

一张新的风寒列线图

W. G. Rees

(斯科特极地研究所, 剑桥大学)

1 热量损失和等效温度

风寒(wind-chill)概念的提出是试图描述冷空气以风的形式运动时人们所经受的寒冷感觉(以及裸露或冻伤的实际危险)。虽然在确定寒冷的主观感觉中包含许多因素,最重要的是身躯热量损失的速率。确定热量损失的基本原理非常简单。在有风条件下,由于身体加热的空气被带走,使身体散发热量的速率增大。为测定这种现象已进行了许多试验,最早是 Dorno (1925, 引自 Cena 等,

1966), Landsberg (1972) 总结了 70 年代以前的测量结果。其中最著名的测定是 Siple 和 Passel (1945) 进行的, 它仍是许多正式风寒表的基础。它给出的裸露干皮肤单位面积热量损失的速率为

$$H = (12.15 + 11.63 \sqrt{v} - 1.163v)(33 - T) \quad (1)$$

其中 v 为风速, 单位用 m/s , T 为气温, 单位用 $^{\circ}\text{C}$, H 单位用 W/m^2 (原始方程中用千卡/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$)。后来 Court (1945) 把方程(1)调整为

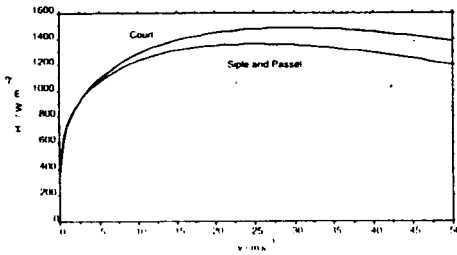


图1 根据 Siple 和 Passel (1945) 和 Court (1948) 的模式计算的裸露皮肤热损失率在气温为 0°C 时随风速的变化

$$H = (10.47 + 12.67 \sqrt{v} - 1.163v)(33 - T) \quad (2)$$

图1给出 $T=0$ 时 H 作为 v 的函数, 以上两个表达式的不同。图中结果表明, Siple 和 Passel 的模式有一极限, 即风速为 25m/s (方程(1)) 或 30m/s (方程(2)) 时, H 达到最大值, 然后 H 随风速的增大而减小。此结果很明显在物理上是不符合实际的, 原因是他们的原始资料中没有包含很大的风速。然而, 模式的此特性已导致在某些正式风寒表中认定风速大于 40mph (18m/s) 就很少会再加大寒冷效果 (Steadman, 1971)。

通常把风寒表示为静止空气的等效温度, 如将这个定义应用到方程(2)中, 其结果为

$$(10.47 + 12.67 \sqrt{v} - 1.163v)(33 - T) = 10.47(33 - T_e)$$

T_e 为静止空气 ($v=0$) 中的等效温度, 求得 T_e 为

$$T_e = 33 - (33 - T)(1 + 1.21 \sqrt{v} - v/9) \quad (3)$$

即使在风速比较小时, 方程(3)的结果也是不合理的, 如 $v=4$ (小风) 和 $T=0$, 等效温度 $T_e = -65^{\circ}\text{C}$ 。Siple 和 Passel 为避免这个问题, 定义等效温度为在风速 5mph (2.2m/s) 时会产生相等 H 值的温度。按此变动, 由方程(2)得到下面的 T_e 公式

$$T_e = 33 - (33 - T)(0.390 + 0.473 \sqrt{v} - 0.043v) \quad (4)$$

采用上例中 $v=4$ 和 $T=0$, 得出 $T_e = -5^{\circ}\text{C}$, 其结果显然地比较合理。

Steadman (1971) 考虑到服装、新陈代谢、肺部干的和蒸发的热量损失、辐射、对流, 并采用裸露皮肤为 30°C 的比较符合实际的值, 得到人体热量损失更加复杂的模式。他还提出了对运动中人们的有效风速的概念。根据他的模式, 得到裸露皮肤单位面积上热损失率的方程为

$$H = 16.3 + 0.22(37 - T) + (30 - T) \left[\begin{array}{l} 0.226(T/100 + 2.73)^3 + \\ 0.17(T/100 + 2.73)^2 + \\ (4.93 - 0.0109T)f(v) \end{array} \right] \quad (5)$$

其中

$$f(v) = (v^2 + 2 + 2.1(2.9 - v)^{1/2})^{0.375} \quad v < 2.9$$

$$f(v) = (v^2 + 2)^{0.375} \quad v \geq 2.9$$

H 的单位为 W/m^2 。

图2给出按方程(5)和 Court 公式(方程2)在 0°C 气温时计算结果的比较。

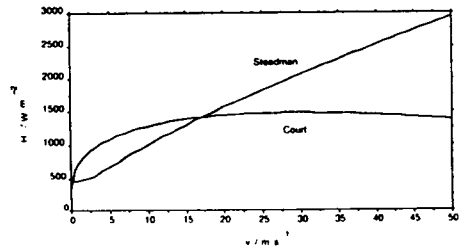


图2 与图1相同, 但根据 Steadman (1971) 和 Court (1948) 的模式

由图2可见, 由于 H 随 v (在 T 固定下) 的增加原则上没有极限, Steadman 的模式在风速较大时是比较合乎实际的。但方程(5)在风速为 0 时得到的等效温度仍然很低。对于气温为 0°C 和风速仅 5m/s , 等效温度约为 -17°C , 而风速为 10m/s 时, 等效温度低于 -40°C 。虽然, 这些值在评估裸露皮肤热量损失时可能合乎实际, 但明显地没有给出人体在充分衣着条件下寒冷的主观感觉 (En-

nemoser 等,1991)。后然 Steadman(1984)改进了他 1971 年的模式,对不同衣着个人,计算出等效温度随风速和温度变化的表格,对有关日射和相对湿度大小作了合理假设。他的表格中的资料给在图 3 中,成为英国天气预报中风寒等效温度的基础。

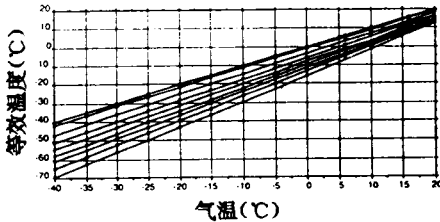


图 3 Steadman(1984)计算的风速为 0(上线)、2、4、6、8、10、12、15 和 20m/s(下线)的等效温度

2 寒冷感觉

尽管风寒表示为裸露皮肤单位面积热量损失的速率具有生理意义,但对于寒冷条件下户外探险活动的人们不能直接使用。甚至等效温度概念的用处也是有怀疑的,由于生活在远离极区的大多数人没有受过远低于-20℃的静止空气温度的足够经验,因而不能解释等效温度。可能比较有用的和一些风寒图提供的意义,是一个等效感觉表(凉、冷、很冷等等),特别是如它能指出可能冻伤的等效感觉。当然这样的分类除了给出裸露肌肉冻伤的危险以外是主观的,人群中各人经受的寒冷感觉,将取决于许多因子,而不是仅与温度和风速有关。衣服的质量和遮体程度,前期暴露和体温、新陈代谢率、颤抖反应的发展,一般健康状况以及实际的心理因素都会起到一部分作用。因此,采用这种方法简化纯环境因子,以使人和衣服因素能以分类的感觉进行比较,这是一种行之有效的方法。把志愿者的报告与经 Court(1948)改进的 Siple 模式所得热量损失的结果联系起来, Terjung(1966)采用对寒冷感觉的主观描述赋予一个数值。他的结果粗略地给在表 1 中。

根据 Court 的公式计算出冻伤发生的热

表 1 单位面积热量损失的速率 H , 根据 Terjung (1966)的结果,对应于寒冷感觉的不同类型, H 单位用 W/m^2

感觉类型	H 范围 (W/m^2)
凉	$H < 700$
非常凉	$700 < H < 950$
寒冷	$950 < H < 1250$
非常寒冷	$1250 < H < 1450$
严寒	$1450 < H < 1700$
冰冻严寒	$1700 < H$

量损失率指标为 $1700W/m^2$,这个数字已得到其它观测者(Landsberg, 1972)的证实,因此,与其它分类方法相比主观性小些。

如上所述, Siple 和 Passel 的公式(方程 1)和即使经 Court 改进的方程(2),作为裸露皮肤热量损失率的模式是不符合实际的。后来 Steadman(1971, 1984)的工作,是最全面的,对公式作了重大改进。然而,正如 Dixon(1991)指出的,用在 Terjung 主观分类的 H 值已应用到这些改进的模式中,这可能产生危险的结果。作为例子, Dixon 让气温为-10℃,风速为 10mph(4.5m/s),根据 Court 的公式就得到热量损失为 $1350W/m^2$ (即非常寒冷),相反根据 Steadman 的公式得到热量损失率为 $770W/m^2$,用 Terjung 的方案,这仅仅能归类为非常凉。

Dixon 研究了这个问题,他把对应于 Terjung 感觉分类的风速与气温条件与 Steadman 公式所得到的等效温度作了仔细比较。这是一个有效的做法,因为 Court 公式和 Steadman 公式预测的 H 值对于小于 30m/s 的风速是单调的, Court 模式在风速大于 30m/s 时肯定是无效的, Dixon 在分析中仅把风速延伸到 22m/s。Dixon 发现对于 Terjung 分类的每一类,风速和气温组合的范围,与 Steadman 模式定义的有效温度范围相当一致。因此他提出了用表 2 中 Terjung 的感觉分类解释 Steadman 的等效温度。

3 风寒列线图

由图 3 可见,等效温度与气温的关系曲线实际上是直线,这些线在较高温度处聚在

表 2 按 Dixon(1991)的文章,对应于 Terjung 感觉分类的等效温度值($T_e, ^\circ\text{C}$)(按 Steadman 1984 年的公式计算)

凉	$10 < T_e < 15$
非常凉	$0 < T_e < 10$
寒冷	$-10 < T_e < 0$
非常寒冷	$-15 < T_e < -10$
严寒	$-25 < T_e < -15$
冰冻严寒	$T_e < -25$

一起,实际上,在温度达到约 42.6°C 时,变成了一条直线。其结果在数学上可以写成

$$(T - T_e)/(T_0 - T) \approx g(v) \quad (6)$$

T 为气温, T_e 为等效温度, $T_0 = 42.6^\circ\text{C}$, $g(v)$ 是仅与风速 v 有关的函数。仅近似服从 Steadman 方程的这个函数形式等效于假设热量损失的速率 H 能够分解成一部分与温度差有关,一部分仅与风速有关,如同方程(1)和方程(2)那样。

分解 T_e 、 T 和 v 之间的关系得到方程(6)的形式,其优点是允许建立一个简单的列线图。

在一个通常形式的列线图中(例如 Dixon, 1991), T 和 T_e 的标尺是平行的,并且有同样宽的刻度,刻度的方向相反, v 的标尺则是两个 42.6°C 刻度点连接的直线,如图 4 所示。

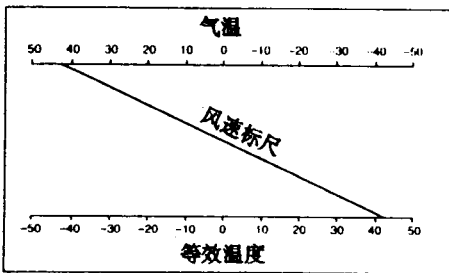


图 4 风寒列线图的一个通常样式

这种列线图的问题是把风速标尺作了过分压缩,如图 5 中 $v=0$ 和 $v=25\text{m/s}$ 两点连线所示。在用尺连接气温标尺上的一点和风速标尺上的一点时的小误差,会在读出对应等效温度值时产生大的误差。若让温度标尺的分度具有不同宽窄,而不损失两个温度

标尺的均一性和线性,就能得到显著改善。利用图 3 中的资料与 Dixon(1991)对 Terjung 的寒冷感觉分类风寒的解释,就能得出如图 6 所示的改进的列线图。

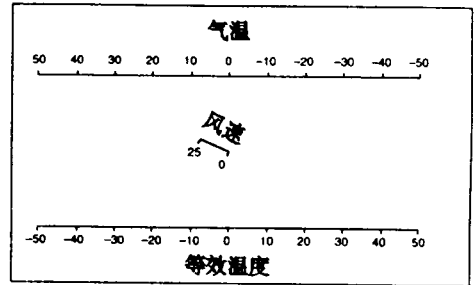


图 5 图 4 中的列线图的风速标尺被过分压缩

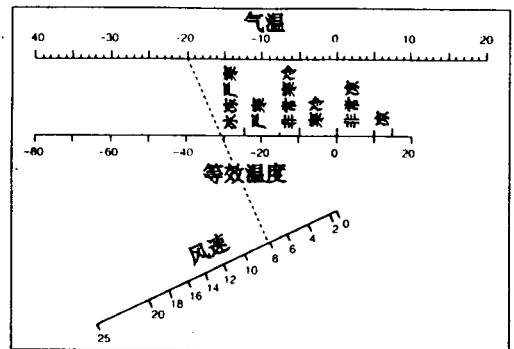


图 6 根据 Steadman(1984)的热量损失模式和 Dixon(1991)对 Terjung(1966)风寒感觉分类的解释改进的风寒列线图。虚线为列线图用法的一个例子。 -20°C 的气温和 8m/s 的风速得到 -32°C 的等效温度,归类为“冰冻严寒”,也就是说,裸肤有明显冻伤的危险

为把这个列线图的性能与其它列线图和风寒表进行比较,可以画出有冻伤危险性的气温随风速的变化。图 7 给出图 6 中列线图的预测结果与一个标准风寒图(例如 Landsberg, 1972)、与 Terjung(1966)对 Siple 和 Passel 的测量结果的解释,以及与 Steele(1988)列线图提供的预测结果的比较。最后两条曲线代表 Steele 列线图的“深冰冻”(旅行危险)和“极端寒冷”(旅行不愉快)。

由图 7 可知,当风速大于 5m/s 时,现在的模式预测的结果与标准风寒表和 Terjung

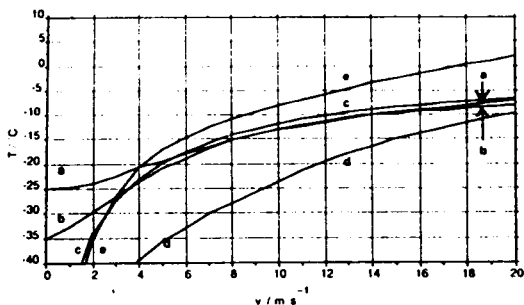


图 7 有冻伤危险的气温随风速的变化, (a)描述在图 6 中的列线图, (b)标准风寒表 (Landsberg, 1972), (c) Terjung 对 Siple 和 Passel 资料的分类, (d) Steele 的列线图, 相当于“深冰冻”条件发生, (e) Steele 的列线图, 相当于“极端寒冷”条件发生

的资料实际上是等同的。这并不奇怪, 因为标准风寒表直接用了 Terjung 的资料, 而本文描述的模式间接用了 Terjung 的资料作标准。Steele 的“深冰冻”看来表示了远超过引起冻伤的条件, 而他的“极端寒冷”过低地估计了危险性。

在风速小于 5m/s 条件下, Steele 的列线图 and Terjung 的分类意味着冻伤条件对应不可能的低气温。本文的列线图和标准风寒表是比较合理的, 相互是类似的。然而, 现在的列线图在指示较高温度的冻伤危险性上比较安全。

4 讨论

本文的基本目的是给出一个新的计算人体在寒冷和大风地区经受的风寒感觉的列线图(图 6), 并说明它是正确的。

图 6 中列线图的理论基础是 Steadman (1971, 1984) 对着装人体热量损失速率的研究结果。Steadman 的理论比过去任何获得风寒理论认识的试验都全面, 但得出的公式十分复杂。然而, 本文表明, 公式预测的热量损失率, 能够分解成两部分, 一部分仅与风速有关, 另一部分等于气温与 42.6°C 之间的差。这种形式的特点允许我们去建立一个简单的列线图。

由 Steadman 公式可以计算出等效温度 (T_e)。Steadman 公式没有采用任何新的试验资料, 算出的等效温度的绝对值直观上看来比较合理, 但可能有误差。有关冻伤可能发生的试验资料距今约有 30 年了。进一步的观测应是非常有价值的。

需要强调的是虽然图 6 中列线图显示的感觉类型与笔者所知的所有风寒表与列线图一样, 有它的主观性, 没有考虑诸如衣着、体温、新陈代谢率和精神状态等因子。不过指示人体暴露冻伤危险的“冰冻严寒”不带主观性。作者希望收到读者在寒冷条件下的经验、详细的气温、风速、衣着情况、活动强度和寒冷感觉的资料, 来完善如表 1 的分类。

卞林根译自 *Polar Record*, 29 (170): 229—234, 1993 曹村校