

长江三角洲夏季气候舒适度模糊评判

唐文君^{1,2,4} 闵敏^{3,4} 景元书²

1 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 以集合论为基础, 采用数学模糊评判方法, 选取长江三角洲3个站点1981~2000年夏季(7、8、9月)的平均气温、相对湿度和风速资料, 作为评价气候环境对人体舒适度的影响因素, 并将舒适程度分为很舒适、舒适、较舒适和不舒适4个等级, 对长江三角洲夏季气候舒适度进行模糊评判, 并结合天空状况进行了分析。结果表明, 长江三角洲地区夏季舒适度分布, 时间上9月份很舒适, 很舒适程度比例均在70%以上; 7、8月较舒适, 较舒适水平也在60%以上; 空间上具有显著的相似性, 仅有微小的差别, 具体表现为南京略好一点, 上海和杭州相当。

关键词 气候 舒适度 模糊评判 夏季 长江三角洲

文章编号 1006-9585 (2007) 06-0773-06 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

A Fuzzy Evaluation for the Climatic Comfortableness of the Yangtze River Delta in summer

TANG Wen-Jun^{1,2,4}, MIN Min^{3,4}, and JING Yuan-Shu²

1 *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*

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

3 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

4 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Based on set theory, this paper use the data of average air temperature, relative humidity and wind velocity in summer from July to September of three stations in the Yangtze River Delta for the period of 1981 to 2000 as the factors of climatic comfortableness to evaluate the climate environment by means of fuzzy mathematics. The level of comfortableness is divided into four grades: very comfortable, comfortable, relatively comfortable and uncomfortable according to the theory of environmental hygienics. Then the results of the evaluation and cloud condition are analyzed complexly. It is indicated that the level of comfortableness of the Yangtze River Delta is very comfortable in September and the percentage of very comfortable day is more than 70%; the level of comfortableness is relatively comfortable in July and August and the percentage of relatively comfortable day is more than 60%; and the spatial distribution of the level of comfortableness is very similar in the Yangtze River Delta and the level of comfortableness of Nanjing is better than that of Shanghai and Hangzhou generally.

Key words climate, comfortableness, fuzzy evaluation, summer, Yangtze River Delta

收稿日期 2006-12-13 收到, 2007-07-20 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 唐文君, 男, 1983年出生, 硕士研究生, 从事应用气象和高原气象研究。E-mail: twjzcm@hotmail.com

1 引言

人体对气候感觉舒适与否,涉及到生理和心理因素。人体生理舒适度(以下简称舒适度)是人体对其所处热环境或日照感到刚好适应,且无需调节时的感觉状态。从热量的角度来说,人体通过对流、传导、辐射、蒸发在生理上得到平衡而觉得舒服。人体热量平衡的保持,受风速、湿度的影响。因此,大气环境最敏感的要素为气温、湿度和风^[1]。研究人体舒适度的意义在于提示人们根据气象因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^[2]。许多学者提出了各种生物气候学指标,如 Terjung^[3]的舒适指数和风效指数, Oliver^[4]的温度—湿度指数和风寒指数。冯定原等^[6,7]根据 Steadman 的感热温度理论^[5],定量计算了我国各地四季感热温度的分布变化,并讨论了体感温度的高低对人类活动的影响。刘梅等^[8]探讨了人体舒适度研究现状及其应用开发前景。王金亮等^[1]做了香格里拉旅游气候适宜度研究。廖善刚^[9]进行了福建省旅游气候资源分析。李秀存等^[10]开展了广西夏季旅游气候舒适度的模糊综合评判。四川、西双版纳等地也开展了此项工作^[11,12]。周后福^[13]通过探讨气候变化因子对人体健康的影响,得出了一种能反映气候的变化与人体健康之间的关系综合指标。这些研究结果可以为那些有序的人类活动提供指导性建议,使人们的选择更具有科学性和可靠性。

由于舒适度受诸多气象因子的影响,其结果本身是模糊的,且无法知道确切的结果,而模糊评判^[14,15]正是解决具有这样特点的一种有效方法。因此本研究中,作者运用模糊评判分析方法,对人类活动密集的长江三角洲地区夏季舒适度进行考察,分析了若干重要城市夏季舒适度的主要特征,并对结果进行了显著性检验。

2 模糊数学方法简介

模糊综合评判是模糊数学的一种具体的应用,在我国很早就将这种理论应用于实际。当待解决的问题本身是模糊的,无法知道确切结果,而且其影响因素多,因素之间相互联系,不同因素对

问题的影响程度不同,当各因素通过某种组合关系共同作用且能大致反映问题的特征时,此方法非常有效。其优点是:数学模型简单,对多因素多层次的复杂问题评判效果较好,是别的数学分支和模型难以替代的。

模糊综合评判就是对拟评判的对象选定若干主要因素,先进行单因素的评判,把评判结果构成矩阵 $\mathbf{R}$,然后考虑各因素在总评判中的地位,即权重 $\mathbf{A}$,求 $\mathbf{R}$ 与 $\mathbf{A}$ 的合成得出综合评判的结果。

模糊综合评判的数学模型是,首先建立因素集 $\mathbf{U}$ 与评价集 $\mathbf{V}$:

$$\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}. \quad (2)$$

各因素在评判中的地位和重要性是不一样的,为了反映它们对评价对象的影响,赋予各因素以适当的权重,记为 $\mathbf{A}$, $\mathbf{A}$ 可以从统计资料中获得,也可由专家评定,设 a_i 为第 i 个因素的权重,则权重集为

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, \quad (3)$$

权重应满足归一性与非负性,即

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1, a_i \geq 0, \quad (4)$$

设第 i 个单因素模糊评判 $\mathbf{V}$ 上的模糊子集为

$$\mathbf{R}_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}, \quad (5)$$

则单因素评判矩阵 $\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\mathbf{R}$ 即是因素集 $\mathbf{U}$ 到评价集 $\mathbf{V}$ 的一个模糊关系, r_{ij} 表示因素 u_i 对 v_j 的隶属度。当模糊向量 $\mathbf{A}$ 和模糊关系矩阵 $\mathbf{R}$ 为已知时,作模糊变换来进行综合评判,即: $\mathbf{B} = \mathbf{A} \times \mathbf{R}$, 其运算采用取大取小法则。且 $\mathbf{B}$ 称为抉择评价集 $\mathbf{V}$ 上的等级模糊子集; b_j ($j=1, 2, \dots, n$) 为等级 v_j 对综合评判等级模糊子集 $\mathbf{B}$ 的隶属度。

3 长江三角洲夏季舒适度的模糊综合评判

3.1 长江三角洲夏季舒适度的模糊评判

对舒适度的评价方法,利用了 Zaden^[16]提出

的模糊集合的概念。在普通集合中，元素 $\mathbf{X}$ 对集合 $\mathbf{A}$ 的隶属关系只有 0 和 1 两种情况。而模糊集合则把 $\mathbf{X}$ 对 $\mathbf{A}$ 的隶属程度从 0 或 1 扩充为 $[0, 1]$ 这样一个实数闭区间。如果在论域 $\mathbf{U}$ 上，每一个元素 $\mathbf{X}$ 都与一个 $\mu_{\mathbf{A}}(x)$ 相对应，且 $\mu_{\mathbf{A}}(x)$ 满足： $0 \leq \mu_{\mathbf{A}}(x) \leq 1$ ，则 $\mu_{\mathbf{A}}(x)$ 就确定了 $\mathbf{U}$ 上的一个模糊子集 $\mathbf{A}$ ，并称 $\mu_{\mathbf{A}}(x)$ 为 $\mathbf{A}$ 的隶属函数，它反映了 $\mathbf{U}$ 中任一元素对模糊子集 $\mathbf{A}$ 的隶属程度^[10]。

本研究选用长江三角洲地区近 20 年（1981～2000 年）夏季平均气温、相对湿度和风速资料作为评价小气候环境对人体舒适度的影响因素，选定因素的论域为 $\mathbf{U}=(\text{气温 } t, \text{空气湿度 } f, \text{风速 } v)$ ；评价的论域为 $\mathbf{V}=(\text{很舒适, 舒适, 较舒适, 不舒适})$ 。根据环境卫生学理论，气温 24 ℃、相对湿度 70%和风速 2 m·s⁻¹，是夏季人体最舒适的小气候条件。据此，对三要素分别建立隶属函数方程^[17]如下，其中 a 、 b 、 c 是通过用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。

$$\mu_t = \begin{cases} 1, & t=24, \\ \frac{1}{1+a(t-24)^2}, & t \neq 24, a=0.0476; \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_f = \begin{cases} 1, & f=70\%, \\ \frac{1}{1+b(f-70)^2}, & f \neq 70\%, b=0.0038; \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_v = \begin{cases} 1, & v=2, \\ \frac{1}{1+c(v-2)^2}, & v \neq 2, c=0.05634. \end{cases} \quad (9)$$

将选定站点的气候要素值分别代入各隶属函数方程，即可求出各站气温、相对湿度和风速的隶属函数值，南京地区的计算结果见表 1。

根据各因素隶属函数值大小可规定^[17]： $\mu \geq 0.85$ 很舒适； $0.85 > \mu \geq 0.75$ 舒适； $0.75 > \mu \geq 0.60$ 较舒适； $0.60 > \mu$ 不舒适。

从单因素评判入手，建立 $\mathbf{U}$ 到 $\mathbf{A}$ 的单因素评判矩阵 $\mathbf{R}$ ， $\mathbf{R}$ 中的每个元素是 $\mathbf{U}$ 中各因素诸记录隶属函数对应 $\mathbf{A}$ 中各等级的个数在该因素中所占的百分率。例如对于 1981～2000 年夏季的 7 月，南京平均气温属最舒适、舒适、较舒适和不舒适的次数分别为 1、4、6 和 9，它们在 20 年气温记录中所占百分率分别为 5%、20%、30%和 45%，这即是 $\mathbf{R}$ 中第一行元素；再对相对湿度和风速进行同样的计算，便可得到 1981～2000 年 7 月南京市的舒适度的单因素评判矩阵为

表 1 南京地区夏季舒适度隶属函数（1981～2000 年）

Table 1 Subordinate function of comfortableness in Nanjing area in summer

7 月			8 月			9 月		
μ_t	μ_f	μ_v	μ_t	μ_f	μ_v	μ_t	μ_f	μ_v
0.53	0.64	0.59	0.64	0.61	0.83	0.84	0.81	0.77
0.83	0.53	0.58	0.76	0.57	0.91	0.80	0.73	1.00
0.68	0.64	0.83	0.61	0.83	1.00	1.00	0.66	0.94
0.57	0.66	0.82	0.58	0.72	0.50	0.80	0.54	0.93
0.62	0.57	0.94	0.57	0.64	0.67	1.00	0.63	0.89
0.75	0.55	0.92	0.71	0.70	0.99	0.87	0.74	1.00
0.80	0.48	0.99	0.62	0.60	0.96	0.92	0.88	0.89
0.38	0.79	0.78	0.77	0.73	0.79	0.85	0.78	0.85
0.77	0.58	0.83	0.79	0.55	0.68	0.92	0.62	0.82
0.41	0.85	0.78	0.52	0.67	0.72	0.95	0.68	0.68
0.60	0.64	0.93	0.75	0.74	0.96	0.95	0.8	0.95
0.53	0.86	0.91	0.73	0.65	0.99	0.93	0.75	0.77
0.73	0.70	0.94	0.90	0.55	1.00	0.95	0.71	0.90
0.33	0.93	0.89	0.45	0.89	0.56	0.99	0.97	0.97
0.50	0.73	1.00	0.50	0.79	0.99	1.00	0.95	0.98
0.73	0.52	0.97	0.59	0.76	0.97	1.00	0.78	0.97
0.63	0.65	0.96	0.61	0.67	0.98	0.87	1.00	0.99
0.41	0.73	0.98	0.50	0.74	0.88	0.99	0.87	0.97
0.85	0.60	0.98	0.83	0.54	0.92	0.97	0.76	0.96
0.47	0.89	0.95	0.58	0.69	0.97	0.99	0.92	0.84

表 2 长江三角洲夏季舒适度模糊评判结果 (1981~2000 年)
Table 2 Results of summer comfortableness of fuzzy evaluation in the Yangtze Delta

舒适度等级	南京			杭州			上海		
	7 月	8 月	9 月	7 月	8 月	9 月	7 月	8 月	9 月
B1	0.16	0.17	0.69	0.19	0.18	0.81	0.1	0.06	0.73
B2	0.19	0.2	0.22	0.14	0.15	0.07	0.13	0.12	0.11
B3	0.29	0.33	0.08	0.19	0.3	0.09	0.31	0.41	0.12
B1+B2+B3	0.64	0.7	0.99	0.52	0.63	0.97	0.54	0.59	0.96
B4	0.36	0.3	0.01	0.48	0.37	0.03	0.46	0.41	0.04

注：B1 为很舒适，B2 为舒适，B3 为较舒适，B4 为不舒适。

$$R=\begin{bmatrix}0.05 & 0.20 & 0.30 & 0.45 \\ 0.20 & 0.15 & 0.45 & 0.30 \\ 0.65 & 0.25 & 0.00 & 0.10\end{bmatrix}, \quad (10)$$

同理，可对杭州、上海进行同样的运算。

人体对小气候环境的感觉是多种因素的综合反应，故需做出综合评判；且影响人体舒适度的诸因素并不处于同等地位，对此，用数学方式可表达为 U 中的一个模糊子集 V 。采用专家组确定三要素的权重分配 $V=(0.60,0.20,0.20)^{[14]}$ ，由 $B=V\times R$ 通过取大取小法则计算即得到人体舒适度的综合评判结果，经归一化处理后，整理如表 2。

3.2 显著性检验

对三城市综合评判结果用公式：

$$P=\sum_i(B_i\times\mu_i),\ i=1,2,\cdots,m, \quad (11)$$

$$t=\frac{(P-\mu)}{s_n}\times\sqrt{\frac{n-1}{n+2}}, \quad (12)$$

进行平均处理，其结果见表 3，其中 μ_i 表示相应评价等级区间的中间值。

如果以数理统计的观点来看，则此平均等级

表 3 三城市平均评判结果
Table 3 The average results of three cities

城市	月份	平均结果
南京	7	0.60
	8	0.63 *
	9	0.88 *
杭州	7	0.56 *
	8	0.60
	9	0.88 *
上海	7	0.55 *
	8	0.55 *
	9	0.86

* 表示通过了显著性水平 0.05 的双尾 t 检验

评判 P 就是抽样检测的结果，可以假设当参加评判的年数很大时，抽样结果的分布属正态分布，这时，就可以对结果用 t 分布统计量（公式 12）做显著性检验，式中 μ 取所在舒适度等级的隶属度下限值， P 为前述的平均等级， s_n 表示样本标准差。可得各显著检验结果如表 3 所示：南京 8 月和 9 月，杭州 7 月和 9 月，上海 7 月和 8 月都通过了 0.05 的显著水平检验。

4 三城市夏季舒适度及其对比

根据舒适度综合评判结果，得到长江三角洲地区夏季各月舒适度等级对比图（如图 1），以此来反映长江三角洲地区夏季舒适程度。

从图中可以看出，南京地区总体舒适度随时间呈明显递增的趋势，表现为 7 月舒适读最差，8 月次之，9 月最好。其中 7、8 月由于天气炎热的缘故，不舒适的天数接近 1/3；但是由于夏天经常伴有雷阵雨天气，湿度大和较大风速的缘故，不舒适的状况常能得到改善，因此，舒适的程度还是占大部分。杭州地区总体舒适度也是随时间呈明显递增的趋势，表现为 7 月最差，不舒适的天数接近一半，到 8 月舒适程度有所改善，但不明显，9 月舒适度大幅改善。上海地区总体舒适度也是随时间呈明显递增的趋势，7、8 月舒适程度较差，不舒适天数接近一半，只有偶尔阴雨天气表现为很舒适；9 月大部分表现为很舒适，只有极个别天数异常炎热呈不舒适状态。总体来讲，长江三角洲地区旅游舒适度在空间上具有显著的相似性，由于地理差异有一定差别，但差别不大；长江三角洲地区夏季舒适度在时间上呈明显好转趋势，9 月份舒适程度极好，7 月舒适程度最差，8 月次之，其舒适程度受天气状况影响较大。

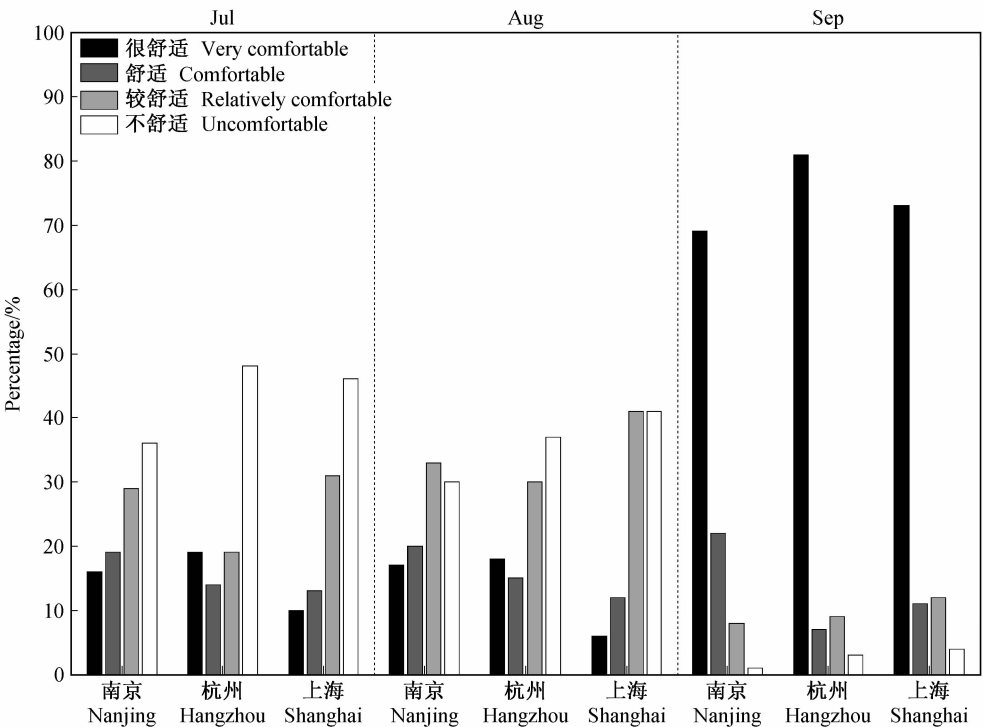


图 1 长江三角洲三城市夏季气候舒适度对比
Fig. 1 Comparison of summer comfortableness in three cities of the Yangtze River Delta

结合表 3 三地综合相比较，舒适度等级总体相似，表现为南京略好一点，上海和杭州相当。根据长江三角洲 20 年天空状况统计，时间上 9 月阴雨天气最多，舒适程度最好，8 月最差，7 月次之；空间上杭州阴雨天最多，最舒适比例也最多，上海和南京相当。

5 结论与讨论

(1) 长江三角洲地区夏季舒适度在时间上呈明显好转趋势，9 月份舒适程度极好，7 月舒适程度最差，8 月次之；在空间上具有显著的相似性，由于地理差异有一定差别，但差别不大。

(2) 通过舒适度，既可以客观地反映气候的舒适程度，又可使不同区域，不同地点间具有可比基础，这对指导在长江三角洲开展各项生产活动有一定意义。由于舒适度的评价不仅和气象要素有关，还和地形地貌、天气状况、大气质量、个体差异等有关，因此以上的结论存在一些不足，我们可以通过引进更多的因子，如紫外线强度、太阳辐射、大气酸碱度、花粉浓度等，并通过选

择具有代表性的不同人群进行检验、修正从而提高舒适度的预报精度。

致谢 本文在修改过程中得到中国科学院大气物理研究所陈泽宇副研究员和吕达仁院士悉心指导，在此表示感谢！

参考文献 (References)

[1] 王金亮, 王平. 香格里拉旅游气候的适宜度. 热带地理, 1999, 19 (3): 235~239
Wang Jinliang, Wang Ping. Climatic Comfort Index for Tourism in Zhongdian, Yunnan. *Tropical Geography* (in Chinese), 1999, 19 (3): 235~239

[2] 张书余. 城市环境气象预报技术. 北京: 气象出版社, 2002
Zhang Shuyu. *Forecasting Technologies of Urban Environmental Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002

[3] Terjung W T. Physiologic climates of the conterminous United States: A bioclimatic classification based on man. *Annal Association of American Geographers*, 1966, 5 (1): 141~179

- [4] Oliver J E. *Climate and Man's Environment: An Introduction to Applied Climatology*. New York: John Wiley & Son's Inc, 1973
- [5] Steadman R G. A Universal Scale of Apparent Temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 1984, **23**: 1674~1687
- [6] 冯定原, 邱新法. 我国各地四季感热温度的计算和分析. 南京气象学院学报, 1990, **13** (1): 71~79
Feng Dingyuan, Qiu Xinfa. Calculation and analysis of the apparent temperature in the four seasons over China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1990, **13** (1): 71~79
- [7] 冯定原, 邱新法, 黄桔梅. 我国夏季感热温度的分布. 气象, 1990, **15** (6): 21~26
Feng Dingyuan, Qiu Xinfa, Huang Jumei. The distribution of the apparent temperatures in summer in China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1990, **15** (6): 21~26
- [8] 刘梅, 于波. 人体舒适度研究现状及其开发应用前景. 气象科技, 2002, **30** (1): 11~14
Liu Mei, Yu Bo. Progress on body comfortability and the prospect for its development and utilization. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2002, **30** (1): 11~14
- [9] 廖善刚. 福建省旅游气候资源分析. 福建师范大学学报 (自然科学版), 1998, **14** (1): 93~97
Liao Shangang. The climate resources for tourism in Fujian. *Journal of Fujian Normal University* (Natural Science) (in Chinese), 1998, **14** (1): 93~97
- [10] 李秀存, 苏志. 广西夏季旅游舒适度的模糊综合评判. 热带地理, 1999, **19** (2): 184~187
Li Xiucun, Su Zhi. A fuzzy comprehensive evaluation for the summer tourism climate in Guangxi. *Tropical Geography* (in Chinese), 1999, **19** (2): 184~187
- [11] 郭成香, 石凤云. 四川省夏季气候舒适度的探讨. 成都气象学院学报, 1997, **9**: 253~250
Guo Chengxiang, Shi fengyun. Discussion of the climatic comfortableness of Sichuan Province in summer. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology* (in Chinese), 1997, **9**: 253~250
- [12] 刘文杰, 李红梅. 西双版纳旅游气候资源. 自然资源, 1997, **2**: 62~66
Liu Wenjie, Li Hongmei. Tourist climate resources in Xishuangbanna. *Natural Resources* (in Chinese), 1997, **2**: 62~66
- [13] 周后福. 气候变化对人体健康影响的综合指标探讨. 气候与环境研究, 1999, **1**: 121~126
Zhou Houfu. Discussion in synthetic index of climatic change influence on human health. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **1**: 121~126
- [14] 张跃, 邹寿平, 宿芬. 模糊数学方法及应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1992
Zhang Yue, Zhou Shouping, Su Fen. *The Method and Application of Fuzzy Mathematics* (in Chinese). Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992
- [15] 张敦敏. 大气质量模糊评价模型与应用. 成都气象学院学报, 1991, **5** (3~4): 89~95
Zhang Dunmin. The model and application of fuzzy evaluation of atmospheric quality. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology* (in Chinese), 1991, **5** (3~4): 89~95
- [16] Zaden L A. Fuzzy set as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Set and System*, 1978, **1**: 3~38
- [17] 陆鼎煌. 北京绿化与居民夏季舒适度. 北京林业, 1984, **1**: 28~36
Lu Dinghuang. Beijing greening program and climatic comfortableness in summer. *Beijing Forestry* (in Chinese), 1984, **1**: 28~36