

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-048-06

人体呼吸道热湿耦合传递过程分析

方悦 余涛 孙亮亮

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 环境的温湿度会影响人体呼吸道的热湿传递, 在低湿环境中呼吸道黏膜会因缺水变得干燥。为了探究人体呼吸道热湿传递与环境参数的关系, 本研究基于热湿平衡分析, 计算人体呼吸过程中呼吸道壁面与空气气流的热湿传递量。结果表明: 呼吸道热传递和湿传递都会受环境参数影响, 热湿传递量随着温度和相对湿度升高而降低; 当海拔越高时热湿传递量越大, 呼吸道热湿传递量在海拔 1000m 以下的平原地区都比较接近, 而随着海拔上升至 3000m 以上热湿传递量明显增加; 相对于平原地区, 在拉萨地区呼吸道一天的热湿传递增加约 20%~30%。

【关键词】 呼吸道; 空气温湿度; 海拔高度; 热湿传递

中图分类号 TU24 文献标识码 A

Analysis of Hot-wet Coupling Transmission Process of Human Respiratory Tract

Fang Yue Yu Tao Sun Liangliang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The temperature and humidity of the environment will affect the heat and moisture transfer of the human respiratory tract, and the respiratory mucosa will become dry due to lack of water in a low-humidity environment. In order to explore the relationship between human respiratory heat and moisture transfer and environmental parameters, this paper calculates the heat and moisture transfer between the respiratory tract wall and the air flow based on the analysis of the heat and moisture balance. The results show that heat and moisture transfer in the respiratory tract will be affected by environmental parameters, and the heat and moisture transfer will decrease with the increase of temperature or relative humidity; the higher the altitude, the greater the heat and moisture transfer, and the respiratory tract heat and moisture transfer in plain areas below 1000m above sea level are relatively close, and as the altitude increases above 3000m, the heat and moisture transfer has increased significantly; compared to the plain area, the day-to-day heat and moisture transfer of the respiratory tract in the Lhasa has increased by about 20% to 30%.

【Keywords】 Respiratory tract; air temperature and humidity; altitude; heat and moisture transfer

基金项目: 川藏铁路隧道热湿环境调控与火灾安全保障理论与方法 (编号: 52038009)

作者简介: 方悦 (1998.4-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: fyuelh@163.com

通讯作者: 孙亮亮 (1982.4-), 女, 博士, 副教授, E-mail: sunliangliang@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-25

0 引言

当人体暴露于低湿、低压的环境中时易出现呼吸粘膜受损、鼻腔出血等症状, 其原因是呼吸道内表面分布的分泌液纤毛会通过加热、加湿将吸入的空气调节到接近肺泡的状态^[4,5], 加热加湿的过程导致了呼吸道的热量和水分的流失。相关研究^[1-3]

表明呼吸道疾病频发与环境低压低氧、寒冷干燥等因素有密切关系。

有关人体呼吸道热湿的研究主要集中于探究呼吸道对空气的加热加湿能力^[6-9]以及从病理角度研究气象参数对呼吸功能的影响^[10-12]。在已有研究中缺少对不同居住环境中人体呼吸道热湿传递量

的关注。本研究从传热传湿理论出发探究呼吸道热湿耦合传递过程的影响因素, 研究环境参数对呼吸道热湿传递的影响规律, 分析不同海拔地区人体呼吸道热湿传递的差异, 为维持与平原地区同等呼吸道热湿传递量下的高原地区室内参数控制提供参考。

1 人体呼吸道热湿传递过程

空气经过呼吸道湿润壁面时, 只要气流与湿润壁面之间存在温差和水蒸气浓度差, 空气与湿润壁面之间将发生热量和湿的传递。传热传湿理论通常假设^[13]湿润壁面存在饱和空气层, 湿润壁面与气流间的湿交换和潜热交换是通过饱和空气层来完成的。在空调环境下呼吸时, 呼吸道壁面温度和湿度都高于吸入气流, 在温差的驱动下热量由壁面传给气流, 而在水蒸气浓度差的驱动下湿润壁面的饱和和水吸收壁面的热量向气流中蒸发并放出汽化潜热; 当气流到达肺部时温度会上升至 37℃ 和相对湿度上升至 100%; 所以在呼气时由肺部呼出的气体温湿度均高于呼吸道壁面, 在温差的驱动下热量由气流传给壁面, 在水蒸气浓度差的驱动下气流中的水分向壁面蒸发, 此时壁面将回收一部分汽化潜热。

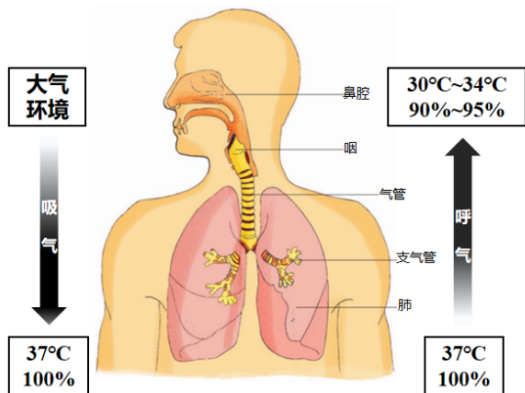


图 1 人体呼吸道热湿传递过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the heat and moisture transfer process in the human respiratory tract

如图 1 所示, 人体通过口鼻吸入空气, 鼻咽道是空气热湿交换的主要场所, 在这里空气温度可达到 32℃ 以上^[14-16], 当空气经支气管进入肺泡时温湿度持续上升。在呼气过程中, 被冷却的呼吸道会从呼出气体中回收部分热量和水分, 最终鼻腔口的呼出气体温湿度将会稳定在一个范围内。

2 呼吸道热湿传递量的计算

如图 2 所示, 将呼吸道空气流动简化, 一个呼吸循环主要包括两个过程和三个状态点, 两个过程分别为吸气过程和呼气过程, 状态 1 为吸入空气状态, 状态点 2 为肺部空气状态, 此时空气温度接近 37℃ 且为湿饱和状态, 状态点 3 为呼出空气状态。通过计算两个阶段中的热湿传递量, 可得到一个呼吸循环中呼吸道与空气的热湿传递量。

本研究做出以下假设: (1) 鼻腔出口气体温湿度为定值, 温度为 30.5℃, 相对湿度为 91%^[17]; (2) 呼吸过程中通气量恒定, 无周期性变化; (3) 呼吸道内气压与所处环境气压一致。

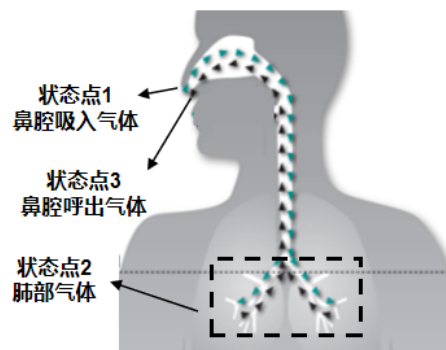


图 2 呼吸道空气流动简化示意图

Fig.2 Simplified schematic diagram of air flow in the respiratory tract

2.1 传热传湿理论分析

对于呼吸道与气流间的热湿传递来说, 无论呼吸道几何结构如何, 热湿传递量只与初末状态量有关, 而与气流流过的路径以及过程无关。吸气过程中空气由鼻腔流进肺部, 这个过程的呼吸道壁面与单位质量空气传热量、传湿量分别由式 (1)、式 (2) 计算。

$$\Delta Q_1 = h_2 - h_1 \quad (1)$$

$$\Delta W_1 = \frac{0.001d_2}{1+0.001d_2} - \frac{0.001d_1}{1+0.001d_1} \quad (2)$$

呼气过程中空气由肺部流出至鼻腔, 该过程呼吸道壁面与空气传热量、传湿量分别由式 (3)、式 (4) 计算。

$$\Delta Q_2 = h_3 - h_2 \quad (3)$$

$$\Delta W_2 = \frac{0.001d_3}{1+0.001d_3} - \frac{0.001d_2}{1+0.001d_2} \quad (4)$$

因此, 一个呼吸循环过程呼吸道与外界热湿交换量由式 (5)、式 (6) 计算。

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = h_3 - h_1 \quad (5)$$

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 = \frac{0.001d_3}{1+0.001d_3} - \frac{0.001d_1}{1+0.001d_1} \quad (6)$$

式中: ΔQ_1 、 ΔQ_2 、 ΔQ 分别为吸气、呼气及一个呼吸循环过程中空气与呼吸道壁面热传递量, kJ/kg ; ΔW_1 、 ΔW_2 、 ΔW 分别为吸气、呼气及一个呼吸循环过程空气与呼吸道壁面湿传递, kg/kg ; h 为空气焓值, kJ/kg ; d 为空气含湿量, g/kg 干空气。

健康成年人正常呼吸 24 小时空气总质量由式 (7) 计算, 24 小时内呼吸道与空气的传热量、传湿量计算由式 (8) 和式 (9) 计算。

$$m = \rho_H v f \times 10^{-6} \times 24 \times 60 \quad (7)$$

$$Q = \frac{m \times \Delta Q}{4.182} \quad (8)$$

$$W = \frac{m \times \Delta W}{\rho_{\text{水}}} \times 10^6 \quad (9)$$

式中: m 为呼吸道一天中吸入空气总质量流量, kg/d ; ρ_H 为海拔高度为 H 下的空气密度, kg/m^3 ; v 为潮气量, mL/次 ; f 为呼吸频率, 次/min ; Q 为一天中空气与呼吸道总热传递, kcal/d ; W 为一天中空气与呼吸道总湿传递, mL/d ; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度, kg/m^3 。

2.2 计算参数确定

计算需要确定的参数有吸气温度、湿度及空气质量流量。根据规范《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002) [20] 规定, 夏季空调时: 室内温度为 $22^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $40\% \sim 80\%$; 冬季采暖时: 室内温度为 $16^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $30\% \sim 60\%$ 。为此本研究室内温度工况设定为 $16^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$, 相对湿度工况设定为 $30\% \sim 80\%$ 。人体呼吸频率和潮气量随个体、地理因素而异, 参考文献[18]、文献[19]将不同海拔地区呼吸频率和潮气量参考值设定如表 1 所示。

表 1 不同海拔高度肺功能参数参考值

Table 1 Reference values of lung function parameters at different altitudes

城市	上海	武汉	成都	兰州	西宁	拉萨	格尔木	昂仁
海拔高度 (m)	4	20	500	1500	2600	3650	4600	5600
呼吸频率 (次/min)	17.3	17.5	17.9	18.7	19.9	20.6	22.2	22.6
潮气量 (mL/次)	638.2	642.2	640.3	749.2	713.7	723.3	730.4	745.3
肺通气 (L/min)	11.0	11.2	11.5	14.0	14.2	14.9	16.2	16.8

2.3 计算方法验证

Daviskas 等[17] 通过模拟和实验方法在吸气温度 26.7°C 、水蒸气浓度 8.8mg/L 条件下, 计算通气量分别 750mL/次 和 2600mL/次 时呼吸道呼吸一次

消耗的热量和水, 本研究与文献[17]中工况一致并按照 2.1 节公式计算数据结果如表 2 所示, 计算误差均小于 10% , 误差范围可以接受, 即该计算方法合理。

表 2 计算方法验证

Table 2 Verification of calculation method

吸气参数	潮气量 (mL/次)	对比	失热量 (kcal/次)	失水量 (mg/次)
温度 26.7°C 水蒸气浓度 8.8mg/L 大气压力 101325pa	750	Daviskas	0.01087	16.7
		本研究	0.01073	18.0
		误差	1.3%	7.8%
	2600	Daviskas	0.0345	53.7
		本研究	0.0372	56.1
		误差	7.8%	4.5%

3 结果分析

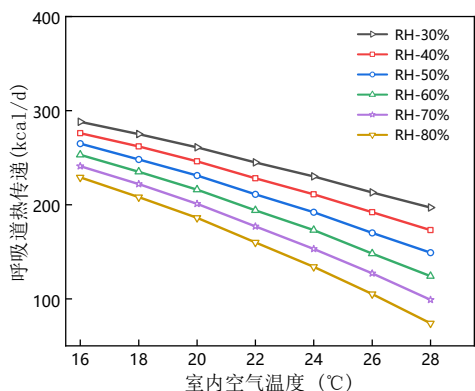
影响人体呼吸散热散湿的因素有很多, 首先是

个体差异 (性别、年龄、身体状况) 的影响, 其次是空气温度、湿度、风速、大气压等这些环境因素的影响。本研究针对环境侧因素探讨在标准大气压中空气温度、空气湿度对人体呼吸道 24 小时热湿传递量的影响规律, 另外再比较海拔 0~6000m 范围内不同地区人体呼吸道 24 小时热湿传递量的差异。

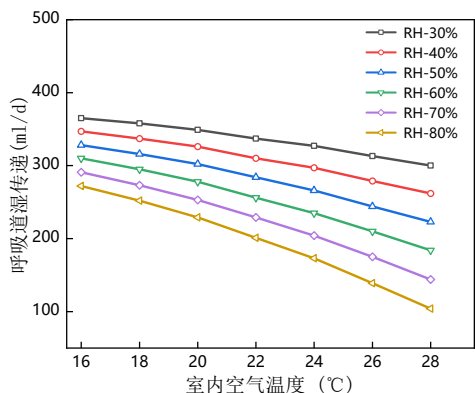
3.1 环境参数对呼吸道热湿传递影响分析

(1) 空气温度

空气温度变化会影响呼吸道壁面与空气气流的对流换热和蒸发散热量。图 5 是在不同室内温度下的呼吸道热湿传递, 从图中可以看出, 随着环境温度升高, 人体呼吸道的热湿传递量降低。空气温度与热湿传递量成线性关系, 当相对湿度增大时, 呼吸道热湿传递量下降率增大。



(a) 呼吸道热传递随室内温度的变化



(b) 呼吸道湿传递随室内温度的变化

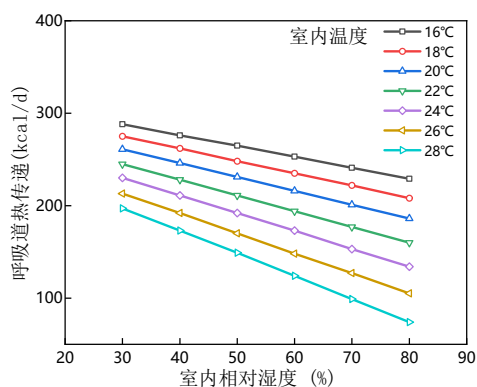
图 5 不同室内温度下的呼吸道热湿传递

Fig.5 Respiratory heat and moisture transfer at different indoor temperatures

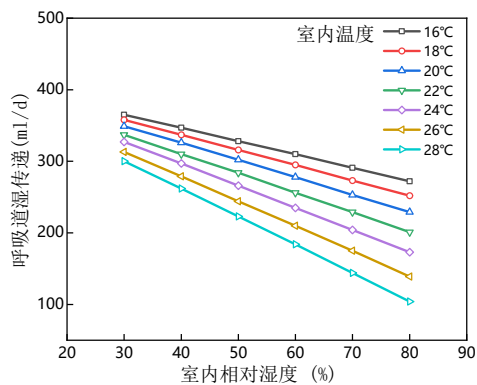
(2) 空气相对湿度

空气相对湿度大小影响着空气中水分的蒸发,

室内温度不变情况下相对湿度越小, 呼吸道内空气气流与呼吸道壁面饱和空气层的水蒸汽浓度差越大, 使得从呼吸道流失到气流中的水分和汽化潜热越多。图 6 是在不同室内相对湿度下呼吸道热湿传递量, 从图中可以看出, 呼吸道热湿传递量与相对湿度呈线性关系。室内温度较高时相对湿度的变化对热湿传递量的影响增强, 这是因为当空气温度升高, 呼吸道与空气气流的对流换热减弱, 呼吸道的热湿交换更依赖于水分的蒸发。



(a) 呼吸道热传递随室内相对湿度的变化



(b) 呼吸道湿传递随室内相对湿度的变化

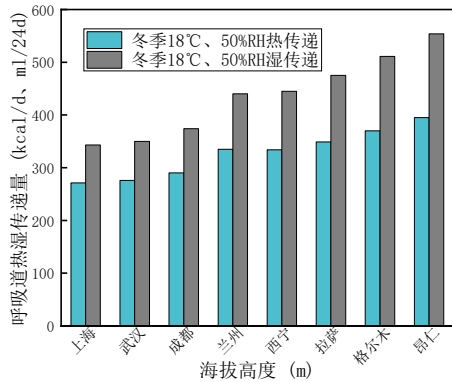
图 6 不同室内相对湿度下的呼吸道热湿传递

Fig.6 Respiratory tract heat and moisture transfer at different indoor relative humidity

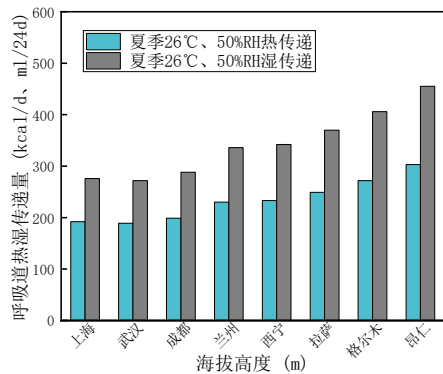
(3) 海拔高度

首先随着大气压力降低呼吸道壁面与空气气流的对流换热系数会减小, 此时依赖水分蒸发的传热传质比例更大; 其次随着海拔高度升高人体的肺通气量也会增大。图 7 (a)、7 (b) 分别为不同海拔地区冬季 18°C、50%和夏季 26°C、50%时呼吸道热湿传递量, 对比两图发现冬、夏季两季不同海拔下热湿传递的变化规律相似, 随着海拔升高人体呼

呼吸道热湿传递逐渐增大,湿传递增加幅度大于热传递。海拔 1000m 以下的上海、武汉、成都三个平原地区热湿传递都比较接近,而在海拔 1500m 的兰州地区有较明显的增幅,随海拔上升至 3000m 以上的高原地区时热、湿传递量的差异更大。



(a) 冬季不同地区室内呼吸道热湿传递



(b) 夏季不同地区室内呼吸道热湿传递

图 7 不同海拔高度下呼吸道热湿传递差异

Fig.7 Differences in heat and moisture transfer in the respiratory tract at different altitudes

3.2 不同海拔高度下影响呼吸道热湿传递量的环

表 3 冬季室内 18°C、45%RH 下拉萨、成都呼吸道热湿传递量对比

Table 3 Comparison of indoor heat and moisture transfer in the respiratory tract at 18°C, 45%RH in LaSa and Chengdu in winter

地区	大气压力 (Pa)	温度 (°C)	相对湿度 (%)	焓值 (kJ/kg)	含湿量 (g/kg)	热传递 (kcal/24h)	湿传递 (mL/24h)
拉萨	65000	18.0	45.0	33.39	6.04	363	488
成都	96230	18.0	45.0	40.85	8.98	296	377
		17.6	81.2	57.99	15.93	296	377
拉萨	65000	20.0	69.7	60.53	15.93	286	377
		22.0	61.6	62.60	15.93	278	377
		24.0	54.6	64.67	15.93	270	377

表 4 夏季室内 26°C、60%RH 下拉萨、成都呼吸道热湿传递量对比

境参数对比

当冬季室温为 18°C、相对湿度为 45%时,拉萨地区呼吸道一天热传递为 363kcal、湿传递为 488mL,而成都地区只有 296kcal 和 377mL,尽管两地室内温湿度相同,但在海拔高度较高的拉萨地区呼吸道散热散湿会加重。在 3.1 节中得知海拔 1000m 以下的三个平原城市呼吸道热湿传递差异不大,因此本节选取成都地区为参考,若使拉萨地区呼吸道热湿传递量降低至与成都地区同一水平,应对拉萨地区室内温湿度适当调控。

以冬季室内温湿度 18°C、45%为例,将以成都地区在该环境温湿度下的热、湿传递值为参考值,在拉萨、成都地区的鼻腔出口空气温湿度相同条件下,通过式(5)~式(9)可以推导出拉萨地区鼻腔进口空气的温湿度,即是拉萨地区与成都地区维持相同呼吸道热湿传递的室内环境参数,经计算拉萨室内空气温度应为 17.6°C,相对湿度应为 81.2%。如果要使拉萨与成都呼吸道湿传递量一致,提高拉萨室内温度同时室内相对湿度值相应降低,呼吸道热传递量会减小,在这样情况下不但有利于呼吸道热湿平衡还增加了室内热舒适。如表 3 所示将拉萨室内温度提高为 20°C时相对湿度可为 69.7%、当温度提高为 22°C时相对湿度为 61.6%、当温度提高为 24°C时相对湿度为 54.6%。在夏季,成都室温 26°C,相对湿度为 60%时拉萨室内温湿度参数控制见表 4。综上,维持同等呼吸道热湿传递量下拉萨地区室内温湿度都需要适当提高,与文献[21]中提到的低压环境下人体热中性温度值会升高的结论相符。

Table 4 Comparison of indoor heat and moisture transfer in the respiratory tract at 26°C, 60%RH in LaSa and Chengdu in summer

地区	大气压力 (Pa)	温度 (°C)	相对湿度 (%)	焓值 (kJ/kg)	含湿量 (g/kg)	热传递 (kcal/24h)	湿传递 (mL/24h)
拉萨	65230	26.0	60.0	60.49	13.48	216	306
成都	94770	26.0	60.0	76.54	19.78	175	243
		26.3	70.8	87.42	23.92	175	243
成都	65230	27	68.0	88.15	23.92	172	243
		28	64.1	89.20	23.93	168	243

4 结论

本研究对人体呼吸道与呼吸气流的热湿传递过程进行分析,比较吸气温度、湿度、海拔高度对人体呼吸道热湿传递的影响规律,并对比分析了不同海拔地区呼吸道热湿传递差异。

(1) 通过理论分析推导出人体呼吸道热湿传递与吸入空气温度、湿度、大气压力以及肺通量有关。

(2) 人体呼吸道热湿传递随吸入空气温湿度升高而减小,在空气温湿度较高情况下,温度和相对湿度的变化对热湿传递的影响都会增大。海拔越高呼吸道热湿传递量越大,尤其在海拔 3000m 以上地区,热湿传递增加幅度更明显,由于大气压力降低引起的湿传递波动比热损失波动更大。在相同室内温湿度下,拉萨地区呼吸道 24 小时的热湿传递量高出成都地区约 20%~30%。

(3) 为了减小拉萨地区人体呼吸道过量的热湿传递,需要对拉萨室内温湿度参数进行适当提高,以使得与平原地区的呼吸道热湿传递量相当。

参考文献:

- [1] 袁延年,刘树茂.高原地区部队前三位疾病发病调查与分析[J].高原医学杂志,2000,10(1):2.
- [2] 张步振,张音.西藏高原地区驻地住院病人疾病谱比较[J].西南国防医药,2010,20(2):224-226.
- [3] 殷旭东,卢林,唐宾,等.非高原部队与高原部队夏季高原训练主要病种构成分析[J].解放军预防医学杂志,2014,32(2):3.
- [4] Mcfadden E R, Pichurko B M, Bowman H F, et al. Thermal mapping of the airways in humans[J]. Journal of Applied Physiology, 1985,58(2):564.

- [5] Wu D, Tawhai M H, Hoffman E A, et al. A Numerical Study of Heat and Water Vapor Transfer in MDCT-Based Human Airway Models[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2014,42(10):2117-2131.
- [6] Wu D, Miyawaki S, Tawhai M H, et al. A Numerical Study of Water Loss Rate Distributions in MDCT-Based Human Airway Models[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2015,43(11):1-14.
- [7] Keck T, Leiacker R, Heinrich A, et al. Humidity and temperature profile in the nasal cavity[J]. Rhinology, 2000,38(4):167-171.
- [8] Tawhai M H, Hunter P J. Modeling water vapor and heat transfer in the normal and the intubated airways[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2004,32(4):609.
- [9] Daviskas E, Gonda I, Anderson S D. Local airway heat and water vapour losses[J]. Respiration physiology, 1991,84(1):115-132.
- [10] 庄淑梅.氧疗湿化液温度对呼吸系统疾病患者氧疗舒适度及疗效影响[D].天津:天津医科大学,2007.
- [11] 庄淑梅,王春梅.氧疗湿化液温度对呼吸系统疾病病人氧疗舒适度和效果影响[J].护理研究:上旬版,2008,22(9):3.
- [12] Kandjov I M. Heat and Water Rate Transfer Processes in the Human Respiratory Tract at Various Altitudes[J]. Journal of Theoretical Biology, 2001,208(3):287-293.
- [13] 连之伟.热质交换原理与设备(第 2 版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [14] 段佐刚.鼻腔内气流的流场,温度场和湿度场分布的研究[D].成都:四川大学,2004. (下转第 66 页)