

# 基于非参数检验的高原反应影响因素分析

常海娟, 刘 猛, 庞丽萍, 杨 鹏, 王 浚

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

**[摘要]** 用一年的时间随青藏铁路列车采集了2 882份样本数据, 随机抽取其中的1 693份, 利用非参数检验及相关分析的方法从统计学上对可能影响耐缺氧反应的因素做分析, 最后发现以前到高原时缺氧反应严重程度、性别、吸烟习惯、肥胖度、年龄5个因素对个体的抗缺氧能力有着不可忽视的影响。该结论不仅可以为减少旅客高原反应提供指导性意见, 为高原旅客列车供氧系统设计和改进提供重要依据, 也可以为后续的医学研究提供统计学基础。

**[关键词]** 高原反应; 影响因素; 青藏铁路; 非参数检验; 个体抗缺氧能力

**[中图分类号]** U293.1+3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)02-0065-05

## 1 前言

高原缺氧属于缺氧性缺氧或低压缺氧, 产生的主要原因是外界大气压力低而导致机体缺氧。过度换气使体内 $\text{CO}_2$ 严重不足, 机体功能低下加重缺氧也是部分原因。平常生活在平原上, 缺氧耐力低的个体进入海拔3 000 m左右的高原后, 就会出现症状, 表现为呼吸急促、脉搏增加, 并引起头痛、恶心、食欲不振、失眠或昏睡等症状。严重时, 会有出冷汗、面色苍白、眩晕、呕吐、意气沮丧等。出现缺氧症状的最低高度因人而异, 有人在海拔2 000 m就开始出现, 个别人在海拔4 500 m也无明显感觉。但在海拔6 000 m高度, 所有未适应的个体都有反应。同时, 体力负荷会加速症状的出现<sup>[1]</sup>。

早期的高原医学与航空医学对缺氧的研究主要集中在缺氧对人体机能的影响程度, 如缺氧对呼吸系统、视觉、听觉、操作能力、认知能力、体力等方面的影响, 缺氧程度与高原病发生率及严重程度的关系。对影响高原反应的各种个体因素尚无深入研究, 国内外对个体抗缺氧能力影响因素的研究均属于一个新的研究方向。随着青藏铁路的开通, 个体抗缺氧能力的影响因素研究成为一个亟待解决的问题,

因为它不仅可以为减少旅客高原反应提供指导性意见, 也为高原旅客列车供氧系统设计和改进提供重要依据。

针对高原旅客列车供氧问题, 北京航空航天大学高原旅客列车供氧状况调查研究课题组在铁道部专项经费支持下开展了近两年的随车实测与调查工作, 获得了大量的实验数据。笔者研究基于其中的2 882份调查问卷数据, 随机抽取其中的1 693份数据组成样本, 利用卡方检验、Fisher精确检验等非参数检验方法分析性别、年龄、民族、籍贯、肥胖度、以前到高原情况、平时吸烟、饮酒、锻炼等生活习惯对个体抗缺氧能力的影响。

## 2 调查问卷设计

笔者设计调查问卷时考虑了可能影响旅客发生高原反应的多种因素。问卷包括乘客的基本信息——性别、年龄、民族、籍贯、身高、体重等, 同时也对乘客去高原的目的、工作性质、以前到高原情况、既往重大病史、是否有心肺系统疾病、上高原前一周内是否生病、是否容易晕车、平时的吸烟、饮酒、锻炼习惯、是否服用抗缺氧药物、在列车上使用头戴式供氧器吸氧的频率等问题采用五级量化标准设计成调查

**[收稿日期]** 2008-09-26

**[基金项目]** 青藏铁路旅客列车供氧状况评价分析(2005Z12)

**[作者简介]** 王 浚(1935-), 男, 山西孝义市人, 中国工程院院士, 北京航空航天大学博士生导师, 主要研究方向为载人航天器环境控制; E-mail: wangjun@buaa.edu.cn

问卷。

问卷还包括旅客头疼严重情况、呕吐严重情况、其他症状等问题,这些问题都是根据 GJB 1098—1991《急性高原反应的诊断和处理原则》提出的<sup>[2]</sup>。

### 3 缺氧反应状况统计

根据 GJB 1098—1991《急性高原反应的诊断和处理原则》,对旅客的缺氧反应情况作统计分析,按高原反应分度综合评价的结果如图 1 所示。

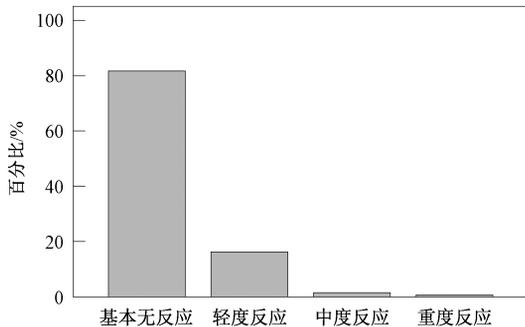


图 1 高原反应分度百分比分布直方图

Fig.1 Percent distribution about degree of mountain sickness

由图 1 可见,86.7% 的乘客基本无高原反应,轻度反应的乘客占 11.8%,发生中度及重度反应的乘客仅占 1.5%。

### 4 独立性检验过程

首先采用独立性检验方法分析各因素与个体抗缺氧能力间是否相互独立<sup>[3~7]</sup>。

#### 4.1 皮尔逊卡方检验

卡方检验,是一种用途较广的计数资料的假设检验方法,属于非参数检验的范畴,主要是比较两个及两个以上样本率以及两个分类变量的关联性分析。其根本思想就是在于比较理论频数和实际频数的吻合程度或拟合优度问题。

现对总体中的每个个体测量其两个指标变量  $(X, Y)$ ,  $X$ ——高原反应分度,  $Y$ ——性别。现预检验:

$H_0$ : 两个变量  $X$  和  $Y$  相互独立

$H_1$ : 两个变量  $X$  和  $Y$  不相互独立

为了检验上述假设,按高原反应分度的结果将总体分为四个类  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , 同时又按性别将总体分为两个类  $B_1, B_2$ 。记

$$p_{i,j} = P(X \in A_i, Y \in B_j),$$

$$i = 1, \dots, 4; j = 1, 2 \quad (1)$$

及

$$p_{i\cdot} = P(X \in A_i), i = 1, 2, \dots, 4$$

$$p_{\cdot j} = P(Y \in B_j), j = 1, 2 \quad (2)$$

显然有

$$p_{i\cdot} = \sum_{j=1}^2 p_{ij}, p_{\cdot j} = \sum_{i=1}^4 p_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^4 p_{i\cdot} = \sum_{j=1}^2 p_{\cdot j} = 1 \quad (3)$$

设  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$  是从该总体中抽取的一个容量为  $n$  的样本,用  $a_{ij}$  表示样本观测中  $X$  值落入类  $A_i = \{\text{基本无反应}; \text{轻度反应}; \text{中度反应}; \text{重度反应}\}$ , 而  $Y$  值落入类  $B_j = \{\text{男}, \text{女}\}$  中的频数,用  $a_{i\cdot}$  表示样本观测中  $X$  值落入类  $A_i$  中的频数,用  $a_{\cdot j}$  表示样本观测中  $Y$  值落入类  $B_j$  中的频数。则有

$$a_{i\cdot} = \sum_{j=1}^2 a_{ij}, a_{\cdot j} = \sum_{i=1}^4 a_{ij}$$

$$n = \sum_{i=1}^4 a_{i\cdot} = \sum_{j=1}^2 a_{\cdot j} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 a_{ij} \quad (4)$$

分类结果如表 1 所示。

表 1 列联表

Table 1 Cross table

Y	影响因素		
	男	女	合计
基本无反应	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{1\cdot}$
轻度反应	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{2\cdot}$
中度反应	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{3\cdot}$
重度反应	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{4\cdot}$
合计	$a_{\cdot 1}$	$a_{\cdot 2}$	$n$

当  $H_0$  为真时,有  $p_{ij} = p_{i\cdot} p_{\cdot j}, i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2$ 。由皮尔逊定理,检验统计量  $\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{(a_{i\cdot} - np_{i\cdot})^2}{np_{i\cdot}}$ 。整理得

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \frac{(f_{ij} - np_{ij})^2}{np_{ij}} \quad (5)$$

$$= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \frac{(f_{ij} - np_{i\cdot} p_{\cdot j})^2}{np_{i\cdot} p_{\cdot j}}$$

$p_{i\cdot}$  和  $p_{\cdot j}$  的极大似然估计分别为

$$\hat{p}_{i\cdot} = \frac{a_{i\cdot}}{n}, i = 1, 2, \dots, 4 \quad (6)$$

$$\hat{p}_{\cdot j} = \frac{a_{\cdot j}}{n}, j = 1, 2$$

因而对假设  $H_0$  和  $H_1$  可采用检验统计量  $\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \frac{(a_{ij} - np_{i\cdot} p_{\cdot j})^2}{np_{i\cdot} p_{\cdot j}}$ , 自由度为 3。

若高原反应分度结果与性别互不相关, 即变量  $X$  与  $Y$  相互独立成立, 各单元格的实际频数  $A$  与理论频数  $T$  相差不应该很大, 即统计量  $\chi^2$  不应该很大。如果  $\chi^2$  值很大, 对于给定的显著性水平  $\alpha$ , 若  $\chi^2 \geq \chi^2_{\alpha}$  (其中  $\chi^2_{\alpha}$  可查表求得), 或者  $\chi^2 = \chi^2_{\beta} \geq \chi^2_{\alpha}$ , 查表求  $\beta$ , 若  $\beta < \alpha$ , 则反过来推断  $A$  与  $T$  相差太大, 超出了抽样误差允许的范围, 从而怀疑  $H_0$  的正确性, 继而拒绝  $H_0$ , 接受其对立假设  $H_1$ , 即高原反应分度结果与不同性别有关系。

由 SPSS 软件做出的统计结果如表 2 和表 3 所示。由于只有 25% 的单元格频数少于 5, 所以可以由皮尔逊卡方检验得出结论, 皮尔逊卡方检验的显著性概率小于 0.001, 所以拒绝原假设, 高原反应分度结果与性别有相关关系。

表 2 高原反应分度及性别列联表

Table 2 Cross table of mountain sickness degree and sex

高原反应分度	性别		合计
	男	女	
基本无反应	931	471	1 402
轻度反应	97	95	192
中度反应	8	9	17
重度反应	4	2	6
合计	1 040	577	1 617

表 3 性别与高原反应分度的卡方检验

Table 3 Chi-square test of mountain sickness degree and sex

	Value	自由度	显著性	Monte Carlo
			概率 (双尾)	显著性概率 (双尾)
皮尔逊卡方检验	20.807	3	0.000	0.000
费雪精确检验	20.308			0.000

注: 两个单元格 (占 25.0%) 期望频数小于 5, 最小期望频数为 2.14; 基于 1 617 个样本。

保持  $X$  变量不变, 取  $Y$  变量为肥胖度。得到列联表如表 4 所示。卡方检验结果见表 5。

由于卡方检验要求列联表中的各个单元格的期望频数  $np_{i\cdot} p_{\cdot j} \geq 1$ , 并且  $1 \leq np_{i\cdot} p_{\cdot j} < 5$  的单元个数不宜超过 25% 单元格总数, 否则可能产生偏性。由表 5 可见表 4 中有 50% 的单元格期望频数都少于 5, 最小单元格频数仅为 0.13, 因此有必要将卡方检

验作进一步改进, 或者选取更适合本例的检验方法。

表 4 高原反应分度及肥胖度列联表

Table 4 Cross table of mountain sickness degree and fatness degree

	肥胖度					合计
	偏瘦	正常	偏重	轻度肥胖	重度肥胖	
基本无反应	135	699	245	205	25	1 309
轻度反应	20	102	34	21	7	184
中度反应	4	4	4	3	2	17
重度反应	1	5	0	0	0	6
合计	160	810	283	229	34	1 516

表 5 肥胖度与高原反应分度的卡方检验

Table 5 Chi-square test of fatness degree and mountain sickness degree

	Value	自由度	显著性	Monte Carlo
			概率 (双尾)	显著性概率 (双尾)
皮尔逊卡方检验	20.903	12	0.052	0.055
费雪精确检验	19.302			0.045

注: 10 个单元格 (50.0%) 的期望频数少于 5; 基于 1 516 个样本。

对于此类问题的处理方法通常有 3 种: a. 增大样本含量以达到增大理论频数, 笔者所采用的样本总容量为 1 693, 再增大样本似乎意义不大; b. 删去理论频数太小的行或列, 或将理论频数太小的行或列与性质相近的邻行或邻列合并。观察表 4 发现, 发生重度反应的人数共 6 人, 可以考虑将其与中度反应一项合并; c. 改用双尾 Fisher 精确检验法。

用第二种方法处理后, 进一步做卡方检验发现, 仍然有 33.3% 的单元格频数少于 5, 因而只能考虑使用双尾 Fisher 精确检验法。

通过卡方检验可以判断, 性别与个体抗缺氧能力相关; 而肥胖度与个体抗缺氧能力之间的关系需要由 Fisher 精确检验进一步作判断。

#### 4.2 Fisher 精确检验

Fisher 精确检验的核心思想是将列联表各单元格中数据随机化<sup>[8]</sup>。对于  $4 \times 5$  列联表, 固定行和与列和, 在  $H_0$  假设条件下列联表中各数值对应为  $a_{ij}$ , 边缘频数  $a_{i\cdot}$ ,  $a_{\cdot j}$  和  $n$  都固定, 在  $X$  和  $Y$  相互独立的条件下, 任意的  $i, j$ ,  $a_{ij}$  都服从多元超几何分布为

$$P\{a_{ij}\} = \frac{\prod_{i=1}^4 (a_{i\cdot}!) \prod_{j=1}^5 (a_{\cdot j}!)}{n! \prod_{i=1}^4 \prod_{j=1}^5 (a_{ij}!)}$$

20个单元格中如果有12个数值确定,另外8个也随之确定了,因此需要分析其中12个点(如  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{14}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{24}$ ,  $a_{31}$ ,  $a_{32}$ ,  $a_{33}$ ,  $a_{34}$ )的分布。求出同时满足  $a_{11} = 135$ ,  $a_{12} = 699, \dots$ ,  $a_{34} = 3$  的概率  $P$ 。若  $H_0$  为真,  $a_{ij}$  的各种取值都不会是小概率事件,对于给定的显著性水平  $\alpha$ ,如果  $P < \alpha$ ,则拒绝  $H_0$ 。

由表5可知,Fisher精确检验的Monte Carlo显著性概率为0.045,小于0.05,因而拒绝  $H_0$ ,抗缺氧能力受肥胖度影响显著。

进一步分析年龄对缺氧反应的影响,为了避免出现理论频数过小的情况,先对年龄做量化处理。将年龄分为五段:0~14岁、15~29岁、30~44岁、45~59岁、60岁以上。样本人群按年龄范围分布如图2所示。

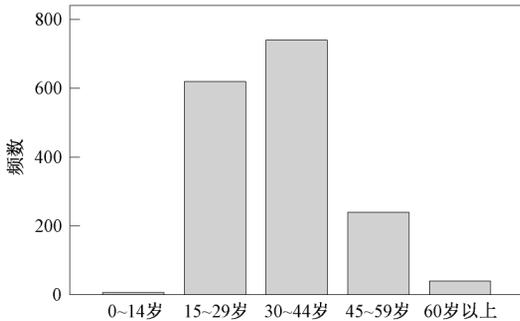


图2 年龄范围频数分布直方图

Fig. 2 Frequency distribution about age range

检验结果发现皮尔逊卡方检验和Fisher精确检验Monte Carlo显著性概率分别为0.043和0.041,都小于0.05,所以年龄对个体抗缺氧能力有影响。

考虑到籍贯包含的信息不仅有遗传因素同时还有缺氧预适应因素,两者均和所处海拔高度有一定关系,因此在进行籍贯与缺氧反应的关系分析时,按照地势高低将中国分为三个阶梯区域,然后进行分析。阶梯区域的划分方法为西部以昆仑山脉、祁连山脉和横断山脉为界为第一级阶梯,平均海拔4000m以上;中部的四川盆地等平均海拔在1000~2000m为第二级阶梯;东部的长江中下游平原以大兴安岭山脉、太行山脉以及巫山为界为第三级阶梯,平均海拔在500m以下,地势最低。样本人群按阶梯区域的分布情况如表6所示。

检验结果显示,不同籍贯的阶梯分布间个体抗缺氧能力没有显著差异。

用同样的方法分析了民族、以前到高原情况、工

作性质、平时吸烟、饮酒、锻炼等生活习惯与高原反应分度间的关系。结果表明:民族、以前是否到过高原及在高原上停留的最长时间、工作性质、平时饮酒习惯、锻炼习惯对个体抗缺氧能力均无影响;不同吸烟习惯间个体抗缺氧能力有差异;曾到过高原的人群中,以前到高原时的缺氧反应严重程度对此次到高原的缺氧反应情况有影响。

表6 籍贯按海拔阶梯的分布

Table 6 Frequency distribution of elevation boundary

		频数	百分比/%	有效百分比/%
有效值	第一级阶梯	97	11.3	13.4
	第二级阶梯	224	26.2	31.0
	第三级阶梯	402	47.0	55.6
	合计	723	84.5	100.0
缺失值	System	133	15.5	
	合计	856	100.0	

## 5 相关分析过程

为进一步研究各变量与个体缺氧反应间的密切程度,需进一步计算圈定变量——性别、肥胖度、以前到高原时的缺氧反应严重程度、吸烟习惯、年龄范围与缺氧综合指标间的相关系数。由于样本变量不服从正态分布,所以需计算Spearman秩相关系数和Kendall- $\tau$ 相关系数。结果发现:以前到高原时的缺氧反应严重程度与缺氧综合指标间的关系最为密切,两相关系数分别为0.339和0.291。其次是性别,男性的抗缺氧能力强于女性;再次是吸烟习惯,平时吸烟频率越高,耐缺氧能力越强;肥胖度表现为负相关,BMI(body mass index)值小于30时,越瘦的人耐缺氧能力越低,然而当BMI值大于30(重度肥胖)时,耐缺氧能力表现为最低,最后是年龄范围,随年龄的增大,耐缺氧能力增强。

## 6 结语

利用卡方检验、Fisher精确检验等非参数检验方法以及相关分析的方法判断并分析了性别、年龄、民族、籍贯、肥胖度、以前到高原情况、平时吸烟、饮酒、锻炼等生活习惯对个体抗缺氧能力的影响。得到如下结论:

- 1) 以前到高原时缺氧反应比较严重的旅客抗缺氧能力低,再次到高原时需做好防护工作,建议服用抗缺氧药物,并随时补充氧气;
- 2) 男性的抗缺氧能力强于女性,原因可能是男

性肺活量大,因而在青藏铁路客车供氧系统供氧量的设计问题上需充分考虑旅客的性别比例;

3) 平时吸烟频率越高的人抗缺氧能力越强;

4) BMI 值小于 30 时,越瘦的人耐缺氧能力越差,BMI 值大于 30 的重度肥胖的人耐缺氧能力最差;

5) 年龄越大的人耐缺氧能力越强;

6) 民族、以前是否到过高原及在高原上停留的最长时间、工作性质、平时饮酒、锻炼习惯对高原反应均无显著影响。

#### 参考文献

- [1] 贾司光. 航空航天缺氧与供氧——生理学与防护装备[M]. 北京:人民军医出版社,1989
- [2] GJB1098—1991,急性高原反应的诊断和处理原则[S]

- [3] Arne C B, Solomon W H. Nonparametric methods in multivariate factorial designs for large number of factor levels[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2008, 138:588—610
- [4] Vesna Cojbasic, Andrija Tomovic. Nonparametric confidence intervals for population variance of one sample and the difference of variances of two samples[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2007, 51: 5562—5578
- [5] Arne C B, Solomon W H, Laurence V M. How to compare small multivariate samples using nonparametric tests [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2008, 52:4951—4965
- [6] Solomon W H, Arne C B. Nonparametric methods for unbalanced multivariate data and many factor levels[J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 2008, 99:1635—1664
- [7] Alexis Roche, Sebastien Meriaux, Merlin Keller, et al. Mixed-effect statistics for group analysis in fMRI: A nonparametric maximum likelihood approach[J]. *NeuroImage*, 2007, 38: 501—510
- [8] 王 星. 非参数统计[M]. 北京:中国人民大学出版社,2005

## Analysis of factors affecting passengers' mountain sickness based on nonparametric tests

Chang Haijuan, Liu Meng, Pang Liping, Yang Peng, Wang Jun  
(*School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China*)

[Abstract] 2 882 samples were taken in Qinghai-Tibet railway cars, and 1 693 samples were taken out randomly, then the factors that may affect the ability of individual's hypoxia-resistant were analyzed in statistics. This paper has done this work by nonparametric statistics and correlation analysis, and got the conclusion that five factors, which are mountain sickness one have suffered before, sex, smoking frequency, bodily form and age, influence individual's hypoxia-resistant ability. The conclusion makes a good sense, as it can provide statistics foundation for continuous iatrical research, while giving directive suggestion to reduce passengers' mountain sickness, and providing warranty for the design and amelioration of oxygen supplying system in Qinghai-Tibet railway cars.

[Key words] mountain sickness; impacting factors; Qinghai-Tibet railway; nonparametric tests; individual's hypoxia-resistant ability