

北京市街道空气中一氧化碳 污染规律的研究

徐锦航 吴波 葛兴 卜淑君

(综合技术研究室)

摘 要

本工作对北京市街道空气受汽车污染的程度和有关影响因素进行了大量监测、测试和综合分析,找到了街道空气中一氧化碳的污染规律,为汽车污染的控制提供了科学依据。

An Investigation of the Law of Carbon Monoxide Pollution in the Air of Beijing Streets

Xu Jin-hang Wu Bo Ge Xing Bo Shu-jun

Abstract

This work involves much monitoring, measurement and test, and comprehensive analysis of the degree of pollution by automobile exhaust on the street air of Beijing Municipality and the relevant factors affecting it. The law of carbon monoxide pollution on the air of Beijing streets has been found, and the scientific basis for the control of automobile pollution is presented.

一 北京市交通干线分类、典型街道及采样点的选择

根据道路布局,北京市的道路间距一般在600米左右^[1]。按照道路宽度、机动车道数、两

李中和、董超美、李铁军、李敬东、管卫、邹立宏、彭淑敏、李建中、崔自非、文军同志参加部分工作。北京工业大学7955、802、8151班全体同学参加采样或分析。

本文于1984年12月7日收到。

旁建筑物情况等, 可把北京市的道路分为三种类型: I类为主干线, II类为次干线, III类为支线或旧式街道。其断面情况示于图1, 具体所选典型街道见表1。监测站点尽量设在较典型的街道, 不放在十字路口, 以便掌握汽车行驶时造成的污染, 并尽量回避大的固定污染源。采样点布置如图1所示。采样高度离地面1.5—2.0米。沿楼房高度方向设 H_x 点, x 代表楼层层次。 D 点设在离道路一侧100米处的开阔地, 作为局地大气环境质量对照点。

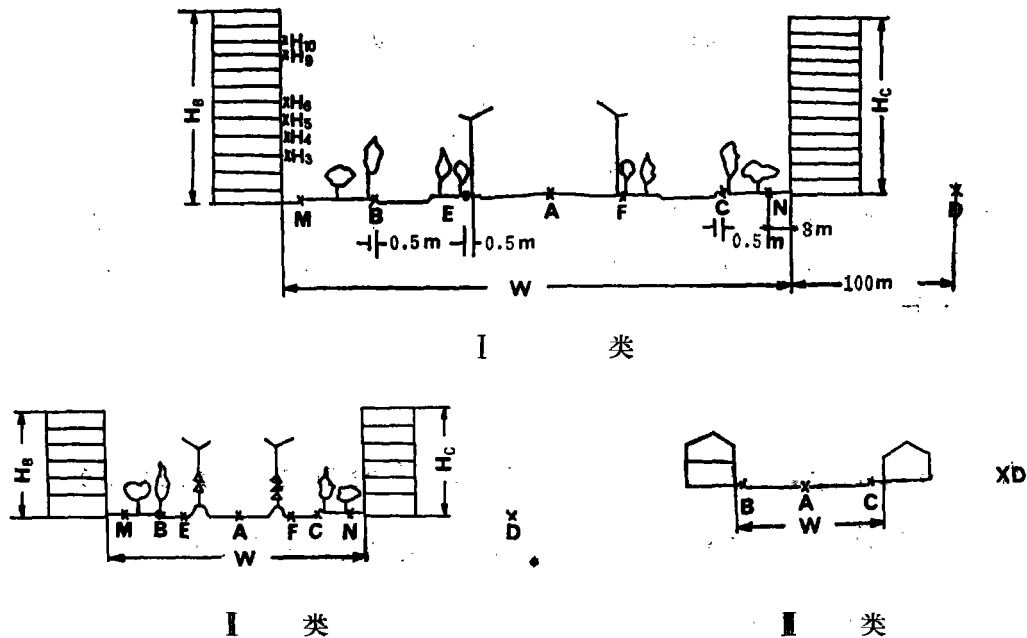


图1 各类街道的断面图

二 北京市典型街道空气的一氧化碳污染现状

自1982年5月至1983年8月, 我们在82天内对北京市19个典型街道空气进行了监测。用CO-1型(汞置换法)及CO-A型(氧化法)一氧化碳测定仪, 当天分析完毕样品, 共得4802个一氧化碳浓度数据(以下对一氧化碳都用CO表示)。

采空气样的同时, 用三杯风向风速计测定楼顶、人行道、背景点的风向和风速, 同时测定车流强度及平均行驶车速。

分析、测定结果列于表2。从表2可见: (1)路中心空气受CO污染的程度各类街道不相上下, 采暖期平均值都已超过国家规定的大气环境质量标准GB3095-82^[2]。人行道空气受CO污染的程度以III类街道最重, 采暖期平均值也已超过三级标准; I类街道上车流强度最大, 但由于街道宽广, 利于污染物扩散, 所以人行道空气受污染相对较轻。

(2)采暖季节街道空气受CO污染的程度明显高于非采暖期, 说明采暖炉排出的CO对街道空气质量影响也很大。

(3)若以采样断面上离街道100米以外开阔地作为不受汽车污染、但受固定源污染影响

表1 北京市道路分类

道路类别	I类—主干道		II类—次干线				III类—旧式主要街道和支线			
	70~100米	40~60米	40~60米	40~60米	20~30米	20~30米	20~30米	20~30米	20~30米	20~30米
道路总宽(米)	6~8条	4条	4条	4条	2条	2条	2条	2条	2条	2条
机动车道数量	10层以上	4~6层	4~6层	4~6层	1~2层,但密集	1~2层,但密集	1~2层,但密集	1~2层,但密集	1~2层,但密集	1~2层,但密集
两旁建筑	有	有	有	有	无	无	无	无	无	无
绿化带										
街道编号	I-1	I-2	I-3	I-1	I-2	I-3	I-1	I-2	I-3	I-4
道路名称	前门大街	前门东大街	复兴门外大街	和平门内大街	朝阳路	新街口外大街	新街口北大街	崇文门内大街	西直门内大街	阜成门内大街
测站所在地	18*楼前	12*楼前	24*楼前	文化部招待所附近	北京经济学院门口	小西天	北京科影院门口	花市	北京展览馆站	地质部门口
道路走向	东西	东西	东西	南北	东西	南北	南北	南北	东西	东西
采样日期	1982年5月	13日,14日		8日,10日	8日,10日	8日,10日	11日,12日	11日,12日	11日,12日	11日,12日
采样日期			2日~9日		2日~9日	2日~9日		2日~9日	2日~9日	
道路断面(米)	25.5	30.2	18.5	14.5	16.6	22.7	9.5	11.6	11.5	10.0
道路断面(米)	23.1	25.3	18.5	14.5	16.6	22.9	9.5	11.6	11.5	10.0
道路断面(米)	北侧>100	南侧>100	南侧>100	东侧>100	南侧>100	东侧>100	东侧>100	东侧>100	北侧>100	北侧>100
道路总宽环[米]	101.8	88.7	119.1	48.0	59.8	49.7	21.7	31.1	29.0	25.2
平均宽度[米]	103.2			52.5				26.8		
南(东)侧	2.9	2.5	2.4	3.4	2.9	3.6	4.3	6.2	5.3	4.1
北(西)侧	12.7	11.1	2.2	9.6	2.8	3.3	4.3	5.9	5.3	4.1
两侧建筑	南侧是12层高楼	北侧1~2层	南侧15层	一边四层	双侧五层	一边五层	一边五层	两边基本是1-2层房屋		
备注	共选8站,实测污染情况共18天		北侧16层	一边二层	共选5站,实测污染情况共34天	共选5站,实测污染情况共30天				

表2 监测结果平均值(7点—18点期间)

街道类型	I				II				西单路口	
	最高测值	7—18点平均值	最高测值	7—18点平均值	最高测值	7—18点平均值	最高测值	7—18点平均值	最高测值	7—18点平均值
车流强度(辆/小时)	(1) 2430 (2) 2088	(1) 1072 (2) 1201	(1) 1704 (2) 1938	(1) 739 (2) 808	(1) 1422 (2) 1800	(1) 616 (2) 334	(1) 3480 (2) 1756	(1) 334 (2) 1756	(1) 334 (2) 1756	(1) 334 (2) 1756
平均行驶车速[公里/小时]	38 31 49 42	— 34.0 46.7 39.3	43 37 52 47	37.6 31.2 47.1 38.4	41 29 36 34	36.1 32.7 41.9 32.7	31.8 27.2 34.7 31.2	— — — —	— — — —	— — — —
路中心 人行道 离街100米外	11.8 8.1 9.0	35.9 118.9 24.6	17.7 11.7 5.1	4.5 2.8 2.1	12.2 10.0 9.0	32.0 28.1 27.4	9.4 6.4 4.4	49.0 28.9 24.5	16.5 7.2 5.9	— — —
一氧化碳浓度	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —
平均风速	4.7 7.0	2.2 8.8	2.4 4.5 8.3	0.7 2.2 3.8	3.0 2.6 8.3	5.0 1.2 3.8	6.2** 8.3 3.8	2.8** — —	2.8** — —	3.8 — —
测试日期	(1) 1982年5月13—14日 (2) 1983年2月2—8日				(1) 1982年5月8—10日 (2) 1983年2月2—8日				(1) 1982年5月11—12日 (2) 1983年2月2—8日	

* 2月2—8日为采暖期 ** 离地10米高测的风速EL型风向风速计测,其它人行道上测的风速用DEM6型三杯风向风速计测

的背景点，则汽车造成的 CO 污染程度（以 ΔC 表示）可近似地看作街道空气中 CO 总浓度（以 C 表示）和背景点空气中 CO 浓度（以 C_0 表示）之差^[3]，即

$$C = C_0 + \Delta C \text{ (毫克/米}^3\text{)}, \text{ 或 } \Delta C = C - C_0 \text{ (毫克/米}^3\text{)} \quad (1)$$

其比值 $\frac{\Delta C}{C}$ ，根据实测结果，采用白天 12 小时的平均值，列于表 3。表 3 也说明，街道空气中的 CO 污染，主要仍来自固定污染源。这个结论和我们所测的 C_0 值及北京市环境监测中心所测的环境质量情况^[4]很附合。

表 3 汽车造成的 CO 污染(ΔC)占街道空气中 CO 总浓度(C)的百分比(估算值)

街道类别		I		II		III	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
$\frac{\Delta C}{C}$ (%)	路中心	59.2	59.2	53.6	47.4	64.5	53.6
	自行车道	34.1	—	42.2	—	—	—
	人行道	17.1*	32.4	25.7	20.1	43.6	30.0
	离路侧建筑物 3 米处	$\frac{(I-1)}{(I-2)}$	(I-3)	—	—	—	—
测定日期		(1) 1982年 5月13—14日 (2) 1983年 2月2—8日		(1) 1982年 5月8—10日 (2) 1983年 2月2—8日		(1) 1982年 5月11—12日 (2) 1983年 2月2—8日	

* 监测站点 I-1 和 I-2 只在南侧有高楼，而 I-3，双侧有高楼。

三 街道空气受 CO 污染的主要影响因素分析

街道空气受污染的程度与很多影响因素有关：有污染源因素，地理、地形条件因素和气象因素等。选主要影响因素分析于下：

1. 汽车排污强度的影响

北京市车流强度随时间的变化呈双峰形，上午 9—10 点是高峰（冬季延长到 11 点），下午高峰出现在 15—16 点（冬季从 14 点即开始），低峰出现在 12—13 点（冬季在 13 点）。这和我国的作息制度有关。监测结果表明：街道空气中的 CO 浓度、随车流强度的增大有所加重，CO 浓度随时间的变化曲线基本上也呈双峰形。各典型街道情况很相似，举例示于图 2。

对汽车排污强度的计算^[3]，根据我国国情（我国流动污染源是大小客车、大小货车和摩托车等混合行驶的复合污染源，而且我国的汽车运行工况尚未研究完毕），我们设计了下式：

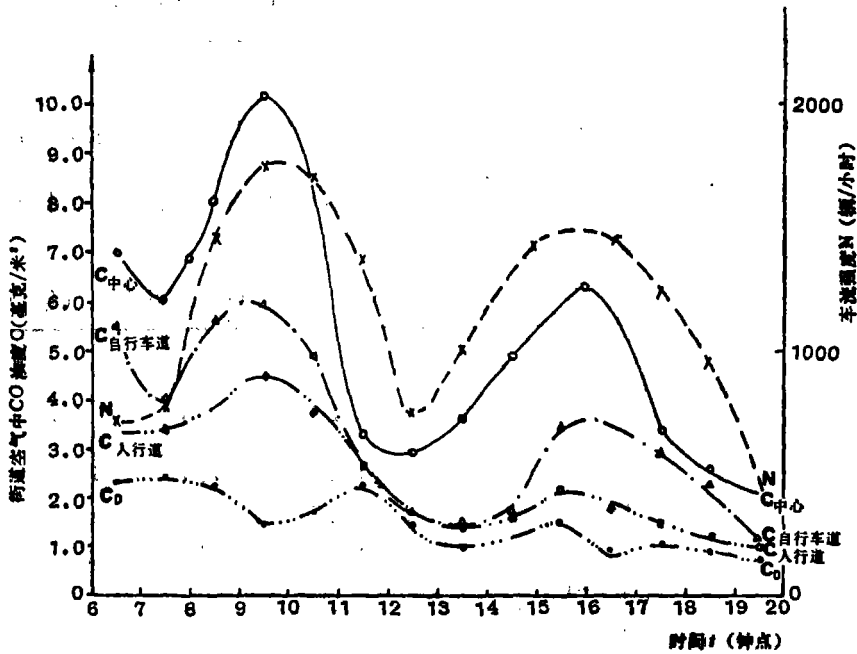


图2 前门大街

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i E_i = \sum_{i=1}^n N_i \frac{E_{s,i}}{S_i} \text{ [克/公里} \cdot \text{小时]} \quad (2)$$

式中, N_i 为某种类型(i)汽车的车流强度[辆/小时];

E_i 为某种类型(i)汽车的CO排放量[克CO/辆·公里];

S_i 为某种类型(i)汽车在所测路段上的平均车速[公里/小时];

$E_{s,i}$ 为某种类型汽车在平均行驶车速,每辆每小时的一氧化碳排放量[克/辆·小时];

n 为主要车型分类数。

我们共测得 5694 个车流强度数据, 13346 个平均车速数据, 并搜集或补做了各主要车型的台架试验数据, 然后按式 2 计算出每条街上, 每小时的汽车排污强度和白天的平均排污强度 Q 值。最后发现, 所测典型街道空气中的一氧化碳浓度与该街道上的车流排污强度成正比关系(图 3)。

2. 风速的影响

北京季风气候较明显, 冬季以偏北风或西北风为主, 夏季盛行西南风, 春秋两季则两种风交替出现。纵观 1941—1984 年风速记录^[5], 北京市月平均风速最大为 4.7 米/秒, 最小为 0.8 米/秒, 最小在八月份。

我们在采暖期(二月份)、非采暖期(五月份)和(八月份), 在街道附近开阔地、人行道、路中心及街道两侧建筑物顶部, 用 DEM 6 型风向风速计进行过 3127 组风向风速的测定。并逐时将 EL 型风向风速计在同一地点测定的数据和北京观象台测定的平均风速数据进行对照。发现不同地点、不同仪器测定的逐时平均风速之间存在着线性相关关系, 可用通式

$U_1 = A + BU_2$ 表示。为便于汽车污染模式的应用，采用北京气象台所测逐时平均风速 $U_{北京}$ 和北京街道附近开阔地所测逐时平均风速 U_D ，其关系式为

$$U_D = A + BU_{北京} \quad [\text{米/秒}] \quad (3)$$

各类街道的参数 A 和 B 见表 4。我们共监测 3127 组风向风速数据，发现北京人行道空气中 CO 的浓度随风速的增大而明显下降。其关系示于图 4。

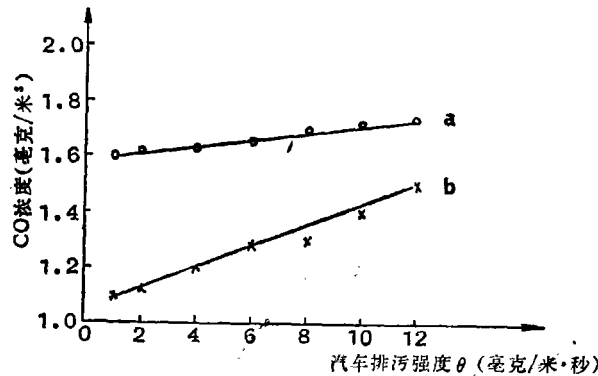


图 3 人行道空气中 CO 浓度与车流排污强度的关系

(a) 1983 年 2 月各街道平均值 (b) 1982 年 5 月各街道平均值

表 4 北京街道附近平均风速与北京气象台平均风速相关情况

测试时间	街道类型	相 关 式	相关系数 R	检验标准 ($N-2$)		测试数 N
				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	
1983年5月	I	$U_D = 0.4476 + 0.3181U_{北京}$	0.5410	0.195	0.254	109组
	II	$U_D = 0.3486 + 0.1753U_{北京}$	0.4798	0.195	0.254	126组
	III	$U_D = 0.1419 + 0.1657U_{北京}$	0.4694	0.195	0.254	105组
1983年2月	I	$U_D = 0.2945 + 0.2638U_{北京}$	0.7471	0.468	0.590	18组
	II	$U_D = 0.4369 + 0.2225U_{北京}$	0.7291	0.413	0.526	109组
	III	$U_D = 0.6160 + 0.1212U_{北京}$	0.4197	0.304	0.393	44组
	I	$U_{顶} = 0.8760 + 0.5159U_{北京}$	0.8334	0.215	0.280	84组

3. 街道宽度的影响

我们共测了 235 组街道宽度和楼房高度数据。发现由汽车造成的 CO 浓度，都随着离路中心距离的增加而迅速下降。但不同街道，由于车流强度和街旁建筑物高度不同而使 C 及 ΔC 的下降情况也不同。各街道平均值示于图 5。

4. 沿街建筑物高度及风向的影响

建筑物增加地面的粗糙度，使地面风的风速减小，不利于污染物扩散。尤其当沿街建筑物是高层楼房时，街道如同峡谷一样，风穿过街道时产生环流，使近地面风分量与顶部风向相反^[3]。由于建筑物的空气动力影响，使背风面人行道空气中 CO 浓度比迎风面的高。实测结果（举例于表 5）也证明这一点。但我们发现，如沿街建筑物之间的红线距离 (W) 相对

楼房高度(H)的比值(即 $\frac{W}{H}$ 值)超过2.5以上,建筑物的影响就减小。

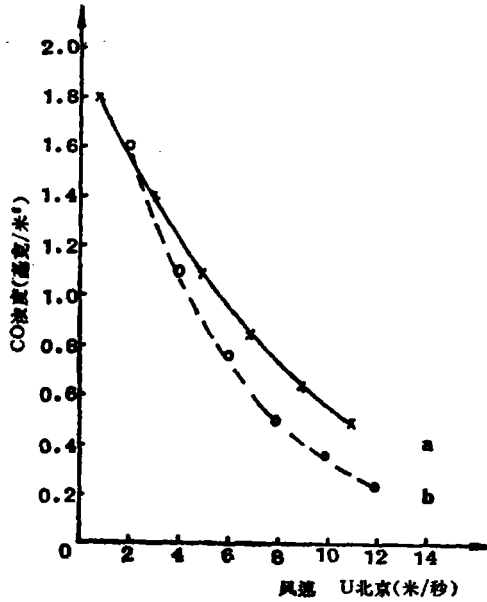


图4 人行道空气中CO浓度和风速的关系
(a) 1983年2月 (b) 1982年5月

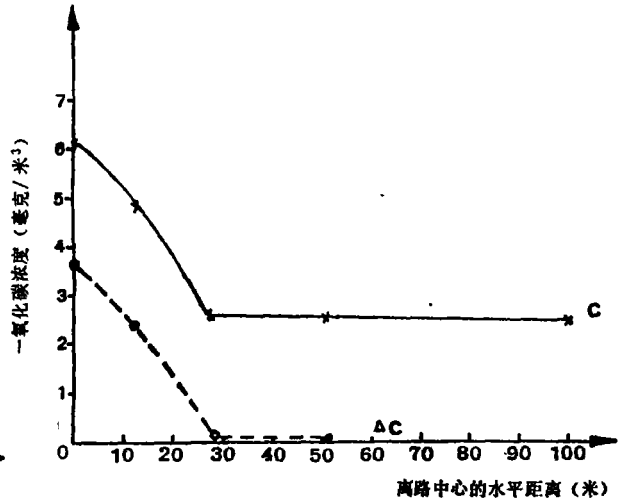


图5 街道空气中CO浓度随扩散距离的变化

表5 迎风面和背风面人行道空气中CO浓度比较

监测地点和时间	监测期 主导风向	$\frac{W}{H}$ (米)	人行道空气中CO平均浓度(毫克/米 ³)		
			背风向	迎风向	浓度差
北京西长安街(东西向) 1983年2月	北, 西北	$\frac{119.1}{52} = 2.3$	6.3	3.5	2.8
北京新街口北大街(南北向) 1982年5月	西	$\frac{22}{5} = 4.4$	4.1	3.8	0.3
北京崇文门外大街(南北向) 1982年5月	西	$\frac{28}{5} = 5.6$	4.1	4.0	0.1
北京阜成门内大街(东西向) 1983年2月	西北	$\frac{23}{5} = 4.6$	北侧2.0	南侧2.0	0

北京前三门大街南侧有高层建筑, 北侧尚未建高层建筑, 虽然街道走向(东西向)和监测期主导风向(西风)平行, 但监测结果表明, 污染物在二侧的扩散情况仍有差别(举例于图6), 说明高层建筑对污染物的扩散有影响。

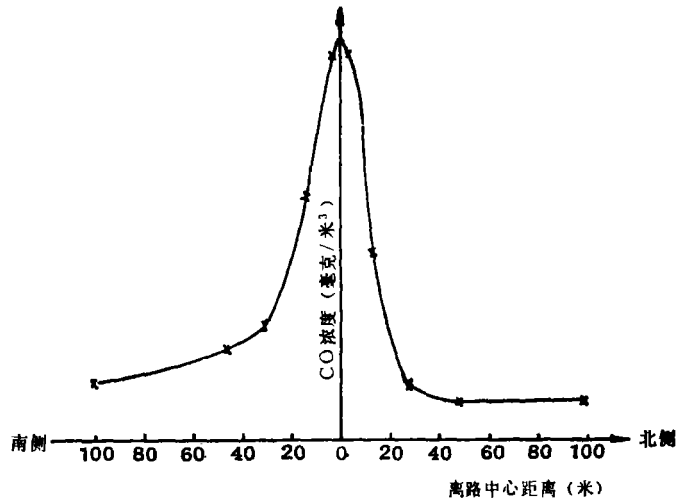


图6 前门西大街18#楼前街道断面上CO浓度分布图

四 街道空气受CO污染的多元回归分析

为进一步摸清街道空气中CO浓度的变化规律，分析各种影响因素的主次顺序，以利于找到控制CO污染的对策，作多元回归分析于下。

把北京街道空气白天（指7—18点期间）CO小时实测浓度平均值 \bar{C} 的对数作为随机变量（即假设 \bar{C} 服从对数正态分布，则 $\ln\bar{C}$ 服从正态分布），把那些实践证明能影响CO浓度的主要影响因素作为自变量，列出多元回归方程：

$$\ln\bar{C} = a_0 + a_1 Q + a_2 L + a_3 U_{\text{北京}} + a_4 \ln C_0 + a_5 H + a_6 Z_n \quad (4)$$

式中： \bar{C} 为白天街道空气中CO小时实测浓度平均值[毫克/米³]；

Q 为该街道上汽车流的排污强度[毫克/米·秒]；

L 为汽车排污的扩散距离[米]，即复合污染源中心至监测点的距离[米]；

$U_{\text{北京}}$ 为北京观象台所测的白天平均风速[米/秒]；

C_0 为离街道100米以外开阔地（背景点）空气中CO平均浓度，即代表固定污染源排放的CO浓度[毫克/米³]；

H 为街道两侧建筑物高度[米]；

Z_n 为北京观象台所测白天主导风向[度]。

根据最小二乘法，要选择这样的 $a_0, a_1 \dots a_6$ ，使 $\sum(\ln\bar{C} - \ln\hat{C})^2$ 达到极小。为此，把监测所得的 M 组数据按计算机程序框图输入电子计算机，用高斯消去法求解各回归系数，并计算出回归平方和、乘余平方和及 F 检验值、乘余标准差 S ，输出各值，计算结束。

得回归方程，分别为

对1983年2月（采暖期）：

$$C_{\text{人行道}} = \exp(1.8044 + 0.0127Q - 0.0155L - 0.0837U_{\text{北京}} + 0.7263 \ln C_0 + 0.0002H - 0.0025 Z_n) \quad (5)$$

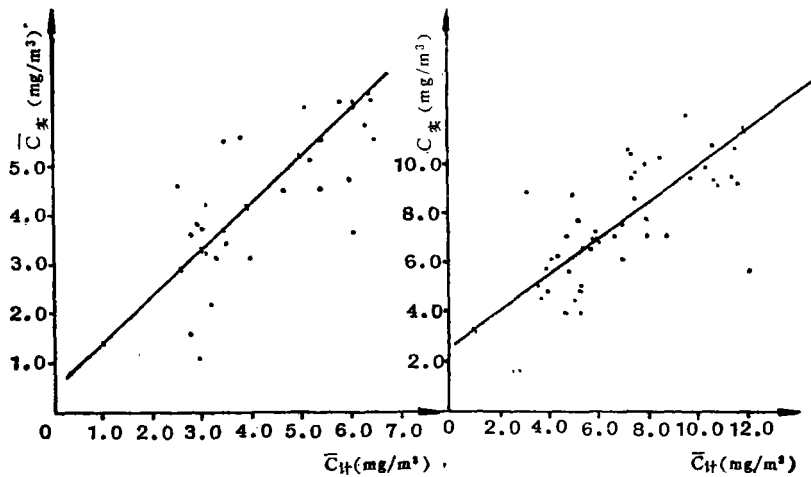


图7. 回归方程验证

$$C_{\text{路中心}} = \exp(1.9869 - 0.0073Q + 0.0650L - 0.1747U_{\text{北京}} + 0.6848 \ln C_D - 0.0077H - 0.0021Zn) \quad (6)$$

对1982年5月(非采暖期):

$$C_{\text{人行道}} = \exp(1.5656 - 0.0077Q - 0.0119L - 0.2436U_{\text{北京}} + 0.6272 \ln C_D - 0.0031H + 0.0008Zn) \quad (7)$$

多元回归的方差分析见表6。用未参加回归方程建立的独立的85组实测数据 $C_{\text{实验}}$ 验证回归方程计算数据 $C_{\text{计}}$ 其相关关系见图7。对人行道,相关系数 $r=0.7258$,共40组数据,检查表 $r_{0.05}^{40;0.1} = 0.406$ 。对路中心45组数据相关系数0.8177,查检验表[6], $r_{0.05}^{45;0.1} = 0.383$ 。相关系数都高度显著。所以,回归方程式5,6,7可以用于预测。

$$\text{为观察各影响因素对CO浓度影响的程度,按式 } a'_i = \sqrt{\frac{L_{ii}}{L_{yy}}} = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - \frac{1}{M}(\sum X_i)^2}{\sum Y^2 - \frac{1}{M}(\sum Y)^2}} \quad (8)$$

$$i=1, 2, \dots, 6$$

求出标准回归系数 a'_i ,以便看出各影响因素的权重。计算结果见表7。

表6 多元回归的方差分析

变差来源	平方和	自由度	均方	F	查表 $F^{0.01}$	备注
回归	11.7457	6				
剩余	1.9036	41	0.0464	42.16**	3.29	1983年2月人行道
总计	13.6493	47				
回归	4.6478	6				
剩余	0.5388	17	0.0317	24.40**	4.10	1983年2月路中心
总计	5.1866	23				
回归	1.3196	6				
剩余	1.2091	22	0.055	4.00**	3.76	1982年5月人行道
总计	2.5287	28				

表7 各影响因素权重

影响因素 自变量编号	汽车排污 强度 $\theta = x_1$	扩散距离 $L = x_2$	平均风速 $U_{北京} = x_3$	背景点 CO浓度 $\ln C_D = x_4$	二侧建筑 物高度 $H = x_5$	主导风向 $Z_n = x_6$	备注
回归系数 a_i	0.0127	-0.0155	-0.0837	0.7263	0.0002	0.0025	1983年 2月(采 暖期)人 行道
标准回归系数 a'_i	0.1349	-0.1229	-0.1284	0.6809	0.0060	-0.0938	
各因素权重 W	11.6%	10.5%	11.0%	58.4%	0.5%	8.0%	
回归系数 a_i	-0.0077	-0.0119	-0.2436	0.6272	-0.0031	0.0008	1982年 5月(非 采暖期) 人行道
标准回归系数 a'_i	-0.1646	-0.3916	-0.4056	0.6896	-0.1178	0.3414	
各因素权重 W	7.8%	18.5%	19.2%	32.7%	5.6%	16.2%	

从表7可见，(1)交通干线人行道空气中的一氧化碳污染主要还是固定污染源造成的，汽车污染所占的比例不大；(2)污染物扩散的条件，如风速扩散距离等，对污染物浓度影响较大，但目前北京市街道二侧建筑物的高度尚无明显影响。

五 小 结

综上所述，汽车污染的形成和有关影响因素不是孤立的，它们之间相互联系，相互作用，互有因果关系。所以，汽车污染控制问题也决不应该避开相互关联因素组成的环境问题的整体。应把它看作一个系统，各影响因素都是这个系统的子系统，而它本身又属于更大一些的系统——城市污染控制系统。污染控制要统筹考虑，把城市规划、交通管理和提高汽车质量等几方面有机地结合起来，采取综合措施，着眼于总体最优来选择方案。对目前来说，比较现实可行的，有如下几点建议：

1. 切实执行汽车排污标准，继续限止排污量高的车种进入市区。
2. 想各种办法（如建立立交桥、改进红绿灯信号控制系统，建中心广场等等）使交通干线交叉口车辆畅通行驶，尽量减少汽车的怠速状态。
3. 合理控制汽车行驶车速，使同时能照顾到安全、省油和减少污染。目前情况下，载重车40公里/小时，轻型车40—60公里/小时较合适。
4. 合理布置交通干线的数量和间距，以便每条交通干线的汽车流量控制在最高允许量以下。根据北京目前的情况，如汽车排污量还保持现有水平的的话，北京的旧街道（Ⅲ类街道）已不宜再增加行驶车辆，也只能保持在600—800辆/时为宜；北京的Ⅰ类，Ⅱ类街道尚有潜力，但Ⅱ类不宜超过1000辆/小时，Ⅰ类两侧都建高楼后也以不超过2000辆/小时为好。
5. 沿街道建筑物高度(H)与街道两侧建筑物之间的距离(W)要保持一定的比例。根据北京目前的情况， $\frac{W}{H} \geq 2.5$ (或3.0)为宜，人行道离路中心50米以上为好。
6. 为大幅度降低交通干线人行道空气中一氧化碳的污染，也急需解决煤气化和集中供

热, 取消民用小煤炉是上策。

参 考 文 献

- [1] 郑祖武: 〈建筑学报〉, No.2, 1982, p37—41.
- [2] 中华人民共和国国家标准 GB3095—82
- [3] W.B.Johnson 等: *Journal of the Air Pollution Control Association* Vol. 23, No. 6, 1973, 490—498.
- [4] 北京市环境质量报告书编写组: 〈北京市环境质量报告书〉, 1970—1980, 1981, 1982, 1983.
- [5] 北京气象局资料室: 〈北京气候资料(一)〉, 1981.
- [6] 中国科学院数学研究所, 〈回归分析方法〉, 科学出版社。1973.