

文章编号:1001-5914(2009)09-0787-03

北京秋季室内外 PM_{2.5} 污染水平及其相关性

程鸿,胡敏,张利文,万霖

摘要:目的 了解北京市住宅室内空气颗粒物的污染状况,研究室外颗粒物以及室内活动对室内颗粒物浓度变化的影响,为制订和修订相应的室内空气质量标准提供基础数据及相应的科学依据。方法 于2008年10月27—31日对一社区居民住宅(8户)的室内和室外同步进行PM_{2.5}的采集。采用称重法测得住宅室内外PM_{2.5}的质量浓度,同时结合在线连续观测数据和活动时间模式问卷调查结果,了解各种污染源对室内外颗粒物浓度变化的影响。结果 采样期间的室内、室外平均浓度分别为58.5和74.1 μg/m³, IO比值(室内与室外颗粒物质量浓度之比)为0.85。室内人为活动(做饭、打扫等)会使室内颗粒物浓度瞬间急剧增大,是室内主要的污染源之一;在夜间,室外颗粒物的渗透作用是影响室内环境的主要因素。结论 与国外相比,国内的室内PM_{2.5}浓度仍处于一个较高的污染水平,做饭可能产生高浓度的颗粒物。室内环境应当受到公众的关注。

关键词:空气污染; 细颗粒物; 室内活动

中图分类号: R122.2

文献标识码: A

PM_{2.5} Concentrations in Indoor and Outdoor Air and Their Relationship in the Fall of Beijing CHENG Hong, HU Min, ZHANG Li-wen, et al. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Objective To investigate indoor particle pollution in the residence of Beijing, and to find out how both outdoor particles and indoor human activities affect the indoor fine particle (PM_{2.5}) levels, which may supply the basic data for setting indoor air quality standards. **Methods** Eight houses were selected in a residential district during October, 2008 and indoor and outdoor PM_{2.5} samples were collected. PM_{2.5} concentration was obtained by weighting the mass of the filter before and after sampling. The detailed information of online PM_{2.5} data (DustTrak) and time-activity pattern questionnaires explained how human activities affected the variation of indoor and outdoor PM_{2.5}. **Results** The indoor and outdoor PM_{2.5} average concentrations were 58.5 μg/m³ and 74.1 μg/m³, respectively. The average IO ratio was 0.85 during the sampling. The indoor activities, especially cooking and sweeping, caused the drastic variation of indoor PM_{2.5} concentration. The indoor activities were the main indoor pollution sources, while the infiltration of outdoor particles was the most important factor that affected the indoor microenvironment at night. **Conclusion** In Chinese residences, the PM_{2.5} concentrations in the indoor air were still in a higher polluted level compared with the developed countries. Cooking activities may make particulate matter of utmost concentration. The indoor microenvironment should be paid more attention by the public.

Key words: Air pollution; Fine particulate matter; Indoor activities

大量的流行病学研究表明,颗粒物会增加发病率和死亡率,危害呼吸系统和心血管系统,影响免疫功能等^[1-3]。研究表明,一天中人们大约有70%的时间是在室内度过^[4-5],室内环境对人体健康的影响尤为重要。室内颗粒物的研究越来越受到关注,包括PM_{2.5}、PM_{1.0},甚至更小的颗粒物的质量浓度^[6]、数浓度^[7]、化学组成等^[8]。目前,国内报道室内颗粒物浓度现状的研究比较少^[9,10]。为了解北京秋季室内外PM_{2.5}污染水平及其相关性笔者进行了调查。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置和采样方法

室外采样点距路北四环约200 m,设置在某社区附近的7层楼顶,附近没有其他明显的污染源。室内采样点设置在某社区退休老人住宅的客厅内,离地面约1.5 m。室内采样地点距离室外采样点的直线距离约500 m。于2008年10月27—31日,每天采集室内空气样本1~2户,每户采样1 d,一共采样8户。同

期采集室外空气样本。

采用TH16A型天虹四通道采样器(武汉市天虹仪表有限公司,16.7 L/min)进行室外空气PM_{2.5}样本采集。采用VSS™型BUCK采样器(A.P公司,4 L/min)进行室内空气PM_{2.5}样本采集。采样时间从9:00到次日9:00,室内和室外采样同步进行。室内、外同时架设8520型DustTrak连续观测仪(TSI公司,1.7 L/min)测定PM_{2.5}的瞬时变化。DustTrak连续观测仪利用光散射的原理进行测量,因此需要用同步获得的采样膜的质量浓度对其产生的数据进行校正^[7]。

1.2 问卷调查

研究对象需要填写24 h时间活动模式调查问卷。问卷内容包括研究对象在室内和外出的时间以及在室内发生的各种活动(如抽烟、做饭、打扫等)的时间。问卷填写的时间段为9:00到次日9:00,时间间隔为30 min。

1.3 质量保证与质量控制

采样前、后,将Teflon膜置于超净实验室,在恒温、恒湿[T=(20±1)℃, RH=(40±5)%]条件下平衡24 h,之后用AX105DR型十万分之一天平(瑞士Mettler Toledo仪器有限公司)称重,由采样前、后采样膜质量差和实际采样体积计算大气中颗粒物PM_{2.5}质量浓度。采样器在采样前进行流量标定,以确保采样流

基金项目:国家科学技术部“十一五”支撑计划项目(2006BA119B06),国家自然科学基金资助项目(20637020),美国HEI项目,美国NIEHS项目
作者单位:北京大学环境科学与工程学院(北京100871)
作者简介:程鸿(1985-),男,硕士研究生,从事大气颗粒物人体暴露评价研究。
通讯作者:胡敏, E-mail: minhu@pku.edu.cn

量的准确性。由于进行室内和室外环境采样时所用仪器的流量不同,为保证数据质量进行了不同仪器之间的比对。结果表明,天虹四通道采样器与BUCK采样器之间有较好的相关性($R^2=0.98$),各个BUCK采样器之间的相关性也较好,可以保证采样过程中采集颗粒物质量浓度的可靠性。

2 结果

2.1 室内和室外空气PM2.5质量浓度以及气象参数

2008年10月27—31日,北京市空气污染指数(API)的平均值为67,范围为42~79(北京市环保局,http://www.bjepb.gov.cn),可以较好地代表秋季空气质量为良的情况。采样期间室外空气PM2.5浓度和气象参数见表1。

表1 采样期间室外空气PM2.5浓度均值和气象参数

时间	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	温度($^{\circ}\text{C}$)		湿度(%)		风速(m/s)	
		均值	范围	均值	范围	均值	范围
10月27日	53.4	14.6	10.4~19.5	25.4	16.1~2.3	1.4	0.4~2.3
10月28日	93.7	14.4	8.9~20.1	39.6	21.5~61.8	0.7	0.4~1.1
10月29日	57.9	11.2	7.7~13.9	45.2	37.5~63.3	1.3	0.7~2.2
10月30日	102.6	9.8	4.2~14.2	57.6	41.4~71.9	1.0	0.4~1.7
10月31日	62.8	13.9	9.0~18.3	33.7	16.3~67.7	1.8	0.1~4.7

在5d的采样中,室外颗粒物呈现出高低浓度交错变化。10月27日晚上风速开始下降,风向开始转变,28日始终处于静风状态使颗粒物浓度上升,29日清晨有雨,出现明显的降温,雨水冲刷使颗粒物浓度明显下降,31日出现采样期间的最大风速(达到4.7 m/s),使得颗粒物浓度从 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降到 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见,气象因素对室外颗粒物浓度变化有显著的影响。

由于室内环境以及个人行为的差异,室内空气PM2.5浓度变化较大,见表2。10月27日即使室外颗粒物浓度较低时($53.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)B户研究对象室内颗粒物浓度水平却达到 $95.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$,高浓度的颗粒物可能与室内排放源有关。大多数对室内颗粒物浓度变化的研究表明室内活动是室内颗粒物浓度升高的主要来源,同时室外颗粒物也有着显著的影响^[11-13]。

表2 采样期间室内空气PM2.5浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

时间	研究对象	均值	范围
10月27日	A户	30.0	6.4~59.4
	B户	95.9	10.0~666.7
10月28日	C户	66.9	31.9~350.4
	D户	76.0	19.1~217.7
10月29日	E户	26.5	18.9~35.7
	F户	76.5	19.3~409.7
10月30日	G户	66.0	8.6~116.2
10月31日	H户	30.3	5.5~115.1

2.2 室内和室外PM2.5变化特征

10月30—31日采用DustTrak连续观测仪同时对室内(G和H户)和室外空气PM2.5浓度进行监测。室外PM2.5的日变化与交通源和气象条件有密切的关系,7:00,12:00和19:00为交通高峰,PM2.5浓度达到峰值。10月31日9:00—12:00大风稀释作用使室外空气PM2.5浓度保持在一个较低的水平。由于风速减小,22:00以后颗粒物浓度出现上升的趋势,见封三图1。

人为活动,如打扫、做饭等,是室内空气PM2.5的主要来源,做饭的时间PM2.5浓度达到峰值^[4,13]。如10月31日12:00,室外PM2.5浓度在大风条件下保持一个较低的水平,由于做饭的

影响室内空气PM2.5浓度达到峰值,并且超过了室外浓度。此外,室外颗粒物通过门、窗及建筑物缝隙等的渗透作用也是室内颗粒物浓度水平上升的原因^[6,17],如10月30日22:00以后由于卡车的行驶,室外和室内颗粒物浓度保持在一个较高的水平。

结合时间活动模式调查问卷,将室内活动分为打扫时段、做饭时段、夜间睡觉时段、室内无人时段,22:00—2:00视为夜晚无人活动时段。各时段室内颗粒物浓度有着明显的不同,如室内无人活动时(G户,16:00—17:27)PM2.5平均浓度为 $37.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,打扫过程中(H户,10:40—11:00)的PM2.5平均浓度为 $57.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,在做饭期间(G户,17:30—18:00)PM2.5的平均浓度高达 $114.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。结果显示,在夜间休息时(22:00—2:00),虽然室内活动最少,但是由于室外高浓度PM2.5的影响,室内PM2.5浓度也维持在一个较高的浓度。所以不能将夜间休息时段的PM2.5浓度视为室内环境的背景浓度。因此将白天室内无人活动时的PM2.5视为背景浓度。

根据平均浓度粗略的估算,做饭可能导致室内PM2.5浓度增大3倍,打扫使室内PM2.5浓度增加1.5倍,夜晚室外颗粒物的渗透作用使室内PM2.5浓度是背景浓度的2.3倍。

2.3 不同研究对象室内空气PM2.5浓度的差异

表2可见,不同研究对象室内颗粒物浓度差异显著。时间活动模式问卷结果显示,A、E户研究对象在采样期间外出办公,在室内时间相对于其他研究对象而言较短,故A、E户室内平均颗粒物浓度较低。

根据表2中PM2.5浓度的较大值,重点考察B、C、F户室内空气中PM2.5浓度的变化情况,见封三图2。虽然研究对象的室内活动存在差异,但一般会在3个相似的时间段出现室内颗粒物浓度值的高峰,即5:00—8:30、11:30—13:00、17:00—18:30,从低浓度上升至最大值的过程大约需要约1h。由于烹饪方式以及使用燃料的差异,各峰值浓度不尽相同,大部分峰值浓度约为 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$,但个别住户室内PM2.5的瞬时最高浓度可高达 $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (B住户)。此外,现场采样时笔者发现,10月29日由于温度骤降,有些老年人夜间在室内采用蜂窝煤供暖(如F户),因此在夜间监测结果显示,室内空气PM2.5出现 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高浓度水平。

2.4 室内外PM2.5浓度的关系

通常采用IO比值(室内与室外颗粒物质量浓度之比)描述室内外颗粒物质量浓度的差异。在没有明显的长期室内污染源的情况下,IO比值约为1^[18]。本研究中的IO比值为0.85。由于各研究对象的生活习惯不同,在家时间的长短也有差异,各研究对象24h的平均IO比值变化范围较大(0.6~1.8),室内外PM2.5相关性并不好。

22:00—2:00室内由于没有明显的人为活动,室内外PM2.5具有很好的相关性,大约有78%的室内颗粒物来源于室外,这与Abt和Allen等^[11,19]的研究结果一致。因此,当室内没有明显的污染源时,室外颗粒物的渗透是室内颗粒物的主要来源。

室内活动使室内PM2.5浓度在短时间内发生显著变化,而室外PM2.5浓度在短时间内变化较小。因此室内不同的活动导致不同时间段的IO比值发生变化。当室内无人和无显著室内活动(睡觉)时,IO比值较小且变化范围较小,说明当室内没有明显的污染源时,室内颗粒物浓度较低且与室外颗粒物浓度有相似的变化趋势。当存在明显的室内污染源时,如打扫和做饭,IO比值的变化较为明显。以G户为例,当无人活动的时段(16:00—17:27),其IO比值为 0.3 ± 0.02 ,夜里睡觉时段(22:00—2:00),IO值为 0.6 ± 0.02 ,这两个时段IO比值变化较小。做饭过程会使

IO 比值变化较大,做饭前 IO 值为 0.3,做饭过程中的 IO 比值增大至 1.0 而在做饭后的 IO 比值为 0.7。当室内活动发生时,室内颗粒物浓度上升,IO 比值明显增大;当室内活动结束时,室内颗粒物浓度有缓慢的下降过程,IO 比值变化不大,室内浓度依然在一个相对较高的水平。为了避免长期暴露在较高浓度水平的室内环境,应该在打扫或做饭后保持室内通风。

3 讨论

本研究通过室内外 PM_{2.5} 的采集获得室内外颗粒物浓度,弥补了北京地区室内外颗粒物浓度基础数据的空白,并且利用 Dust Trak 连续观测仪第 1 次测得室内 PM_{2.5} 高分辨率的变化情况,研究不同室内活动对室内 PM_{2.5} 的影响。

室内活动是导致室内颗粒物浓度变化的主要原因。做饭、打扫等会使室内 PM_{2.5} 浓度上升几倍。这与大部分报道的结论较为一致,He 等^[15]对各种室内活动对室内 PM_{2.5} 浓度贡献的研究表明做饭行为使颗粒物浓度是背景浓度的 2.9 倍,室内打扫可以使 PM_{2.5} 浓度增大 1.7~2 倍左右。Abt 等^[11]在对各种室内活动导致 PM_{2.5} 浓度变化的研究中也印证了这点。

研究结果表明,不同的研究对象室内由于室内活动的差异具有不同的变化规律。虽然在调查问卷上对室内餐饮源的具体细节上没有设计完善。但是根据现场采样的观察记录以及文献中的报道,对做饭所产生峰值的估计仍具有一定的科学依据。如文献中报道,以液化石油气为燃料的住户在做饭时刻室内 PM_{2.5} 浓度为 71 μg/m³,以木材为燃料的室内浓度高达 212 μg/m³^[20]。各种不同烹饪方式对室内 PM_{2.5} 浓度也有不同的影响,如以蒸为主时 PM_{2.5} 浓度变化范围为 72~92 μg/m³,以油炸为主时 PM_{2.5} 浓度变化范围为 120~209 μg/m³,以烧烤为主时颗粒物浓度变化范围为 699~2 911 μg/m³^[16,17]。根据这些不同燃料以及不同做饭方式对室内颗粒物浓度贡献的研究结果^[16,17,21]我们可以推测出这几户研究对象的可能采用了以油炸和烧烤为主的烹饪方式。因此在做饭时刻室内产生了极高的颗粒物浓度(350~666 μg/m³),个体在做饭时刻将接受短期高浓度的 PM_{2.5} 暴露。

目前,国内尚未制定 PM_{2.5} 质量浓度标准限值,将此次采样获得的 PM_{2.5} 质量浓度与 WHO 所推荐日均标准 25 μg/m³ (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html>) 相比,发现大多数情况下,无论是室外还是室内环境的 PM_{2.5} 浓度均超过 WHO 推荐标准 2~3 倍,可见,室内、室外环境 PM_{2.5} 超标问题在国内依然比较严重。对于在室内时间长的人群如老人和儿童而言,室内 PM_{2.5} 浓度对他们的健康影响将会更大。因此,室内颗粒物浓度过高的问题应当受到大家的重视。

4 结论

(1)北京秋季采样期间,室外 PM_{2.5} 平均浓度为 74.1 μg/m³,室内 PM_{2.5} 平均浓度为 58.5 μg/m³。大多数情况下,室内、室外浓度均高于 WHO 标准。

(2)室内外颗粒物浓度具有显著的日变化特征。室外颗粒物浓度变化受到交通和气象因素的影响。室内颗粒物浓度变化主要受到人为活动的影响。22:00 以后,室内颗粒物浓度主要受到室外的影响而且保持在一个较高的浓度水平。

(3)采样期间的平均 IO 比值为 0.85,各研究对象的室内活动不同使得 IO 比值具有较大的差异。当无明显的室内污染源时 IO 比值较小且变化不大,当存在明显的室内活动时 IO 比值会由于室内

PM_{2.5} 浓度在很短时间内的迅速上升而增大,并且在室内活动结束后由于短时间内室内仍保持较高的 PM_{2.5} 浓度,IO 比值变化较小。

参考文献:

- [1] Neuberger M, Schimek M G, Horak F, et al. Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and function: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter [J]. Atmos Environ, 2004, 38: 3971-3981.
- [2] Laden F, Neas L M, Dockery D W, et al. Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities [J]. Environ Health Perspect, 2000, 108:941-947.
- [3] Peters A, Dockery D W, Muller J E, et al. Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction [J]. Circulation, 2001, 103: 2810-2815.
- [4] Klepeis N E, Nelson W C, Ott W R, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants [J]. J Expo Anal Environ Epidemiol, 2001, 11: 231-252.
- [5] Schweizer C, Edwards RD, Bayer-Oglesby L, et al. Indoor time microenvironment activity patterns in seven regions of Europe [J]. J Expo Sci Environ Epidemiol, 2007, 17: 170-181.
- [6] Massey D, Masih J, Kulshrestha A, et al. Indoor / Outdoor relationship of fine particles less than 2.5 μm (PM_{2.5}) in residential homes locations in central Indian region [J]. Build Environ, 2009, 44: 2037-2045.
- [7] Morawska L, He CR, Hitchins J, et al. Characteristics of particle number and mass concentrations in residential houses in Brisbane, Australia [J]. Atmos Environ, 2003, 37: 4195-4203.
- [8] Funasaka K, Miyazaki T, Tsuruho K, et al. Relationship between indoor and outdoor carbonaceous particulates in roadside households [J]. Environmental Pollution, 2000, 110: 127-134.
- [9] 刘阳生,沈兴兴,毛小琴,等.北京市冬季公共场所室内空气中 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 污染研究[J].环境科学学报, 2004, 24(2): 190-196.
- [10] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等.广州市夏、冬季室内外 PM_{2.5} 质量浓度的特征[J].环境污染与防治, 2006, 28(12): 945-948.
- [11] Abt E, Suh H H, Allen G, et al. Characterization of indoor particle sources: A study conducted in the metropolitan Boston area [J]. Environ Health Perspect, 2000, 108, 35-44.
- [12] Morawska L, He C R, Hitchins J, et al. The relationship between indoor and outdoor airborne particles in the residential environment [J]. Atmos Environ, 2001, 35, 3463-3473
- [13] Cao J J, Lee S C, Chow J C, et al. Indoor/outdoor relationships for PM_{2.5} and associated carbonaceous pollutants at residential homes in Hong Kong-case study [J]. Indoor Air, 2005, 15: 197-204
- [14] Tucker W G. An overview of PM_{2.5} sources and control strategies [J]. Fuel Process Technol, 2000, 65: 379-392.
- [15] He C R, Morawska L D, Hitchins J, et al. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses [J]. Atmos Environ, 2004, 38, 3405-3415.
- [16] Lee S C, Li W M, Chan L Y. Indoor air quality at restaurants with different styles of cooking in metropolitan Hong Kong [J]. Sci Total Environ, 2001, 279: 181-193.
- [17] See S W, Balasubramanian R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods [J]. Atmos Environ, 2008, 42: 8852-8862.
- [18] Wallace L. Indoor particles: A review [J]. J Expo Sci Environ Epidemiol, 1996, 46, 98-126.
- [19] Allen R, Larson T, Sheppard L, et al. Use of real-time light scattering data to estimate the contribution of infiltrated and indoor-generated particles to indoor air [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37: 3484-3492.
- [20] Begum B A, Paul S K, Hossain M D, et al. Indoor air pollution from particulate matter emissions in different households in rural areas of Bangladesh [J]. Build Environ, 2009, 44: 898-903.
- [21] Wallace L A, Emmerich S J, Howard-Reed C. Source strengths of ultrafine and fine particles due to cooking with a gas stove [J]. Environ Sci Technol, 2004, 38:2304-2311.

(收稿日期: 2009-06-08 修回日期: 2009-07-30)

(本文编辑: 高申)

程鸿,等.北京秋季室内外PM2.5污染水平及其相关性

(正文见第787页)

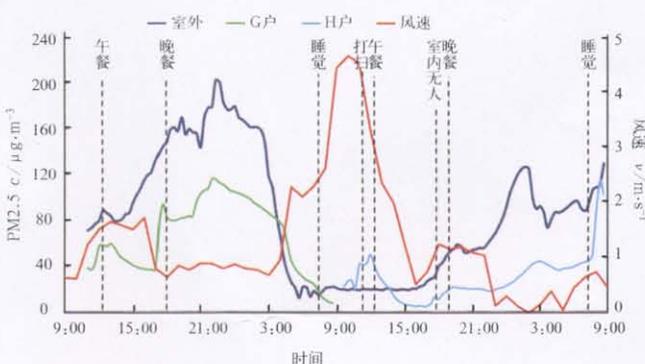


图1 室内和室外PM2.5浓度和风速随时间的变化

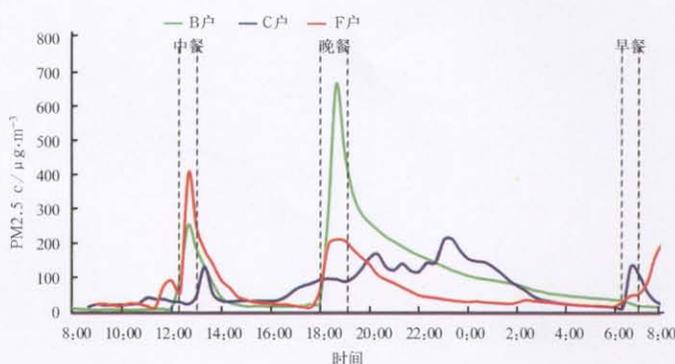


图2 B、C、F户室内空气PM2.5浓度随时间的变化

邵然,等.丁草胺对蟾蜍心肌的毒性作用

(正文见第799页)

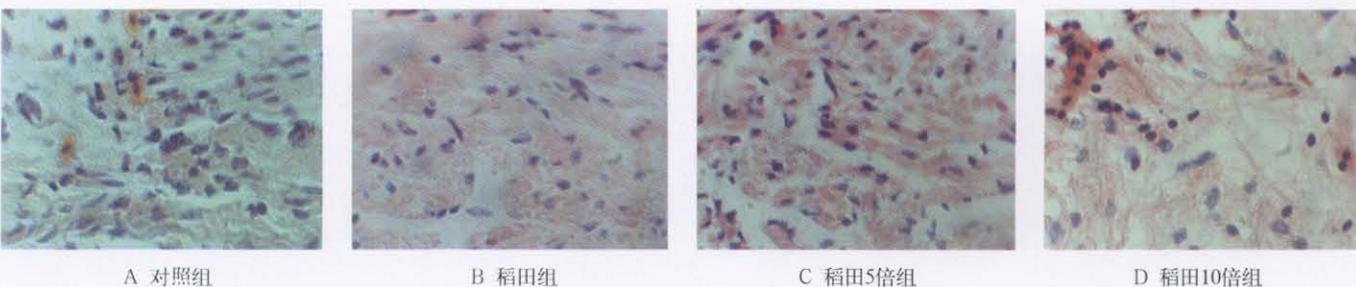


图1 丁草胺染毒6 d蟾蜍心房肌细胞结构的变化 HE 40×

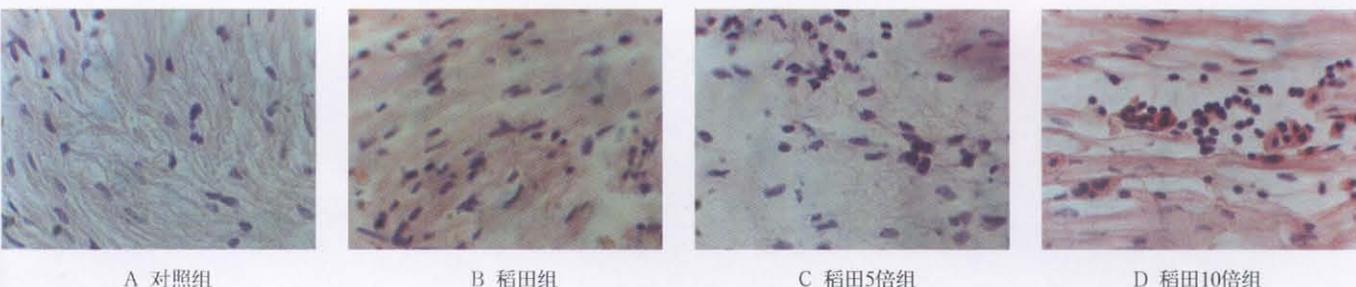


图2 丁草胺染毒6 d蟾蜍心室肌细胞结构的变化 HE 40×

张媛,等.1 800 MHz电磁波辐射出生前暴露对子代大鼠海马脑区超微结构的影响

(正文见第810页)

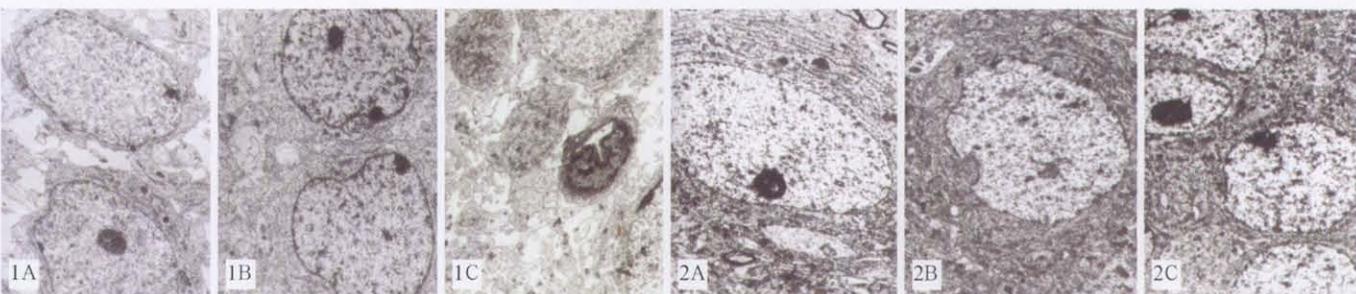


图1 A (对照组)、B (0.5 mV/cm²)、C (1.0 mV/cm²)为1 800MHz电磁波辐射出生前暴露子代大鼠出生后3 d海马脑区超微结构(7 500×);
图2 A (对照组)、B (0.5 mV/cm²)、C (1.0 mV/cm²)为1 800MHz电磁波辐射出生前暴露子代大鼠出生后72 d海马脑区超微结构(7 500×)