

靳宁, 景元书, 武永利. 2009. 南京市不同下垫面对人体舒适度的影响分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 445-450. Jin Ning, Jing Yuanshu, Wu Yongli. 2009. Analysis of the impacts of different kinds of underlying surfaces on human body comfort in the city of Nanjing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 445-450.

## 南京市不同下垫面对人体舒适度的影响分析

靳宁<sup>1,2</sup> 景元书<sup>2</sup> 武永利<sup>1</sup>

1 山西省气候中心, 太原 030002

2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

**摘要** 为了分析城市绿化改变对人体舒适度的影响, 于2006年4~5月期间对南京信息工程大学的林地、裸地和草地3种不同下垫面的主要气象要素进行对比观测, 以气温、相对湿度和风速资料作为评价环境对人体舒适度的影响因素。用数学模糊评判方法, 对不同下垫面的人体舒适度进行模糊综合评判, 结果表明: 4~5月草地的舒适度高于裸地和林地; 裸地的舒适度高于林地; 同草地和裸地相比, 林地气温较低, 舒适度最低。

**关键词** 下垫面 人体舒适度 气温 相对湿度 风速

**文章编号** 1006-9585 (2009) 04-0445-06 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

### Analysis of the Impacts of Different Kinds of Underlying Surfaces on Human Body Comfort in the City of Nanjing

JIN Ning<sup>1,2</sup>, JING Yuanshu<sup>2</sup>, and WU Yongli<sup>1</sup>

1 Shanxi Province Climate Center, Taiyuan 030002

2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract** To analyze the influence of the changes in city underlying surface on human comfort, air temperature, relative humidity and wind velocity are observed in Nanjing University of Information Science and Technology with different kinds of underlying surface as woods, lawn, and bare land in April and May 2006. The data of air temperature, relative humidity, and wind velocity are used to evaluate the influences of climate environment on human comfort. Based on fuzzy mathematics, the comprehensive evaluation of human comfort for different kinds of underlying surfaces is made. The results show that from April to May it is the most comfortable on the lawn, while the least comfortable in the woods, and the that of woods is lower than that of lawn and bare land.

**Key words** underlying surface, human comfort, air temperature, relative humidity, wind speed

## 1 引言

城市由于下垫面的性质和人类活动的影响, 不仅产生了城市热岛、城市干岛、城市环流, 而

且降低了能见度、减少了日照时数, 即形成了城市气候。城市气候对城市居民的生活、工作环境有着重要影响 (Toy et al., 2007)。研究人体舒适度的意义在于提示人们根据气象要素的变化来及时调节生理、适应环境以及采取一些防范措施

**收稿日期** 2008-05-19 收到, 2009-04-30 收到修定稿

**资助项目** 江苏省科学技术厅资助项目 BS2006059

**作者简介** 靳宁, 男, 1983年出生, 硕士研究生, 从事应用气象研究。E-mail: home96@126.com

(张书余, 2002)。许多学者对人体舒适度进行了研究, Nikolopoulou et al. (2006) 对欧洲不同国家的城市热舒适性进行了研究。周后福 (1999) 探讨了气候变化对人体健康的影响。吴兑 (2003) 进行了多种人体舒适度预报公式的讨论。白虎志等 (2005) 分析了兰州城市热岛效应特征并对其影响因子进行了研究。唐文君等 (2007) 进行了长江三角洲夏季气候舒适度模糊评判。这些研究对指导人们的活动提供了有益的参考。

为了提高对城市气候、城市绿化和环境保护的认识, 并为利用绿化改善城市小气候等问题提供有益的参考, 本文以裸地、草地和林地三种不同类型下垫面为研究对象, 利用气象要素的观测数据, 使用人体舒适度这一生物气象指标来评价不同下垫面对人们户外活动舒适程度的影响。

## 2 实验数据和方法

### 2.1 实验数据

观测点设置在江北浦口区的南京信息工程大学校园 ( $32^{\circ}14'N$ ,  $118^{\circ}42'E$ , 海拔高度 21.9 m) 内。为比较不同下垫面对人体舒适度的影响, 设置了三个观测点: 测点 1——林地, 测点 2——草地, 测点 3——水泥地面 (裸地)。

观测项目为气温、相对湿度和风速。测定时期为 2006 年 4 月 12 日到 5 月 11 日, 每天 08:00~17:00 (北京时间, 下同) 每逢整点观测一次。其中, 空气温度用 DHM<sub>2</sub> 型通风干湿表测定, 测定高度距地面 1.5 m; 空气相对湿度利用干湿球温度值进行查算; 风速用 DEM<sub>6</sub> 型轻便三杯风向风速表测定, 测定高度亦为 1.5 m。同时, 在各测点分别连续放置 Watch Dog 自动气象站若干天, 所得数据作为人工观测的对照。

### 2.2 方法

人体的热平衡机能、体温调节等生理功能受到多种气象要素的综合影响。例如气温、相对湿度、气压、光照、风等。气温适中时, 相对湿度对人体的影响并不显著。由于相对湿度主要影响人体的热代谢和水盐代谢。当气温较高或较低时, 其波动对人体的热平衡和温热感就显得非常重要 (唐国利等, 2006)。人体舒适度指数是从气象角度评价在不同气候条件下人体的舒适感, 根据人

体与大气环境之间的热交换而制定的生物气象指标, 用来反映不同气象环境下人体的舒适感觉。

对舒适度的评价方法, 利用 Zaden (1978) 提出的模糊集合概念。元素  $X$  对集合  $A$  的隶属关系在普通集合中只有 0 和 1 两种情况, 而模糊集合则把  $X$  对  $A$  的隶属程度扩充为  $[0, 1]$  这样一个实数闭区间。我们假定在论域  $U$  上, 每一个元素  $X$  都与一个  $\mu(x)$  相对应, 且  $\mu(x)$  满足:  $0 \leq \mu(x) \leq 1$ , 则可以认为  $\mu(x)$  确定了  $U$  上的一个模糊子集  $A$ , 其中  $\mu(x)$  称为  $A$  的隶属函数, 其值反映了  $U$  中任一元素对模糊子集  $A$  的隶属程度。

本文以自测的林地、草地和裸地三种不同下垫面的气温  $t$ 、相对湿度  $r$  和风速  $v$ , 作为评价小气候对人体舒适度的影响因素, 故选定因素的论域为:  $U=(t, r, v)$ ; 评价的论域为:  $A=(\text{很舒适}, \text{舒适}, \text{较舒适}, \text{不舒适})$ 。

由环境卫生学获知, 气温为  $24^{\circ}C$ 、相对湿度为 70% 且风速为  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  是夏季人体感觉最舒适的小气候条件 (李秀存等, 1999)。观测期间, 林地、裸地和草地的平均气温分别为 19.3、20.4 和  $20.3^{\circ}C$ , 最高气温已经达到了 31.0、31.7 和  $31.8^{\circ}C$ , 此时的南京已经具有了初夏的一些特征, 利用夏季的评判标准基本适宜。据此, 对三要素分别建立隶属函数方程如下 (李秀存等, 1999):

$$\mu_t = \begin{cases} 1, & t = 24, \\ \frac{1}{1+a(t-24)^2}, & t \neq 24, \quad a = 0.0476, \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_r = \begin{cases} 1, & r = 70\%, \\ \frac{1}{1+b(r-70)^2}, & r \neq 70\%, \quad b = 0.0038, \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_v = \begin{cases} 1, & v = 2, \\ \frac{1}{1+c(v-2)^2}, & v \neq 2, \quad c = 0.5634, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  是通过特尔斐法对一组实测值评估出相应的一组隶属度, 并根据这两组数据拟合隶属度函数而求得。

将选定观测点的气象要素值分别代入各隶属函数方程, 求出各观测点气温、相对湿度和风速的隶属函数值。根据各因素的隶属函数值大小可规定:  $\mu \geq 0.85$  为很舒适;  $0.85 > \mu \geq 0.75$  为舒适;  $0.75 > \mu \geq 0.60$  为较舒适;  $0.60 > \mu$  为不

舒适。

### 3 结果和分析

#### 3.1 不同下垫面气象要素隶属度的对比

气温是评判人体舒适度最重要的气象要素，隶属度值越大，舒适程度越大。由图 1 可以看出，就气温单因子而言，绿化带的舒适程度高于裸地，且越是晴朗高温的天气，效果越明显。如 4 月 29 日气温较高，草地和裸地的舒适度差异明显。而在阴雨天气条件下，三点几乎重合在一起，差异不明显。

就整体而言，裸地相对湿度因子的隶属度值

最小，林地的隶属度值最大（如图 2），由于 3 种下垫面日相对湿度变化及日较差较大，使得 3 条相对湿度隶属度曲线的日变化也比较大。

裸地和草地的风速单因子隶属度值整体上相差不多，只有个别日期相差较大（如图 3）。林地由于较为封闭，不如裸地和草地开阔，风速较小，隶属度值明显小于裸地和草地。草地和裸地的风速较大，隶属度值较大，人体感觉舒适。

#### 3.2 隶属度的日变化

以 5 月 4 日林地为例，日最高气温为 31.0℃，相对湿度较小。由图 4 可以看出，早上 8~9 时（北京时间，下同）气温因子的隶属度值随逐渐增大，这是由于随着太阳辐射的增强，树林内温

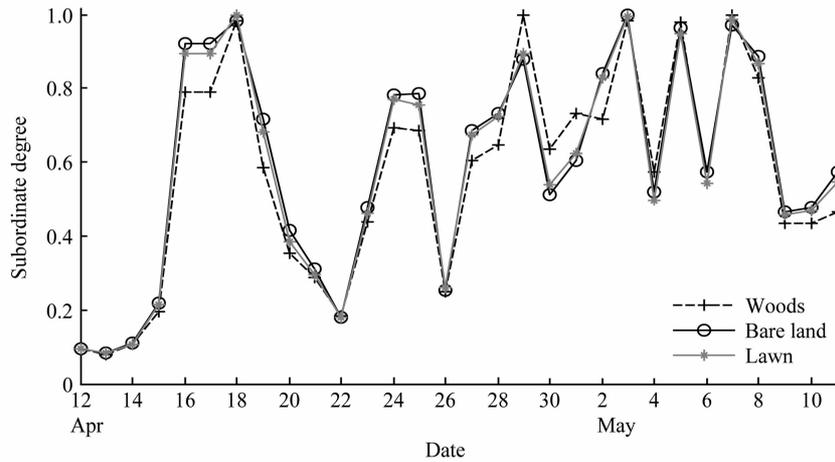


图 1 气温单因子隶属度变化

Fig. 1 The subordinate degree change of air temperature

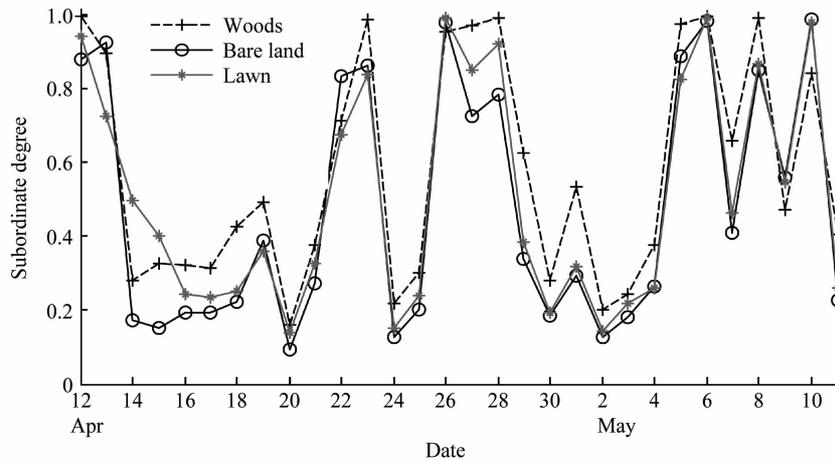


图 2 相对湿度单因子隶属度变化

Fig. 2 The subordinate degree change of humidity

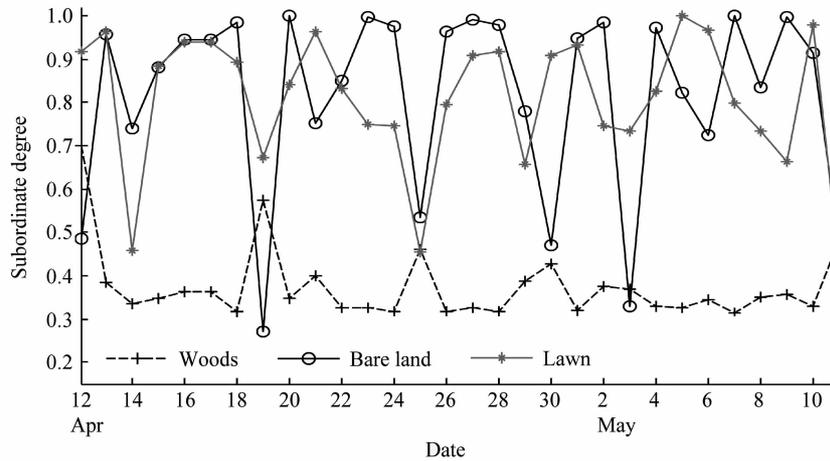


图3 风速单因子隶属度变化  
Fig. 3 The subordinate degree change of wind speed

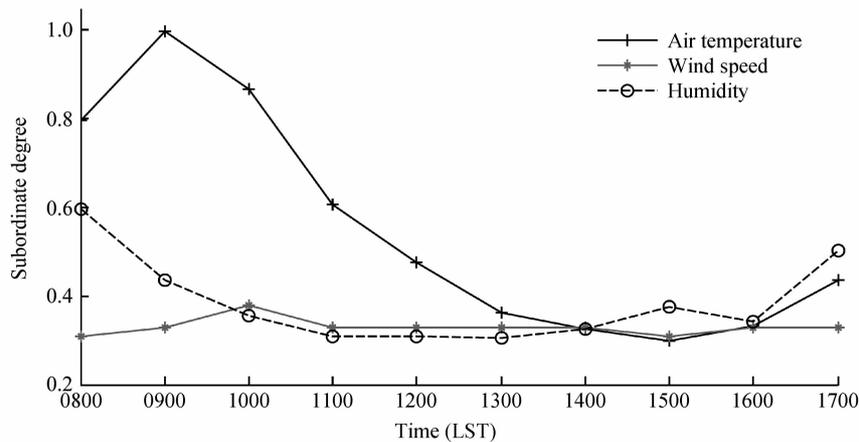


图4 林地三因子隶属度日变化  
Fig. 4 Daily subordinate degree change of three factors in the woods

度上升的缘故。9 时后隶属度值随着气温的进一步升高又逐渐减小，至 15 时左右达到最小值，然后随着气温的下降而上升。相对湿度因子的隶属度值从早上 8 时开始随着林内相对湿度的减小而逐渐减小，下午 14 时以后又出现增大趋势。风速因子的隶属度值变化较平缓，这是由于林内分冠层密度较大，加上周围环境的影响使得林内风速较小。

### 3.3 不同下垫面舒适度的综合评判

从单因素评判入手，建立  $U$  到  $A$  的单因素评判矩阵  $R$ ， $R$  中的各元素是  $U$  中各因素的隶属函数值所属等级的个数在观测记录数中所占的百分率。例如，在所记录的 30 次观测中，林地气温很舒适、舒适、较舒适和不舒适的次数分别为 10、

2、3 和 15，它们所占百分率分别为 0.33、0.07、0.10 和 0.50，这即是  $R$  中第一行元素。对相对湿度和风速进行同样的计算，可得到林地测点舒适度的单因素评判矩阵为：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.07 & 0.10 & 0.50 \\ 0.20 & 0.13 & 0.30 & 0.37 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0.97 \end{bmatrix}$$

同理，再对其他测点进行同样的运算可得：

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.17 & 0.10 & 0.40 \\ 0.23 & 0.03 & 0.17 & 0.57 \\ 0.53 & 0.20 & 0.17 & 0.10 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.13 & 0.13 & 0.40 \\ 0.30 & 0.10 & 0.13 & 0.47 \\ 0.63 & 0.07 & 0.07 & 0.23 \end{bmatrix}$$

$R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ，分别代表树林、裸地、草地的单因子评判矩阵。在小气候条件对人体舒适度的评价中，由于人体对小气候环境的感受是多种因素的综合反映，故需要做出综合评判。由于影响人体舒适度的诸因素并不处于同等地位，用数学的方式可表达为  $U$  中的一个模糊子集  $V$ ，并设三要素的权重分配为  $V = (0.60, 0.20, 0.20)$ ，则综合评判为  $B = VR$ 。例如，对林地测点可得如下结果，即

$$B_1 = (0.60 \ 0.20 \ 0.20) \begin{bmatrix} 0.33 & 0.07 & 0.10 & 0.50 \\ 0.20 & 0.13 & 0.30 & 0.37 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0.97 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.33 & 0.07 & 0.10 & 0.50 \\ 0.20 & 0.13 & 0.20 & 0.20 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0.20 \end{bmatrix}$$

$$= [0.33 \ 0.13 \ 0.20 \ 0.50],$$

作归一化处理，得  $B_1 = [0.28 \ 0.12 \ 0.17 \ 0.43]$ 。

同理，可得其他测点的综合评判结果：

$$B_2 = [0.30 \ 0.18 \ 0.16 \ 0.36],$$

$$B_3 = [0.33 \ 0.13 \ 0.13 \ 0.40].$$

综合评判结果（表 1）表明，就整个观测时段而言，草地的舒适程度最高，裸地和林地次之。具体到某一时段，情况则会有所不同，如林地和白天气温较高时还是比较舒适的。产生这种综合评判结果的原因在于观测时间为 4~5 月份，此时气温不是很高，林地由于自然条件及周围地理条件的影响，风速同裸地和草地相差较大，林内气温又低，整体感觉不舒适。林地的降温作用是十分明显的，无论是日平均气温、日最高气温，林下均显著低于裸地和草地。

表 1 不同下垫面舒适度的综合比较

Table 1 Integral comparison of comfort on different underlying surfaces

| 舒适度等级 | 裸地   | 草地   | 林地   |
|-------|------|------|------|
| 很舒适   | 0.30 | 0.33 | 0.28 |
| 舒适    | 0.18 | 0.13 | 0.12 |
| 较舒适   | 0.16 | 0.13 | 0.17 |
| 不舒适   | 0.36 | 0.40 | 0.43 |

## 4 结论与讨论

(1) 通过对自测数据进行整理、分析，采用

模糊综合评判方法对比分析了南京市 4~5 月林地、裸地、草地三种下垫面的人体舒适度，综合结果表明草地的舒适程度最高，裸地次之，林地最低，经与观测者每天记录的自身舒适度感觉对比，发现模糊综合评判得出的结论符合实际情况，可用于南京市人体舒适度的综合评判，为春末夏初季节交替之际人们的外出游玩提供有益的参考。

(2) 人体舒适度的评价不仅受气象要素的影响，还受地形、天气状况、个体差异等要素的影响，因此上述结论存在一些不足。我们还可以引入更多的因子，如太阳辐射，紫外线强度等，并通过大量的对比和选取代表性人群进行验证，提高舒适度的预报精度，更好地指导人们的生活实践。

## 参考文献 (References)

- 白虎志, 任国玉, 方锋. 2005. 兰州城市热岛效应特征及其影响因素研究 [J]. 气象科技, 33 (6): 492-495, 500. Bai Huzhi, Ren Guoyu, Fang Feng. 2005. Characteristics of urban heat island effect and its influencing factors in Lanzhou [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 33 (6): 492-495, 500.
- 李秀存, 苏志. 1999. 广西夏季旅游气候舒适度的模糊综合评价 [J]. 热带地理, 19 (2): 184-187. Li Xiucun, Su Zhi. 1999. A fuzzy comprehensive evaluation for the summer tourism climate in Guangxi [J]. Tropical Geography (in Chinese), 19 (2): 184-187.
- Nikolopoulou M, Lykoudis S. 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces; Analysis across different European countries [J]. Building and Environment, 41: 1455-1470.
- 唐国利, 丁一汇. 2006. 近 44 年南京温度变化的特征及其可能原因的分析 [J]. 大气科学, 30 (1): 56-68. Tang Guoli, Ding Yihui. 2006. The changes in temperature and its possible causes in Nanjing in recent 44 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 56-68.
- 唐文君, 闵敏, 景元书. 2007. 长江三角洲夏季气候舒适度模糊评判 [J]. 气候与环境研究, 12 (6): 773-778. Tang Wenjun, Min Min, Jing Yuanshu. 2007. A fuzzy evaluation for the climatic comfortableness of the Yangtze River Delta in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (6): 773-778.
- Toy S, Yilmaz S, Yilmaz H. 2007. Determination of bioclimatic comfort in three different land uses in the city of Erzurum, Turkey [J]. Building and Environment, 42: 1315-1318.
- 吴兑. 2003. 多种人体舒适度预报公式讨论 [J]. 气象科技, 31

- (6): 370 - 372. Wu Dui. 2003. Discussion on various formulas for forecasting human comfort index [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (6): 370 - 372.
- Zaden L. A. 1978. Fuzzy set as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Set and System, 1: 3 - 38.
- 张书余. 2002. 城市环境气象预报技术 [M]. 北京: 气象出版社, 124 - 126. Zhang Shuyu. 2002. Forecasting Technologies of Urban Environmental Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 124 - 126.
- 周后福. 1999. 气候变化对人体健康影响的综合指标探讨 [J]. 气候与环境研究, 4 (1): 121 - 126. Zhou Houfu. 1999. Discussion in synthetic index of climatic change influence on human health [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (1): 121 - 126.