

呼吸阻力感觉评量的模糊集途径¹⁾*

马 谋 超

中国科学院心理研究所

张立藩 吴兴裕 姜世忠

第四军医大学

摘 要

在本工作中,呼吸阻力感觉被看作是一种模糊量。采用模糊集的途径揭示了这一模糊量的可能性分布。在此基础上,建立了用来估定呼吸阻力负荷的感觉量公式 $F^k(u_i) = \frac{1}{t} \left(\frac{\sum_{j=1}^m V_j y_{ij}^k w_j}{\sum_{j=1}^m y_{ij}^k w_j} \right)$ 。通过对37名被试在不同负荷时相下各种外加阻力负荷所致的感觉进行测试,揭示了如下一些基本事实:呼吸阻力负荷与其感觉间的心理物理函数遵循幂定律;三种呼吸阻力时相下的呼吸阻力感觉体验有显著差异,但是统计检验表明它们的感觉增长速度差异不显著;本实验还找出了与各感觉类别等级相应的阻力负荷值,可供制订防护装置阻力标准参考;最后还比较与讨论了有关的方法学问题。

导 言

自从心理物理学问世以来,关于感觉体验的测量及心理物理函数的研究,多集中于外感受器的功能,而对于本体感觉及内脏感觉的研究则很少涉及^[1]。关于呼吸机械负荷所引起的呼吸感觉的研究,开始于本世纪四十年代初期^[2,3]。随后的发展,朝着两个方向:一是探讨呼吸困难发生机制。其主要手段是借助于古典的心理物理法,检测人对呼吸阻力负荷或弹性负荷的绝对阈^[4]、辨别阈^[5]及其心理物理函数^[6-8],进而以阈限测量为手段广泛地探讨各种因素,如压力(P)、流率(\dot{V})、容量(V)或 P/\dot{V} 等对气流阻力负荷及弹性负荷觉察能力的影响^[4,9,10]。然而,有论据表明所得结果是不尽一致的^[11]。一些作者指出:这可能是由于使用古典心理物理法确定觉察率时没有考虑到主观的非感受性因素的影响^[11,12]。于是,在探讨有关觉察阻力负荷刺激的神经机制方面,新近出现了信号检测理论分析的新途径。该领域的另一方向是,为了解决呼吸防护中的阻力标准问题而展开的有关呼吸阻力负荷所致阻力感觉的评量^[2,3,13-15]。评量工作通常采用的是古典的类别量表。

1) 本文于1985年3月14日收到。

* 冯林华、王兴邦同志参加了本实验;在形式化和数据处理方面曾得到汪培庄、赵汝怀、陈图云、傅湘等同志的帮助,在此一并致谢。

用它对被试测量的结果,可以直接把特定阻力负荷同若干感觉类别等级中的某个类别联系起来,从而更富有实用价值。然而,有关的评量文章指出^[16]:古典类别量表的一个公认缺点,往往是不能反映实际感觉的增长。我们认为,诸如呼吸阻力感觉可能是一类模糊现象。在性质上,它是可能性的*,而不是概率的。这或许是所说问题的症结所在。类别判断的模糊集模型指出:当人们在作类别判断时,往往可能在一个以上的类别等级上有不同程度的反应,而非仅在其中之一上有^[17]。本工作在该理论模型基础上,应用多级估量法于呼吸阻力感觉的评量^[18,19],并与古典的类别量表作以比较和讨论。

实验仪器与方法

被试者 37名健康男性青年(年龄在18至23岁)参加了本实验。他们均无心肺疾病史。

仪器装置 作为实验刺激的外加阻力负荷是由特制的阻力器产生。该阻力器由若干分节所组成。每节上都装有一尼龙网作为阻力片。它们直接决定外加阻力负荷量。每个阻力分节上都有一个开口,由一个活塞启、闭。阻力器通过呼吸活门与流率仪的一端相连。流率仪的另一端与面罩的出口相接。实验时,被试者的呼吸流率及口腔或面罩腔的压力变化由一台XY-1型流率及压力测量仪测出。其模拟量输出由A-69磁带记录仪记录,并由MDR Z-80微计算机脱机处理数据。

感觉量的评量 在本实验中,由外加阻力负荷所引起的呼吸阻力感觉是采用多级估量法评量的。多级估量法的测试表格如下:

表 1 呼吸阻力感觉的多级估量表 (MES)

		无	轻 度	中 度	重 度	极 重 度
赞 同	坚 决		✓			
	基 本					
	少 许	✓				
反 对	少 许					
	基 本			✓		
	坚 决				✓	✓

注:表内“✓”系某被试对一个阻力负荷反应的标记

被试者_____ 主试者_____

在记录表上,第一行是呼吸阻力感觉体验的五个类别等级,分别定义如下:

“无”:未觉察到外加阻力;

“轻度”:觉察到外加阻力,但无不适感;

“中度”:呼吸用力,可以忍受;

* 可能性系模糊数学中的术语,它的严格定义见文献(20)。这里,可直观地理解为各种可能程度,在数值上等于隶属度。图1与图2引用了由ELSEVIER即将出版的Application of Fuzzy Set Theory in Human Factor一书中的原图,在此表示感谢。

“重度”：呼吸费力，难以忍受；

“极重度”：窒息感，需立即解除负荷。

该表的第一列是主观评量，包括态度与肯定度。使用该表格的程序是：首先，确定一个最符合自己感觉体验的类别等级及其赞成的肯定度，并在表格内的相应小格上画上一个“√”；然后，对其相邻两个类别作对偶判断，以便确定赞同或反对的肯定度，亦在各自相应的小格内画上“√”；照此做法，直至全部类别等级评量完毕。

实验设计 本实验采用二因素6×3析因实验设计。因素a代表外加总阻力值(mmH₂O·L⁻¹·S)，分别为40(a₁)、80(a₂)、160(a₃)、240(a₄)、320(a₅)和480(a₆)；因素b代表阻力负荷时相：吸气相(b₁)、呼气相(b₂)及呼吸联合阻力时相(b₃)，共组成18种阻力负荷刺激另加一个面罩腔基础阻力。实验顺序：先随机排定a，再用3×3拉丁方表排定b。

实验步骤 首先向被试者讲解本实验要求和填表方法，并进行练习和体验。熟练之后进入正式实验。被试者戴好面罩接受外加阻力负荷刺激。对于每个刺激，被试者均须体验三分钟。第二分钟末开始记录呼吸流率、压力变化。第三分钟末，即填写测试表格。之后，再接受下一个阻力负荷。全部实验历时约1.5小时，中间休息一至二次。

实验数据处理与形式化

本实验有三种呼吸阻力负荷时相。每一种时相有六个外加阻力负荷量，记为

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，其中，阻力负荷 $u_1 < u_2 < \dots < u_n, i = 1, 2, \dots, n$ ；

心理量表分成五个类别等级 r_j ，它们构成论域 $R, R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, j = 1, 2, \dots, m$ ；

被试者集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}$

给定一个阻力负荷 u_i ，被试者 S_k 对之必须在每个类别等级 r 上表明自己的反应肯定度 C 。因为 C 受阻力负荷值 i ，类别等级 j 与被试 K 影响，故写成 $C(i, j, k)$ 。

$C(i, j, k)$ 可以是数字系统 $\{-3, -2, -1, 1, 2, 3\}$ 中任一个数，其中，“+”表示“赞同”；“-”表示“反对”。

为了使 C 规范化，要求取值于 $(0, 1)$ 。令

$$y_{ij}^k = (3 + C(i, j, k)) / 6 \tag{1}$$

式中， y_{ij}^k 为 C 的规范值。此量反映了被试 S_k 对刺激 u_i 在第 j 个类别等级 r 上反应的可能性。

对于 u_i 在 r_j 上得到的肯定度 $(y_{i1}^k, y_{i2}^k, \dots, y_{in}^k)$ 则形成量表 R 上的一个可能性分布，记峰值为 χ_i^k 。在 R 上与 χ_i^k 相应的点，记为 $r_{\theta_{ik}}$ ，称 $r_{\theta_{ik}}$ 是对 u_i 反应在 R 上的最大可能点。

在任一类别等级 r_j 上，存在由刺激系列 U 所引起的若干 y_{ij}^k ，其中的一个最大值 $\max_{1 \leq i \leq n} y_{ij}^k$ 所对应的 u_{ijk} 记为 U_{Ijk} 并被称为 r_j 的“赋值”。

如果在 r_j 上有不只有一个 $\max_{1 \leq i \leq n} y_{ij}^k$ ，那么所对应的 u_{ijk} 也不只有一个。为了获得 U_{Ijk} 必须从 u_{ijk} 选取一个。其判据应是峰值 θ_{ik} 最接近 r_j ，即

$$|j - \theta_{Ijk}| = \text{Min}_{1 \leq i_0 \leq n} \{ |j - \theta_{i_0 k}| \mid y_{i_0 k}^k = \text{Max}_{1 \leq i \leq n} y_{ij}^k \} \tag{2}$$

这样,便可获得一个映射

$$r_j \rightarrow U_{I_{jk}} \text{ (为方便书写, } u_{I_{jk}} \text{ 记为 } V_j \text{)} \quad (3)$$

至此,量表上的类别语词得到赋值,在此基础上,对于每个 u_i ,只要获得 y_{ij}^k 便可由上述估计其感觉量 $F^k(u_i)$ 。

$$F^k(u_i) = \frac{1}{t} \left(\sum_{j=1}^m V_j y_{ij}^k w_j / \sum_{j=1}^m y_{ij}^k w_j \right) \quad (4)$$

式中, t 为极重度类别等级所对应的阻力负荷量,用作规范化; w 被称为滑动权数。从实际出发,设 ϵ 为一个适当取定的正整数,以代表一个类别等级,则

$$w_j = \begin{cases} 3.5, & j = \theta_{ik} \text{ (峰值的类别等级)} \\ 3.3, & y_{ij}^k > 0.5 \text{ 且 } |j - \theta_{ik}| \leq \epsilon \text{ (} y_{ij}^k > 0.5 \text{ 系“赞成”的值; } |j - \theta_{ik}| \leq \epsilon \text{ 为峰值相毗连的类别等级)。} \\ 3.0, & y_{ij}^k > 0.5 \text{ 且 } \epsilon \leq |j - \theta_{ik}| \leq 2\epsilon \text{ (表示赞成值,且与峰值相隔一个类别)。} \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

关于加权及其取值的细节,见本文讨论部分。

平均感觉量 $F(u_i)$ 记为

$$F(u_i) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s F^k(u_i) \quad (6)$$

式中,小写的 s 为被试者总人数。

实验结果与分析

1. 各个类别等级上的反应最大可能值临界值和量表值 本实验用多级估量法对每个阻力负荷量所致的反应肯定度进行了评量。其直接结果是该阻力在给定的类别等级上的一个可能性分布。经上节式(1)处理,然后以各给定阻力负荷量作横坐标,以反应自信度作纵坐标,绘出如图2的曲线簇。图中的每一点都是37名所得数据的平均值。

图1中, $\bigcirc \cdots \cdots \bigcirc$ 表示“无”类别等级,记以英文字母 \textcircled{N} ; $\bigcirc \cdots \cdots \bigcirc$ 表示“轻度”类别等级,记以 \textcircled{L} ; $\bigcirc \cdots \cdots \bigcirc$ 表示“中度”类别等级,记以 \textcircled{M} ; $\bigcirc \cdots \cdots \bigcirc$ 表示“重度”类别等级,记以 \textcircled{H} ; $\bigcirc \cdots \cdots \bigcirc$ 表示“极重”类别等级,记以 \textcircled{S} 。

从图1中,可以直观地找出各反应类别等级所对应的最大可能的阻力负荷量 I_j , 临界负荷量。 I_j 的精确确定,可根据 $\max_{1 \leq i \leq n} y_{ij}^k$ 或和式(2),同

时,还可参照该点上的概率,即要求反应的峰值落在 I_j 上的人数最多,至少

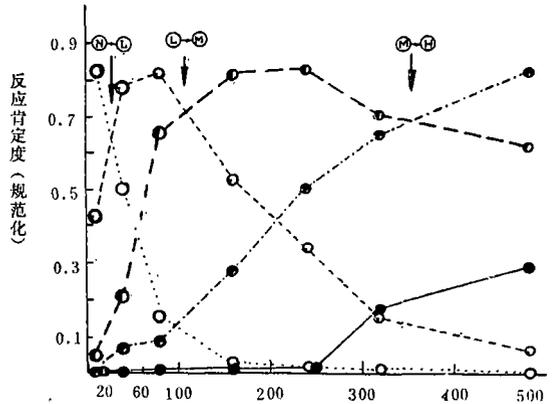


图1 各个反应类别等级的曲线簇(联合阻力时相),横座标为外加总阻力负荷量($\text{mmHg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{S}$)

表 2 对应各反应类别上的最大可能值、临界值和量表值

	轻 度			中 度			重 度		
	I_j	临界值	量表值	I_j	临界值	量表值	I_j	临界值	量表值
吸阻力时相	40	90	0.0891	160	100	0.2381	480	307	0.4754
呼阻力时相	80	30	0.1134	240	148	0.2054	>480	>352	<0.4261
联合阻力时相	80	28	0.1935	240	108	0.2723	480	352	0.4261

接近于最多；临界值系指上一个反应类别与下一个反应类别的两条肯定度曲线相交点所对应的阻力负荷量。表 2 列出了本实验所得的三种呼吸阻力负荷时相条件下的 I_j , 临界负荷量, 同时, 也列入了按式 (4) 计算得到的 I_j 感觉量表值。

表 2 中的 I_j 与临界值的数字越大, 说明对阻力的感觉越迟钝; 而量表值越接近于 1.0, 说明阻力感觉越严重。由表 2 中可以看出: 在三种呼吸阻力负荷的时相下, 呼阻力时相引起轻度、中度和重度感觉所对应的阻力负荷量相对于其它两种时相高; 而其感觉量表值则反之。

此外, 表 2 中还揭示一个有趣的事实: 在量表上相邻类别之间的心理距离是不等的。

2. 阻力负荷量与感觉量之间的心理物理函数 按照式 (5) 计算了三种呼吸阻力负荷时相下给定的各阻力负荷量所致的感觉量。以阻力负荷量作横坐标; 以感觉量作纵坐标, 在双对数纸上作图, 见图 2 所示。

图 2 中显示出三条直线, 表明了三种阻力负荷时相下的心理物理函数为幂函数 (因为双对数的直线方程正好是幂函数)。其幂分别为 0.7021 (吸阻力时相)、0.6645 (呼阻力时相) 和 0.7271 (联合阻力时相)。

表 3 指明: 本实验的两个基本变量, 即总阻力值和阻力负荷时相造成的差异均在 0.01 水平上显著。但是, 对各负荷时相的回归系数两两之间作 t 检验的结果并没有显著差异, 表明它们在感觉增长率上没有不同。从后者这一事实出发, 也许可以推论三种负荷时相的感觉机制类似。

为了从方法学上作比较, 本文对多级估量法得到的峰值作概率统计, 然后求其中数。这正是古典的类别量表程序, 在此缩写成 CS。

表 3 呼吸阻力感觉量的 6×3 折因分析结果

变 异 源	自 由 度	离均差平方和	均 方	F	P
总 变 异	665	18.5186			
阻力负荷时相间 (a)	2	0.5968	0.2984	21.8882	<0.01
总阻力负荷间 (b)	5	8.8636	1.7727	130.0321	<0.01
(a) × (b) 交互作用	10	0.2240	0.0224	1.6493	>0.05
误 差	648	8.9342	1.3633		

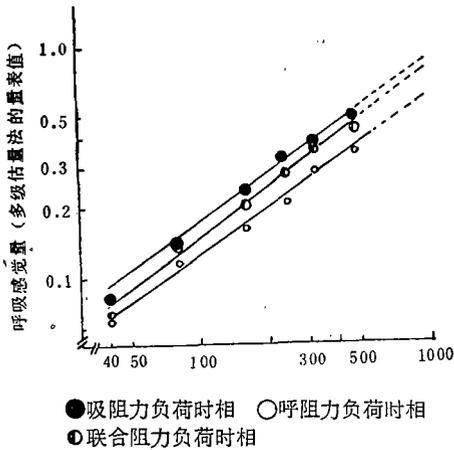


图 2 阻力负荷量与其感觉量的函数关系曲线簇
座标为外加总阻力负荷量($\text{mmH}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{S}$)

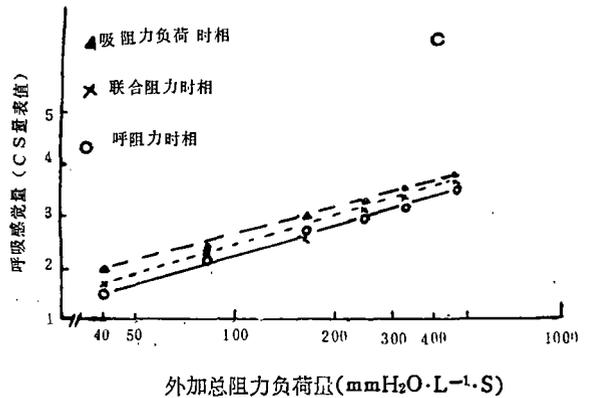


图 3 CS 法求得的呼吸阻力负荷量与感觉量之间的心理物理函数

从图 3 中所绘制的直线与图 2 的相比较,前者是单对数坐标,而后者是双对数坐标。这就是说,用古典量表法取得的心理物理函数关系是对数函数。它可以用 $y = a + b \log x$ 拟合。造成这里的不一致原因见本文的讨论部分。

3. 实验前后面罩腔基础阻力所致感觉的比较 本实验在外加呼吸阻力负荷作用之前,每位被试者照例都体验面罩腔的基础阻力,并且作出评量。实验结束后,同样对之进行体验与评量。前后对基础阻力所致感觉评量的结果,分别为 0.039 与 0.017 呼吸感觉量表值。t 检验指明:它们的差异达到 0.01 显著水平。这一初步结果似乎提示:持续戴面罩在本实验期间有减轻阻力感觉的倾向。

讨 论

本工作给出了一个评量呼吸阻力感觉的定义式(式(4)),式中, V_j 是根据实验数据求取的“赋值”(式(3)),而不是通常那样,按照词语的语义给出的主观值。当 $r_j = 1, 2, \dots, m-1$ 时, r_j 与 r_{j+1} 所对应的 u_i 与 u_{i+1} 之间显然不是等距的。式(4)在过去给出的基本定义式基础上又引入了一个滑动的权数 w ,使得定义式更符合于多级估量法的特点。因为对于测量而言,肯定的信息比否定的信息更有意义;而且在肯定的信息中,峰值为最,邻近类别给出的次之,远离的类别给出的更次,在具体权数的选取上具有经验性质。然而,我们希望能满足这样的要求:峰值在不同类别上的两个函数,在最终计算出来的感觉量表上的差异,能在(0, 1)内小数点后的第一位数值上反映出来;若两个函数的峰值类别及其肯定度相同,只在相邻类别上的赞成肯定度有差异,一般希望在小数点后的第二位数值上反映;若两个函数的差异只在否定的肯定度上,那么,指望它们反映在小数点后的第三位数值上。现在的式(5)基本上满足了上述要求,从而使多级估量法的测量趋向于完善。

为什么古典的类别量表在测量相同的被试者时得到的结果,会与用多级估量法所得背离呢?这不能不涉及到方法学上的一些问题。

首先,让我们考察一下有关的事实,即人们在对物体,尤其是对那些特点不鲜明的物体作类别判断时,感到难以明确地表态。这说明类别判断是可能性的,不是概率的。而可能性与概率只有弱的联系^[20]。已有的类别判断模糊集模型正确地反映了上述性质。它提出这种判断的结果可能表现在一个以上的类别上作出不同程度的反应。多级估量法正好适合于对这种量的测量。然而,古典的类别量表,则把这种判断看作是概率事件。每次测试只允许在其中一个类别上反应(称为事件发生),而其它类别上则无(其它事件不发生)。事件之间是不相容的。这样,被试在遇到难以明确判断的场合下,只得强制选择或猜测了。其次,用 MES 测量,一次便可获得一组向量,包括赞同和反对的态度及其不同肯定度等信息;而 CS 的一次测量获得的结果只能是一个确定的单值。虽然这个单值反映了主要的信息,却摒弃了其余有用的信息。因而难以反映细微的差异;再者, MES 具有二维评价的特点,考虑的因素较多,以利于因素间的相互制约,从而使测量的可靠程度增加;而 CS 只是一维评价,难免有任意性,而致使可靠性相对差些。

幂函数与对数函数究竟哪个更接近实际呢?判断它们的客观性尚有一定的困难,因为缺乏一个可测的客观量作判据。但是,可以想象,阻力负荷不断地增大与机体生物学的防御机制是相抵触的。因此,有机体不太可能随着负荷量增加,感受会变得越加迟钝,而情形应当是相反。如果是这样,幂函数比对数函数就更接近实际,因为,后者的特征是随阻力负荷量增大,反应曲线变得平坦了。

结 语

本工作应用模糊集理论较满意地解决了关于外加阻力负荷引起的吸呼感觉体验的评量问题。这一尝试有可能为各种本体及内脏感觉体验的评量提供一条新的途径。所得结果表明:呼吸阻力负荷与其感觉间的函数关系遵循幂函数定律。在三种阻力负荷时相下,其感觉体验的程度是不同的,但在感觉增长率上没有明显的差异。实验提供了不同感觉类别所对应的物理量(阻力负荷)。这些数据可供制订防护装置阻力标准参考。实验初步提示了关于面罩持续作用的积极倾向;还比较与讨论了 MES 与 CS 的方法学上的区别。

参 考 文 献

- (1) Schmidt, R. F. (ed), *Fundamentals of sensory physiology*, 81-125, Springer-Verlag, 1978.
- (2) Silverman, L et al., A study and an evaluation of inspiratory and expiratory resistance for protective respiratory equipment, OSRD. No. 5339, 1945.
- (3) Hart, J. S., Resistance to breathing, appendix IV Aeromedical Laboratory, TSEAA-660-83-E, 1946.
- (4) Bennett, E. P., M.I.V Jayson, D Rubenstein, E.J.M Campbell: The ability of man to detect added non-elastic loads to breathing, *Clin Sci*, 23:155-162 1962.
- (5) Wiley, R. L. and F. W. Zechman, Jr, Perception of added airflow resistance in humans, *Respir. physiol.* 2:73-87, 1966.
- (6) 张立藩,呼吸机械负荷(文献综述), *国外医学,军事医学分册*, 2:82-85, 1984.
- (7) Altose, M. D., A F Dimarco, S. B. Gottfried, The sensation of respiratory muscle force, *Amer. Rev. Respir. Dis.*, 126:807-811, 1982.
- (8) Killian, K. J. D.D. Bucens, E.J.M Campbell: Effect of breathing patterns on the perceived magnitude of added loads to breathing, *J. Appl. Physiol: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*

- 54:1216—1221, 1983.
- (9) Muza, S R, S McDonald, F W Zechman, Comparison of subject's perception of inspiratory and expiratory resistance, *J. Appl. Physiol:Respirat. Environ. Exercise Physiol*, 56:211—216, 1984.
- (10) 张立藩, 呼吸机械负荷(文献综述), 国外医学, 军事医学分册, 2:82—85, 1984.
- (11) Narbed, P G, D Marcer, J B L Howell: The contribution of the accelerating phase of in respiratory flow to resistive load detection in man, *Clin. Sci.*, 62:367—372, 1982.
- (12) Narbed, P G, D Marcer, J B L Howell, E Spencer, A signal detection theory analysis of the effect of chest cage restriction upon the detection of inspiratory resistive loads, *Clin. Sci.*, 64:417—421, 1983.
- (13) Bentley, R A, O G Griffin, R G love, D.C.F Muir, K.F. Sweetland: Acceptable levels for breathing resistance of respiratory apparatus, *Arch. Environ. Health*, 27:273—280, 1979.
- (14) Morgan, W P, Psychometric correlates of respiration: a review, *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.* 44:677—684, 1983.
- (15) 李兵林, 冯林华, 张立藩, 外加呼吸阻力合理匹配的研究, 解放军医学杂志, 9:184—187, 1984.
- (16) Morgan, W P, Psychological problems associated with the wearing of industrial respirators: a review, *Amer. Industrial. Hyg. Assoc. J.* 44:671—676 1983.
- (17) 马谋超, 曹志强, 类别(Category)判断的模糊集模型和多级估量法, 心理学报, 2:198—204, 1983.
- (18) Mou-chao, Ma, Zhi-qiang, Cao: The Multistage evaluation method in psychological measurement: an application of fuzzy sets theory to psychology, M M Gupta, E Sanchez (ed), *Approximate reasoning in decision analysis*, North-Holland, 307—312, 1982.
- (19) 马谋超, 汪培庄, 心理模糊性及模糊统计试验评注, 心理学报, 2, 1985.
- (20) Zadeh, L A, Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy sets and Systems*, 1:9—28, 1978.

A FUZZY SET APPROACH TO THE ESTIMATION OF RESPIRATORY SENSATION

Ma Mouchao

(*Institute of Psychology, Academia Sinica*)

Zhang Lifan Wu Xingyu Jiang Shizhong

(*Fourth Military Medical College, Xian*)

Abstract

Psychological magnitude associated with respiratory resistive load is considered as a fuzzy one in this study. A fuzzy set approach called Multistage Evaluation Scale (MES) was adopted to reveal a possibility distribution of this fuzzy magnitude, and a formula for treatment of the data— $F^k(u_i) = \frac{1}{t} \left(\sum_{j=1}^m V_j y_{ij}^k w_j / \sum_{j=1}^m y_{ij}^k w_j \right)$ —was used to estimate psychological magnitude associated with respiratory resistive load. Thirty-seven healthy young male subjects experienced six levels of suprathreshold added resistance, loaded at different phases of the breathing cycle.

The results revealed that the relationship between resistive load.

and perceived magnitude can be expressed by psychophysical power function. The data showed that the severity of the sensory experience caused by equal resistive intensity differed significantly when loaded at different phases of the breathing cycle, but the speed of sensory growth did not manifest significant change. The experiment also showed that the physical and physiological magnitudes were correlated to each sensory category grade of the scale, which may be useful for establishing resistive standards for respiratory protective equipments. We also compared and discussed methodology related to MES and classical category scale.