ， $20^{\circ}\text{C}$ ， $30^{\circ}\text{C}$ ， $40^{\circ}\text{C}$  空气温度下空气密度和比热容值

空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	空气比热容 ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
10	1.247	1.005
20	1.205	1.005
30	1.155	1.005
40	1.128	1.005

通过能量模型的求解，已得到所选黑屋顶地域的温度 $t_1$ ，白屋顶温度 $t_0$ 。

则气温改变值为： $\Delta t = (t_1 - t_0) \dots \dots (8.2)$

黑屋顶产生的热量值： $Q_1 = cm(t_1 - t_0) \dots \dots (8.3)$

白屋顶产生的热量值： $Q_0 = cmt_0 \dots \dots (8.4)$

消耗能量值差额 $\Delta Q = cmt_1 - cmt_0 = cm\Delta t \dots \dots (8.5)$

进而有能量改变率，即节能效率：

$$p = \frac{\Delta Q}{Q_1} \dots \dots (8.6)$$

表 8.2 节能效率评价指标

等级	1	2	3	4	5
节能效率 p (%)	80-100	60-80	40-60	20-40	0-20

根据计算所得 p 值，查找节能等级，为节能策略的制定提供数值依据。

若已知当地的电价单价以及减缓能源消耗的设施的已投入费用，就可得到的经济效益费用一节省值：

$$S = d \cdot \Delta Q \dots \dots (8.7)$$

经济效益为：

$$r = \frac{\Delta S}{S} \times 100\% \dots \dots (8.8)$$

## 8.2.2 温室气体减排量的定量分析

根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）2007 年发布的第四次评估报告，过去 100 年间，地表平均温度已升高 0.74℃，90%以上的可能性是来自于温室气体排放的贡献[1]。温室气体有很多，其中 CO2 对全球变暖的贡献最大，它也是城市热岛效应影响因子中的一项，且前面已算出贡献率为 4.76%。

一些发达国家为达到《京都议定书》规定，通过支付合同方，获得温室气体减排额，从而实现其减排的目标，即碳交易。已知现行的碳交易价格水平，1 吨的二氧化碳价值 25 美元，当已知下垫面屋顶的平均面积 S 时，通过温度与 CO2 间的换算关系，每下降 1℃ 对应 x 吨 CO2 的排放，就可求出

“白屋顶计划”所带来的经济效益：

$$\tau = 25x \cdot S \dots \dots (8.9)$$

## 8.2.3 个人舒适度及工作效率提高定性分析

学者对南京市不同小气候环境夏季 7~9 月的人体舒适度作对比分析，发现城市热岛对人体舒适度有负面影响，市中心繁华区、郊区空旷地白天人体舒适度始终低于森林绿地。近年来，为了研究人体与大气环境之间的热交换，大量的人体舒适参数被提出，均反映了人体对空气温度、湿度等要素的感受。本文采用运用较为广泛的经验公式 (8.10)，计算分析了由“白屋顶计划”降温带来的人体舒适度增加效应。



$$I_{HC} = T - 0.55(1 - H_R) * (T - 58) \cdots \cdots (8.10)$$

其中,  $I_{HC}$  为人体舒适度指数,  $T$  为气温,  $H_R$  为相对湿度量。

### 8.3 人体舒适度指数( $I_{HC}$ ) 与人体舒适度( $H_C$ ) 对照

人体舒适度指数范围 Scope of $I_{HC}$	等级 Grade	人体舒适度 Human comfort $H_C$
86 ~ 88	+4 级	人体感觉极热, 极不舒服, 采取放暑降温措施
80 ~ 85	+3 级	人体感觉很热, 很不舒服, 需注意防暑降温
76 ~ 79	+2 级	人体感觉偏热, 不舒适, 需适当降温
71 ~ 75	+1 级	人体感觉偏暖, 较为舒适
59 ~ 70	0 级	人体最舒适, 最可接受
51 ~ 58	-1 级	人体感觉偏凉, 较为舒适
39 ~ 50	-2 级	人体感觉偏冷, 不舒适, 需注意保暖
26 ~ 38	-3 级	人体感觉很冷, 很不舒适, 需注意保暖防寒
<<25	-4 级	人体感觉寒冷, 极不舒服, 需注意保暖防寒, 防止冻伤

从能量平衡模型导出的白屋顶减温结果看来, 在夏季大气层结稳定的情况下, 半小时减温最大值为  $14.11^{\circ}\text{C}$ , 日平均减温  $4.74^{\circ}\text{C}$ 。将前文中能量平衡模型输出的 24 小时气温数值序列, 代入到人体舒适度指数经验公式中求解, 有结果如图 (8.1), 其中“白屋顶计划”降温效应将人体日平均舒适度提高了 6.85 个百分点, 在提高夏季居民的舒适度上有显著效果。

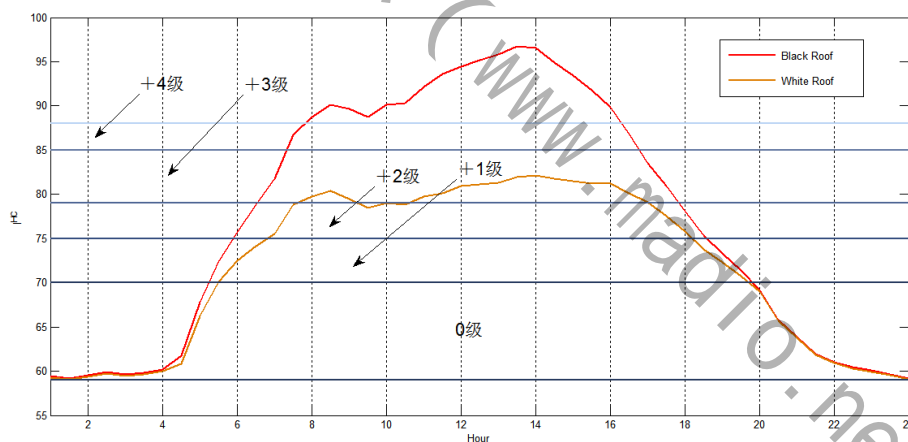


图 8.1 “白屋顶计划”降温效益对应的人体舒适度增益效应示意图

据医学研究表明, 在温度高、气压低的湿热天气里, 人的情绪会有强烈波动, 心理也会受到刺激, 导致出汗、心跳加快、植物神经功能亢进, 高级神经活动的某些机能的协调和反应速度降低, 工作效率随之降低。

表 8.4 工作效率和温度的关系

气温 $^{\circ}\text{C}$	20	25	35	42	52
最高效率%	90	99.24	74.19	46.48	15

根据美国伊利诺斯大学调查显示, 当气温在  $20^{\circ}\text{C}$  时劳动效率最高, 当气温升至  $35^{\circ}\text{C}$  时劳动效率只有最高效率的 75%, 当气温高达  $41^{\circ}\text{C}$  时, 就只有最高效率的 50%。据统计,

如以气温 15℃时的工作效率为 100%，则 25℃时为 92.5%，35℃时为 84.3%。同时，工作效率的降低也将直接导致经济效益的降低。

图 8.2 为劳动效率与劳工所处环境温度的关系，对于使用白色屋顶的建筑，由第六节能量平衡模型的计算，其工作环境温度处于黄色区域内，此时的平均工作效率为 76.06%；而使用黑色屋顶的建筑，劳工的平均工作效率仅为 37.21%。



图 8.2 “白屋顶计划”降温效益对应的工作效率提高效应示意图

#### 8.2.4 减少灾害频率及公众健康威胁的定性分析

城市热岛效应是另一种灾害，它使得高温灾害出现的频率大大增加，加重热浪带来的危害。同时，高温易诱发多种疾病，如中暑、心脑血管疾病、呼吸系统疾病等，使人的舒适度大大减少，高温导致的死亡现象也屡见不鲜，对公众健康构成了严重威胁。

对于灾害因子  $Z$  的评价评价计算，可以引入灾害因子的评价指标——热场变异指数  $HI(T)$ ，其评价因子如表 8-1 所示：

表 8-5 灾害评价因子

等级	1	2	3	4	5
热场变异指数	$\leq 0$	0.000–0.005	0.005–0.015	0.015–0.020	$\geq 0.020$
灾害频率 $Z$	5	4	3	2	1

$HI(T)$  值越高，说明地表温度高出高温临界点越远，灾害发生的频率越高。所以，若通过比较热岛效应形成前后  $HI(T)$  的变化，可评价不同城市的灾害频率。

有统计结果显示，在热岛中心长期居住的居民以消化系统疾病多见，胃肠道疾病的复发周期短，复发率高。热岛中心地区居民神经系统方面的损害也较严重，神经系统患病率达 30%。热岛中心居民的失眠率高于非热岛居民的 2.5 倍。有学者通过居民死亡率与气温的回归分析发现，酷热期间死亡率比正常年份的同期要高出 55%—1%。城市热岛效应主要通过气温、气压、湿度、大气污染等方面影响公众的健康。人体的体温恒定在 37℃左右，而对人体健康最理想的温度为 18℃–20℃。人体通过蒸发来散发热量，保持肌体体温与外界气温平衡，当温度在 35℃以上时，人往往会出现肌肉痉挛、中暑、脱水等现象。低气压是心血管病死亡增加的诱因。湿热的天气易使人患关节痛、偏头痛、

胃溃疡、脑血栓、皮疹等。若城市中风速小，高温天气不利于人体散热，不利于空气污染物的净化。

所以，可选用高温天气下研究区范围内的死亡率  $D$  来衡量公众的健康水平，其评价因子如下表 8-2 所示：

表 8-6 健康水平评价因子

等级	1	2	3	4	5
死亡率 $D$ (%)	$\leq 30$	30-50	50-80	80-100	$\geq 100$
健康水平指标	5	4	3	2	1

死亡率  $D$  越高，健康水平则越低。通过比较热岛效应形成前后  $D$  的变化，可对公众的健康做出定性的评价。

### 8.3 “白屋顶计划”可推广性分析

在 21 世纪全球温室效应受到人们广泛关注的今天，“白屋顶计划”这样一个简单的环保举措，通过改变建筑屋顶热物理属性，增大太阳辐射反照率，能有效减缓城市热岛增温效应、减缓增温带来的能源消耗、减缓主要由  $\text{CO}_2$  组成的温室气体的排放、减缓高温带来的人体舒适度和工作效率的下降、减缓夏季高温引发的灾害和公众健康威胁效应，理应在全球范围内得到大力推广。

从热岛效应成因机理分析和“白屋顶计划”物理原理分析发现，该计划从根本上存在一些特点，这些特点决定了具有一定气候特征的地域不适合推广“白屋顶计划”，这就是为什么该计划推出受到大众热力追捧的同时，也遭到了一部分科学家的质疑。下面本文将这些特点整理归纳，总结为以下几个影响白屋顶计划推广的指标，并一一做出分析。

### 8.4 “白屋顶计划”推广影响指标分析

图 8.3 影响“白屋顶计划”推广的指标分析





从“白屋顶计划”的物理原理和热岛效应的成因机理分析得知，对白屋顶减缓热岛效应所有贡献因子加权排序，发现不同地区不同气候环境、不同的城市情况、不同的气候条件，对白屋顶的热岛减缓效应影响最大。若想通过改变屋顶的热物理属性，在建筑屋顶采用高反照率的涂料，增大建筑屋顶对太阳辐射的反照率，从而减少辐射热量的吸收，减缓城市热岛的夏季高温效应，并取得由降温带来的室内空调等消温能耗下降、CO<sub>2</sub>等温室气体排放减少等环境友好效应，必须先权衡该地区各影响因子。

在此过程中，太阳辐射占据着至关重要的地位，在考虑推广问题时，太阳辐射应该从重点注意三方面：1、由于地球的自转公转造成的，全球不同纬度的区域的太阳辐射吸收量大相径庭，例如，夏至日时，北京地区的单位面积 24 小时接受的太阳有效辐射总量将远远小于新德里；2、同一纬度，由不同地形导致的太阳辐射吸收也可能存在很大差异，例如重庆和成都就是两个比较典型的例子；3、不同地区孕育了不同人文文化、民族风情和建筑风格，其中不同风格的建筑屋顶对太阳辐射的垂直接受面积不同，产生的辐射积累效应必然不同，由此项人文因素带来的变化也不容小觑。

同时，城市化进程程度对热岛效应的影响也不容小觑的，因此在考虑推广问题时，各城市自身的情况，也应重点纳入考虑的范畴。其中人为排放热来源于人类生产、生活及生物新陈代谢所产生的热量，城市中人为热主要包括工业生产废热、生活废热、汽车排放热和空调排放热等。概括后集中体现为，每个城市的人口，城市汽车和工业的温室气体排放量，房屋的覆盖面积等具体参数。

最为重要的是，城市热岛高温须在一定天气形势下才能形成，并且得到发展。因此在考虑推广问题时，城市气候态对推行白屋顶计划热岛减缓效益保障有着重要作用。据城市气候学研究结果表明，城市热岛对云量、风速和空气湿度的敏感度最高。晴天、少云、温度层结稳定这样的天气形势，简称为“晴稳天气”，容易为城市热岛现象产生提供有利的气象条件。而大风、频繁降水以及相对湿度大的局地气象条件，不利于城市热岛效应的发展。综上，城市热岛效应的发展依赖于一定的天气形势，同理，气象要素的变化也会对白屋顶减缓效益产生巨大影响，不容轻视。

## 8.5 小结

本章首先讨论了“白屋顶计划”推行后，由夏季气温降低带来的热岛减缓效益，并逐项分析“白屋顶计划”在环保、节能、个人舒适度和工作效率、灾害频率和公众卫生等方面的作用。紧接着讨论了“白屋顶计划”的可推广性，通过辐射、气候、城市化等多方面影响因子的粗略分析讨论，判断“白屋顶计划”是否契合当地的各方面情况，这样才有利于决策者对白屋顶计划本地推广的判断，完善缓减策略，实现良好的舒适健康的生产生活环境，也能避免出现盲目推行带来的不必要的经济负担。

## 九、总结

### 9.1 对模型的总结

在屋顶增温效应评估模型方面，通过合理假设与适当简化，建立层次分析模型，求解得到影响城市热岛效应因子的排序向量，直观的反映方案层元素对目标层的影响权重。通过分析发现，城市热岛效应受到的影响来自多方面，且各影响因素的权重并不相同。可以明显看到，工业排放、辐射吸收、汽车尾气对热岛效应的影响尤为显著。评估“白屋顶”计划，也正是基于辐射吸收量的讨论开展下去的，辐射吸收权重较大，故评估具有重要的现实意义。

在能量平衡模型方面，对模型的输出结果一下垫面温度的比较而言，将“黑色屋顶”更换为“白色屋顶”能够缓解城市热岛效应产生的局地高温，即“白屋顶计划”在局地是完全可行的。但同时需要注意的是，能量平衡模型建立时所依据的三条最关键的假设（大气层结稳定、下垫面均一稳定、下垫面温度无平流变化）的存在，使其只能模拟较小时间尺度下的下垫面温度变化。因此，能量平衡模型及其计算结果能够在时空小尺度条件下为“白屋顶计划”提供支撑，对于大尺度问题，则还需重点考虑大尺度下气象要素的周期性变化、下垫面温度的平流变化以及各类不同性质下垫面的特殊性质等方面。

### 9.2 白屋顶计划可能存在的弊端

#### 9.2.1 光污染

根据表 6.1 所提供的数据，白色屋顶具有很高的反射率，这一方面使得白色屋顶能够极大地减小白色屋顶对太阳辐射的吸收，另一方面，被白色屋顶反射的能量能够在城市产生额外的生态灾害。其中，光污染便是较为重要的一项，在白天，白色屋顶的高反射率，使得更多的太阳辐射滞留在城市外环境中（而不是被建筑物吸收），对人和动物的眼睛、皮肤造成伤害；在夜间，白色屋顶的反射作用使得城市灯光得以传播到更远的地方，影响生物的正常活动。

#### 9.2.2 高昂的保养费用

“白色屋顶计划”的关键在于屋顶的反射率，而反射率的大小与屋顶的清洁程度直接相关，一个并不清洁的白色屋顶难以为减缓城市热岛效应作出贡献，随着时间的流逝，“白屋顶计划”的效果很可能逐渐消退。保证白色屋顶的清洁需要高昂的成本。因此，如果没有持续的投入，“白屋顶计划”难以真正发挥效果。

## 十、参考文献

- [1] 戈登·B.伯南, 生态气候学, 北京: 气象出版社, 2009. 6. p344~348
- [2] 孙宏才 等著, 网络层次分析法与决策科学, 北京: 国防工业出版社, 2011. 1. p. 9~50
- [3] 林振山 著, 气候建模·诊断和预测的研究, 北京: 气象出版社, 1996. 10. p. 78~80
- [4] 周淑贞 束炯 著, 城市气候学, 北京: 气象出版社, 1994. p. 158~174
- [5] K.N.Liou 著, 郭彩丽 周诗健 译, 周秀骥 张文健 校, 大气辐射导论(第2版). 北京: 气象出版社, 2004. 10. p. 87~89
- [6] G.W. 帕尔特里奇 著, 吕达仁 等译, 气象学和气候学中的辐射过程, 北京: 科学出版社. 1981. p. 83~91
- (超星电子书: [http://book.chaoxing.com/ebook/read\\_10093367.html](http://book.chaoxing.com/ebook/read_10093367.html))
- [7] 潘守文 等编著, 现代气候学原理, 北京: 气象出版社, 1994. 4. p. 964~1010
- [8] 任军芳 等, 标量粗糙度对地气交换的影响, 大气科学, 23(3), p. 349~358, 1999
- [9] 盛裴轩 毛节泰 等编著, 大气物理学, 北京: 北京大学出版社, 2006. 12. p. 102~105 132~134
- [10] 周强 申双和, 南京地区城市热岛效应研究, 南京信息工程大学硕士学位论文
- [11] 中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>)
- [12] NASA-MODIS laads  
(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)
- [13] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Secretariat, 2007.

## 十一、附录

%% MATLAB源程序

%% Scrip for Model 1

% By: Fengting Yang NUIST

% April 14th 2012

% MATLAB release: MATLAB 7.6.0 (R2007a)

clear;

A=[1,7,9,3,5 ; 1/7,1,3,1/7,1/4 ; 1/9,1/3,1,1/7,1/5 ; 1/3,6,7,1,4 ;  
1/5,4,5,1/4,1];

[n,n]=size(A);

x=ones(n,10);

y=ones(n,10);

m=zeros(1,10);

m(1)=max(x(:,1));

y(:,1)=x(:,1);

x(:,2)=A\*y(:,1);

m(2)=max(x(:,2));

```
y(:,2)=x(:,2)/m(2);
p=0.0001;
i=2;
k=abs(m(2)-m(1));
while k>p i=i+1;
    x(:,i)=A*y(:,i-1);
    m(i)=max(x(:,i));
    y(:,i)=x(:,i)/m(i);
    k=abs(m(i)-m(i-1));
end
a=sum(y(:,i));
w=y(:,i)/a;
t=m(i);
CI=(t-5)/(5-1)
RI=[0 0 0.52 0.89 1.12 1.26 1.36 1.41 1.46 1.49 1.52 1.54 1.56 1.58 1.59];
CR=CI/RI(5)%% Scrip for Model 2
% By: Yingkai Sha NUIST
% April 14th 2012
% MATLAB release: MATLAB 7.11.0 (R2010b)
clear
ft=importdata('ft58238.dat');
hour=0.5:0.5:24;
u=ft(17857:17904, 45);
t=ft(17857:17904, 75);
t2=ft(17857:17904,84);
t3=ft(17857:17904,93);
t4=ft(17857:17904,102);
t5=ft(17857:17904,111);
R0=ft(17857:17904,3);
Uv=ft(17857:17904, 80);
a=0.5;
b=0.06;
rou=1.293;
cp=1.005e3;
sigma=5.67e-8;
lamda=1.7;
adw=0.8;
adb=0.1;
rew=0.85;
reb=0.92;
Z=3;
z0=1.3;
Re=1.2;
Ri=1.1;
```

```

k=0.4;
Uv=Uv/100;
es=6.107*(10.^((a*t)/(b+t)));
e=es.*Uv;
q=(0.622*e)/(1013.25+0.378*e);
pa=lamda*((t5-t4)+(t4-t3)+(t3-t2)+(t2-t))/4;
EA=pa/(Z-z0);
z0t=z0./exp((2.48*(Re^0.25)-2));
z0q=z0./exp((2.28*(Re^0.25)-2));
CD=(Z/z0)*((k^2)/(log(Z/z0)))/(1+10*Ri*(1+8*Ri));
CH=CD;
KT=(CH.*u)/(1+0.4*sqrt(CD)*log(z0/z0t));
Kq=(CH.*u)/(1+0.4*sqrt(CD)*log(z0/z0q));
E=rou*cp*KT+rou*cp*Kq;
Rs=R0*(1-adw);
Rs2=R0*(1-adb);
Rl=E-EA-Rs;
T4=Rl/((1-a-b*sqrt(e))*rew*sigma);
T=T4.^0.25;
Rl2=E-EA-Rs2;
T42=Rl2/((1-a-b*sqrt(e))*reb*sigma);
T2=T42.^0.25;
diff=T2-T;
figure('Color','w')
hold on
Handle1=plot(hour, T);
Handle2=plot(hour, T2);
set(Handle1, 'LineWidth', 2.5, 'Color', 'b')
set(Handle2, 'LineWidth', 2.5, 'Color', 'r')
hold off
box on
grid on
axis([1 24 285 325])
xlabel('Hour')
ylabel('Surface Temperature( K )')
legend([Handle1 Handle2], 'White Roof', 'Black Roof')
title('\fontsize{14}Surface Temperature Distribution')
figure('Color','w')
hold on
stem(halfhour, diff, 'Color', 'b', 'LineWidth', 2.5)
sumt=sum(diff);
avg=sumt/48;
line([1 48], [avg avg], 'LineWidth', 3, 'Color', 'r'))
grid on

```

```
box on
axis([1 24 0 30])
hold off
title('\fontsize{14}Analysis')
legend('Temperature Diff', 'Average')
xlabel('Hour')
ylabel('Temperature ( K )')
data=flux(17857:17904,6:7);
figure('Color', 'w')
hold on
plot(hour, data(:,1), 'Linewi', 3, 'Color', [1 0.2 0.1])
plot(hour, data(:,2), 'Linewi', 3, 'Color', [1 0.4 0.2])
hold off
axis([1 24 -100 350])
title('\fontsize{12}Energy Flux Record | Jun 7^t^h 2008')
xlabel('Hour')
ylabel('Energy ( J )')
legend('Latent Heat', 'Sensible Heat')
grid on
box on
data=ft(17857:17904,3:4:7);
figure('Color', 'w')
hold on
plot(hour, data(:,1), 'LineWi', 3, 'color', [0.5 0.3 0.5])
plot(hour, data(:,2), 'LineWi', 3, 'color', [0.3 0.1 0.5])
hold off
title('\fontsize{12}Shortwave Radiation Record | Jun 7^t^h 2008')
xlabel('Hour')
ylabel('Radiant Flux Density ( W/m^2 )')
legend('Sm', 'Rm')
grid on
box on
axis([1 24 -25 1300])
data=ft(17857:17904, 11:4:15);
figure('Color', 'w')
hold on
plot(hour, data(:,1), 'linewi', 3, 'color', [1 0.2 0.2])
plot(hour, data(:,2), 'linewi', 3, 'color', [1 0.4 0.4])
hold off
title('\fontsize{12}Longwave Radiation Record | Jun 7^t^h 2008')
xlabel('Hour')
ylabel('Radiant Flux Density ( W/m^2 )')
legend('Gm', 'Em')
grid on
```

```
box on
axis([1 24 125 1300])
clear
%% Scrip for MODIS
% By: Yingkai Sha NUIST
% April 14th 2012
% MATLAB release: MATLAB 7.11.0 (R2010b)
lst=hdfread('MOD11_L2.A2011152.1525.005.2011153113418.hdf',...
'MOD_Swath_LST', 'Fields', 'LST');
lat=hdfread('MOD11_L2.A2011152.1525.005.2011153113418.hdf',...
'MOD_Swath_LST', 'Fields', 'Latitude');
lon=hdfread('MOD11_L2.A2011152.1525.005.2011153113418.hdf',...
'MOD_Swath_LST', 'Fields', 'Longitude');
lst=double(lst);
for i=1:2040
    for j=1:1354
        if(lst(j, i)==0)
            lst(j, i)=NaN;
        end
    end
end
m=1;
n=1;
d=0.0055;
for i=1:408
    for j=1:271
        if(lat(i, j)>40.7542-d*10 && lon(i, j)>73.9778-d*10 && lat(i,
j)<40.7542+d*10 && lon(i, j)<73.9778+d*10)
            t1(m)=lst(i, j);
            m=m+1;
        end
        if(lat(i, j)>40.6433-d*10 && lon(i, j)>73.7819-d*10 && lat(i,
j)<40.6433+d*10 && lon(i, j)<73.7819+d*10)
            t2(n)=lst(i, j);
            n=n+1;
        end
    end
end
figure('Color', 'w')
hold on
plot(dataserise, t1, 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 10,...
'LineStyle', 'none', 'Color', 'r', 'LineWi', 2);
plot(dataserise, t2, 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 10,...
'LineStyle', 'none', 'Color', 'b', 'LineWi', 2);
```

```

hold off
axis tight
legend('Part B', 'Part A', 'Average B', 'Average A')
title('\fontsize{14}MODIS Data')
ylabel('Temperature ( \circ C )')
xlabel('Data Serise')
grid on
box on
syms t

f=fittype('t+b', 'independent', 't', 'coefficients', {'b'});
fun=fit(t1,t2,f);
x=linspace(270, 350, 100);
y=fun(x);
figure('Color', 'w')
hold on
plot(t1, t2, 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 12,...
'LineStyle', 'none', 'Color', 'r', 'LineWi', 2);
plot(x, y, 'LineWi', 2, 'Color', 'r')
axis([280 330 280 330])
xlabel('Part B's Temperature')
ylabel('Part A's Temperature')
legend('Data Point', 'Fit Line')
title('\fontsize{14}Data Analysis')

%% Sample Distribution of Global Surface Temperature
% By: Yingkai Sha NUIST
% MATLAB release: MATLAB 7.11.0 (R2010b)
% Toolbox required: Map Toolbox & netCDF Toolbox
% Make sure NOAA.nc is in the right path
% PAT: This part required netCDF Toolbox
nc_getall('NOAA.nc')
y=nc_varget('NOAA.nc', 'lat');
x=nc_varget('NOAA.nc', 'lon');
srb=nc_varget('NOAA.nc', 'sst');
srb_sum=sum(srb);
srb_ori=permute(srb_sum, [3 2 1]);
srb_ori=srb_ori.*(281^-1);
load coast
figure('Color', 'w')
axesm('MapProjection', 'Mollweid', 'MapLatLimit', [-89.5 89.5], 'MapLonLimit',
[0.5 359.5])
framem on
hold on

```



```
[latitude longitude]=meshgrid(y, x);
surfm(latitude, longitude, srb_ori)
linem(lat, long, 'Color', 'k')
contourm(latitude, longitude, srb_ori, 7, 'k', 'linestyle', ':')
hold off
axis off
colormap(HSV)
title('\fontsize{14}A Sample Distribution of SRB')
%% Others
% By: yingkai sha
ft=importdata('ft58238.dat');
hum=ft(17857:17904, 80);
hum=hum/100;
t=T-273.15;
t2=T2-273.15;
t=(9/5)*t+32;
t2=(9/5)*t2+32;
I2=t2-0.55.*(abs(hum-1)).*(t2-58);
I1=t-0.55.*(abs(hum-1)).*(t-58);
t=T-273.15;
t2=T2-273.15;
t=(9/5)*t+32;
t2=(9/5)*t2+32;
I2=t2-0.55.*(abs(hum-1)).*(t2-58);
I1=t-0.55.*(abs(hum-1)).*(t-58);
figure
plot(hours, I1);
line([1 24], [59 59]);
line([1 24], [70 70]);
line([1 24], [75 75]);
line([1 24], [79 79]);
line([1 24], [85 85]);
line([1 24], [88 88]);
legend('Black Roof', 'White Roof')
ylabel('I^H^C')
xlabel('Hour')
figure
hold on
plot(x, y0);
H1=plot(x(39:54), y0(39:54))
H2=plot(x(59:97), y0(59:97))
legend('White Roof', 'Black Roof')
legend([H1 H2], 'White Roof', 'Black Roof')
grid on
```

```
box on
axis tight
title('\fontsize{14}Labor Efficiency')
xlabel('Temperature( \circC )')
ylabel('Efficiency')
HI1=(T-35)./35;
HI2=(T2-35)./35;
figure
hold on
hours=0.5:0.5:24;
plot(hours, HI1)
plot(hours, HI2)
line([1 24], [0])
line([1 24], [0 0])
line([1 24], [0.02 0.02])
axis tight
title('\fontsize{14}Analysis')
xlabel('Hour')
ylabel('HI')
box on
```