# 城市暑热危险度统计预报模型

陈正洪　王祖承　杨宏青
( 湖北省气象科学研究所 , 武汉　430074)

陈安珞　刘建安
( 武汉市劳动卫生职业病防治院 , 武汉　430071 )

马　骏
( 武汉市桥口区卫生局防疫站 , 武汉　430030)

摘要　利用武汉市 5 个区 1993 ~ 2000 年中暑死亡个例 ,统计了中暑死亡的时间分布 、性别 、年龄 、区域差异等流行病学特征 ,进行了中暑死亡的气候分析 ,计算了中暑死亡数与 27 个气象因子的单相关系数 ,找出了关键气象因子为持续不小于 37 ℃的有效累积温度 。利用逐步回归方法建立了逐日中暑死亡数的统计预报模型 ,并将高温危险度划分为 5 个等级 ,经回代和试报检验 ,预报效果较好 。

关键词　中暑死亡　流行病学特征　有效累积温度　高温危险度等级预报

## 引言

高温热浪易引起大量中暑事件并对其中承受力较差者尤其是 60 岁以上的老年人危害最大 ,可以导致患者多种功能衰竭 ,最终发生死亡 ,从而使人群死亡率增加 ,在死因谱中中暑死亡位次提前 ,已引起国内外学者的高度关注[1 ~ 4] 。国内对中暑死亡气象研究很少 ,湖北省卫生防疫站曾在 1988 年高温热浪发生后对 60 岁以上老年人中暑死亡与气温的关系进行了简单分析 ,发现中暑死亡人数随气温 、年龄上升呈指数增加[4] 。武汉是“三大火炉”之一 ,夏季高温频繁 ,危害甚重 ,气象工作者自 20 世纪 70 年代以来一直致力于中暑气象分析和预报 ,取得了一些成果[3 ,5 ,6] ,本文利用最新中暑死亡资料 ,在流行病学特征分析的基础上 ,通过医疗气象统计分析 ,寻找导致中暑死亡的关键期和关键气象因子 ,建立中暑死亡气象预报模型及其服务指标 。

## 1　资料

武汉市 5 个区( 桥口 、武昌 、青山 、江汉 、汉阳) 的卫生防疫站慢性病科 1993 ~ 2000 年中暑死亡 184 例 。病例资料包括姓名 、年龄 、性别 、发病地点 、中暑死亡日期等 ,其中 1995 ~ 2000 年各区资料较完整 ,共计死亡 117 例 。

1995 ~ 2000 年 5 ~ 9 月逐日最高气温 、最低气温 、平均气温 、平均相对湿度及平均风速等气象资料来源于武汉气象中心 。

## 2　中暑死亡的流行病学特征分析

### 2.1　中暑死亡的时间分布特征

统计 1995 ~ 2000 年 6 ~ 9 月逐月 、逐旬中暑死亡数及其占死亡总数的比例详见表 1 、表 2 。

表 1　武汉市 1995 ~ 2000 年逐月中暑死亡数及其占死亡总数的比例( %)

| 年 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 合计 | 百分数/ % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1995 | 1 | 38 | 5 | 14 | 58 | 49.6 |
| 1996 | 0 | 5 | 4 | 0 | 9 | 7.7 |
| 1997 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0.9 |
| 1998 | 2 | 20 | 10 | 0 | 32 | 27.4 |
| 1999 | 0 | 1 | 2 | 1 | 4 | 3.4 |
| 2000 | 2 | 9 | 2 | 0 | 13 | 11.1 |
| 合计 | 5 | 73 | 24 | 15 | 117 | |
| % | 4.3 | 62.4 | 20.5 | 12.8 | | 100 |

中国气象局气象科技服务应用技术开发项目资助
收稿日期 :2001 年 5 月 27 日 ;定稿日期 :2002 年 2 月 4 日
作者简介 :陈正洪 ,男 ,湖北大冶人 ,1964 年 1 月出生 ,理学硕士 ,正研级高工 ,主要从事应用气象学研究

表 2　武汉市 1995 ~ 2000 年逐旬中暑死亡数及其占死亡总数的比例( %)

| 年 | 6 月 | | | 7 月 | | | 8 月 | | | 9 月 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 上旬 | 中旬 | 下旬 | 上旬 | 中旬 | 下旬 | 上旬 | 中旬 | 下旬 | 上旬 | 中旬 | 下旬 |
| 1995 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 34 | 4 | 1 | 0 | 14 | 0 | 0 |
| 1996 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1997 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1998 | 1 | 1 | 0 | 2 | 16 | 2 | 3 | 1 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 1999 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 2000 | 1 | 1 | 0 | 1 | 6 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合计 | 2 | 2 | 1 | 4 | 26 | 43 | 14 | 3 | 7 | 15 | 0 | 0 |
| 百分数 % | 1.7 | 1.7 | 0.9 | 3.4 | 22.2 | 36.8 | 12.0 | 2.6 | 6.0 | 12.8 | 0 | 0 |
| 排名 | 8 | 8 | 9 | 6 | 2 | 1 | 4 | 7 | 5 | 3 | | |

对表 1 、表 2 进一步分析可知:

(1) 中暑死亡数年际间差异悬殊,最多的 1995 年达 58 例,占 1995 ~ 2000 年死亡总数 117 例的 49.6 %;其次是 1998 年,占总数的 27.4 %,这两年合计占总数的近 77 %。1997 、1999 年则很少,只有 1 例和 4 例。最多年与最少年的中暑死亡数比值为 58,而最多年与最少年的中暑数比值为 29[6],可见中暑死亡的年际差异比中暑大。

(2) 中暑死亡数月际差异显著,呈单峰型。1995 ~ 2000 年 6 年合计,7 月份以中暑死亡 73 例为高峰月,占总数的 62.4 %,8 月 24 例次之,占总数的 20.5 %,这两个月合计占总数的 80 %以上。7 、8 两月几乎每年都有中暑死亡发生(仅 1997 年 7 月例外)。9 月只比 8 月略少,主要是 1995 年 9 月上旬一段高温中暑死亡较多,其余年份稀有发生,6 月最少,有半数以上年份的 6 、9 月没有中暑死亡发生。6 年合计最多月与最少月的中暑死亡数比值为 14.6,而中暑数比值为 5[6],表明中暑死亡比中暑的月际差异更大。

(3) 中暑死亡数的旬分布呈双峰型,7 月下旬为主峰(43 例,占总数的 36.8 %) ,9 月上旬为次峰。6 月上旬至 7 月上旬偶有中暑死亡发生(1 ~ 4 例不等) ,此时是“霉雨”期,雨多气温低;7 月中旬陡增,7 月下旬最多,8 月上旬有所减少,3 旬共 83 例,占总数的 70.9 %,此时正是热浪滚滚的“三伏”期;8 月中旬骤减至 3 例,此时正是立秋时节,夜间降温快,暑气大减;但 8 月下旬中暑死亡数又略增加,9 月上旬升到次极值,主要是近年气候格局调整,8 月下旬至 9 月上旬常有一段异常高温出现。此后再没有中暑、中暑死亡。

2.2　中暑死亡的年龄分布特征

图 1 给出中暑死亡 166 例、中暑 315 例以每 10 岁为一段的年龄分布曲线。

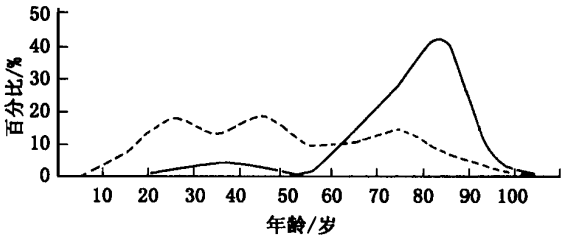


图 1　武汉市居民中暑死亡(实线) 、中暑(虚线)的年龄分布曲线(每 10 岁一段)

从图 1 看出,二者分布型有很大区别:

(1) 中暑死亡年龄分布曲线是单峰型,以 80 ~ 89 岁为高峰,70 ~ 79 岁次之,60 ~ 69 岁和 90 ~ 100 岁分别列第 3 、4 位,60 岁以上合计 149 例,占总数的 89.8 %,60 岁以下仅 17 例,占总数的 10.2 %。考虑到 60 岁以上人群仅占全部人群的 10 %左右,60 岁以上老年人中暑死亡率约为 60 岁以下的 80 倍即(149/17) / (10 %/ 90 %) 。20 岁以下尚未见中暑死亡记录。20 ~ 60 岁 5 个年龄段仅偶有中暑死亡发生。

(2) 中暑年龄分布相对较均匀,呈三峰型,依次出现在 40 ~ 49 岁、20 ~ 29 岁、70 ~ 80 岁,可能与 40 ~ 49 岁的人承受的劳动强度大、20 ~ 29 岁的人最多、70 岁以上的人体质明显下降有关。10 岁以下的儿童没有中暑,10 ~ 19 岁有 23 例,即虽有中暑但没有死亡。60 岁以下中暑 211 例,占总数的 67 %,表明中暑多发生在 60 岁以下,60 岁以上 104 例。60 岁以上老年人中暑几率约为 60 岁以下的 4.5 倍即(104/ 211) / (10 %/ 90 %) 。

(3) 分析以 5 岁为一年龄段统计并绘制中暑死亡和中暑的年龄分布(图略) ,可知中暑死亡在 60 岁、75 岁两次陡增,在 80 ~ 84 岁最集中(竟占总数的 28.3 %) ,95 岁以上则少有发生。而中暑则以 20 ~ 24 岁、40 ~ 44 岁最集中。

2.3　中暑死亡的区域差异

武汉市 5 个区 1995 ~ 2000 年中暑死亡共 140 例,中暑死亡数从多到少依次为桥口区(73 例) 、武昌区(33 例) 、江汉区(17 例) 、汉阳区(12 例) 、青山区(5 例) ,分别占总数的 52.1 %、23.6 %、12.1 %、

8.6 %、3.6 %。居首位的桥口区为老城区,房屋建筑最拥挤、城市盛夏热岛最强[9]、老年人口最多、人口最稠密,另外影响因素相似但程度相对弱些的武昌区、江汉区居其后,青山区是新城区人口少且分布密度小而居末位。

### 2.4 中暑死亡的性别差异

据不完全统计,中暑死亡有着明显的性别差异,武汉市5个区1994~2000年中暑死亡184例中,男性64例、女性120例,分别占总数的34.8%、65.2%,女性约为男性的2倍,可能是在高龄人口中女性比男性多的缘故。相反,1994~1998年中暑246例中,男性157例、女性92例,分别占总数的63.1%、36.9%,男性约为女性的2倍[6],可能原因是城市中男性比女性承担更多的户外劳动。

## 3 中暑死亡的气候分析

中暑死亡是极端不利气候条件(持续高温)的产物,表3是1995~2000年6~8月及9月上旬武汉市平均气温($T$)及其距平($\Delta T$)。

表3 武汉市1994~1998年6~8月及9月上旬平均气温及其距平(℃)

| | 6月 | | 7月 | | 8月 | | 9月上旬 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T$ | $\Delta T$ | $T$ | $\Delta T$ | $T$ | $\Delta T$ | $T$ | $\Delta T$ |
| 1995年 | 25.8 | 0.3 | 30.0 | 1.3 | 28.9 | 0.5 | 30.0 | 4.7 |
| 1996年 | 25.5 | 0.0 | 28.2 | -0.5 | 28.4 | 0.1 | 24.9 | -0.4 |
| 1997年 | 26.4 | 0.9 | 28.2 | -0.5 | 29.6 | 1.3 | 26.6 | 1.3 |
| 1998年 | 26.2 | 0.7 | 29.9 | 1.2 | 29.7 | 1.4 | 26.8 | 1.5 |
| 1999年 | 25.0 | -0.5 | 28.1 | -0.6 | 27.4 | -0.9 | 29.3 | 4.0 |
| 2000年 | 27.3 | 1.8 | 31.1 | 2.4 | 287 | 0.4 | 25.0 | -0.3 |
| 平均 | 25.5 | | 28.7 | | 28.3 | | 25.3 | |

注:$\Delta T$根据为1961~1990年的$T$平均值计算

将表3与表1、表2对照分析可知:

(1) 1995、1998、2000年出现热夏,7、8月平均气温均为较大正距平,3年中中暑死亡数依次为58、32、13例,合计103例,占6年总数的88%。其余3年是凉夏,7、8月平均气温往往为负距平或较小正距平,所以中暑死亡数少(1~9例)。

(2) 1995、1998及2000年7月平均气温均高于1996、1997、1999年7月平均气温,且高出多年平均值1.2~1.3℃,这3年7月的中暑死亡数明显偏多,依次为38、20、9例,共67例,占6年7月中暑死亡总数的91.8%;而1996、1997、1999年7月平均气温相对低一些且距平为负,这3年7月的中暑死亡数远远少于其余3年,依次为5、0、1例,可见1997年7月没有中暑死亡。1998年8月平均气温为最大正距平(1.4℃),中暑死亡数也是该月最多(10例)。

(3) 6、9月平均气温较7、8月低3~8℃,所以6、9月少有中暑死亡发生,但一旦气温异常偏高,仍会有中暑集中发生。如1995年9月有14例,因为当年9月上旬出现了"秋老虎"天气,持续7天日最高气温≥35℃。

## 4 中暑死亡气象预报模型的建立

为寻找出影响中暑死亡的关键气象因子和关键期,参考了国内外中暑气象分析文献[1~9],选择27个可能有影响的当天和前期气象因子,即:

$x_1$:当日最高气温,$x_2$~$x_5$:当日及前1~4天的平均最高气温,$x_6$:当日最低气温,$x_7$~$x_{10}$:当日及前1~4天的平均最低气温,$x_{11}$:当日平均气温,$x_{12}$~$x_{15}$:当日及前1~4天的平均气温,$x_{16}$:当日平均相对湿度,$x_{17}$~$x_{20}$:当日及前1~4天的平均相对湿度,$x_{21}$:当日平均风速,$X_{22}$~$X_{27}$:当日前若干天日最高气温持续≥32℃、≥33℃、≥34℃、≥35℃、≥36℃、≥37℃的有效累积温度。

以1995年7月15日至8月8日、1998年7月10日至7月21日及8月21日至8月27日的逐日中暑死亡数$y$(共52个样本)为因变量,相应的27个气象因子$x_i$($i=1,2,...,27$)为自变量,计算$y$和$x$之间的单相关系数,并进行显著性检验(表4)。

表4 中暑死亡数与27个气象因子的单相关系数($r$)

| 因子序号 | $r$ | 显著检验 | 因子序号 | $r$ | 显著检验 | 因子序号 | $r$ | 显著检验 | 因子序号 | $r$ | 显著检验 | 因子序号 | $r$ | 显著检验 | 因子序号 | $r$ | 显著检验 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.419 | ✓ | 6 | 0.215 | | 11 | 0.385 | ✓ | 16 | -0.247 | | 21 | -0.173 | | 26 | 0.507 | ✓ |
| 2 | 0.496 | ✓ | 7 | 0.363 | ✓ | 12 | 0.474 | ✓ | 17 | -0.304 | * | 22 | 0.103 | | 27 | 0.531 | ✓ |
| 3 | 0.502 | ✓ | 8 | 0.364 | ✓ | 13 | 0.459 | ✓ | 18 | -0.319 | * | 23 | 0.374 | ✓ | | | |
| 4 | 0.501 | ✓ | 9 | 0.455 | ✓ | 14 | 0.483 | ✓ | 19 | -0.383 | ✓ | 24 | 0.358 | ✓ | | | |
| 5 | 0.467 | ✓ | 10 | 0.426 | ✓ | 15 | 0.442 | ✓ | 20 | -0.407 | ✓ | 25 | 0.394 | ✓ | | | |

注:"✓"、"*"分别表示通过信度为0.01、0.05的显著性检验,当日因子序号有下划线

由表 4 可知:

(1) 温度和湿度因子在考虑了前 1 ~ 4 日累积效应后与中暑死亡的相关系数均比只考虑当日温度和湿度时有较大幅度提高,且以考虑前 2 ~ 3 日最好,而且当日最低气温、相对湿度与中暑死亡相关,表明高温热浪只有在持续 3 天以上才会对人体产生致命的伤害。

(2) 虽然过去的研究曾指出夜间低温协同白天的高温共同导致大量中暑[3,5],但表 4 中的数字指出中暑死亡与最高气温的相关系数大于与最低气温的相关系数,表明白天的极端高温才是真正的杀手。

(3) $y$ 与累积温度的相关系数随起点温度的升高呈逐渐增大趋势,与不小于 37 ℃累积温度的相关系数最大(0.531)。起点温度在 33 ℃以上的所有方案的相关系数均通过了信度 0.01 的显著性检验,只有 32 ℃的方案未能通过显著性检验。表明只有当外界温度超过人的体表温度(33 ℃)才会有中暑死亡可能,而导致大量中暑死亡的温度(36 ~ 37 ℃)则比导致大量中暑的温度(35 ℃)[6]高 1 ~ 2 ℃。

(4) $y$ 与湿度为显著负相关,表明湿度大时虽闷热但云量较多或降雨已发生,温度不高,中暑很少[6],死亡也不容易发生。

(5) $y$ 与风速呈微弱负相关且未通过显著性检验。

运用逐步回归方法建立的 $y$ 与 $x_i$ 的拟合方程如下:

$$y = -12.843 + 0.444\,x_{12} + 1.498\,x_{27} \qquad (1)$$

式(1)的复相关系数为 0.629,拟合率 75 %,$F = 16.0$。

将 $y$ 划分为 5 级,称为高温危险度等级,其指标范围见表 5。

表 5　高温危险度等级

| 1 级 | 2 级 | 3 级 | 4 级 | 5 级 |
|---|---|---|---|---|
| $y \leqslant 0$ | $0 < y \leqslant 0.5$ | $0.5 < y \leqslant 1.0$ | $1.0 < y \leqslant 2.0$ | $y > 2.0$ |
| 很低 | 低 | 中等 | 高 | 很高 |

应用该等级标准进行历史样本回代及独立样本试报检验,结果见表 6、表 7。

表 6　高温危险度等级预报回代检验(52 日)

| | 实有日数 | 有中暑死亡的日数 | 中暑死亡几率 | 中暑死亡人数 | 平均每日的中暑死亡数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 级 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 级 | 7 | 2 | 28.6 % | 2 | 0.29 |
| 3 级 | 6 | 3 | 50.0 % | 5 | 0.83 |
| 4 级 | 26 | 15 | 57.7 % | 33 | 1.27 |
| 5 级 | 11 | 9 | 81.8 % | 39 | 3.55 |

表 7　高温危险度等级预报试报检验(2000 年 7 ~ 8 月共 62 日)

| | 实有日数 | 有中暑死亡的日数 | 中暑死亡几率 | 中暑死亡人数 | 平均每日中暑死亡数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 级 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 级 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 级 | 15 | 1 | 6.67 % | 1 | 0.07 |
| 4 级 | 9 | 2 | 22.2 % | 6 | 0.67 |
| 5 级 | 6 | 2 | 33.3 % | 2 | 0.33 |

从表 6、表 7 看出,随着高温危险等级从低到高,中暑死亡几率和平均每日中暑死亡人数都是增加的,尤其从 2 级到 3 级增幅最大。在进行回代的 52 日中,3 ~ 5 级日子里中暑死亡数 77 例,占总数 79 例的 97.5 %;在 2000 年 7 ~ 8 月试报的 62 日中,3 ~ 5 级日子里中暑死亡数 8 例,占总数 9 例的 88.9 %。可见,高温危险度 5 级划分较为合理,制作并发布该项等级预报对防暑降温避免死亡具有可操作性。

## 5　小结

(1) 中暑死亡数的年际、月际差异大于中暑数,但二者趋势一致。热夏年中暑死亡数明显高于凉夏年,1995 年最多达 58 例,1997 年最少仅 1 例。中暑死亡只发生在 6 ~ 9 月,又以 7 月最多,8 月次之,6、9 月偶有发生。其中又以 7 月中旬或盛夏“三伏”期最集中,一旦“秋老虎”出现,8 月下旬至 9 月上旬就有可能出现死亡次峰。

(2) 中暑死亡的年龄分布为单峰型,80 岁左右出现峰值,且 89.8 %集中发生在 60 岁以上;中暑为三峰型,分别出现在 40 ~ 49 岁、20 ~ 29 岁、70 岁,且 65.4 %集中发生在 60 岁以下。60 岁以上老年人中暑死亡几率是 60 岁以下的 80 倍,而中暑事件该比值只有 4.5。以老年人口居多的老城区居民中暑死亡几率明显比新城区高。女性中暑死亡几率高于男性约 1 倍,相反男性中暑几率则高于女性(约 1 倍)。所以搞好高温热浪期老年人的防暑降温工作致关重要。

(3) 中暑死亡数与前期气象因子的相关好于与当日气象因子的相关,大于等于 36 ~ 37 ℃以上累积温度与中暑死亡数相关最好,持续极端高温是引发大量中暑死亡的根本原因。中暑死亡与湿度为显著负相关,与风速不相关。

(下转 104 页)

(上接 101 页)

(4) 建立了逐日中暑死亡数的统计模型,并制定了高温危险度 5 级划分标准,经回代及预报检验效果较好。

## 参考文献


1 Karacostas T S, Pennas P J, Mitas C M. On The Study of Heat Wave Events in Thessaloniki, Greece, During The Last 30 Years. In: Proceedings of 14th International Congress of Biometeorology. Slovania, 1996: 72 - 79

2 茅志成,邬堂春.现代中暑诊断治疗学.北京:人民军医出版社,2000

3 武汉中心气象台.武汉中暑人数与气象因子的逐步回归分析.见:全国应用气候会议论文集.北京:科学出版社,1977

4 何权,何祖安,郑有清.炎热地区热浪对人群健康影响的调查.环境与健康杂志,1990,7(5):206 - 211

5 乔盛西.武汉中暑人数与体感温度、CDH 的关系以及中暑发病的预报.湖北气象,1992,11(2):29 - 32

6 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.湖北中医学院学报,2000,2(3):51 - 52,62

7 茅志成,恽振先,杜学利,等.南京市重症中暑发病与气象因素的关系.南京铁道医学院学报,1998,17(1):4 - 7

8 王长来,茅志成,程极壮.气象要素与中暑发生关系的探讨.气候与环境研究,1999,4(1):40 - 43

9 陈正洪.汉口盛夏热岛效应的统计分析及应用.见:湖北省自然灾害综合防御对策论文集.北京:地震出版社,1990:86 - 88