

香港住宅室内环境及污染暴露量研究

涂 有, 周志坤, John Burnett, 陈维田 (香港理工大学 屋宇设备工程学系, 香港)

摘要: 对选定的 14 间香港住宅的 PM₁₀、CO、NO₂ 等主要室内污染物浓度进行监测, 通过建立多元线性回归模型, 分析了室内、外 PM₁₀ 浓度与居民室内各种活动等其它有关因素之间的相关关系。结合香港居民日常时间安排调查的结果, 计算出各种室内污染物的暴露量, 对住宅室内环境污染对居民健康的影响进行了初步评估, 提出了改善住宅室内环境的一些建议。

关键词: PM₁₀; CO; NO₂; 污染物暴露量; 香港住宅; 室内环境

Indoor environment & air pollutant exposure in residential buildings of Hong Kong

Edward Y. Tu, C. K. Chau, J. Burnett, D. W. T. Chan (Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract: Hong Kong people spend most of their daily time in various indoor environments especially in their dwellings located in high-rise buildings. Since then the indoor air quality of residential buildings may deeply influence the health of Hong Kong people. In this research project, some major indoor air pollutants such as PM₁₀, CO, NO₂, were monitored in 14 dwelling flats. The relationships among indoor PM₁₀ concentration and outdoor PM₁₀ concentration, occupant's activities were analyzed through a multiple regression model. Combining with the result of time budget survey, the dwelling indoor exposures of various pollutants were calculated for the estimation of health effect to Hong Kong population.

Keywords: PM₁₀, CO, NO₂, pollutant exposure, residential premises, indoor environment

现代工业社会中, 大气环境污染对人类健康构成严重威胁, 相应的室外空气质量标准应运而生。然而在发达国家的调查显示^[1], 居民每日停留于住宅、公共建筑等各类室内环境的时间超过 80%。香港居民平均每日在各类室内环境的停留时间达全日时间的 90%, 在住宅内的时间接近全日时间的 60%^[2]。由此可见, 室内环境的优劣对人类健康的影响较室外大气环境更值得关注, 住宅更是直接关系到居民健康的重要室内环境之一。诚然室内环境在很大程度上受大气环境制约, 室内环境的改善在很大程度上也依赖于大气环境的改善^[3,4]。

本文通过对分布于香港不同地区的住宅建筑的空气质量进行监测, 分析室内、外可吸入颗粒物浓度以及 CO、NO₂ 等室内污染物的浓度水平与变化; 结合香港市民日常时间安排调查结果^[2], 计算香港居民每日在住宅内可吸入颗粒物、CO、NO₂ 等污染物的总暴露量。以此揭示香港住宅空气质量的现状, 评估香港市民受到住宅内空气污染危害的风险水平, 并为政府制定更科学的室内、外空气质量标准提供参考依据。

1 研究方法

污染物暴露量 (Pollutant Exposure) 是衡量污染物对人类健康影响的重要指标^[5-9]。污染物

暴露量综合考虑了不同微环境(microenvironment)中污染物的浓度和人员停留于相应微环境中的时间,其表达式为:

$$E_j = \sum_{i=1}^n \bar{c}_i t_{ij} \quad (1)$$

其中: E_j 表示个体 j 的污染物总暴露量; \bar{c}_i 是微环境 i 中的污染物平均浓度; t_{ij} 表示个体 j 在微环境 i 中停留的时间; n 则表示微环境的数量.

污染物暴露量的研究方法主要有直接法与间接法^[10-12]. 直接法是将个人暴露量检测器(Personal exposure monitor)佩戴在身体上,直接量度污染物暴露量;间接法则通过调查个人的日常时间安排^[1,2],以及测量不同微环境当中的污染物浓度,来计算污染物暴露量.本研究中采用了间接法对香港住宅室内环境的污染物暴露量进行研究.

在此次研究中,选取了分布于香港不同地区、不同楼层的 14 间住宅,对其室内与室外的 PM10 浓度进行监测;同时对室内 CO、NO₂、CO₂ 的浓度也进行了监测;尽管 CO₂ 并非有毒污染物,但其浓度反映了房间的通风效果,从一个侧面反映出室内空气质量的优劣.表 1 给出了此次研究中所监测住宅的简要情况.

测试时间由 2000 年 9 月到 2001 年 2 月,涵盖了香港使用与不使用空调的季节.对每间住宅的室内、外空气质量进行了连续 72 h 的监测.在此次研究中,使用 PM 7400 (MetroSonic, 美国)便携型空气检测仪监测 CO、NO₂ 浓度;使用 Dustrak 8520 (TSI, 美国)尘粒监测仪监测 PM10 浓度.使用 Q-

Trak (TSI, 美国)空气品质检测仪测量 CO₂ 浓度.在每次进行测试前,仪器均按相关要求加以检查、校准,以保证测试工作的质量.

为综合考虑室内、外污染源对室内 PM10、CO、NO₂ 浓度的影响,对参加测试的住宅内居民在测试期间的活动,如煮食、清洁、吸烟、空调的种类及使用情况等也进行了记录;室外污染源主要考虑周围环境,如交通、建筑地盘及工业等的影响.

2 结果与讨论

2.1 室内、外污染物浓度

香港特区政府高度重视对环境污染的控制,于 1989 年颁布了香港室内外空气质量指标;香港环保署(HK-EPD)于 1997 年完成了一项对香港公共建筑室内环境的研究,并参照美国采暖制冷空调工程师协会(ASHRAE)及 WHO 等颁布的室内空气质量标准,制定了“办公与公共建筑室内空气质量管理指引草案”.表 2、表 3 所示为香港现行的室内外空气质量标准.室内空

表 1 测试住宅基本情况介绍

Table 1 Brief introduction of dwelling flats taken IAQ measurements

编号	地区	楼层	居住人口	吸烟	煮食	燃料	空调
1	港岛区	3	2	无	无	管道煤气	窗式
2	港岛区	12	3	无	有	管道煤气	窗式
3	港岛区	10	4	有	有	液化气	分体式
4	九龙区	7	4	无	有	液化气	窗式
5	九龙区	17	3	有	有	管道煤气	窗式
6	九龙区	5	4	无	无	管道煤气	窗式
7	九龙区	3	3	有	有	液化气	窗式
8	九龙区	16	4	无	无	管道煤气	窗式
9	九龙区	14	6	无	无	管道煤气	分体式
10	新界区	14	2	无	有	管道煤气	窗式
11	新界区	2	2	无	有	液化气	窗式
12	新界区	25	4	有	有	管道煤气	窗式
13	新界区	19	4	无	有	管道煤气	窗式
14	新界区	9	3	无	无	管道煤气	窗式

表 2 香港的室外空气质量指标
Table 2 Hong Kong air quality objectives

污染物	平均值				
	1 h	8 h	24 h	3 月	1 年
二氧化硫, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	800	—	350	—	80
总悬浮颗粒物, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	—	—	260	—	80
可吸入颗粒物, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	—	—	180	—	55
二氧化氮, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	300	—	150	—	80
一氧化碳, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	30000	10000	—	—	—
臭氧, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	240	—	—	—	—
铅, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	—	—	—	1.5	—

表 3 香港政府推荐的办公楼与公共建筑室内空气质量指标
Table 3 Recommended indoor air quality objectives for office buildings and public places in Hong Kong

污染物	8h 平均值 25℃, 101.325 kPa		
	一级	二级	三级*
二氧化碳, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	< 1571	< 1964	< 9821
一氧化碳, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	< 2000	< 10000	< 29000
可吸入颗粒物, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	< 20	< 180	—
二氧化氮, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	< 40	< 150	< 5600
臭氧, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	< 50	< 120	< 200
甲醛, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	< 30	< 100	< 370
总挥发性有机物, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	< 200	< 600	—
氡, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	< 150	< 200	—
细菌, $\text{cfu} \cdot \text{m}^{-3}$	< 500	< 1000	—
温度, $^{\circ}\text{C}$	20—25.5	< 25.5	—
相对湿度, %	40—70	< 70	—
气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	< 0.2	< 0.3	—

* 职业环境暴露量标准

室外 PM10 浓度比频率分布. 由于住宅多数时间利用自然通风, 室外空气对室内的影响较采用机械通风的公共建筑为大, 由图 2 可以看出, 室内与室外 PM10 浓度存在一定相关关系.

由分析可知, 室内 PM10 浓度除受到室外 PM10 浓度影响外, 还与住宅居住人数、吸烟状况及煮食情况等因素有关, 笔者试图利用多元线性回归模型来建立室内 PM10 浓度与几种影响因素间的相关关系. 回归模型以室内 PM10 浓度为因变量, 以室外 PM10 浓度、住宅居住人数、吸烟状况及煮食情况为自变量, 利用 SPSS 统计软件进行回归

气污染物以可吸入颗粒物 (RSP)、CO、NO₂ 为主^[13-17]. 可吸入悬浮尘粒是指总悬浮颗粒物 (TSP) 当中粒径低于 10 μm 的尘粒 (PM10)^[18], 可由呼吸道进入肺部, 危害人体健康. 室内污染源与居民活动有关, 如民用炉火、吸烟、吸尘以及一些装饰材料也会释放出 PM10. 而 CO、NO₂ 则与车辆尾气排放、燃料不完全燃烧密切相关.

高层住宅楼为香港典型的住宅形式, 选择高层住宅楼加以研究具有一定代表性. 住宅的室内、外空气质量监测的简要结果见表 4. 由表 4 可知, 香港 14 间住宅建筑内的 PM10 日平均浓度介于 32.63—135.83 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间. 与香港室内、外空气指标比较, 除个别时段, 如煮食与吸烟时, 室内的 PM10 日平均浓度均满足香港政府推荐的办公楼与公共建筑室内空气质量指标的二级指标要求的 8 h 内平均值不超过 180 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 但远不能满足一级指标要求的 20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 水平; 室外 PM10 日平均浓度均满足香港的室外空气质量指标要求的 24 h 不超过 180 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

住宅的室内与室外 PM10 浓度比介于 0.60—2.43 之间, 平均浓度比为 1.12, 标准差为 0.3. 图 1 所示为室内与

表 4 住宅的污染物浓度水平

Table 4 Pollutant concentrations in dwelling flats

室内、外 PM10 浓度	平均浓度	标准差	最大值	最小值
室内 PM10 浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	62.17	28.38	135.83	32.63
室外 PM10 浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	56.64	27.18	140.44	29.52
室内外浓度比, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	1.12	0.30	2.43	0.60
室内其它污染物浓度	平均浓度	标准差	最大值	最小值
CO 浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	964.14	655.06	3788.57	0
NO ₂ 浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	67.68	33.20	155.27	18.78
CO ₂ 浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	1044.63	527.39	2958.37	307.43

计算, 得到回归方程:

$$C_{in} = 1.08C_{out} + 5.60O + 4.18S + 11.17C - 27.15 \quad (2)$$

方程中 C_{in} 为室内 PM10 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), C_{out} 为室外 PM10 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), O 为居住人数, S 为吸烟情况, C 为煮食情况. 计算得到回归相关系数 $r^2=0.83$, 反映回归方程的拟合程度较高. 利用 F 检验法对回归方程的显著性进行检验. 计算得到回归方程的 F 统计量 = 10.29; 对给定的显著性水平 ($\alpha=0.01$) 和两个自由度 ($df_1=4$; $df_2=9$), 查表得 $F_{\text{临界值}}=6.42$; 因为 $F_{\text{统计量}} > F_{\text{临界值}}$, 证明所得回归方程的效果是显著的.

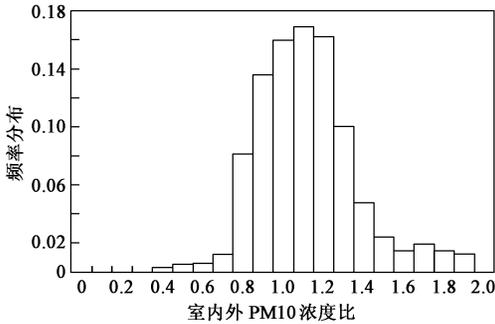


图 1 室内/室外 PM10 浓度比分布

Fig. 1 Indoor/outdoor PM10 ratio distributions

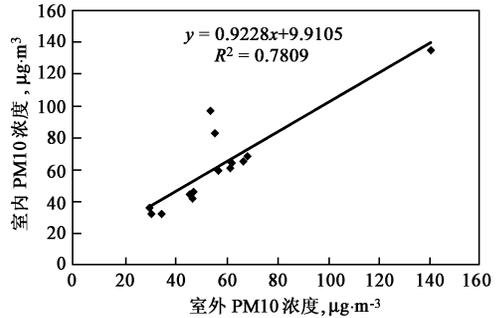


图 2 室内/室外 PM10 浓度相关关系

Fig. 2 Relationship of indoor/outdoor PM10 concentration

由于各自变量的量纲不同, 故采用标准回归系统比较不同自变量对因变量的影响. 对比回归方程中各个自变量的标准化回归系数 (Standardized coefficients), 其中室外 PM10 浓度的标准化回归系数 = 1.034 为最高, 可推知住宅室内 PM10 浓度主要受到室外 PM10 浓度影响; 室内居民人数、居民活动如吸烟与煮食情况等影响因素与室内 PM10 浓度均为正相关, 其标准化回归系数由大到小依次为煮食、居民人数及吸烟, 反映煮食活动对室内 PM10 浓度影响较大; 香港居市民的吸烟率较低, 在所监测的 14 间住宅中只有 3 间存在吸烟情况, 对室内 PM10 浓度的影响反不及煮食活动; 室外 PM10 浓度与住宅的室内 PM10 浓度相差较小, 主要原因在于住宅多采用自然通风以及具有一定换气能力的窗式空调器.

室内 CO 日平均浓度介于 $0-3788.57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 室内 NO_2 日平均浓度介于 $18.78-155.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 室内 CO、 NO_2 日平均浓度满足香港政府推荐的室内空气质量指标的一级指标的要求, 但仍有个别住宅单元的 CO、 NO_2 日平均浓度高于一级指标的要求. 造成浓度超过标准的原因依然是受住宅内吸烟与煮食活动的影响. 由于住宅的人员密度较低, 通风较好, 室内 CO_2 浓度基本处于较低水平.

2.2 室内污染物暴露量

污染物暴露量由所处环境的污染物浓度与停留时间决定. 在此前的研究中, 笔者对香港市民日常时间安排进行了调查. 调查工作依据统计学原理, 对香港家庭进行随机抽样, 并通过电话访问方式, 共获取了 396 个香港市民日常时间分配的有效样本, 表 5 给出了香港居民按性别、年龄及工作状况分组每日在住宅停留的时间统计.

利用住宅内各种污染物浓度的监测数据, 结合时间安排调查的结果, 根据公式 1 计算住宅内 PM10、CO、 NO_2 的日平均暴露量. 图 3 所示为香港居民平均每日住宅停留时间与污染暴露量

的统计分布.从污染暴露量频率分布直方图可以看出,香港居民每日在住宅停留时间与污染暴露量均接近正态分布;从累积分布曲线可以得到,95%的香港居民每日在住宅停留的时间低于19 h,每日住宅内的PM₁₀、CO、NO₂暴露量分别低于1181.2 μg·h·m⁻³、18318.7 μg·h·m⁻³、1285.9 μg·h·m⁻³.

表 5 按性别、年龄及工作状况分组的香港居民每日在住宅内停留的平均时间调查结果

Table 5 Average time spending at home of Hong Kong people in different age, gender and occupational groups

不同分组	调查人数	比例, %	平均时间, h	标准差, h	最大值, h	最小值, h
男性	181	45.7	14.5	2.7	24.0	8.4
女性	215	54.4	13.4	2.6	24.0	7.7
6—18岁	40	10.1	14.2	2.2	21.1	10.5
18—60岁	332	83.8	13.7	2.6	24.0	7.7
>60岁	24	6.1	16.6	3.3	24.0	10.5
工作*	316	79.8	13.4	2.3	24.0	7.7
无工作	40	10.1	17.4	2.7	24.0	10.5
全体	396	100.0	13.9	2.7	24.0	7.7

*该组工作状况不包括青少年

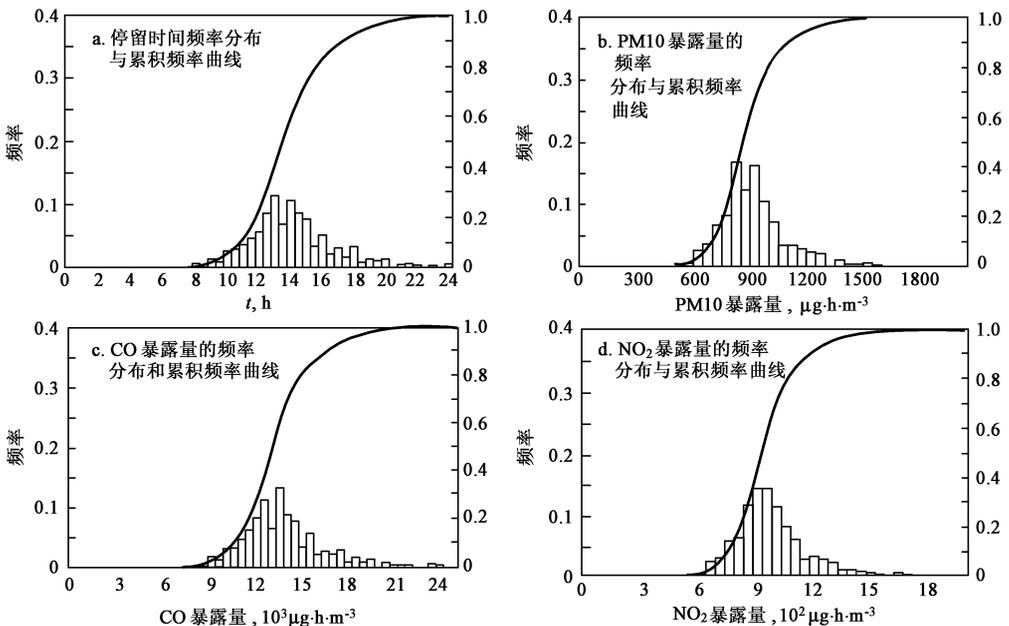


图 3 香港居民每日住宅停留时间与污染暴露量统计分布

Fig. 3 Distribution of daily time spending and pollutant exposures at home of Hong Kong people

居民的日常时间安排受到性别、年龄、工作情况等因素影响,不同的生活、工作方式决定了在住宅内停留的时间也存在差异.根据表5中调查结果,分别计算各组人群的污染暴露量,计算结果见表6.鉴于污染暴露量接近正态分布,给定显著性水平($\alpha=0.05, 0.01$),利用统计软件对各组人群的污染暴露量均值的差异进行 t 检验,检验结果见表7.

表 7 检验结果显示: 按照性别分组, 男性与女性在住宅的 PM₁₀、CO、NO₂ 日平均暴露量均值存在明显差异 ($\alpha = 0.01$), 女性的暴露量水平高于男性; 按照年龄分组, 青少年与成年组的暴露量均值差异不明显, 但与老年组存在明显差异 ($\alpha = 0.01$), 老年的暴露量水平高于青少年与成年; 按照工作情况分组, 有工作与无工作人群的暴露量均值存在明显差异 ($\alpha = 0.01$), 无工作人群的暴露量水平明显偏高. 从以上结果可知, 女性与老年人群(无工作人群也主要为女性与老年人)由于每日在住宅的停留时间较长, 受到住宅室内污染的影响更为严重.

表 7 不同性别、年龄及工作组别的香港居民每日在住宅内污染暴露量均值差异 *t* 检验

Table 7 T-test for average daily pollutant exposures of Hong Kong people in different age, gender and occupational subgroups at home

分组	污染物	<i>t</i> 统计值	<i>t</i> 临界值	α
男性 vs 女性	PM ₁₀	4.088	2.576	0.01
	CO	4.088	2.576	0.01
	NO ₂	4.088	2.576	0.01
青少年 vs 成年	PM ₁₀	1.377	1.966	0.05
	CO	1.377	1.966	0.05
	NO ₂	1.377	1.966	0.05
青少年 vs 老年	PM ₁₀	3.477	2.704	0.01
	CO	3.477	2.704	0.01
	NO ₂	3.477	2.704	0.01
老年 vs 成年	PM ₁₀	5.364	2.797	0.01
	CO	5.364	2.797	0.01
	NO ₂	5.364	2.797	0.01
工作 vs 无工作	PM ₁₀	10.296	2.704	0.01
	CO	10.296	2.704	0.01
	NO ₂	10.296	2.704	0.01

年龄、性别及工作情况划分的人群中, 女性与老年人群(无工作人群也主要为女性与老年人)是受住宅室内环境污染的高危人群. 鉴于女性与老年人的生理特点, 较普通人更易受到环境污染的影响而损害健康, 改善住宅室内环境对于减少空气污染对女性与老年人的健康危害尤为重要.

参考文献:

[1] Jenkins P.L. *et al.* A study of activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources [J]. Atmospheric Environment, 1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

表 6 按性别、年龄及工作状态分组的香港居民每日在住宅内污染暴露量

Table 6 Daily pollutant exposures at home of Hong Kong people in different age, gender and occupational groups

分组	调查人数	暴露量, $\mu\text{g}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$		
		PM ₁₀	CO	NO ₂
男性	181	833.1	12920.6	907.0
女性	215	900.4	13963.7	980.2
6—18 岁	40	885.3	13729.5	963.8
18—60 岁	332	849.0	13166.7	924.3
> 60 岁	24	1033.9	16034.6	1125.6
工作 *	316	830.5	12879.0	904.1
无工作	40	1082.8	16791.5	1178.7
全体	396	863.9	13397.4	940.5

* 该组工作状态不包括青少年

3 结论

监测与分析的结果显示, 香港住宅的 PM₁₀、CO、NO₂ 等主要污染物的日平均浓度均不超过标准, 室内空气质量基本满足香港政府推荐的室内空气质量指标要求. 因为住宅主要以自然通风为主, 室内、外 PM₁₀ 浓度比接近 1. 部分住宅由于存在室内污染源, 室内浓度高出室外浓度较多. 煮食、吸烟等居民活动是造成室内 PM₁₀ 浓度上升的主要原因.

由于香港居民每日停留于住宅的时间较长, 尽管住宅内的污染物浓度水平较低, 居民在住宅内的污染物暴露量在全日暴露量(包含在各类室内环境内的污染物总暴露量)中仍然占较大比重. 住宅内空气品质的改善可有效减少污染物全日暴露量. 在按年

- 1992, 26A: 2141—2148
- [2] Chau C K, Tu E Y, Burnett J, *et al.* Estimating the total exposure of the Hong Kong population[J], *Environmental International*, 2002, 27: 617—630
- [3] Spengler J D, Soczek M L. Evidence for improved ambient air quality and the need for personal exposure research[J]. *Environmental Science and Technology*, 1984, 18(9): 268A—280A
- [4] Yocom J E. Indoor-outdoor air quality relationships—a critical review[J], *Journal of Air Pollution Control Association*, 1982, 32: 500—520
- [5] Ott W R. Concepts of human exposure to air pollution[J], *Environment International*, 1982, 7: 179—186
- [6] Ott W R. Total human exposure; an emerging science focuses on humans as receptors of environmental pollution[J], *Environmental Science and Technology*, 1985, 19(10): 880—886
- [7] Ott W R, *et al.*, The Environmental Protection Agency's research program on total human exposure[J], *Environment International*, 1986, 12: 475—494
- [8] Ott W R. Total human exposure; basic concepts, EPA field studies, and future research needs[J], *Journal of Air Waste Management Association*, 1990, 40(7): 966—975
- [9] Özkaynak H. Exposure assessment[A], In: Holgate S. T., *et al.*, (eds), *Air Pollution and Health*[C], Academic Press, London, UK, 1999, 149—162
- [10] Duan N. Models for human exposure to air pollution[J]. *Environment International*, 1982, 8: 305—309
- [11] Liou P J. Assessing total human exposure to contaminants; a multidisciplinary approach[J]. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24(7): 938—945
- [12] Ryan P B. An overview of human exposure modeling[J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1991, 1: 453—473
- [13] Chao Y H C, Tu E Y, Lo D W Y. The Air Conditioning System in Pubs and Restaurants in Hong Kong[C]. *Proceedings of International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering 1997*, Tianjin, China, 1997, 161—167
- [14] Chao Y H C, Chan G Y, Ho L. Feasibility study of an indoor air quality measurement protocol on 12 parameters in mechanically ventilated and air-conditioned buildings[Z]. *Indoor Built Environment*, 2004, 10: 3—19
- [15] Tu E Y, Chau C K, Burnett J, *et al.* Study of the Indoor Air Quality of the Chinese Restaurants in Hong Kong[Z]. *The Proceedings of the National HVAC Annual Conference 2000*, China, 90—96
- [16] Lee S C, *et al.* Indoor and outdoor air quality investigation at six residential buildings in Hong Kong[J]. *Environment International*, 1999, 25(4): 489—496
- [17] Lee S C, *et al.* Indoor and outdoor air quality investigation at 14 public places in Hong Kong[J]. *Environment International*, 1999, 25(4): 443—450
- [18] Yocom J E. Methods for measuring indoor pollutants[A]. In: John Wiley & Sons Ltd. (eds). *Measuring Indoor Air Quality: a practical guide*[C]. Chichester, England, 1991, 18—27