

# 屋顶绿化对室内人体热舒适的影响研究\*

高旭东, 靳松, 渠亚东

(河北工程大学 水电学院, 邯郸 056038)

**摘要:**进行了夏季屋顶绿化对室内热环境影响的实验研究,结果表明:室内空气和维护结构内表面温度均有不同程度的降低,这是有利的;然而房间的相对湿度升高了,这是不利的;综合效果是人感到热改善为基本能接受;当热环境要求高时,仅靠屋顶绿化一个手段还达不到令人满意的效果,还必须采用其它手段比如夜间开窗通风,利用电风扇使室内产生一定的风速以及空调等的综合作用。

**关键词:**屋顶绿化;人体热舒适;PMV;夜间通风;风扇

**中图分类号:**TU11 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2007)05-0044-05

## Research on the Impact of Green Roof on Indoor Human Thermal Comfort

GAO Xu-dong, JIN Song, QU Ya-dong

(Hebei Engineering University, Handan 056038, P. R. China)

**Abstract:** An experiment is conducted on the impact of green roof on Indoor Human Thermal Comfort. The result shows that the temperatures of the building walls and indoor air fall for certain degrees, and that is good. But unfortunately, the relative humidity of the indoor air rises. Totally speaking, the whole effect is changed from feeling warm to basically acceptable. When the requirement of the indoor environment is high, it is impossible to be satisfied by exploiting green roof solely, other methods, such as using night ventilation, electric fans or air-conditioners, should be taken at the same time.

**Keywords:** green roofs; human thermal comfort; PMV; night ventilation; fans

良好的室内热舒适度,是暖通空调工作者始终追求不懈的目标。然而,一个不可避免的问题是,与室内热环境改善相伴的往往是能源的大量消耗和城市热环境的恶化。

如何能既改善室内环境,还节约能源,同时还不对

室外环境造成热污染呢?现在看来,建筑绿化不失是一个好办法。绿色植物是我们人类生存的“保护神”,但由于种种原因,目前我国城市的人均绿化面积远远低于联合国对城市规划要求的人均  $30\text{m}^2 \sim 40\text{m}^2$ ,表 1<sup>[1]</sup>是国内外一些城市的人均绿地面积比较。

表 1 国内外部分城市人均绿地面积/ $\text{m}^2$

城市	北京	上海	重庆	深圳	华沙	莫斯科	巴黎	伦敦
绿地面积	1.39	0.66	1.33	16.82	77.70	44.00	24.70	22.80

从表 1 可以清楚看出我国人居与城市生态形势严重,与国外以及联合国要求的人均绿化面积差距甚大,急需迎头赶上。然而,在城镇建设与发展中,若想少

占、不占、甚至还增加绿地,难度是相当大的。一方面市区人口在增加,需要占用更多的建筑、道路用地;另一方面为了满足人们的基本生活需要,城市绿地还要

\* 收稿日期:2007-02-25

基金项目:邯郸市科学技术研究与发展计划项目资助(04029-1)

作者简介:高旭东,(1970-),男,河北邯郸人,讲师,硕士,主要从事建筑节能与热环境研究。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

留足,更重要的是还要给子孙后代留有足够的土地,特别是耕地,实现可持续发展,这是一对矛盾。因此,结合建设开辟屋顶绿地,从建筑占地中夺回绿化用地,恢复自然生态平衡,是改造城市生态环境的根本出路。

分析夏季室内热量主要来源的实验表明,平屋顶的室外综合温度最大,其次是西墙。因此,在炎热的夏季隔热降温的重点应是屋顶。

屋顶采用绿化措施进行隔热降温冷却的方法,不仅能有效减弱太阳辐射对屋面的作用,改善室内热环境,减少空调能耗;而且使建筑屋面变成了绿化面积,对健全城市生态环境起着重要作用。因此,屋顶绿化引起了各国学者的关注,并进行了一些研究工作<sup>[2]</sup>。

然而,就目前检索到的文献看,以前的研究大多集中屋顶绿化对室外环境的改善上;对由于采用了屋顶绿化,带来的人体热舒适度的提高,文献涉及的相对较少,且多为定性研究,因此有必要对它做进一步的定量研究。

## 1 本文采用的热舒适的量度指标

在美国供暖制冷空调工程师学会的标准(ASHRAE Standard 55—1992)中,热舒适有明确定义,即热舒适是对热环境表示满意的意识状态。从定义上看,热舒适属于人的主观感受,无法用仪器等客观手段测量,目前最好的方法是采用调查的方式让人自己来描述自己的感受。

为了统计的方便,同时更为了这些人、不同环境之间主观描述能够有很好的可比性,产生了大量热舒适指标研究成果,一般认为能够正确反映的热舒适指标必须满足以下两个条件:①必须成功地综合考虑了所有影响人体热舒适的建筑物理学和人体生理学因素对热舒适感的影响;②必须是在人体热舒适研究领域中被证明是基本正确与合理的。

基于以上考虑,本文选择了平均预测投票(PMV)作为热舒适的量度指标。这个指标不仅综合了所有与人体热舒适有关的物理生理因素同人体热舒适的关系,并且在热环境研究领域中得到了实践的检验,是目前使用最广泛的指标之一。

当然,PMV指标也有其自身的局限性。由于PMV是在建立在欧美的人种特点基础之上的,比较公认一致的说法是PMV要适用于其他人种群必须要经过修正;另外在高湿度、高风速下,PMV不能很好地预测人体舒适感;除此以外,这个指标往往是用来描述人体的静态热舒适,而真实环境中人体的热舒适是具有动态特性

的。尽管如此,大量的研究仍然表明在典型室内气候条件下,PMV的预测结果与人体的感觉是基本一致的;当前作为热舒适的量度指标,PMV仍然是较好选择之一。

## 2 实测情况及数据分析

测试现场位于在建筑热工分区上属于寒冷地区的河北省邯郸市,绿化屋顶外观如图1所示。



图1 屋顶草坪全景

测定项目包括屋顶绿化房间和普通参比房间各围护结构内表面温度、室内外空气温度、相对湿度以及室外风速。两房间在测试过程中,窗户均采用了相同的内遮阳措施并且门窗始终关闭,可以认为室内空气流速接近于0。实测选在夏季后期连晴期间进行,每天24 h连续测定,每1 h记录一次数据。用1#代表屋顶绿化房间,2#代表普通参比房间,3#代表室外空气,测试结果如图2所示。

从图2a中可以看出,1#房间的空气温度全天始终小于2#房间,说明屋顶采用绿化措施后,有效地降低了房间的空气温度,改善了室内的热环境;1#房间的空气的相对湿度全天始终大于2#房间,这主要是由于屋顶采用绿化措施后,房间的空气温度降低了,而空气的绝对湿度变化不明显造成的。

从图2b~图2c中可以看出,房间屋顶绿化后,维护结构各内表面温度均有所降低,其中屋顶降低的最多,而且温度振幅也变小,分析原因是屋顶绿化的隔热降温作用直接作用在屋顶上,所以效果明显。降低其次多的是南墙,墙温降低原因是屋顶降温后向墙传导的热量有所减少,南墙因自身接受太阳辐射较多,温度较高,所以降温也较高。降温最低的是地板,原因是屋顶与地板不直接相连,故屋顶降温对地板影响较小。维护结构内表面温度的降低,可以改善室内气候条件,提高居住质量。

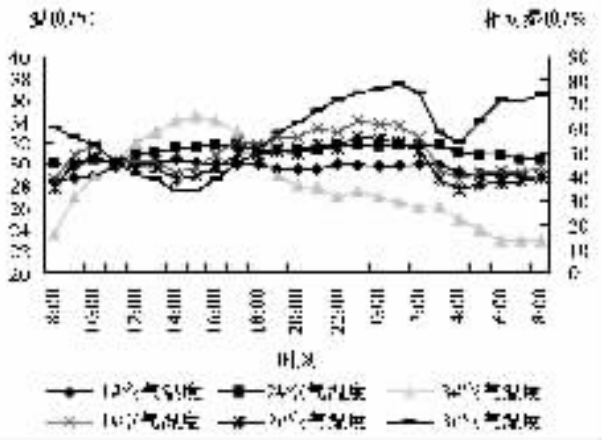


图 2a 空气温度和相对湿度的实测值

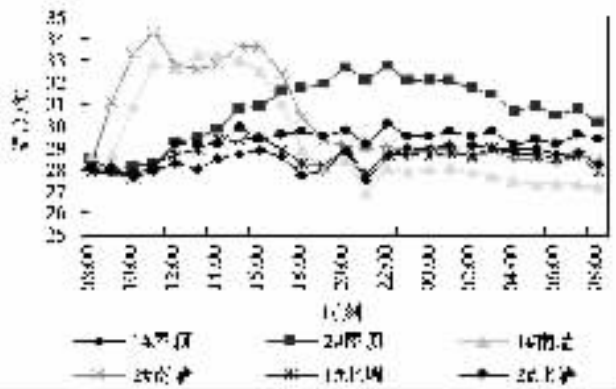


图 2b 屋顶、南墙、北墙内表面温度的实测值

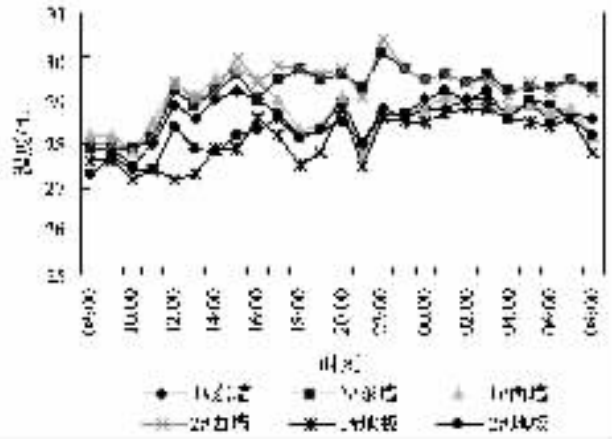


图 2c 东墙、西墙、地板内表面温度的实测值

### 3 PMV 指标的求解和对比分析

由前可知,屋顶绿化后室内空气和维护结构内表面温度均有不同程度的降低,这对室内热环境来说是有利的,然而室内的相对湿度提高了,这是一个不利的影[3]。有有利的,也有不利的,到底屋顶绿化对室内热湿环境影响程度如何?因此有必要从人体热舒适层面上对屋顶绿化的对室内热湿环境的影响做一个综合

评价。

#### 3.1 编制求解程序

根据国际标准 ISO 7730 ,室内人体热舒适的量度指标 PMV 是人体能量代谢率、人体所做的机械功、衣服热阻、空气中的水蒸汽分压力、空气温度、环境平均辐射温度、风速的函数,它们之间有如下数学关系式:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.0275) \{ M - W - 3.05 \times 10^{-3} [5.733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42(M - W - 58.2) - 1.73 \times 10^{-5} M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275(M - W) - I_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (2)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 I_{cl}, & \text{当 } I_{cl} \leq 0.078 \\ 1.05 + 0.645 I_{cl}, & \text{当 } I_{cl} > 0.078 \end{cases} \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_d - t_a)^{0.25}, & \text{当 } 2.38(t_d - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_a} \\ 12.1\sqrt{V_a}, & \text{当 } 2.38(t_d - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_a} \end{cases} \quad (4)$$

式中:PMV 为预期平均热感觉投票指标;M 为人体能量代谢率, W/m<sup>2</sup>;W 为人体所做的机械功, W/m<sup>2</sup>;P<sub>a</sub> 为周围空气中的水蒸汽分压力, Pa;t<sub>a</sub> 为空气温度, °C;f<sub>cl</sub> 为服装面积系数;t<sub>cl</sub> 为衣服表面平均温度, °C;t<sub>r</sub> 为平均辐射温度, °C;h<sub>c</sub> 为对流传热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);I<sub>cl</sub> 为衣服热阻, m<sup>2</sup>·K/W;V<sub>a</sub> 为空气流速, m/s。

通过 PMV 的表达式不难得出,PMV 指标与人体热舒适感的影响因素间存在着非常复杂的非线性关系。求解 PMV 的关键是对 t<sub>cl</sub> 的求解,公式(2)、(3)、(4)构成了求解 t<sub>cl</sub> 的一元非线性方程。可以看出,把 t<sub>cl</sub> 简化成由其它变量构成的显函数的形式几乎不可能,同时由于公式(4)的加入使这个一元非线性方程变得更加复杂;t<sub>cl</sub> 的求解依赖于 h<sub>c</sub>,而 h<sub>c</sub> 的求解又依赖于 t<sub>cl</sub>,在公式(2)、(3)之间形成了一个循环嵌套。这样的方程通过手算求解是不可能的。

由于人和人之间的生理差别,对于即使大多数人表示满意的热环境,还是有少数人并不满意,故用预测不满意百分数 PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied)指标来表示对热环境不满意的百分数,PPD 指标也已被编入国际标准 ISO 7730。依据国际标准 ISO 7730,PPD 和 PMV 之间的关系式为:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (5)$$

式中,所有符号含义同上。

笔者利用 Visual Basic 语言编写了求解  $t_{cl}$ 、PMV、PPD 程序,可执行的求解  $t_{cl}$ 、PMV、PPD 的值,程序的界面如图 3 所示。



图 3 PMV-PPD 及人体衣服表面温度求解程序界面

### 3.2 计算结果及对比分析

因本文做实验时门窗紧闭,室内风速接近于 0,故取风速  $V_a=0$ ;外部功  $W$ ,对于大多数情况来说该值为零,故这里取  $W=0$ ;考虑到大多数情况人在室内处于静坐休息状态,而人体处于静坐休息状态时新陈代谢率  $M$  为  $58.15 \text{ W/m}^2$ ,所以这里取  $M=58.15 \text{ W/m}^2=1 \text{ met}$ ;测试季节为夏季,人体的着装应与测试季节相一致,故取典型的炎热季节服装类型——短裤加 T 恤,衣着量  $I_{cl}=0.3 \text{ clo}$ 。

平均辐射温度  $t_r$ ,利用下面的计算式求得:

$$T_r = (T_{f1} S_{f1} + T_{f2} S_{f2} + \dots + T_{f6} S_{f6}) / (S_{f1} + S_{f2} + \dots + S_{f6}) \quad (6)$$

式中: $T_r$  为平均辐射温度,K; $T_{f1}$ 、 $T_{f2}$ 、 $\dots$ 、 $T_{f6}$  为房间内各壁面温度,K; $S_{f1}$ 、 $S_{f2}$ 、 $\dots$ 、 $S_{f6}$  为房间内各壁面面积, $\text{m}^2$ 。

将选定的变量值,实测的空气逐时温、湿度值,以及由实测的各壁面内表面温度通过计算得到的平均辐射温度值输入计算程序,得出屋顶绿化房间和普通房间的 PMV、PPD 随时间的变化,如图 4 所示。

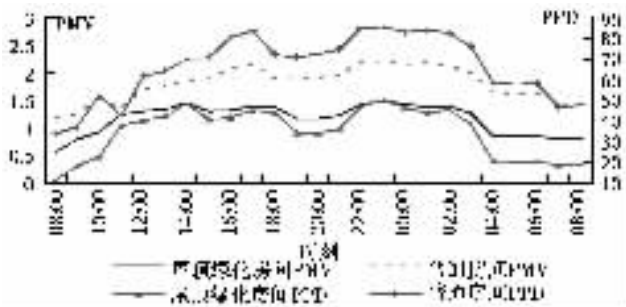


图 4 屋顶绿化房间和普通房间的 PMV-PPD 随时间的变化

从图 4 中可以看出,普通房间的 PMV 值始终比屋顶绿化房间的 PMV 值高,在 16:00~17:00 和 22:00~2:00 这两个时间段内,普通房间的 PMV 值大于 2,意味着人感到热;而屋顶绿化房间的 PMV 值全天在 0.5 到 1.5 之间,这对于在自然环境条件下是可以接受的热环境,如果能在室内产生一定的风速,基本上能达到人体热舒适性标准。PPD 值也是普通房间始终比屋顶绿化房间高,整理出一天的平均值,普通房间人们对热环境的不满意率是 66.1%,屋顶绿化房间人们对热环境的不满意率是 34.8%。可见,采用屋顶绿化有效地改善了室内热环境,使人从感到热改善为基本能接受,同时对热环境不满意人群亦大为减少。

但与此同时也应该注意到,当室内热环境要求相对比较高时,仅依靠屋顶绿化一个手段还达不到令人满意的效果,PPD 值还降不到 10 以下;要想达到较理想的效果,还必须考虑采用其它手段比如:在恰当的时机开窗通风,以及采用风扇、空调等。

## 4 屋顶绿化条件下合理利用夜间自然通风和电风扇等措施改善室内热舒适环境

### 4.1 合理利用夜间自然通风

自然通风是一种比较经济的改善室内热环境的方式,它不消耗动力,还能提高室内空气的新鲜度,因此在采取屋顶绿化措施后,仍应合理利用自然通风进一步改善室内热环境。

根据图 2a 所示的测试结果,一天之中在 20:00~5:00 这个夜间时间段内,室外大气的温度低于室内空气,并且该时间段内没有太阳辐射,因此应该在这段时间内采用开窗通风手段,将室外自然冷风送入室内,使其与室内空气、围护结构、家具等进行对流换热,进行预冷和蓄冷。

利用自然通风的一个重要的问题是自然通风量的计算问题。由于建筑物所处位置、气候条件及其内部空间的复杂性,要准确地计算自然通风量是一件十分复杂的工作,一般地,人们将自然通风的作用力分为热压作用与风压作用,目前关于自然通风量的有关理论及计算方法基本上是在伯努利方程和这两种作用基础之上的。国内外有许多学者在不同场合针对自然通风量的计算以及与如何达到最佳通风效果的有关问题展开了讨论。根据做实验房间的具体情况:实验房间仅在一面墙有窗户,可以根据通过建筑物单开口的自然通风量公式,计算房间通风量  $q^{[4]}$ ;  
<http://qks.cqu.edu.cn>

$$\begin{cases} q \approx \sqrt{q_s^2 + q_w^2} \\ q_s = 0.04 \times A \times \sqrt{(T_i - T_o)h} \\ q_w = 0.4 \sim 0.8 \times A \times V_H \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $A$  为开口面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$  为孔口垂直高度,  $\text{m}$ ;  $T_i$ 、 $T_o$  为室内和室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_s$  为热压单独作用下的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_w$  为风压单独作用下的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q$  为联合作用下的通风流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $V_H$  为建筑物高度上的平均风速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

利用窗户的尺寸, 实测的 20:00~5:00 时间段室内、外空气温度和室外风速平均值, 风压单独作用下的流量系数取 0.6, 可计算得出窗户通风平均流量; 再利用房间的体积可进一步计算出通风后房间空气在该时间段的平均温度, 平均辐射温度可近似认为等于房间空气的温度<sup>[5]</sup>。室内空气流速可根据窗户位置和窗墙面积比近似地计算出是室外气流速度的 8.5%<sup>[6]</sup>。

将所有数据输入计算程序, 开窗通风的情况下, 20:00~5:00 时间段内屋顶绿化房间 PMV 的平均值为 -0.6, 可见室内的人已经有了凉意的感觉。因此在屋顶绿化条件下, 结合夜间开窗通风, 可以在夜间使房间达到热舒适环境。

#### 4.2 电风扇的使用对白天室内热环境的影响

由前可知, 在夜间可以利用开窗通风来改善室内环境; 但在人们上班的 8:00~19:00 的白天时间段内, 室外空气温度高于室内空气温度, 而且还从窗户传入太阳辐射热, 是无法利用开窗通风来改善室内热环境的。在这个时间段内, 可以用电风扇等低能耗的强迫对流措施改善室内热环境。不过空气流速对热舒适性的影响是很复杂的, 不同的研究结论相差还比较大。但在众多的研究结果中, 非空调的房间里,  $1\text{m}/\text{s}$  以下的风速是可以接受的; 原因之一是  $1\text{m}/\text{s}$  以上的风速会使未压紧的薄纸从桌上吹跑而导致办公人员反感。在本文所做的实验中, 热舒适环境最差的时刻出现在 17:00 点, 若使用电风扇, 使屋顶绿化房间内存在  $0.8\text{m}/\text{s}$  的风速, 则 PMV 值降为 0.5, PPD 值降为 10, 能够满足人体热舒适性标准。因此在屋顶绿化条件下, 当白天无法使用开窗通风达到令人满意的室内热环境时, 利用电风扇使室内产生一定的风速, 可以在节能的基础上确保人体的舒适度。

## 5 结论

屋顶采用绿化措施进行隔热降温, 不仅能使建筑屋面变成了绿化面积, 健全城市的生态环境; 而且有效地改善了室内热环境。根据国际标准 ISO7730, 在邯郸地区盛夏后期, 当人穿着短裤和 T 恤在室内静坐休息时, 有以下结论:

1) 未经屋顶绿化的顶层房间内, 一天内存在两个较长的时间段, 房间内 PMV 值大于 2, 也就是人感到热; 而采用屋顶绿化措施后, 房间内 PMV 值降到全天在 0.5 到 1.5 之间, 这对于在自然环境条件下是可以接受的热环境条件。

2) 未经屋顶绿化的顶层房间内, 全天平均约有 66.1% 的人感到不舒适, 人体感觉偏热; 采用屋顶绿化措施后, 这一数字减少到 34.8%。

3) 当房间热环境要求相对比较高时, 仅依靠屋顶绿化一个手段还达不到令人满意的效果, 感到热不舒适的人数比例还降不到 10% 以下; 要想达到较高房间热环境满意程度, 还必须考虑采用其它手段比如夜间开窗通风, 利用电风扇使室内产生一定的风速以及空调等的综合作用。

## 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 1998[Z]. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [2] 白雪莲. 种植屋面能量传输和热环境的研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 2000.
- [3] 高旭东. 屋顶绿化对室内人体热舒适及室外热环境的影响研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2006.
- [4] 孙一坚. 工业通风[第 3 版][M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] ASHRAE handbook & product directory-1977 fundamentals[M]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. 1977.
- [6] B. GIVONI. Man, Climate and Architecture[M]. London. Second Edition. Applied Science Publishers Ltd. 1976.

(编辑 陈 蓉)