

# 改进的武汉中暑气象模型 及中暑指数等级标准研究

陈正洪<sup>1</sup> 史瑞琴<sup>1</sup> 李松汉<sup>2</sup> 王 瑛<sup>2</sup> 卢 明<sup>2</sup>

(1. 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2. 武汉市职业病防治院)

**提 要:** 为了更好开展高温中暑气象预报服务和气候评价工作, 以武汉市 2003—2005 年高温期间逐日中暑人数与当天、前期共 33 个气象因子为基础资料, 通过相关普查寻找关键气象因子, 通过逐步回归方法建立了改进的中暑气象模型, 修订了 1990 年代研制的中暑指数 5 级划分标准, 新提出了中暑天数的推算方法, 并进行了回代检验和 2006—2007 年试报检验。结果表明: 中暑人数与当日各项气温、气压、日照时数为正相关, 与总云量、相对湿度为负相关, 其中气温最为关键, 考虑前期气温累积效应后相关系数有所提高; 日最高气温  $\geq 36^{\circ}\text{C}$  的累积高温为首选因子, 比 1990 年代的临界指标上升  $1^{\circ}\text{C}$ ; 建立了 3 套预报(评估)模型, 并推荐使用以日最高气温  $\geq 36^{\circ}\text{C}$  的累积高温、日平均气温为因子的模型; 回代试验、试验报检验表明, 改进的模型、等级划分标准科学适用。

**关键词:** 中暑指数 气象模型 等级标准 高温热浪

## Developed Model between Heatstroke and Meteorological Factors and Standard for Heatstroke Index Grades in Wuhan

Chen Zhenghong<sup>1</sup> Shi Ruiqin<sup>1</sup> Li Songhan<sup>2</sup> Wang Ying<sup>2</sup> Lu Ming<sup>2</sup>

(1. Wuhan Regional Climate Center, 430074; 2. Wuhan Institute of Occupying Medicine)

**Abstract:** In order to deeply develop the meteorological prediction and climate impact assessment of heatstroke by heat wave, the daily heat stroke cases and meteorological factors from 2003 to 2005 in Wuhan are used to choose the key factors by correlative method. Three regressive models

基金项目: 中国气象局气候研究开放实验室开放课题(LCS-2006-11)、气象新技术推广项目(CMATG2006M15)、2007 年业务建设项目(高温热浪监测预警业务系统)资助

收稿日期: 2008 年 1 月 22 日; 修定稿日期: 2008 年 3 月 19 日

are set up with progressive regression on the basis of calculating the single—correlation coefficient of daily heat stroke numbers and 33 meteorological factors, and the more reasonable grade standards than original model of 1990's are also built up, and a method to calculate days with heatstroke event is designed. The results show that the factors concerned temperature are the most important, and the accumulated temperature  $\geq 35^{\circ}\text{C}$  is selected at first. By experimental test, the results show that the forecasting value and the real value are relatively identical.

**Key Words:** heatstroke index meteorological model grade standards heat wave

## 引 言

武汉市是湖北省的省会,辖三镇 13 个区,人口约为 831 万人(2005 年末),是华中地区最大的都市。因地处长江中游,每年夏季常受副热带高压控制,气流下沉增温,云量稀少,辐射强烈,时有南洋风,会出现几段持续性的晴热天气,人们会感到酷热难受,故素有“火炉”之称。随着全球气候变暖<sup>[1-4]</sup>和热岛效应加强<sup>[5]</sup>,武汉市暑热不但日益加强,而且呈现出新的特征,如夜间温度显著上升,自 1990 年代以来,日最低气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 的情况频繁出现;高温出现早,结束迟,炎热时间持续时间长,自 1994 年以来有 3 年在 9 月出现高温热浪;2003 年 8 月 1 日出现了 1951 年以来的最高气温( $39.6^{\circ}\text{C}$ );2006 年则出现了 1951 年以来多个平均气温最高值记录,包括夏季、5—9 月及年平均气温,武汉市居民度过了 56 年来最暖年和最热夏<sup>1)</sup>。

所谓高温热浪过程,是指日最高气温连续 3~5 天在某一临界温度以上(中纬度为  $35\sim 37^{\circ}\text{C}$ )并造成中暑发生的一段炎热期(hot spell)<sup>[6]</sup>。按照该标准,武汉市每年夏半年都会有几段高温热浪过程。如 2006 年夏季,武汉市共出现 5 次高温热浪过程:6 月 17—22 日、6 月 26 日至 7 月 4 日、7 月 12—22 日、8 月 13—15 日,8 月 27 日至 9 月 4 日,据不完全统计,共造成 158 人中暑,4 人

死亡。

根据 IPCC 的 4 次评估报告<sup>[2-3]</sup>,在未来很长时间,气温将继续升高,高温威胁将更严峻,定量评估这种极端气候对人体健康的影响,建立定量高温中暑评估或预报模型,对今后科学适应和应对气候变化,保障人民身体健康十分必要。早在 1999 年,有人根据武汉市 1994—1998 年逐日中暑人数和同期气象资料建立了中暑指数及等级<sup>[7]</sup>,在 2000 年又根据 1994—2000 年逐日中暑死亡人数和同期气象资料建立了暑热危险度及等级<sup>[8]</sup>,并通过媒体发布高温中暑气象预报,对预防高温中暑危害起到了积极的作用。

尽管空调使用更广泛,但随着城市规模的膨胀,人口的老龄化,生活压力的增加,以及夏季气温的升高和职业病上报制度的完善,武汉市近几年居民中暑人数显著增加。1994—2002 年每年中暑人数在 86 人以下,1997 年只有 3 人,而 2003—2007 年中暑人数在 113 人以上,2003 年达 561 人。利用最新中暑个案资料,在更多气象因子范围内寻找关键因子,研制新一代高温中暑评估模型,重新划分中暑指数等级,并增加了中暑发生天数的推算,使成果的适用性更强。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

2003—2007 年逐日中暑人数(Y)来源

1) 武汉区域气候中心. 2006 年湖北省气候影响评价, 2007 年 1 月

于武汉市职业病防治院。同期气象资料来源于湖北省气象档案馆,气象因子主要参考文献[5-7],其中当天因子 11 个,前期因子 22 个:

$x_1$ : 当日最高气温,  $x_2 \sim x_5$ : 当日及前 1~4 天的平均最高气温( $^{\circ}\text{C}$ )

$x_6$ : 当日最低气温,  $x_7 \sim x_{10}$ : 当日及前 1~4 天的平均最低气温( $^{\circ}\text{C}$ )

$x_{11}$ : 当日平均气温,  $x_{12} \sim x_{15}$ : 当日及前 1~4 天的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )

$x_{16}$ : 当日平均相对湿度,  $x_{17} \sim x_{20}$ : 当日及前 1~4 天的平均相对湿度( $\%$ )

$x_{21} \sim x_{26}$ : 当日前若干天日最高气温持续  $\geq 32, 33, 34, 35, 36, 37^{\circ}\text{C}$  的累积温度。

$x_{27}$ : 当日平均风速(m/s)

$x_{28}$ : 当日降水量(mm)

$x_{29}$ : 当日最小相对湿度( $\%$ )

$x_{30}$ : 当日平均气压(hPa)

$x_{31}$ : 当日日照时数(hr.)

$x_{32}$ : 当日总云量(成)

$x_{33}$ : 当日低云量(成)

将 2003—2005 年每年高温热浪期集中发生的时段合并,即 2003 年 7 月 1 日到 8 月 30 日、2004 年 6 月 28 日到 8 月 15 日、2005 年 6 月 12 日到 8 月 16 日共 176 天,以逐日中暑人数  $y$  为因变量,对应气象因子  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, 33$ ) 为自变量,构成完整的时间序列。

## 1.2 方法

计算  $y$  和  $x_i$  之间的单相关系数,筛选出相关系数高,生理意义明确、便于运用的气象因子,通过逐步回归建立中暑人数与气象因子的关系模型,制订中暑指数等级标准,计算出 2003—2005 年各级总天数( $d_i$ , days),再结合各级实际发生中暑总天数和总人数资料,计算出各级中暑天数发生几率( $m_i$ , 无量纲或 $\%$ )、各级平均每天中暑人数( $n_i$ , 人/天)。

另外设计了逐年中暑发生天数( $D$ )的推算公式:

$$D = \sum_{i=1}^5 (m_i \times d_i) \quad (1)$$

对任一年,即使没有中暑资料,也可利用式(1)推算该年高温中暑天数( $D$ ),利用回归模型推算该年中暑总人数( $P$ )以及各级总天数( $d_i$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 相关分析

表 1 为 3 年 176 天逐日中暑人数与气象因子的单相关系数,由表可知:

(1) 日中暑人数与各项气温、气压、日照时数显著正相关,与相对湿度、低云量显著负相关,与当日风速、降水量、总云量等因子未见相关。

(2) 中暑人数与考虑气象因子前期累积效应后相关系数有所增大。

(3) 日中暑人数与日最高气温  $\geq 32^{\circ}\text{C} \sim 37^{\circ}\text{C}$  累积温度的相关系数有随气温增高逐渐增大趋势,但与  $\geq 36^{\circ}\text{C}$  累积温度的相关系数最大,也是所有因子中最大的,比 1990 年代的临界温度上升  $1^{\circ}\text{C}$ ,最大相关系数也从 0.62 提高到 0.72<sup>[6]</sup>。

以上结果说明:高压控制、云量稀少、日照强烈、持续高温是中暑发生的至关重要的环境条件,而云量增多、湿度增大导致闷热,且湿度达到极端时往往意味着转折,即发生降雨,高温暑热会得到缓解,则往往少见中暑事件发生。

### 2.2 改进的高温中暑气象预报(评估)模型的建立

通过逐步回归共得到 3 个优化模型:

$$\begin{aligned} \text{模型 1: } Y &= 8.873 + 2.73X_{25} - 0.105X_{32} \\ (R &= 0.749, F = 111.118) \end{aligned} \quad (2)$$

表 1 逐日中暑人数与气象因子的单相关系数

序号	相关系数	序号	相关系数	序号	相关系数	序号	相关系数	序号	相关系数	序号	相关系数
1	0.346**	6	0.382**	11	0.382**	16	-0.275**	21	0.283**	27	0.046
2	0.356**	7	0.406**	12	0.398**	17	-0.312**	22	0.331**	28	-0.067
3	0.356**	8	0.409**	13	0.399**	18	-0.327**	23	0.412**	29	-0.263**
4	0.352**	9	0.407**	14	0.396**	19	-0.330**	24	0.676**	30	0.323**
5	0.346**	10	0.405**	15	0.391**	20	-0.330**	25	0.720**	31	0.219**
								26	0.668**	32	-0.334**
										33	-0.146

“\*\*”表示通过信度为 0.01 的显著性检验,当日因子序号有下划线。

模型 2:  $Y = -19.754 + 2.68X_{25} + 0.71X_{11}$   
 $(R = 0.734, F = 101.901)$  (3)

模型 3:  $Y = 1.189 + 2.88X_{25}$   
 $(R = 0.720, F = 188.264)$  (4)

可见,当日前若干天日最高气温持续  $\geq 36^\circ\text{C}$  的累积温度( $X_{25}$ )对中暑发生至关重要;湿度仍然未能进入模型;3 个模型的效果都很好。考虑到日均总云量的定量预报还不成熟和方程的稳定性,推荐使用模型 2。本次进入模型的累积温度临界值为  $36^\circ\text{C}$ ,比 1990 年代模型提高了  $1^\circ\text{C}$ 。

### 2.3 改进的中暑指数等级标准的制订

为了便于开展预报服务和综合评估,需要制订一套高温中暑等级标准。以武汉市一日内发生中暑人数  $\leq 1$  作为最低级(1 级),一日内中暑人数  $\geq 7$  作为最高级(5 级),其间进行等间隔等级划分,如表 2 所示。

表 2 高温中暑指数的等级划分和命名

等级	名称	指数	是否预警	预警色标
1	不会发生中暑	$<1.0$	否	
2	可能发生中暑	$[1.0 \sim 3.0)$	是	兰
3	较易发生中暑	$[3.0 \sim 5.0)$	是	黄
4	易发生中暑	$[5.0 \sim 7.0]$	是	橙
5	极易发生中暑	$\geq 7.0$	是	红

它与原标准<sup>[6]</sup>的差别主要在各级临界值均有所提高,名称也有改变,并增加了预警色标。

### 2.4 等级标准效果检验

应用模式 2 及表 2 的高温中暑指数等级

标准,对武汉市 2003—2005 年每年 6 月 1 日至 8 月 31 进行逐日中暑指数及等级进行了回代计算,结合实际中暑天数和中暑人数,可确定式(1)、(2)待定系数  $m_i$ 、 $n_i$ (见表 3),检验等级划分是否合理。结果表明:中暑天数发生几率( $m_i$ )和平均每天中暑人数( $n_i$ )各级之间差别明显,从 1 级到 2 级,均约增加 1 倍;但从 2 级到 3 级,增加 1.5 到 4 倍;从 3 级到 4 级,增加 2 到 3 倍;从 4 级到 5 级, $m_i$  增加 0.5 倍, $n_i$  则增加了 5 倍。84.4% 的中暑天数和 96.0% 的中暑人数发生在 4 级以上,而 4 级天数只占总天数的 46.0%,表明从 3 级到 4 级(或 5 级),气象条件对人体的危害发生了质的变化。

表 3 回代效果检验与待定系数  $m_i$ 、 $n_i$

等级	各级天数	中暑天数*	中暑天数发生几率 $m_i$	实际中暑人数	平均每天中暑人数 $n_i$
1 级	80	5	0.0625	6	0.075
2 级	36	4	0.111	5	0.139
3 级	33	9	0.273	22	0.667
4 级	93	64	0.688	241	2.591
5 级	34	33	0.971	560	16.471

\*任一天只要有中暑事件发生(无论人数多少),记 1 天,否则为 0

同样,对 2006—2007 年两年 6 月 1 日至 8 月 31 日的逐日中暑指数及等级进行了计算,进一步检验等级划分的适用性(见表 4)。结果表明,各级别间有关评判指标差别明显,如从 3 级到 4 级,平均每天中暑人数增加了 2.3 倍,从 4 级到 5 级,平均每天中暑人数增加了 2.4 倍。大部分中暑事件发生在 4 级以上,62 天有中暑发生,占全部中暑天数的 76.5%,中暑人数 242,占全部中暑人数的

90.3%;中暑等级众数为 4 级,明显向高等级偏移,说明这个夏天很酷热。

表 4 预估效果检验

等级	各 级 天 数	中 暑 天 数 *	中 暑 天 数 发 生 几 率	实 际 中 暑 人 数	平 均 每 天 中 暑 人 数
1 级	33	2	0.061	2	0.061
2 级	29	5	0.172	8	0.276
3 级	34	12	0.353	16	0.471
4 级	59	34	0.576	91	1.542
5 级	29	28	0.966	151	5.207

以上分析充分说明表 2 的等级划分合理、可操作性强。

### 2.5 推算效果评估

对每年 6 月 1 日至 8 月 31 日,根据式(1)推算出中暑总天数( $D$ ),根据模式 2 推算出中暑总人数( $P$ ),并与实际情况进行比较分析。

可见,逐年中暑天数、中暑人数的推算效果较好,如推算的中暑天数与实际中暑天数最多只差 7 天,2007 年完全一致;推算的中暑人数与实际中暑人数,前 2 年误差极小,仅差 1~2 人,但后 3 年有所高估,主要是因为 2003 年的严重高温后,政府采取了大量有力措施,抗御高温危害,有效地减少人员伤亡。

表 5 推算年中暑天数、人数及与实际情况比较

年	推 算 天 数	实 际 天 数	误 差 /天	推 算 人 数	实 际 人 数	误 差 /人
2003	42	38	4	561	560	1
2004	32	33	-1	141	143	-2
2005	41	34	7	224	131	93
2006	44	42	2	228	154	74
2007	37	37	0	195	114	81

\* 误差=推算值-实际值

2003 年 8 月 1 日出现了 1951 年以来的极端最高气温 39.6℃,日中暑人数达到 131 人,次日最高气温 38.9℃,日中暑人数达到 112 人,前后几天中暑人数均在 20~67 人之

间。而 2006 年高温开始得早,结束晚,危害时间长,期间有 5 次高温热浪过程,推算的中暑人数也是 2006 年多,但极端高温程度比 2003 年轻。

### 3 讨论

武汉市抗御高温危害的经验是十分宝贵的,如在高温期间,政府出资设置大量临时降温场所,安装空调,免费提供给老人、民工、流动人员;实施江湖连通,打通冷气流通道,降低城区温度;实施“冬暖夏凉”工程提速,通过集中供应凉水,建筑节能,已惠及几十万人;人们的防范意识加强。但有效的人工干预将使预测或评估难度加大,今后应考虑这些因子的影响,或建立动态模型,保证最新资料进入模型,提高预测或评估精度。

### 参考文献

- [1] Houghton, J T, Ding, Yi-Hui, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001.
- [2] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.
- [3] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007 (in Press).
- [4] 任国玉. 地表气温变化研究的现状和问题 [J]. 气象, 2003, 29(8): 3-6.
- [5] Chen Zheng-Hong, Wang Hai-Jun, Ren Guo-Yu. Urban Heat Island Intensity in Wuhan, China [N]. Newsletter of IAUC (International Association of Urban Climate). 2006, 17: 7-8.
- [6] 谈建国, 黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 680-68.
- [7] 杨宏青, 陈正洪, 刘建安, 等. 武汉市中暑发病的流行病学分析及统计预报模型的建立 [J]. 湖北中医学院学报, 2000, 2(3): 51-52.
- [8] 陈正洪, 王祖承, 杨宏青. 城市暑热危险度统计预报模型 [J]. 气象科技, 2002, 30(2): 98-101, 104.