

# 呼吸阻力感觉的辨别阈 梯级——一种辨别阈量表

张立藩 吴兴裕 王兴邦 唐家安 肖赞英

(第四军医大学航空环境生理学教研室)

马 谋 超

(中国科学院心理研究所)

**摘要** 以9名健康男性为对象,测量了其对于 $10\sim 500\text{mmH}_2\text{O}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{s}$ 范围吸气(I)或呼气(E)阻力负荷(R)的辨别阈梯级(或“最小可觉差”梯级, JND梯级),以及各梯级所对应的呼吸感觉类别量表值和相应的呼吸型式变化。结果如下:在所观察的阻力范围内, IR或ER负荷的感觉连续体,一般包含6~7个JND梯级。物理或生理刺激量(Y)(如R、口腔压力、外呼吸功等)均与JND感觉单位(X)呈下列指数函数关系:  $\hat{Y} = e^{A+bX} - K$  (A、b、K—参数)。由多级估量法评量之呼吸感觉量与JND感觉单位亦呈指数函数关系,并能反映I、E在感觉强度上的差别。当感觉强度达3JND时,多数呼吸型式参数已有较明显变化;4JND时,肺通气量仍可维持对照水平。3JND之阻力感觉类别仍属“轻度”,在IR或ER负荷下,其相应的 $P_{\text{max}}$ 分别为70或55 $\text{mmH}_2\text{O}$ 。本文提出可将JND梯级测量作为一种辨别阈量表用于呼吸感觉评量,并就其对制订呼吸防护装备生理标准的意义进行了讨论。

**关键词** 外加呼吸阻力,呼吸感觉,辨别阈梯级,呼吸型式,辨别阈量表

自Bennett等(1962)应用古典心理物理学方法, Bakers与Tenney(1970)应用心理物理量表法定量研究人对外加呼吸机械负荷的感觉体验以来,近年又已取得一些重要进展<sup>[1~5]</sup>。此期间对阈上阻力负荷的研究多限于按Stevens定律定量描述<sup>[3,5,6]</sup>,而对另一重要心理物理函数——Fechner定律<sup>[7,8]</sup>在本领域的应用问题则未见提及<sup>[1,2]</sup>。仅少数报道<sup>[4,6,9]</sup>曾提出人对阻力负荷的感觉体验符合Weber法则。

本实验之主要目的在于考察呼吸阻力感觉是否符合Fechner定律,可否由辨别阈量表<sup>[7,8,10]</sup>评量。主要内容有:①测出人对一定范围吸气或呼气阻力负荷的辨别阈梯级(difference threshold steps, 或称“最小可觉差”梯级, just noticeable difference steps, JND steps)的数目,每一梯级所对应的物理或生理刺激量范围;②每一JND梯级所对应的多级估量量表值<sup>[11]</sup>;③呼吸型式随JND梯级的特征性变化。

## 实 验 方 法

**被试者** 共9名健康男子,无心肺疾病史,18~42岁,身高 $172.4\pm 7.3\text{cm}$ ,体重 $60.8\pm 4.4\text{kg}$ ,常规肺功能检查属正常范围。

**实验装置** 以XY-1呼吸气体流率与压力测量仪测出呼吸流率及口腔压力变化,其模拟量输出分别由LM-12-YT笔记录仪(永青示波器厂)及A-69数据记录仪(sony)记录。流率仪的一端安装咬咀;另一端经呼吸活门与阻力器相连。阻力器为由若干分节组合而成的结构,每节开始部位装有一尼龙网制阻力片,于节的中间部位又有一侧向开口,可随时启、闭,阻力大小即由开口的位置决定。当阻力器各级开口单独启开时的阻值及流阻特性见表1。其它详情见文献<sup>[11]</sup>。

表1 阻力器的流阻特性\*

阻力器开口		阻力值(mmH <sub>2</sub> O)		流阻特性		阻力器开口		阻力值(mmH <sub>2</sub> O)		流阻特性	
序号	0.5 l <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	1 l <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	K	n	序号	0.5 l <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	1 l <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	K	n		
1	5	11	.0612	1.2648	14	73	183	.8046	1.3240		
2	8	21	.0622	1.4261	15	83	205	.9814	1.3035		
3	12	31	.1081	1.3840	16	91	226	1.3465	1.3129		
4	15	42	.0914	1.4690	17	101	246	1.3176	1.2763		
5	20	52	.1836	1.3791	18	112	264	1.5925	1.2489		
6	24	62	.1783	1.4334	19	117	281	1.5801	1.2656		
7	27	72	.2163	1.4152	20	125	300	1.7096	1.2620		
8	30	82	.2276	1.4359	21	143	350	1.8403	1.2797		
9	35	91	.2984	1.3968	22	161	385	2.2446	1.2564		
10	39	102	.3248	1.4041	23	178	415	2.6900	1.2320		
11	48	124	.4322	1.3840	24	194	457	2.9461	1.2314		
12	58	145	.6306	1.3290	25	208	490	3.2063	1.2272		
13	66	166	.6560	1.3529							

\* 流阻特性以方程式 $P = K \cdot V^n$ 的参数K、n表示。

**实验步骤** 被试来实验室后,先接受主试的指导语,并进行体验,俟结果基本稳定才开始正式实验。

对每名被试,均先测定自10(对照)至500mmH<sub>2</sub>O·l<sup>-1</sup>·s范围吸气或呼气阻力的JND梯级数目各6~8次,并求出各梯级所对应的平均起始阻力值。最后,由被试对本人吸或呼气相各JND梯级所对应的平均起始阻力再依次各体验3分钟;前两分钟记录生理变化;第三分钟,依次按多级估量量表(Multistage Evaluation Scale, MES)<sup>[11]</sup>及一般类别量表(CS)<sup>[12]</sup>对所体验的呼吸阻力感觉进行评量。每名被试均须于三至四日以内完成实验任务。

JND梯级的测定按辨别阈限法。每次测定之具体步骤是:依次将一标准阻力(R<sub>s</sub>)和可变阻力(R<sub>v</sub>)施加于吸气或呼气相,R<sub>s</sub>持续3~6次呼吸,R<sub>v</sub>持续5次呼吸;如被试者不能辨别,即重新给予R<sub>s</sub>,并增加下一次R<sub>v</sub>的强度,再行比较。反复进行,至刚能辨别时为止。以最后的R<sub>v</sub>作为此JND梯级的终点,并作为下一梯级的始点(R<sub>s</sub>')。仿上述方法进行至所规定的阻力上限。如遇被试辨别不清,则回到更低值的R<sub>v</sub>按上述步骤重行测定。实验中反复向被试者强调以“在R<sub>v</sub>作用期间刚能体验出的、确定的阻力感觉或呼吸用力程度的差别作为辨别阈的判断标准”,而不得依据其他“暗示”等。为使被试集中精力,在每次R<sub>s</sub>或R<sub>v</sub>出现之前,主试均发出相应预备口令——“0”或“1”。

## 实验结果

### 一、JND 感觉单位与外加呼吸阻力、口腔压力或外呼吸功间的关系

据 Fechner 定律, 感觉量(S)可以 JND 梯级为单位进行测量[7,8]。为检验阻力负荷与 S 间的函数关系, 分别以外加阻力(R)为物理刺激量, 以口腔压力(峰值  $P_{max}$ , 积分均值  $\bar{P}$ , 压力积分值  $\bar{P} \cdot T$ ,  $\bar{P} \cdot T = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt$ ) P 或外呼吸功 ( $W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot \dot{V}(t) \cdot dt$ ) 为生理刺激量, 分析其与 JND 感觉单位间的关系。结果见图 1、表 2。R-JND、 $\bar{P} \cdot T$ -JND、 $\bar{P}$ -JND、 $P_{max}$ -JND 及 W-JND 函数关系皆属指数型式, 均可由  $\hat{Y} = e^{A+B \cdot X} - k$  ( $\hat{Y}$ —物理或生理刺激量, X—JND 感觉单位, A、b、k—参数) 拟合。由数据分布情况看, 1~3 JND 比较集中, 4 JND 以上数据分散程度加大。吸气或呼气阻力(IR 或 ER) 相应函数关系比较: R-JND、 $\bar{P} \cdot T$ -JND 均为 ER 曲线位于 IR 者之上方(回归系数相差显著性检验,  $P < .01$ ); 而在  $P_{max}$ -JND、 $\bar{P}$ -JND 及 W-JND 则均为 IR 曲线位于上方, 在 2 或 3 JND 以上, 差别越加明显 ( $P < .01$ , 或  $< .05$ )。

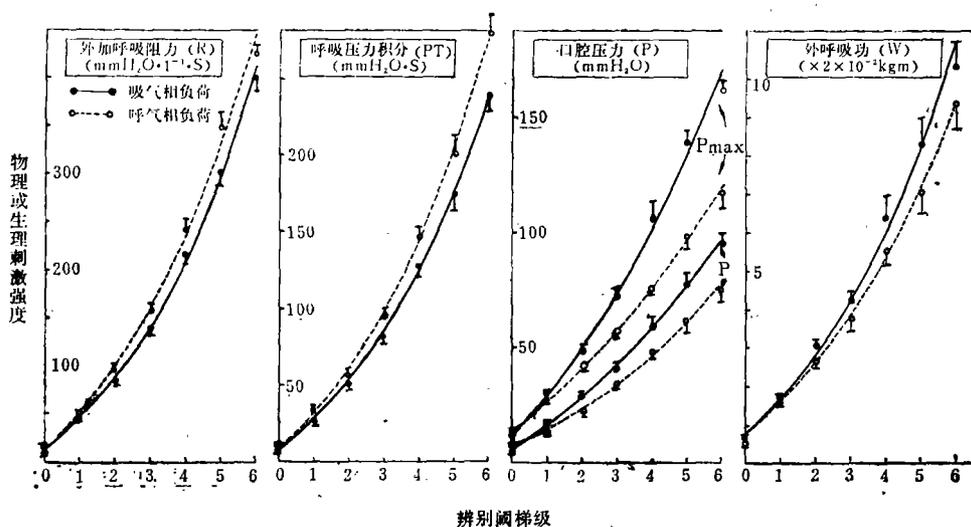


图1 JND 感觉单位分别与外加呼吸阻力、口腔压力、外呼吸功间的函数关系

图注: 图中圆点为组的均值, 垂直线段长度代表 1 SE

### 二、JND 感觉单位与由心理类别量表评量的呼吸感觉量间的关系

JND 感觉单位与两种类别量表评量的感觉量 ( $S_{MES}$  及  $S_{CS}$ ) 间均符合指数函数关系 (图 2、表 3)。由量表评量结果结合实验后的主诉得知: 1~3 JND 感觉单位的阻力感觉属“轻度”; 4 JND, “中度”; 5 JND, 属“较重”以上, 并有一定程度的呼吸不适感。

IR 与 ER 曲线的比较: MES 评量之结果, 于 5、6 JND 处可见 IR 之感觉量值明显高于 ER 者 ( $P < .01$ ); CS 评量结果, 两者间无显著差别。

表2 JND感觉单位(X)与物理或生理刺激量(Y)间的函数关系

Y 变量	负荷时相	$\hat{Y} = e^{A+bX-K}$			方程的参数			L、E方程回归系数相差显著性检验
		A	b	K	r	Sy·x	P	
物理刺激	I	4.6247	0.2663	90	0.9995	0.0199	<.01	**
	R	5.0132	0.2271	140	0.9987	0.0276	<.01	
生理刺激	I	4.7056	0.1493	100	0.9981	0.0220	<.01	**
	Pmax	4.6296	0.1193	90	0.9982	0.0169	<.01	
P.T	I	4.3457	0.2311	70	0.9997	0.0127	<.01	**
	E	4.3721	0.2469	70	0.9996	0.0161	<.01	
P	I	4.1025	0.1544	55	0.9994	0.0127	<.01	**
	E	3.6000	0.1815	30	0.9976	0.0301	<.01	
W	I	1.3049	0.2231	3	0.9964	0.0451	<.01	*
	E	1.3336	0.1996	3.1	0.9987	0.0245	<.01	

\* 相差显著, P<.05, \*\* 相差非常显著, P<.01

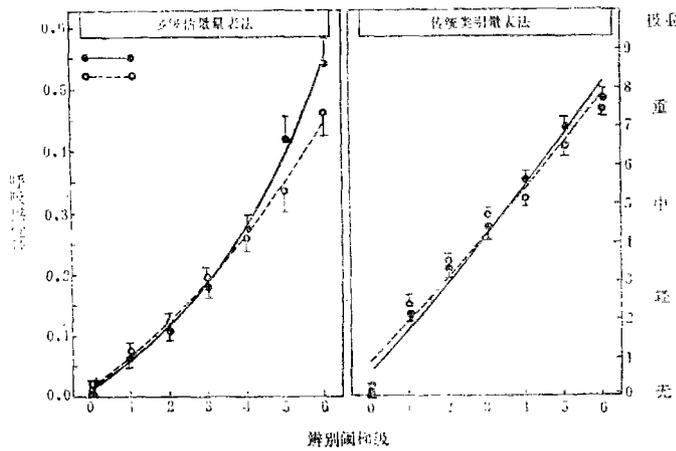


图2 JND感觉单位与多级估量量表及类别量表评量之呼吸感觉量间的关系

图注: 见图 1

表3 JND感觉单位(X)与呼吸感觉量值(Y)间的函数关系

Y 变量	负荷时相	$\hat{Y} = e^{A+bX-K}$			方程的参数			L、E方程回归系数相差显著性检验
		A	b	K	r	Sy·x	P	
多级估量法估计的	I	-1.8185	0.2429	0.15	0.9993	0.0215	<.01	**
感觉量值(S <sub>MES</sub> )	E	-1.0083	0.1295	0.35	0.9984	0.0174	<.01	
类别量表估计的感	I	3.1210	0.0430	22	0.9887	0.0172	<.01	NS
觉量(S <sub>CS</sub> )	E	3.1326	0.0438	22	0.9762	0.0230	<.01	

\*\* 相差非常显著, P<.01, NS相差不显著, P>.05。

由各JND 梯级所对应的刺激量关系,还可间接得出刺激量与由类别量表评量的感觉量间

的函数关系。图3给出的 $P_{max}$ - $S_{MES}$ 关系即是一例，函数呈凹向上指数型式，I、E间差别非常显著 ( $P < .01$ )。

### 三、各JND梯级所对应的呼吸型式变化

取各JND梯级所对应的平均起始阻力负荷作用期间第1、5、10、15、20次呼吸周期的呼吸频率( $f$ )、潮气量( $V_T$ )、肺通气量( $V$ )、呼吸气体流率的峰值( $\dot{V}_{I\max}$ )及均值( $\bar{V}_I$ )、呼吸时间( $T_I$ 、 $T_E$ 、 $T_I/T_C$ )以及形状因子( $\dot{V}_{I\max}/V$ )等的均值表示呼吸型式的变化，并将其与JND感觉单位之间的关系整理于图4。

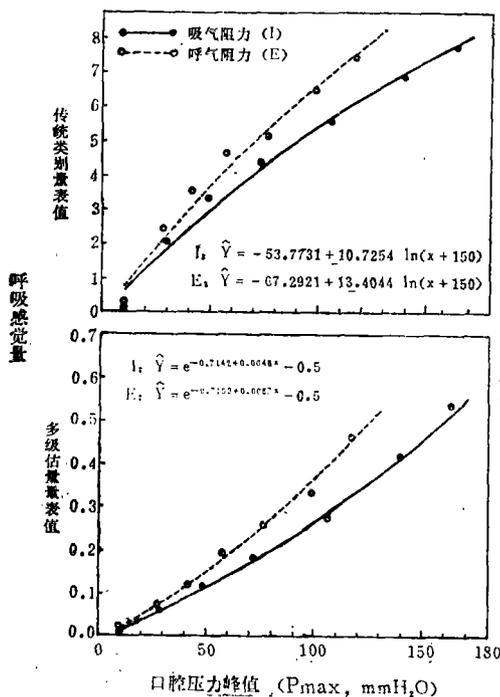


图3 生理刺激量 ( $P_{max}$ ) 与呼吸感觉量间的函数关系

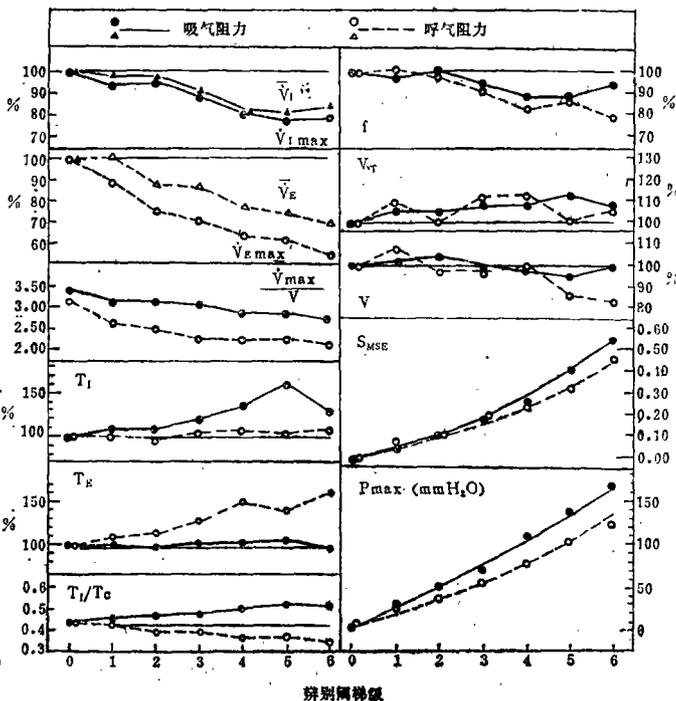


图4 JND感觉单位与口腔压力、呼吸感觉量及呼吸型式变化的对应关系

可见 $\bar{V}$ 与 $\dot{V}_{I\max}$ 的变化趋势基本一致，只是前者的倍数变化相对较小， $\bar{V}_I$ 在3JND时降为对照的90%， $\bar{V}_E$ 在2JND时已降至90%。3JND时，阻力负荷时相时间的延长， $f$ 降低以及 $V_T$ 升高等的相对倍数变化均已较明显。4JND时，肺通气量仍可维持在对照水平。

## 讨 论

以往二十年关于机械负荷引起之呼吸感觉的研究主要集中在以下三个方面：①应用恒定刺激法测出人对外加负荷的绝对阈及辨别阈；②应用等距量表的归类估计法（类别量表）、比率量表的量值估计法等评量对阈上机械负荷的感觉体验；③阐明Stevens定律对呼吸感觉的有效性<sup>[1,2]</sup>。近年亦报道用信号检测理论<sup>[13]</sup>、模糊集论<sup>[11]</sup>研究呼吸感觉。本工作则阐明可用JND梯级描述呼吸阻力感觉，并证明JND感觉单位与刺激量之间均呈指数关系。现分别

就方法学、心理物理函数及本工作之生理学和实际意义讨论如下。

在方法学上，经典的心理物理学方法都规定以50%试验次数能被辨别的最小差别为辨别阈。在呼吸感觉阈限研究中，以往亦多采用恒定刺激法，以阻力负荷作用1、3或5个呼吸周期，50%次数能察觉或辨别的负荷来确定绝对阈或辨别阈<sup>[1,2,6,9]</sup>。由于呼吸活动有一定节律性及较大的随机性，逐次呼吸的各项参数值变异较大，即使采用50%概率表达阈限，亦不能从根本上排除非感觉因素的影响<sup>[13]</sup>。且实验时间过长，还会带来疲劳因素等的影响，故我们只采用递增的极限法测定JND梯级数。

曾见文献<sup>[4,6,9]</sup>提出人对呼吸机械负荷的辨别阈符合Weber法则。Halttunen(1974)<sup>[10]</sup>曾试图用调整法观察人对肺容积变化的感觉体验是否符合Fechner定律，但未得出明确结果。本工作阐明JND感觉单位与物理或生理刺激量间均符合 $Y = e^{A+bx} - K$ 的指数关系(参见表2)。此与Fechner定律的一般数学形式<sup>[7]</sup>： $S = k \log R$  (S—感觉量，以JND单位计；R—刺激量，以绝对阈倍数计)，尚有所不同，故关于Fechner定律对呼吸感觉的有效性问题的探讨。

业已阐明，人对外加吸气阻力负荷所体验到的感觉量直接与吸气肌张力有关(可由 $P_{Im}$ 代表其强度)，间接与阻力的物理量有关<sup>[3,5]</sup>。本实验及我们先前工作<sup>[11,12]</sup>均表明以 $P_{max}$ 作为生理刺激的指标是合理的。本实验还证明，同等大小的 $P_{max}$ 在呼气相将引起更强的阻力感觉(参见图3)；在<sup>[14]</sup>的结果中也可看出这种趋势。至于<sup>[12,15]</sup>所报道之吸气阻力能引起更强烈呼吸不适感的结果，显然与一般条件下 $\dot{V}_{Imax}$ 相对较高，同等R作用下 $P_{Imax}$ 也较高有关。即感觉量与R只是间接相关。

从应用角度，可将本实验的JND梯级数目测定看作评量呼吸阻力感觉的辨别阈量表(Discriminability Scale)<sup>[引自10]</sup>。它表明在给定的负荷范围内，人能辨别出的阻力感觉共有多少个梯级，每一梯级的“范围”有多大。这种量表基于通过对 $R_s$ 与 $R_v$ 的对比而确定，其主观判断依据较为明确。一个感觉过程除具有性质、数量、时间、空间维数外，还常具有情感方面的影响<sup>[8]</sup>。阻力感觉与呼吸不适感两者间既有联系又有区别，应大致呈平行关系。本实验所确定的JND感觉单位与 $S_{MES}$ 之间的关系，可具体地给出各JND感觉单位所对应的阻力感觉的强度类别及呼吸不适感的程度。

由多元分析或者概率单位法<sup>[12]</sup>，只能是经验性地由相关关系得出外加呼吸阻力的容许阈限值；而由辨别阈量表测得之JND梯级及所对应的 $S_{MES}$ 值则是基于感觉生理及心理物理规律。本实验测得3 JND的感觉强度仍属“轻度”。引起此种感觉的相应生理刺激量为： $P_{Imax}$ ，70~100mmH<sub>2</sub>O ( $\dot{V}_{Imax} = 45 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ )； $P_{Emax}$ ，55~75mmH<sub>2</sub>O ( $\dot{V}_{Emax} = 30 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ )。以上结果对制订呼吸防护装备阻力标准有一定参考价值。

### 参 考 文 献

1. 张立藩：呼吸机械负荷(综述)。国外医学(军事医学分册) 2: 82, 1984
2. Altose MD and Cherniack NS. Respiratory sensation and respiratory muscle activity, in Hutas I and Debreczeni A (Ed), *Advances in Physiological Sciences, Vol 10, Respiration*, pp. 111-119, Pergamon Press, 1980
3. Altose MD, et al. The sensation of respiratory muscle force. *Am Rev Respir Dis* 126: 807, 1982
4. Mahutte CK, et al. Theory of resistive load detection. *Respir physiol* 51: 131, 1983
5. Stubbing DG, et al. Psychophysics of inspiratory muscle force. *J Appl Physiol* 54: 1216, 1983

6. Gottfried SB, et al. The perception of changes in airflow resistance in normal subjects and patients with chronic airway obstruction. *Chest* 73(2)suppl: 286, 1979
7. Bennett TL (旦明译): 感觉世界—感觉和知觉导论. 28-50, 科学出版社, 1983
8. Schmidt R F(Ed). Fundamentals of sensory Physiology. pp.15-30, Springer Verlag, 1978
9. Wiley RL and Zechman FW. Perception of added airflow resistance in humans. *Respi Physiol* 2: 73, 1966/67
10. Halttunen PK. The voluntary control in human breathing. *Acta Physiol Scand Suppl* no. 419, 1974
11. 张立藩等: 呼吸阻力负荷感觉评量方法的研究. 第四军医大学学报 7: 1, 1986
12. 马瑞山等: 飞行人员航空供氧装备外加呼吸阻力容许水平的测定. 第四军医大学学报 6: 1, 1985
13. Narbed PG, et al. The contribution of the accelerating phase of inspiratory flow to resistive load detection in man. *Clin Sci* 62: 367, 1982
14. Muza S R, et al. Comparison of subjects' perception of inspiratory and expiratory resistance. *J Appl Physiol* 56: 211, 1984
15. Chapman KR and Rebeck AS. Inspiratory and expiratory resistive loading as a model of dyspnea in asthma. *Respiration* 44: 425, 1983

## THE DIFFERENCE THRESHOLD STEPS OF RESPIRATORY RESISTIVE-LOAD-SENSATION — A DISCRIMINABILITY SCALE

Zhang Lifan

(Department of Aviation Environmental Physiology, The Fourth Military Medical College)

The difference threshold steps, or just noticeable difference steps (JND steps) of respiratory sensation in 9 healthy male subjects caused by either inspiratory (I) or expiratory (E) resistive loads (R) ranging 10-500 mmH<sub>2</sub>O. 1<sup>-1</sup>.S were determined. The perceived sensory magnitude and respiratory patterns were also estimated and recorded simultaneously. It was found that the sensory continuum corresponding to the range of loads studied consisted of 6 to 7 JND steps. Both physical (R) and physiological stimuli (i.e. oral pressure—P or external respiratory work—w) were related to JND sensory units. These relations could be fitted by an equation:  $\hat{Y} = e^{A+bx} - K$ , where  $\hat{Y}$ —quantity of physical or physiological stimulus; X—JND sensory unit; A, b, K—parameters. The relationship between perceived magnitude estimated by use of Multistage Evaluation Scale and JND units was also an exponential one and the difference between I and E loads was significant. The corresponding changes in respiratory patterns were as follows, when the intensity of sensation reached to 3 JND, most parameters began to show significant changes and pulmonary ventilation could be maintained at control level within 4 JND. The P<sub>max</sub> induced by 3 JND load, where the respiratory resistive-load-sensation elicited could be categorized as of "light" degree, was 70 and 55 mmH<sub>2</sub>O in IR and ER, respectively. The JND steps based upon the concept of Fechner's psychophysical function could be treated as a discriminability scale for the estimation of respiratory sensation. The significance of our findings for establishing physiological standard of respiratory protective equipment is also discussed.

**KEY WORDS** added respiratory resistance; respiratory pattern; respiratory sensation; difference threshold steps; discriminability scale

收稿日期 1985年11月5日