

我国冬季感热温度分布和 人体保暖所需服装量

冯定原 邱新法 傅玮东

(南京气象学院)

提 要

本文从人体热量平衡观点出发,根据美国著名生物气象学家R.G.Steadman提出的感热温度理论〔1-4〕,计算了我国各地冬季(12-2月)各月的平均感热温度,并讨论了人体保暖所需的服装量。

一、前言

最近20多年来,国外生物气象学研究发展很快。对冬季人体冷感觉方面的研究,也是其中的重要课题之一,有关这方面的研究大体可分为两个阶段:第一阶段主要研究气象要素与人体冷感觉的经验关系,并提出了风寒温度(Windchill temperature)的概念。Siple和Passel提出的计算人体冷感觉,即风寒温度的经验公式为 $q = h(33 - T_a)$,式中 h 为风速的函数,并取 $h = 10.45 + 10V^{1/2} - V$ 。后来,Coust对 h 进行了修改,取 $h = 9.0 + 10.9V^{1/2} - V$ 〔1〕。第二阶段着重从人体热量平衡、人体生理学和服装科学角度出发,考虑环境条件对人体冷感觉的综合影响。

国内对人体冷感觉的理论研究还很少,只有王润鹿、王西亭等〔5〕1976年根据当时国外的研究,利用牛顿冷却定理,对我国各地1月份人体保暖所需服装量进行过一次讨论,并按所需服装量将我国初步划分为6个区。

王润鹿等从牛顿冷却定理出发,仅考虑服装对显热通量的阻碍作用。但是人体的散热按照传热方式可以分为:辐射散热、显热散热和潜热散热等三种。服装对这三种散热方式都有不同程度的影响,特别是对潜热散

热的影响更加不容忽视。另外,风速对人体散热的影响,也与服装量有关。由于王润鹿等对环境温度的讨论仅是经验分析,所计算出的服装量一般均偏大。

二、感热温度和服装量的计算

感热温度是从人体热量平衡观点出发,提出的人体对周围环境实际感受的热量指标,它受空气温度、湿度、风速和太阳辐射等气象要素的综合影响。

R.G.Steadman在讨论人体的热量平衡时,将人体散热分为肺部呼吸散热 Q_r 、衣着部分散热 Q_l 、裸露部分散热 Q_n 三部分。若令 ϕ_2 为人体的衣着面积系数,则人体的热量平衡方程为:

$$Q = Q_r + \phi_2 Q_l + (1 - \phi_2) Q_n \quad (1)$$

式中 Q 为人体新陈代谢产热量。为了便于研究,Steadman以身高1.70m,体重67kg的壮年人体作为标准人体,并进行了适当简化,从整个人体出发,只考虑单位面积上的平均散热量 Q 。显然, Q 随人的年龄、体质和劳动强度等因素变化。据研究,当人以 $1.4m \cdot s^{-1}$ 的速度步行时, $Q = 177.8W \cdot m^{-2}$ 。

(1)式中各参量的取值分别为:

$$Q_r = 0.143 - 0.00112 T_a - 0.0168 e_a$$

$$Q_n = \frac{T_b - T_a}{R_s + R_a} + \frac{e_b - e_a}{Z_s + Z_a} \cdot \frac{R_a}{R_s + R_a}$$

$$-Q_s \frac{R_s}{R_s + R_s} \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{T_b - T_a}{R_s + R_f + R_a} + \frac{e_b - e_a}{Z_s + rR_f' + Z_s}$$

$$\cdot \frac{R_f + R_s}{R_s + R_f' + R_s} -$$

$$Q_s \frac{R_s}{R_s + R_f' + R_s} \quad (3)$$

式中 T_b 为体温(°C); T_a 为环境温度(即气温,°C); e_b 为体内水汽压(hPa); e_a 为环境水汽压(hPa); R_s 为皮肤的显热传输阻力($m^2 \cdot kW^{-1}$); R_f 为服装的显热传输阻力($m^2 \cdot kW^{-1}$); Z_s 为皮肤的潜热传输阻力($m^2 \cdot kPa \cdot W^{-1}$); Z_f 为服装的潜热传输阻力($m^2 \cdot kPa \cdot W^{-1}$); Q_s 为单位面积的净辐射($W \cdot m^{-2}$); R_f' 为对温度和风速进行订正后的服装显热传输阻力(标准条件: $T_a = 0, V_{1.0} = 0$); $V_{1.0}$ 为10m高度处的风速($m \cdot s^{-1}$)。

(2)、(3)式中各分量的取值为:

$$R_s = 1 / (1 + 0.6 R_f') / (11.4 + 1.86 V_{1.0} + T_a / 29)$$

$$(衣着部分) \quad (4)$$

$$R_s = 1 / (11.6 + 1.86 V_{1.0} + T_a / 36)$$

$$(裸露部分) \quad (5)$$

$$Z_s = 1 / (128 + 30 V_{1.0}) / (1 + 0.6 R_f')$$

$$(整体) \quad (6)$$

$$R_f' = \phi_7 R_f \phi_e^{-1} \quad (7)$$

$$\phi_7 = 1 + (T_a + R_s Q_s) / 750 \quad (8)$$

式中 ϕ_7 为任一条件下的服装率与 $T_a = 0, Q_s = 0$ 时的导热率之比。

$$\phi_e = 1 / [0.72 + 0.28 (h_c / h_{c_0})^{1/2}] \quad (9)$$

其中 ϕ_e 为任一风速下的服装传热阻力与 $V_{1.0} = 0$ 时的服装传热阻力之比; h_c 为空气对流传输系数; h_{c_0} 为皮肤表面的热对流传输系数。

$$\phi_2 = 1 - 0.3 \exp(R_f' / 5) \quad (10)$$

$$R_s = 0.040 + R_f / 30 \quad (11)$$

$$T_b = 33.5 + 1 / 7 R_s \quad (12)$$

$$e_b = 4.40 + 1 / 20 R_s \quad (13)$$

$$Z_s = (12 R_s)^4 \quad (14)$$

$$Q_s = (Q_d + Q_D) / 6 - Q_l \quad (15)$$

式中 Q_d 为散射辐射($W \cdot m^{-2}$); Q_D 为直接辐射($W \cdot m^{-2}$); Q_l 为长波辐射。

$$Q_d = 0.40 \varepsilon \sigma \phi_1 [1 - \phi_2^2 (0.50 + 0.043 \lambda)] [1 - 0.62 \exp(-0.108 E) - 0.16 \sqrt{e_a}] T_a^4 \quad (16)$$

式中 ε 为比发射率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; ϕ_1 为有效辐射面积系数; ϕ_2 为云量(%); λ 为纬度, E 为海拔高度(km); T_a 为皮肤表面温度(K)。

利用(3)式解出 R_f 后,将 R_f 重新回代到原方程(1)式中,在标准条件下,解出的温度即为感热温度,记为 $T_{s,p}$ 。但由于这样比较复杂,本文采用Steadman经过回归统计后得出的经验公式:

$$T_{s,p} = -1.3 + 0.92 T_a + 2.2 e_a \quad (17)$$

$$T_{s,p,v} = -2.7 + 1.04 T_a + 2.0 e_a - 0.65 V_{1.0} \quad (18)$$

$$T_{s,p,v,q} = 4.5 + 1.02 T_a - 1.00 V_{1.0} + 2.8 e_a - 5.8 \phi_s + 0.0054 (Q_d + Q_D) \quad (19)$$

式中 $T_{s,p}$ 为考虑空气湿度影响时的感热温度; $T_{s,p,v}$ 为考虑空气湿度和风速影响时的感热温度; $T_{s,p,v,q}$ 为考虑空气温度、风速和太阳辐射综合影响时的感热温度; ϕ_s 为太阳直接辐射与总辐射之比。

计算出感热温度后,再根据Steadman的感热温度- R_f 关系曲线,进行内插,可得出 R_f ,并可用 $T_{s,p} - T_a, T_{s,p,v} - T_{s,p}, T_{s,p,v,q} - T_{s,p}$ 分别讨论空气湿度、风速和太阳辐射对人体冷感觉的影响。

服装的保暖能力与服装的原料、式样、加工等因素有关,因此,不能单纯用服装的厚度来表示服装量。目前国外都采用克罗(clo)为单位作为服装保暖性能的指标,它是一个阻力形式的单位,1克罗=0.18K/

(千卡·米²·小时)，约相当于1.0cm厚度的衣服，这样计算出 R_i 后，也就知道了所需要的服装量。本文在计算了全国各地199个站点12—2月平均感热温度的基础上，进一步计算出各地冬季壮年人体保暖所需要的服装量，并作出了人体保暖所需服装量的分布图。

三、资料来源和处理

在计算过程中，考虑到人主要在白天活动，故文中均将月平均温度、湿度、风速和太阳辐射等资料订正到白天的情况。具体的月平均白天温度 $\bar{T}_d = (\bar{T}_{min} + 3\bar{T}_{max})/4$ ，月平均白天水汽压 $\bar{e}_d = e_d$ ，月平均白天风速 $\bar{V}_d = 1.2\bar{V}$ ，月平均白天太阳总辐射 $\bar{Q}_{白天} = \bar{Q} / (t_{日落} - t_{日出})$ 。其中所用的月平均最高、最低温度，水汽压，风速以及太阳总辐射等数据均取自国家气象局整编出版的《中国地面气象观测资料》和《中国太阳辐射资料总论》，各纬度的日出、日落时间取自《实用气象手册》。

为了计算各地的月平均太阳直接辐射与总辐射之比，我们选取了我国87个日射站的月平均太阳直接辐射与总辐射资料，并对其113个无日射资料的站点进行了内插。

四、计算结果与讨论

我国大部分地区位于欧亚大陆东部20—50°N范围内，东南部濒临广阔的太平洋，我国气候主要受变性极地大陆气团和热带海洋气团影响。由于大气环流和地形的影响，各地天气气候状况不一，人们保暖所需的服装量也有很大差异。下面分别讨论我国冬季感热温度分布，空气湿度、风速和太阳辐射对人体感觉的影响以及人体保暖所需服装量的分布情况。

(一) 我国冬季感热温度的分布及空气湿度、风速和太阳辐射对人体冷感觉的影响。

我国冬季主要受蒙古冷高压控制，从12、1、2月的月平均白天感热温度分布图(图1)可见，感热温度基本呈纬向型分布，由北向南逐渐增大，东西向差异不大。感热温度最低的地区是黑龙江漠河，1月份达-27.4℃；南部沿海地区高达27.2℃，南北

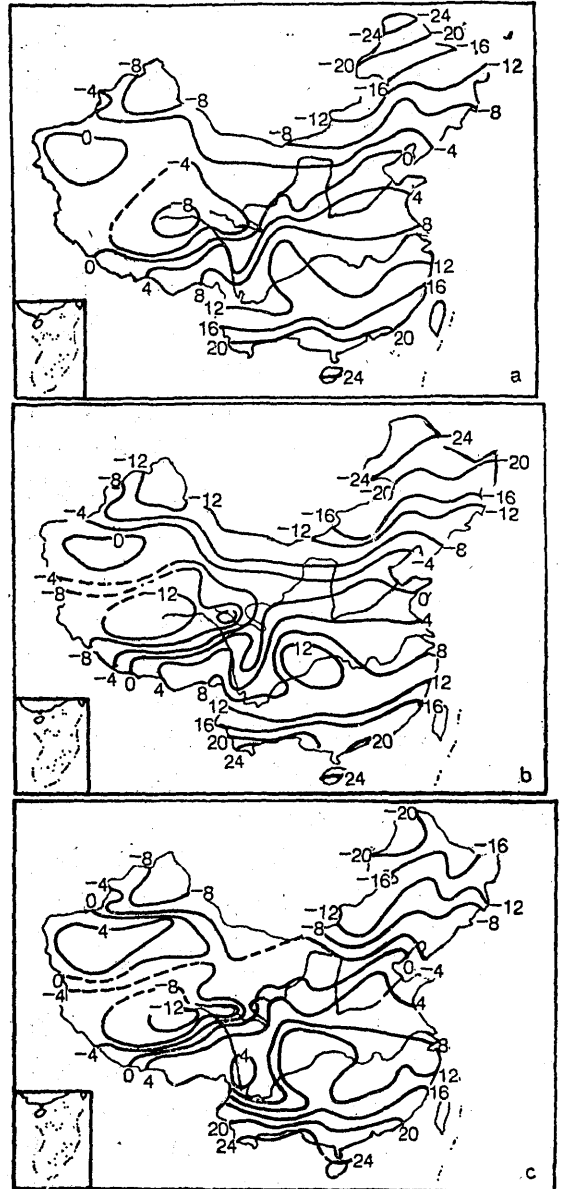


图1 12月(a)、1月(b)和2月(c)平均白天感热温度分布图

相差54.6℃。新疆境内，由于天山的阻挡，北疆比南疆冷得多。秦岭南北的西南和华北地区，差异明显：秦岭以北在7℃以下，以南在7℃以上。青藏高原是世界屋脊，北方冷空气难以逾越，其南侧冬季干暖，其北侧的南疆和河西一带干冷。比较高山和平原地区的感热温度可以看出，高山地区的感热温度要比山麓地区明显偏低，这一方面是由于温度随高度升高而降低，另一方面也由于高山上风速较大的缘故。

下面分别讨论太阳辐射、空气湿度和风速对人体冷感觉的影响。

1. 太阳辐射的影响

到达地球表面的太阳辐射，一方面可使地面和近地层空气温度升高，另一方面还可以加速水分的蒸发，增加空气湿度。投射到人体表面的太阳辐射，则可直接增加人体对热的感受，这里主要讨论太阳辐射对人体产生的直接影响。太阳辐射对人体的影响不仅与辐射强度有关，而且还与太阳的相对位置、太阳高度等因素有关。例如，人体正对太阳时所获得的辐射就比斜对太阳时要多。到达人体表面的太阳辐射，一部分被人体表面反射，一部分被人体表面吸收。但人体表面吸收的这部分辐射并不能全部转化为载热形式来增加人体的热感觉，而是存在着一定的转换效率 η_s 。对衣着部分来说， $\eta_s = R_s / (R_s + R'_i + R_{e0})$ 。据研究，随着温度和湿度升高， η_s 增大；而随着风速增大， η_s 减小；即在高温高湿条件下，人体对太阳辐射的反应要比在低温低湿条件下敏感。

从图2可见，太阳辐射对人体主要起加热作用，但由于冬季气温低，太阳辐射对感热温度的影响较小，一般为4—6℃。由图2 b、c可见，由北向南，太阳辐射对感热温度的影响逐渐增大，长江中下游、西南和华南大部是一个相对高值区，这主要是因为这些地区温度较高，人体对太阳辐射比较敏感的缘故。南疆沙漠地区也是一个高值区，这

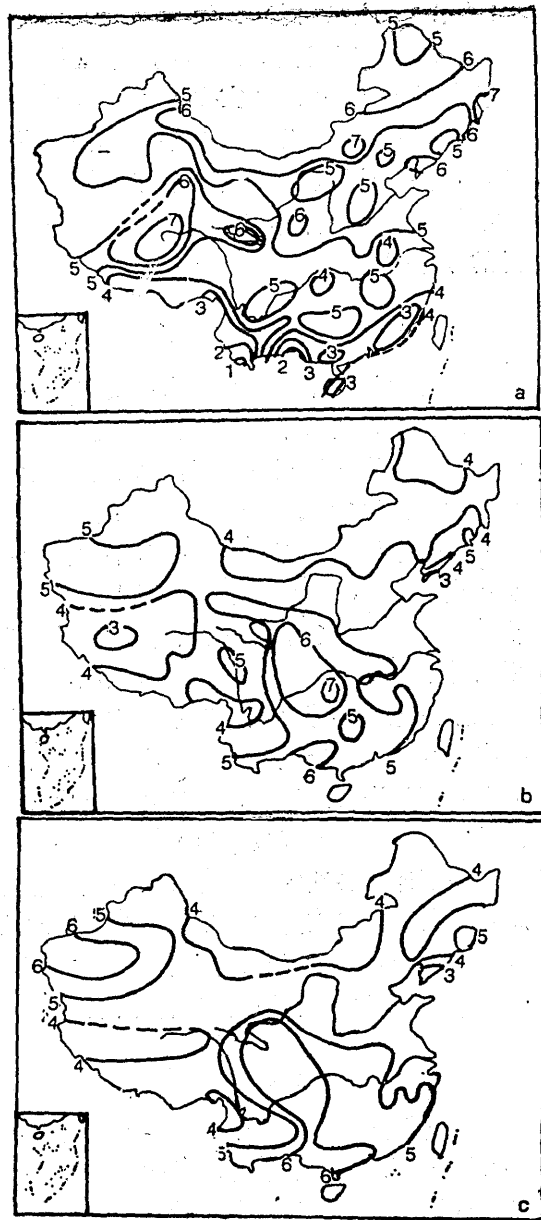


图2 12月(a)、1月(b)和2月(c)太阳辐射直接影响感热温度分布图

主要是因为该地区的太阳总辐射较大所致。12月份，我国南方地区由于直接辐射占总辐射的比重较大，所以，辐射对感热温度的影响较小。

2. 空气湿度的影响

空气湿度主要通过影响水汽传输而影响人体的冷感觉。人体对冷热的感受除与空

气温度有关外，也与空气湿度有关。在气温较高时，由于出汗而使人体皮肤表面的湿度增大，若此时空气湿度较高，则因为汗液不易蒸发，体内热量的散发受阻，使人体产生闷热的感觉；若此时空气湿度较低，汗液蒸发加快，即使气温稍偏高，人体也会觉得比较舒适，并无炎热之感。另外，由于气温较高时，空气湿度的变化也较大，所以，湿度对感热温度的影响也较大。但在冬季，气温较低，上述效应不太明显，所以空气湿度对感热温度的影响也较小。与太阳辐射相似，在感热温度较高时，人体对空气湿度的反应也较大。

从图3可以看出，冬季我国大部分地区空气湿度的影响为负值，只有在海南省、黑龙江和新疆两省（区）北部的部分地区为正值。这是因为冬季我国大部分地区的湿度较低，空气干燥；海南省气温较高，黑龙江和新疆北部地区相对湿度偏大的缘故。由图3还可见，冬季空气湿度对感热温度的影响较小，全国大部地区都在 $-1-1^{\circ}\text{C}$ 之间。

3. 风速的影响

风不仅能加快空气的流动，从而加速人体的散热，而且，由于冬季气温远低于人体皮肤温度，所以，风能加强冷平流的作用。因此，在生活中，人们都有寒风刺骨的经验。图4给出了我国各地冬季风对人体冷感觉的影响情况。

由图4可见，冬季风速对人体主要起降温作用。黄河以北的大部分地区由于风速较大，感热温度普遍比气温降低 3°C 以上；东北北部及内蒙古东部的部分地区，感热温度则比气温降低 6°C 以上。由此可见，冬季风速对人体冷感觉的影响是很大的。一般来说，北方大于南方，沿海大于内陆。究其原因，主要是因为冬季北方风速大、气温低；沿海地区虽然气温比内陆地区稍高，但风速要比内陆大得多。

(二) 冬季人体保暖所需服装量的分析

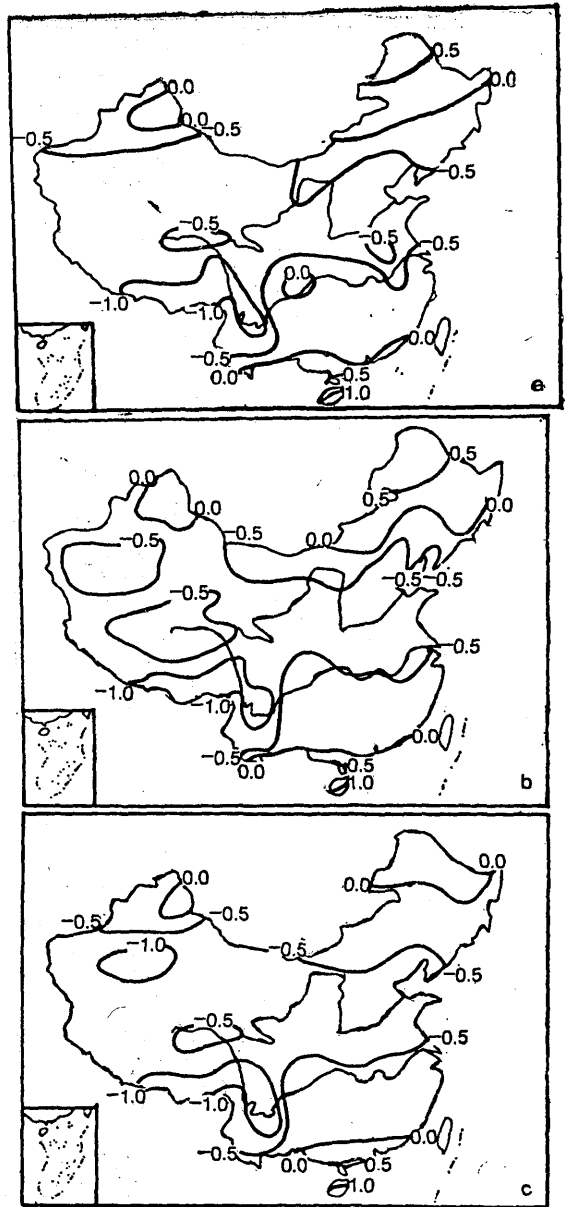


图3 12月(a)、1月(b)和2月(c)空气湿度影响的感热温度分布

图5给出了我国各地冬季人体保暖所需服装量的平均状况。与图1对比可见，人体保暖所需的服装量分布与感热温度分布趋势是一致的。与王润鹿等的计算结果比较可见，两者计算的人体保暖所需服装量的分布趋势基本一致。但王润鹿等计算的1月份黑



图4 12月(a)、1月(b)和2月(c)风速影响的感热温度分布图

龙江北部人体保暖所需服装量为7.0克罗，比本文计算结果高出一倍多。由此可见，在人体散热过程中，以显热形成传输的热量与以潜热形式传输的热量大体上相当。

五、结束语

本文根据美国著名生物气象学家 R·G·Steadman 的感热温度理论计算了我国各

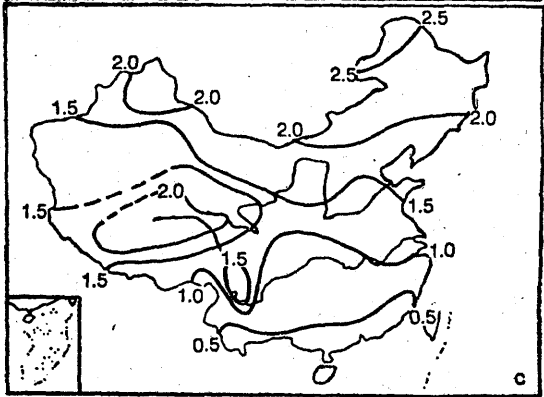
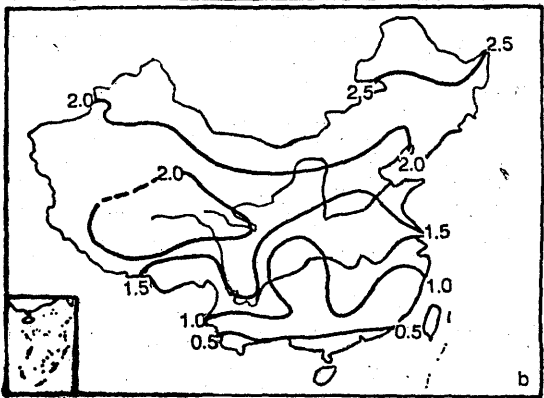
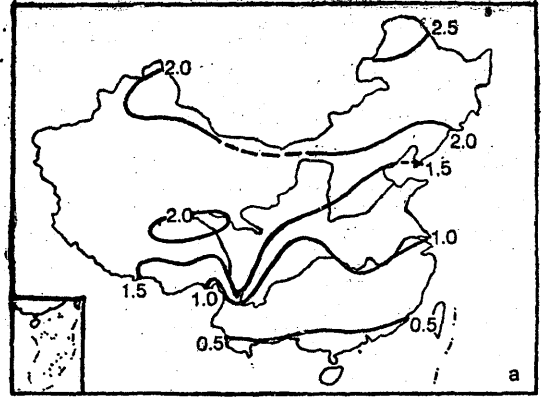


图5 我国12(a)、1月(b)和2月(c)月份人体保暖所需服装量(单位: 克罗)分布

地冬季12、1、2三个月平均白天感热温度，分析了空气湿度、风速和太阳辐射等气象因子对人体冷感觉的影响，得出的结论与人们实际生活中的经验基本一致，但尚有以下几个方面有待今后进一步研究：

1. 根据我国实际情况，在大量实验基础上，对热量平衡方程中的各个参量需作一

些订正。

2. 深入讨论不同年龄、体质和劳动强度的人对冷感觉的差异。

3. 细致地讨论白天平均空气温度、湿度、风速和太阳总辐射等气象资料的取值。

参 考 文 献

[1] R. G. Steadman, Indices of windchill of clothed persons, *J. Appl. Meteor.*, 10, 674—683, 1971.

[2] R. G. Steadman, The assessment of sultriness, Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science, *J. Appl. Meteor.*, 18, 861—871, 1979.

[3] R. G. Steadman, The assessment of sultriness, Part II: Effect of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature, *J. Appl. Meteor.*, 18, 874—884, 1979.

[4] R. G. Steadman, A universal scale of apparent temperature, *J. Climate and Appl. Meteor.* 23, 1674—1687, 1984.

[5] 王润鹿、王西亭, 我国冬季服装的气候分区, 全国应用气候会议论文集, 1976.

The distribution of the apparent temperature in winter and the amount of clothing in keeping warm for people

Feng Dingyuan Qiu Xinfa Fu Weidong

(Nanjing Meteorological Institute)

Abstract

The distributions of monthly mean apparent temperature in winter (Dec.—Feb.) in China and its relationship with the amount of clothing in keeping warm for people are discussed here, based on the concept of thermal equilibrium in human body as well as on the theory on apparent temperature initiated by the famous American bio-meteorologist, R. G. Steadman.