

飞行人员 2007 年宇宙辐射受照水平的估算分析

杨永华¹, 张涛², 张军², 彭新涛², 冯英进^{3*}, 陈蔚茹⁴, 斯明⁵

摘要: [目的] 根据国际放射防护委员会(ICRP)和我国国家标准中关于飞行人员宇宙辐射防护的要求, 估算某航空公司飞行人员 2007 年飞行中受到的宇宙辐射受照水平。[方法] 根据 2007 年航空公司各航班的飞行数据, 用中国民航总局组织开发的民航飞行宇宙辐射有效剂量计算系统(CARD) 计算各航班的年均宇宙辐射有效剂量及年均剂量率, 估算飞行人员的辐射受照水平; 用美国联邦航空局(FAA)的 CARI-6 软件计算部分航线飞行人员宇宙辐射受照水平, 并对上述两种计算方法的结果进行比较。[结果] 2007 年 460 个航班中, 单程飞行 1 次受到宇宙辐射有效剂量最大为 17.10 μSv , 最小为 0.36 μSv , 平均为 3.78 μSv 。全公司飞行员年均受照有效剂量最大为 1.81 mSv/a, 最小为 0.72 mSv/a, 平均为 1.45 mSv/a; 乘务员最大为 2.54 mSv/a, 最小为 1.45 mSv/a, 平均为 1.81 mSv/a。[结论] 飞行人员受到的宇宙辐射有效剂量均在 ICRP 和我国国家标准建议的限值以下。

关键词: 宇宙辐射; 有效辐射剂量; 剂量估算; 民航飞行宇宙辐射有效剂量计算系统

The Air Crew Cosmic Radiation Exposure Level for 2007, Estimation and Analysis YANG Yong-hua¹, ZHANG Tao², ZHANG Jun², PENG Xin-tao², FENG Ying-jin^{3*}, CHEN Wei-ru⁴, SI Ming⁵ (1. Taiyuan Management Base of Hainan Airlines Company Limited, Taiyuan, Shanxi 030031, China; 2. Department of Aviation Medicine of Xinjiang Filiale of China Southern Airlines Company Limited, Urumqi, Xinjiang 830016, China; 3. Transportation Engineering College of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 4. Aviation Medicine Graduate School of The Department of Science and Technology of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 5. Aviation Health Center, China Southern Airlines Company Limited, Guangzhou, Guangdong 510470, China). *Address correspondence to FENG Ying-jin; E-mail: chenwr@public.tpt.tj.cn

Abstract: [Objective] In accordance with the international and national standard on radiation safety, estimating the cosmic radiation exposure level received by crews onboard of airlines of a air transportation company in 2007. [Methods] On the basis of routes data of 2007, the cosmic radiation effective doses received by aircrews in flight on certain routes were calculated with the computer system CARD developed by Civil Aviation Administration of China, and compared the results with those obtained through CARI-6 of FAA. [Results] For 460 routs in year 2007, the average of cosmic radiation effective dose in flight was 3.78 μSv , with the maximum of 17.10 μSv and minimum of 0.36 μSv . For pilots, the annual average of personal cosmic radiation effective dose received in flight was 1.45 mSv/a, with the maximum 1.81 mSv/a and minimum 0.72 mSv/a. For stewards, the average, maximal, and minimal doses were 1.81 mSv/a, 2.54 mSv/a, and 1.45 mSv/a, respectively. [Conclusion] The personal cosmic radiation effective dose calculated is below the recommended limit of ICRP and Chinese standard.

Key Words: cosmic radiation; effective radiation dose; dose estimation; CARD

研究表明, 在 10000 m 高空的宇宙辐射强度大约是地面的 100 多倍, 高空宇宙辐射对飞行人员的健康有损害作用^[1-2]。1991 年, 国际放射防护委员会(International Commission on

Radiological Protection, ICRP)首次建议将喷气客机组人员列为辐射职业受照人员^[3]。根据 ICRP 的建议, 1996 年欧盟委员会在关于保护工作人员和公众的健康, 防止电离辐射引起的危害的安全标准中正式将飞行人员列为辐射职业受照人员^[4]。2003 年 10 月, 美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)发布了一份科技报告, 该报告针对飞行人员为职业受照人群提出了一些建议^[5]。2002 年, 中国国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)^[6]和《空勤人员宇宙辐射控制标准》(GBZ 140—2002)^[7]也将喷气飞机机组人员列为辐射受照职业人群, 要求对飞行人员受到的宇宙辐射剂量进行监测和估算。对于飞行人员的宇宙辐射防护, 必须计算其受到的宇宙辐射有效剂量。大气层中宇宙辐射环境非常复杂, 宇宙辐射中含有多种能量范围很宽的高能粒子, 准确获

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(编号: 60472119)

[作者简介] 杨永华(1971—), 男, 大学本科, 主治医师; 研究方向: 航空医学; E-mail: yonh_yang@hnair.com

[*通信作者] 冯英进教授; E-mail: chenwr@public.tpt.tj.cn

[作者单位] 1. 海南航空股份有限公司太原运营基地, 山西 太原 030031; 2. 中国南方航空股份有限公司新疆分公司航医室, 新疆 乌鲁木齐 830016; 3. 中国民航大学交通工程学院, 天津 300300; 4. 中国民航大学科技处航空医学研究所, 天津 300300; 5. 中国南方航空股份有限公司航空卫生中心, 广东 广州 510470

取飞行人员的辐射数据非常困难。目前,用于飞行人员宇宙辐射防护的监测手段,最方便适用的方法是使用计算机估算系统。为了对某航空公司飞行人员的宇宙辐射情况进行监测,本项目拟采用中国民航总局组织开发的“民航飞行宇宙辐射剂量计算系统(CARD)”计算该公司2007年飞行航线的宇宙辐射有效剂量,分析飞行人员的受照水平。CARD是一个大气层民航飞行空域宇宙辐射剂量计算系统,用该系统根据飞行日期和飞行航线的数据可以计算飞行过程中飞行人员受到的宇宙辐射(cosmic radiation, CR)的有效剂量(单位: μSV),可以计算的高度范围为海拔25 000 m。计算的起始时间为1958年1月到2009年。还可以根据日期、地理位置和海拔计算大气层中从海平面至25 000 m高空任何一点的宇宙辐射剂量率(单位: $\mu\text{SV/h}$)。该系统在Windows平台上运行。

一般估算测量或计算结果的准确性是和真值比较。用E表示真实剂量,用C表示计算获得的剂量,计算的不确定度为U。ICRP对辐射防护领域内剂量计算的精确度要求为: $0.5 E < C < 1.5 E$, $U < 21\%$ ^[3]。在无法得到真值时,可用最接近真值的近似值代替真值。目前大多数国家的系统用FAA的软件CARI-6计算的结果为真值。本研究为了说明CARD计算结果的准确程度,对部分航班的飞行同时用CARI-6进行计算,比较两个系统计算结果的差异情况。

1 材料与方法

用CARD计算460个航班飞行过程中受到的宇宙辐射剂量,其中29个航班同时用CARI-6计算,目的是用其结果与CARD结果进行对照。为了进一步比较两个系统计算结果随太阳活动变化的情况,计算了北京—上海和北京—乌鲁木齐两条航线近一个太阳活动周期内每个月飞行一次受到的宇宙辐射有效剂量。所有计算结果用统计软件SPSS 11.5进行处理,获得所需信息。

1.1 CARD计算宇宙辐射有效剂量和剂量率的流程

CARD计算宇宙辐射剂量的工作流程如图1所示。系统的核心部分是宇宙辐射剂量数据库,该数据库中的数据来源于仿真、实测和试验。太阳活动数据来源于地面监测站。计算机程序根据输入的指定位置的地理坐标和日期,调用剂量数据库和太阳活动数据库的数据,通过计算机图形学和图像学的插值方法计算出该指定位置在给定日期的宇宙辐射剂量率。根据输入的飞行数据计算出飞行过程中飞行人员受到的宇宙辐射有效剂量。

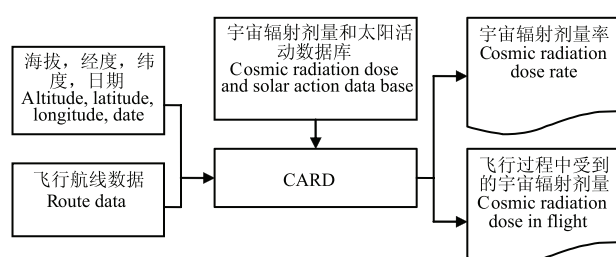


图1 CARD计算宇宙辐射剂量和剂量率的流程

Figure 1 Information flow for cosmic radiation dose and dose rate calculation with CARD

1.2 航线数据的来源

用CARD计算飞行过程中飞行人员所受宇宙辐射有效剂量需要的参数包括:起飞机场和降落机场的地理位置坐标、飞行日期、起飞时爬升所用时间、降落所用时间、巡航高度及在巡航高度飞行所用的时间。飞行的航迹按飞行的最短距离计算,即取起飞和降落机场之间的大圆轨迹。本项目计算所用航线数据由航空公司提供。

1.3 飞行过程中辐射剂量率的计算

用飞行过程中的辐射剂量除以该次飞行所用时间,可得该航线在该时段的辐射剂量率。根据每条航线2007年的航班数,每次飞行的飞行时间,每次飞行所受宇宙辐射剂量计算出所有航线的年均剂量率。根据年均剂量率和每个飞行人员该年的飞行时间可以计算出该飞行人员该年所受宇宙辐射剂量。

1.4 CARI-6

CARI-6是FAA开发的民航宇宙辐射剂量计算系统,目前在国际上是事实上的工业标准,被称为“金本位”^[8]。本研究使用该系统,主要目的是用其结果作为CARD的参照数据。因为CARI-6服务对象是美国民航,在它们的数据库中除了与其航线有关系的城市外,没有我国大陆民航的数据,因此用CARI-6只能计算我国大陆极少部分航线。

2 结果

2.1 2007年飞行航线剂量计算及飞行人员所受剂量估算

用CARD计算该公司2007年460个航班的年均受照有效剂量。结果显示,2007年,对于460个航班,一次飞行过程中,所受宇宙辐射平均有效剂量为3.78 μSv ,最大为17.10 μSv ,最小为0.36 μSv ;所受宇宙辐射平均剂量率为1.69 $\mu\text{Sv/h}$,最大为3.13 $\mu\text{Sv/h}$,最小为0.65 $\mu\text{Sv/h}$,平均剂量率为1.81 $\mu\text{Sv/h}$ 。

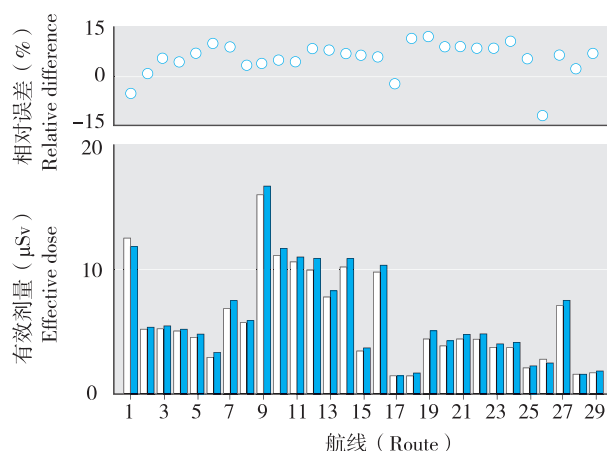
2007年,该公司飞行员平均飞行时间为800 h,最多为1000 h,最少为400 h,飞行员的个人宇宙辐射年均有效剂量为1.45 mSv/a,最小为0.72 mSv/a,最大为1.81 mSv/a。乘务人员年均飞行时间为1000 h,最多为1400 h,最少为800 h;个人宇宙辐射年均有效剂量为1.81 mSv/a,最小为1.45 mSv/a,最大为2.54 mSv/a,均在ICRP建议的限值之内。如果飞行时间最多的飞行员和乘务员全年在剂量率最高的航线飞行,则其受到的宇宙辐射剂量分别是3.13 mSv/a和4.38 mSv/a。

2.2 CARD和CARI-6计算结果比较

2.2.1 2007年29条航线年均剂量 图2显示的是用CARD和CARI-6计算的2007年29条航线年均宇宙辐射有效剂量和两个系统计算结果的相对误差(%)。在最后5条航线上飞行的是支线客机D38,飞行高度9000 m,其余航线为B737,飞行高度10500 m。对这29条航线,CARD与CARI-6计算结果比较:最大相对误差12.80%,最小0.38%,平均6.58%,不确定度3.02%。

2.2.2 一个太阳活动周期内飞行航线剂量变化 图3下框中显示分别用CARD和CASRI-6计算的北京至上海航线,北京至乌鲁木齐航线1998年5月至2008年4月逐月的宇宙辐射有效剂量变化曲线。图上框的曲线是表示1998年5月至2008年4月各月太阳活动情况的太阳日心压(solar heliocentric potential)的值。日心压的数值来自于FAA网站。北京到上海航线,CARD

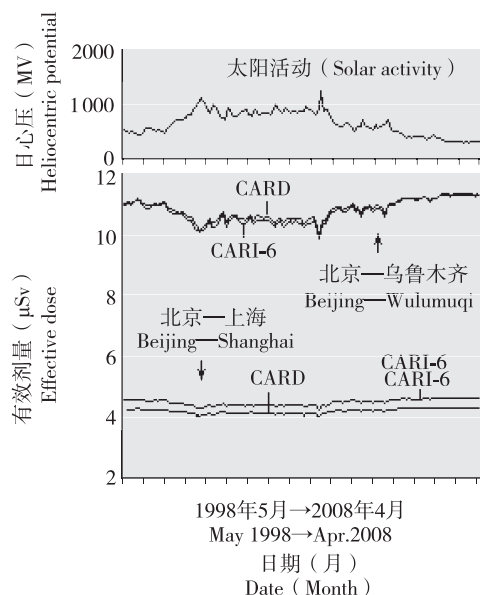
与 CARI-6 计算结果比较,最大误差 7.03%,最小误差 5.69%,平均误差 6.38%,不确定度 0.36%;北京到乌鲁木齐航线的最大误差、最小误差、平均误差和不确定度分别为 1.58%、0.05%、0.70% 和 0.41%。计算结果显示,两系统计算的结果随太阳活动变化的趋势相同。



[注]上框表示 CARD 与 CARI-6 两种系统计算结果的相对误差(The relative differences between results of CARD and CARI-6 were shown on the top of figure)

图 2 29 条航线的宇宙辐射有效剂量

Figure 2 The cosmic radiation effective doses calculated with CARD and CARI-6 for 29 flight routes



[注]上框为 1998 年 5 月至 2008 年 4 月逐月的太阳日心压曲线 (The monthly solar heliocentric potential from May 1998 to Apr.2008 is shown as the curve at top part of the figure)

图 3 用计算机宇宙辐射计算系统 CARD 和 CARI-6 计算的从 1998 年 5 月至 2008 年 4 月逐月的北京—上海及北京—乌鲁木齐飞行过程中的宇宙辐射剂量

Figure 3 The monthly effective dose calculated by using the CARD and CARI-6 for Beijing-Shanghai and Beijing-Urumqi flights from May 1998 to Apr. 2008

3 讨论

影响大气层内宇宙辐射强度的因素依其影响大小依次为

海拔高度、地球磁场和太阳磁场。

地球大气层内的宇宙辐射,主要来源是太阳系外的银河系宇宙辐射(galactic cosmic radiation, GCR)。GCR 在进入太阳系时,受到太阳磁场的屏蔽作用。太阳活动越强烈,太阳磁场强度也越大,对 GCR 的屏蔽作用亦越大。太阳活动的周期大约是 11 年。图 3 上框显示的 1998 年 5 月至 2008 年 4 月期间太阳日心压曲线,大约是一个太阳活动周期。从图 3 看出,对应于太阳活动较强时期的航线宇宙辐射较弱。2007 年太阳活动在该周期内处于较弱时期,全年平均日心压值为 316 MV,该时期的太阳风磁场较弱,对宇宙辐射的屏蔽作用较小,因此宇宙辐射较强。对于同一条航线,2007 年飞行过程中受到的宇宙辐射有效剂量较大。

GCR 在进入地球大气层时,还要受到地球磁场的屏蔽作用,辐射强度和地磁纬度有关,即和地球的经纬度有关。在接近地磁两极的位置,辐射强度大,而在接近赤道的位置较小。从计算结果看,同样高度,飞行时间相近,处于纬度高的航线受照剂量较大。例如处于北方区域的北京—乌鲁木齐航线,飞行时间 240 min,用 CARD 和 CARI-6 计算的宇宙辐射剂量与剂量率(括号内)分别为 12.49 μSv (3.12 $\mu\text{Sv/h}$)、11.8 μSv (2.95 $\mu\text{Sv/h}$),而处于南方的海口—宁波航线,飞行时间相近,为 220 min,计算的数值分别为 6.81 μSv (1.86 $\mu\text{Sv/h}$)、7.41 μSv (2.02 $\mu\text{Sv/h}$),因前者航线所处纬度较高,因此该航线的宇宙辐射水平比后者高。

初级宇宙辐射在进入大气层后和大气层中空气的原子核相互反应而产生的次级粒子能量很高,足以引起新的反应,如此不断,形成级联反应。次级粒子与初级辐射的粒子叠加,使辐射强度有增大趋势。而大气层对辐射有减弱作用,随着大气密度的增加,宇宙辐射强度逐渐减弱(通过衰减、能量损失和吸收)。这样共同作用,使得大气层中宇宙辐射强度先是增大,在海平面以上大约 20 000 m 处达到最大值,然后随海拔的降低而减小,到海平面时达到最小值^[9]。现代民航客机飞行期间的宇宙辐射强度随飞行高度的增加而增大。一般干线飞机飞行高度在 10 000 m 以上,距离较长。而支线客机飞行高度较低,且距离较短,飞机刚爬升到巡航高度就要开始降落,在巡航高度飞行的时间很短,受到的宇宙辐射较少。有的支线航线,由于客源丰富,也使用大型客机,但在巡航高度飞行的时间达不到总飞行时间的 50%,受到的宇宙辐射也较少。如图 3,北京—呼和浩特,北京—包头航线使用大型客机,因飞行距离短,总飞行时间仅 55 min,巡航高度飞行时间只占总飞行时间的 45%,故虽然航线位置处于北方,所以受到的宇宙辐射较小;用 CARD 和 CARI-6 计算获得的北京—呼和浩特航线有效剂量和剂量率分别为 1.53 μSv 、1.67 $\mu\text{Sv/h}$ 和 1.49 μSv 、1.63 $\mu\text{Sv/h}$;北京—包头航线分别为 1.53 μSv 、1.67 $\mu\text{Sv/h}$ 和 1.72 μSv 、1.88 $\mu\text{Sv/h}$ 。

大气层内宇宙辐射成分和能量分布非常复杂,目前还没有一种仪器能够较准确全面地测量出它的数值。美国航天局(NASA)曾经用 ER-2 高空科学研究飞机装载 14 个探测器在特定的飞行路线上测量,并将测量结果对 CARI-6 的计算结果进行了验证^[10-11],有文献称 CARI-6 系统准确度大约在 7% 以内^[12]。本研究采用 CARD 计算值与 CARI-6 的结果进行比较,

相对误差均在 20% 之内。民航飞行人员宇宙辐射防护领域的专家提出, 两个系统计算的结果相差在 25%~30% 之内, 即可认为两个系统计算的结果一致^[13]。2009 年, 研究者将目前国际上使用的几种计算系统进行了对比, 虽然有些结果的差别达到 30%, 但认为这些系统的计算结果都一致^[14]。图 2 和图 3 均显示, CARD 与 CARI-6 计算的结果差别小于 20%。

ICRP 和中国国家标准都规定: 职业辐射受照人员在任 5 年内受到的年均有效剂量不能超过 20 mSv, 且在这 5 年内任一年的最大剂量不能超过 50 mSv^[3,6]。使用 CARD 系统计算结果显示, 该公司飞行人员 2007 年个人受到的宇宙辐射有效剂量 < 5 mSv, 在 ICRP 和中国国家标准规定的限值之内。

参考文献:

- [1] IRVINE D, DAVIES DM. British airway flightdeck mortality study, 1950-1992[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1999, 70(6): 548-555.
- [2] RAFNSSON V, HRAFNKELSSON J, TULINIUS H. Incidence of cancer among commercial airline pilots[J]. *Occup Environ Med*, 2000, 57(3): 175-179.
- [3] International Commission on Radiological Protection. 1990 recommendations of the International Commission for Radiological Protection[M]. New York: Elsevier Science, 1991.
- [4] European Communities. The basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation[M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996.
- [5] FRIEDBURG W, COPELAND K. What aircrews should know about their occupational exposure to ionizing radiation[R/OL]. [2009-03-01]. [http://www.faa.gov/library/reports/medical/](http://www.faa.gov/library/reports/medical/oamtechreports/2000s/media/0316.pdf)

[oamtechreports/2000s/media/0316.pdf](http://www.faa.gov/library/reports/2000s/media/0316.pdf).

- [6] 中国国家安全生产监督管理总局. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [7] 中国国家安全生产监督管理总局. GBZ 140—2002 空勤人员宇宙辐射控制标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] HAMMER G P, ZEEB H, BLETTNER M. Comparing different methods of estimating cosmic radiation exposure of airline personnel[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2000, 39: 227-231.
- [9] REITZ G. Radiation environment in the stratosphere[J]. *Radiat Prot Dos*, 1993, 48: 5-20.
- [10] ALEXANDER C P, LESLIE A, THOMAS J C. Potential doses to passengers and crew of supersonic transports[J]. *Health Physics*, 2000, 79(5): 547-552.
- [11] LANTOS P, FULLER N, BOTTOLIER-DEPOIS J F. Methods for estimating radiation doses received by commercial aircrew[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2003, 74(7): 746-752.
- [12] TAYLOR G C, BENTLEY R D, HORWOOD N A, et al. TEPC measurements in commercial aircraft[J]. *Radiat Prot Dos*, 2004, 110(1-4): 381-386.
- [13] FERRAI A, PELLICIONI M, RANCATI T. Calculation of the radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure[J]. *Radiat Prot Dos*, 2001, 93(2): 101-114.
- [14] BOTTOLIER-DEPOIS J F, BECK P, BENNETT B, et al. Comparison of codes assessing galactic cosmic radiation exposure of aircraft crew[J]. *Radiat Prot Dos*, 2009, 136(4): 317-323.

(收稿日期: 2009-08-07)

(英文编审: 薛寿征; 编辑: 洪琪; 校对: 徐新春)

(上接第 523 页)

染的传统因素室内生活燃料和烹调油烟所致污染已经不是本区肺癌发病的主要因素, 而房地产市场发展和室内装饰装修行业活跃带来的居室装修装潢引发的健康问题越来越受到关注。室内装修所使用的油漆、胶粘剂、塑料饰物、粘合剂等均会带来室内的空气污染^[6]。本研究表明, 通过使用有害物质含量较少的实木地板、居室经常通风、室内种植绿色植物, 有助于减少室内有害化学物质含量, 降低肺癌发病的风险。因此, 为预防居室内环境污染对人体健康的影响, 居民在装修住宅时应选择有环保标志的正规建筑装饰材料, 培养和保持良好的生活习惯, 经常保持室内通风换气、种植一些能吸收有害物质的绿色植物等。总之, 采取综合措施改善居室不良环境, 对于减少肺癌的发生有重要意义。

参考文献:

- [1] 李广灿, 叶召. 全球常见恶性肿瘤的当前流行趋势[J]. *肿瘤防治*

研究, 1999, 26(4): 308.

- [2] 张文丽, 方欣, 曹兆进. 中国 4 城市居室装修状况对居民健康影响[J]. *中国公共卫生*, 2009, 25(4): 424-426.
- [3] 黄红儿, 刘世友. 上海市宝山区 271 例肺癌危险因素的病例对照研究[J]. *中国慢性病预防与控制*, 2006, 14(5): 336-338.
- [4] 房军, 甘德坤, 政素华, 等. 中国非吸烟女性肺癌危险因素的病例-对照研究[J]. *卫生研究*, 2006, 35(4): 464-467.
- [5] 朱朝阳, 张志峰, 李长风, 等. 武汉市城区居民肺癌危险因素研究[J]. *肿瘤防治研究*, 2007, 34(8): 633-635.
- [6] 贾正立. 肺癌的危险因素研究进展及预防[J]. *实用医技杂志*, 2006, 13(20): 3702-3703.

(收稿日期: 2009-12-25)

(英文编审: 薛寿征; 编辑: 徐新春; 校对: 洪琪)