

# 自然通风对呼吸顺畅度影响的有序逻辑回归分析

陈言桂<sup>1,2</sup>, 李莉<sup>1,2</sup>, 施灵<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 海洋可再生能源装备福建省高校重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究教室自然通风条件下环境参数对学生呼吸顺畅度的影响, 2018年3月至4月期间对77名受试者进行呼吸顺畅度指标问卷调查和现场自然通风环境参数采集, 得到82组数据。对数据进行有序逻辑回归分析, 得出: 呼吸顺畅度指标与干球温度、相对湿度和CO<sub>2</sub>体积分数有关; 建立逻辑回归的模型模拟指标与实测指标吻合度89.8%, 具有较高的拟合结果; 影响呼吸顺畅度指标的主要因素是干球温度, 相对湿度次之, CO<sub>2</sub>体积分数的影响较弱。

[关键词] 呼吸顺畅度; 问卷调查; 环境参数; 有序逻辑回归

[中图分类号] TK 124; TB 64

## Ordered Logistic Regression Analysis of the Effect of Natural Ventilation on Smooth Breathing

CHEN Yangui<sup>1,2</sup>, LI Li<sup>1,2</sup>, SHI Ling<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Ocean Renewable Energy Equipment, Fujian Province University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to study the influence of natural ventilation parameters on student's smooth breathing in classroom, 77 volunteers were surveyed for the index of smooth breathing and the environment parameters were collected from March to April in 2018. The 82 sets of data were got. The data were analyzed by orderly logistic regression analysis. Results show that the index of smooth breathing is related to dry temperature, relative humidity and CO<sub>2</sub>, the 89.8% of the regression models established by logistic regression are consistent with the measured data and have higher fitting results. Results also reveal that dry ball temperature has the greatest influence on the index of human smooth breathing, and the influence of CO<sub>2</sub> is weaker than that of dry ball temperature and relative humidity.

**Keywords:** smooth breathing; questionnaire; environment parameters; ordered logistic regression analysis

## 0 引言

呼吸是人体与外界进行气体交换的过程, 外界环境参数的变化影响着人体呼吸, 良好的空气参数不仅能改善人体呼吸顺畅度, 而且对人的健康有益, 同时可以提高工作效率, 使人富有创造力。

[收稿日期] 2018-05-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51508225); 福建省自然科学基金项目(2018J01486); 福建省教育厅基金项目(JAT170320)

[作者简介] 陈言桂(1980—), 男, 讲师, 从事制冷空调理论和新能源技术等方面研究。E-mail: chenyanhui@jmu.edu.cn

目前，国内外的相关研究主要集中在环境参数对呼吸系统疾病影响方面。如 Carder 等<sup>[1]</sup>认为气温与大气颗粒物对呼吸系统的影响存在交互作用，过低或过高的空气温度均能加剧大气颗粒物对呼吸系统的损害，并造成严重的健康问题；Michelozzi 等<sup>[2]</sup>的研究发现，高温会引起呼吸系统疾病入院率升高，中东和北欧城市的气温从某个临界值开始每升高 1 ℃，呼吸系统疾病入院率增加 4.5%；陶辉等<sup>[3]</sup>对北京 H 区研究结果显示，日平均气温大于 25 ℃时，气温每升高 1 ℃，呼吸系统疾病死亡率增加 25.7%；Barreca<sup>[4]</sup>，陶燕等<sup>[5]</sup>认为人体暴露于极端湿度环境下同样也会增加呼吸系统疾病的死亡风险；王敏珍等<sup>[6]</sup>研究发现，平均气温与相对湿度对呼吸系统疾病急诊就诊人数的影响均呈现 U 型的非线性分布特征，其中低温、低湿是呼吸系统疾病发生的重要环境因素。

综上所述，目前相关研究侧重于呼吸系统疾病方面，尚缺乏对人体正常呼吸顺畅度方面的研究；且未发现室内 CO<sub>2</sub>浓度对人体呼吸顺畅度影响方面相关文献。故本文在厦门市教室自然通风环境下，测试该环境参数（辐射温度  $t_r$ ，干球温度  $t_g$ ，相对湿度  $\psi$ ，风速  $v$ ，CO<sub>2</sub> $n$ ），收集受试者在该环境下对呼吸顺畅度所做的主观评价指标，研究教室在自然通风情况下环境参数对人体呼吸顺畅度的影响，以期为同类课题研究提供参考。

1 研究方法

1.1 受试者背景和测试地点

本次课题受试者为建筑环境与能源应用工程专业学生，受试者人数 77 人，其中男生 66 人，女生 11 人。受试者已在厦门生活 3 年，已基本适应厦门市气候。受试者背景情况见表 1。

表 1 受试者背景情况  
Tab. 1 The background of participants

项目 Project	年龄 Age/( 岁 year)	身高 Height/cm	体重 Weight/kg
平均 Mean	20.30	168.3	58.0
最小 Minimum	18.00	150.0	44.0
最大 Maximum	23.00	183.0	72.0
标准偏差 Standard deviation	1.14	10.2	9.3

测试地点位于集美大学大唐楼 2504 教室，该教学楼是一座 6 层建筑物，南北朝向，教室南面为窗户，北面为内墙及门，测试时将门窗开启，实现自然通风。

1.2 数据采集

1.2.1 环境参数采集

采用型号为 Testo 480 的德图多功能测量仪测试教室自然通风环境参数，每隔 1 s 自动采集一次数据，每次采集 15 min。

1.2.2 问卷调查方案

本课题制定的呼吸顺畅度指标  $m$  为 4 水平的因变量，见表 2。

表 2 统计结果  
Tab. 2 The result of descriptive statistics

因素 Factor	呼吸顺畅度指标 The index of smooth breathing				$P$
	顺畅 ( $m = 1$ ) Smooth	正常 ( $m = 2$ ) Normal	微闷 ( $m = 3$ ) Slightly stuffy	闷 ( $m = 4$ ) Stuffy	
$t_r/^\circ\text{C}$	20.84 ± 1.52	21.38 ± 2.22	26.89 ± 3.35	26.87 ± 0.31	>0.05
$t_g/^\circ\text{C}$	19.41 ± 1.99	20.02 ± 2.35	26.19 ± 3.41	26.77 ± 0.21	<0.05
$\psi/^\circ\text{C}$	61.39 ± 5.43	62.08 ± 8.48	68.56 ± 3.37	67.40 ± 15.95	<0.01
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.40 ± 0.22	0.55 ± 0.59	0.35 ± 0.22	0.03 ± 0.01	>0.05
$n$	587.11 ± 58.64	615.33 ± 67.09	501.71 ± 59.33	814.00 ± 323.04	<0.01

利用现流行的微信——腾讯投票调查小程序,制作呼吸顺畅度指标问卷调查内容。课题组于2018年3月至4月期间,在测试地点,对受试者的呼吸顺畅度进行问卷调查和现场环境参数采集,得到自然通风环境下82组环境参数和呼吸顺畅度指标。

厦门市3月至4月为传统的梅雨季节,温湿度变化较大,测试期间教室内干球温度 $t_g$ 为17.4~29.6℃,相对湿度 $\psi$ 为51.45%~83.35%,风速 $v$ 为0.04~1.14 m/s,CO<sub>2</sub>体积分数 $n$ 为442~1137,说明测试数据具有较大适用性。

测试时要求受试者着长袖单衣和长裤,忽略衣服热阻对人体呼吸顺畅度的影响。为减少受试者刚进入教室时产生感官误判以及教室自然通风条件下环境参数产生波动的不稳定因素,要求受试者静坐30 min,再开始问卷调查。

2 数据处理

根据受试者的呼吸顺畅度问卷调查内容,将频数在90%以上的呼吸顺畅度指标作为测试最终结果。整理 Testo 480 多功能测量仪测试得到的环境参数,建立辐射温度 $t_f$ ,干球温度 $t_g$ ,相对湿度 $\psi$ ,风速 $v$ ,CO<sub>2</sub>体积分数 $n$ 与呼吸顺畅度指标的对应关系,分别对这些参数和指标进行单因素分析的 $\chi^2$ 检验,以显著水平 $P=0.05$ 为标准<sup>[7]</sup>。检验的均值、偏差和显著水平 $P$ 值,见表2。根据表2,相对湿度 $\psi$ 和CO<sub>2</sub>体积分数 $n$ 存在显著差异( $P<0.01$ );干球温度 $t_g$ 存在差异显著( $P<0.05$ )。

因测试季节正处于厦门市春夏过渡季,气候适宜,且所测环境为教室,辐射温度与干球温度温差较小,其对人体呼吸顺畅度指标影响与干球温度一致,故辐射温度 $t_f$ 无明显差异( $P>0.05$ );教室风速较低(0.04~1.14 m/s),对人体呼吸顺畅度影响无明显差异( $P>0.05$ ),但当风速变大时,风速是否人体呼吸顺畅度产生影响,将在后期研究中进一步深化。

综上所述,在教室内自然通风条件下,呼吸顺畅度指标与干球温度、相对湿度和CO<sub>2</sub>体积分数有关,与风速和辐射温度未发现相关性。

3 有序逻辑回归模型

3.1 有序逻辑回归模型的建立

在本课题中,人体呼吸顺畅度是4水平的因变量,即存在有序多分类,传统模型回归方式无法对这种因变量进行拟合,而有序逻辑回归方式能解决这类问题,其原理是将因变量的多个分类依次分割为多个二元的逻辑回归<sup>[8]</sup>。

为了正确估计多因素的综合影响,根据表2的单因素分析结果,将 $P<0.01$ 的因素进行有序逻辑回归分析, $P<0.05$ 的因素为保留条件,来拟合回归方程,则进入模型的变量有相对湿度 $\psi$ 、CO<sub>2</sub>体积分数 $n$ 和干球温度 $t_g$ ,因变量有呼吸顺畅度指标 $m$ ,所建立的有序逻辑回归模型,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \ln [\pi_1/(1-\pi_1)] = \ln [\pi_1/(\pi_2+\pi_3+\pi_4)] = -\alpha_1 + \beta_1 \cdot t_g + \beta_2 \cdot \phi + \beta_3 \cdot n, \\ \ln [(\pi_2+\pi_1)/(1-(\pi_2+\pi_1))] = \ln [(\pi_2+\pi_1)/(\pi_4+\pi_3)] = -\alpha_2 + \beta_1 \cdot t_g + \beta_2 \cdot \phi + \beta_3 \cdot n, \\ \ln [(\pi_3+\pi_1+\pi_2)/(1-(\pi_3+\pi_1+\pi_2))] = \ln [(\pi_3+\pi_1+\pi_2)/\pi_4] = -\alpha_3 + \beta_1 \cdot t_g + \beta_2 \cdot \phi + \beta_3 \cdot n. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\pi_1$ 为呼吸顺畅度 $m=1$ 的概率; $\pi_2$ 为呼吸顺畅度 $m=2$ 的概率; $\pi_3$ 为呼吸顺畅度 $m=3$ 的概率; $\pi_4$ 为呼吸顺畅度 $m=4$ 的概率; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 分别为 $t_g$ 、 $\phi$ 和 $n$ 的自变量系数; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 为常数。

3.2 模型检验

有序逻辑回归分析建立的基础是自变量之间无多重共线性(即平行线检验)和模型满足“优势比”这两个假设条件,故所建立的模型需对这两个假设条件进行检验。

平行线检验是在不同指标的有序分类结果中,解释变量的效应( $\beta_i$ 值)应保存一致,不会随着指标的不同而变化。当模型的回归系数( $\beta_i$ 值)相等的限制条件取消时,公式(1)的对数似然值改

变，其统计量服从 $\chi^2$ 分布，在平行线假设成立的条件下， $\beta_i$ 应保持一致或接近，不存在系统的差别，即显著水平 $P \geq 0.05$ 。<sup>[8]</sup>

优势比 OR (odds ratio) 是一种描述性统计方法，是某事件在一个群体内发生概率与不发生概率之比与该事件在另一个群体内发生概率与不发生概率之比的比值。在本文中利用优势比判断不同因素对因变量（呼吸顺畅度）影响程度的大小<sup>[8]</sup>。优势比  $OR = \exp(\beta_i)$ ，其 95% CI (Confidence Intervals) 置信区间由  $95\% CI = OR^{(1 \pm 1.96/\sqrt{\chi^2})}$  计算。

## 4 模拟结果及因素分析

### 4.1 模拟结果

采用 SPSS20 软件对 82 组样本数据进行有序逻辑分析，得出有序逻辑分析的平行线检验，见表 3，其中  $df$  为自由度；模型的参数估计值见表 4；实测指标与模型模拟指标对比情况如图 1 所示。

表 3 平行线检验  
Tab. 3 Parallel text

模型 Model	-2 对数似然值 -2 Log Likelihood	$\chi^2$	df	P
零假设 Null Hypothesis	88.741			
广义 General	82.473 <sup>b</sup>	6.268 <sup>c</sup>	6	0.394

由表 3 的平行线检验结果，可以看出零假设逻辑模型和广义逻辑模型回归方程中，各自变量与因变量的检验影响结果相同，即  $P = 0.394 > 0.05$ ，说明各回归方程是相互平行的，可以使用有序回归模型来进行分析。

由表 4 可以得出自变量系数显著水平  $P$  均小于 0.01，说明干球温度、相对湿度和  $CO_2$  体积分数与该有序逻辑回归模型具有显著的相关性。

表 4 模型的参数估计值  
Tab. 4 Estimation of the parameters of the model

系数 Coefficient	估计值 Estimation	标准差 Std Error	$\chi^2$	P	OR	95% CI
$\alpha_1$	94.125	20.557	20.964	<0.01		
$\alpha_2$	99.871	21.267	22.053	<0.01		
$\alpha_3$	110.792	23.906	21.478	<0.01		
$\beta_1$	1.549	0.320	23.392	<0.01	4.707	2.511 ~ 8.822
$\beta_2$	0.412	0.101	16.805	<0.01	1.510	1.239 ~ 1.842
$\beta_3$	0.064	0.014	19.394	<0.01	1.066	1.035 ~ 1.098

由图 1 可以看出，模拟指标与实测指标 89.8% 吻合，说明所建立的有序逻辑回归模型与实测值具有较高的拟合结果。

### 4.2 因素分析

由表 4 可得， $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$ 。根据式 (1) 可知，对呼吸顺畅度指标的影响重要程度依次为干球温度 > 相对湿度 >  $CO_2$  体积分数。

干球温度的 OR 值为  $4.707 > 1$ ，即在呼吸顺畅度指标  $m$  在高 1 个指标的可能性判断中，干球温度的高是低的 4.707 倍，说明干球温度越高，呼吸顺畅度就越差。

相对湿度的 OR 值为  $1.510 > 1$ ，即呼吸顺畅度指标  $m$  在高 1 个指标的可能性判断中，相

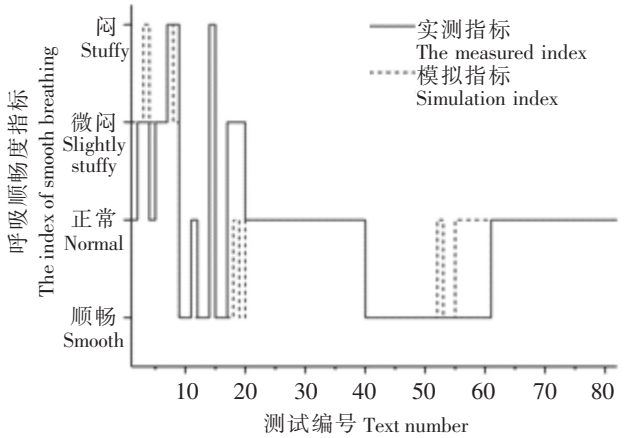


图 1 实测指标与模型模拟指标对比

Fig.1 Comparison of the measured index and model simulation index

对湿度的高是低的 1.510 倍,说明相对湿度越高,呼吸顺畅度就越差。

CO<sub>2</sub> 体积分数的 OR 值为 1.066,即在呼吸顺畅度指标  $m$  在高 1 个指标的可能性判断中,CO<sub>2</sub> 体积分数的高是低的 1.066 倍,说明 CO<sub>2</sub> 体积分数越高,呼吸顺畅度就越差。在教室自然通风环境下,CO<sub>2</sub> 体积分数对呼吸顺畅度影响较干球温度和相对湿度弱。

## 5 结论

1) 在教室自然通风环境下,呼吸顺畅度指标与干球温度、相对湿度和 CO<sub>2</sub> 体积分数有关,它们对呼吸顺畅度指标的影响程度依次为干球温度 > 相对湿度 > CO<sub>2</sub> 体积分数。

2) 用有序逻辑回归理论来建立呼吸顺畅度指标回归模型是可行的,89.8% 的模拟指标与实测指标吻合,具有较高的拟合结果。

## [ 参考文献 ]

- [1] CARDER M, MCNAMEE R, BEVERLAND I, et al. Interacting effects of particulate pollution and cold temperature on cardiorespiratory mortality in Scotland [J]. *Occup Environ Med*, 2008, 65: 197-204.
- [2] MICHELOZZI P, ACCETTA G, SARIO M, et al. High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2009, 179: 383-389.
- [3] 陶辉,童建勇,沈艳辉,等.北京市 H 区日平均气温与呼吸系统疾病死亡的病例交叉研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2011, 28(7): 569-572.
- [4] BARRECA A I. Climate change, humidity and mortality in the United States [J]. *J Environ Econ Manage*, 2012, 63(1): 19-34.
- [5] 陶燕,宋捷,强力,等.兰州市城关区气象因素与麻疹发病人数的时间序列研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(11): 2964-2969.
- [6] 王敏珍,郑山,王式功,等.气温与湿度的交互作用对呼吸系统疾病的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 581-588.
- [7] 张文彤. 统计分析高级教程 [M]. 北京:高等教育出版社,2017: 265-281.
- [8] 张文彤,董伟. 统计分析高级教程 [M]. 北京:高等教育出版社,2018: 162-189.
- [9] GREEN RS, BASU R, MALIG B, et al. The effect of temperature on hospital admissions in nine california counties [J]. *Int J Public Health*, 2010, 55(2): 113-121.
- [10] REN C, WILLIAMS GM, TONG S. Does particulate matter modify the association between temperature and cardiorespiratory diseases [J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114(11): 1690-1696.
- [11] MENG X, ZHANG Y, ZHAO Z, et al. Temperature modifies the acute effect of particulate air pollution on mortality in eight Chinese cities [J]. *Sci Total Environ*, 2012, 435: 215-221.
- [12] JAAKKOLA K, SAUKKORIIPPI A, JOKELAINEN J, et al. Decline in temperature and humidity increases the occurrence of influenza in cold climate [J]. *Environ Health*, 2014, 13(1): 22.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)