

街谷大气扩散试验研究*

组铁林 王木林 郭相臣 房秀梅**

(气象科学研究院大气化学研究室)

提 要

为研究机动车辆排出的污染物在大气中的扩散规律,在北京做了小风条件下的街谷示踪试验。当楼顶风速 u 接近或大于1米/秒时,街谷内可形成一稳定的原生涡; $u < 0.6$ 米/秒时原生涡将消失。对于楼之间空间较小的街谷,背风面和迎风面的示踪剂浓度平均比值可达8。浓度值沿楼层高度无明显变化;由于快车路旁松墙的阻挡和抬升作用,可能造成沿高度方向楼层中段的浓度偏高。在街谷外,除下风方路面上有一按下方距离的负幂指数衰减的浓度分布外,上风方路面上也有一按较大负幂指数衰减的分布。根据上述试验,给出了用以预测街谷中机动车辆排出的惰性气体污染物的扩散模式;模式中,对原生涡和小尺度湍流,做了分别处理。

一、引 言

研究流动源排放的气体污染物在城市中的时空分布是近十几年来人们关注的主要课题之一。其中,首要的是了解建筑物周围和“街谷”中的流场及其扩散规律。对于CO一类近似惰性的气体可直接确定其浓度值。

当气流流过一个孤立建筑物时,由于建筑物的三维外形及气流的分离现象,在屋顶和背风面形成负压空腔区(同时在迎风面形成正压区)。在背风面的空腔区内常出现一个原生涡和波及到屋顶的若干二次涡;与此同时,在建筑物下风方,出现气流下洗的尾迹区。Robins等^[1]及Yasushi等^[2]利用风洞和现场模拟试验,较系统地研究了空腔区和尾迹区的尺度随风向和建筑物前沿的夹角 θ ,以及建筑物的长高比和宽高比等因素的变化关系。

Yasushi等还利用超声风速仪测量了空腔区的湍流强度 i_c 和谱密度。结果表明: i_c 比自由流的湍流强度大2—3倍,谱密度峰值频率也相应增大。对这一增大的峰值频率进一步计算后,可发现其对应的积分尺度 $L_c \approx 1.5H \sim 2H$ (H 为建筑物高度),恰好相当于空腔的长度尺度。这说明空腔内湍流的增大主要来自原生涡。这一点应该是模式

* 本文于1986年4月30日收到,1986年8月22日收到修改稿。

** 参加本试验者还有北京市环保所张绍英、邢玉兰、权宝玲等。

[1] Robins A. G., Atmos. Envir., 11, 291—297, 1977. [2] Yasushi Ogawa, Atmos. Envir., 16, 207—222, 1982.

化的一个主要依据。其次,他们的研究还表明:孤立建筑物背风面的原生涡并不总是稳定的,其出现频率约为20—50%。原生涡内的污染物主要靠其边沿附近较强的卷夹作用和失稳后的破裂传输到尾迹区再扩散到自由流。

气流绕过建筑物的流动规律是研究街谷流场的基础。类似地,街谷内的流场主要受其两侧建筑物、树木、车辆、行人等状况以及风向、风速、稳定度等气象因子的影响。和风相比,太阳辐射、稳定度等热力参数对街谷流场的影响是第二位的。林复基等^[3]的研究结果表明:考虑太阳辐射等热力因素后的预测结果,尚不如不考虑这些因素的预测结果更符合实际。

当风向和街谷的夹角 $\theta = 90^\circ$ 时,由于沿风向街谷内的空间是有限的,在街谷内可形成一稳定的环形涡; $0 < \theta < 90^\circ$ 时,常形成一螺旋形涡;当 $\theta = 0$ 时,通常这两种涡都将消失。原生涡或螺旋涡所带来的主要后果,是使背风面的污染物浓度显著地大于迎风面的浓度,美国St Louis市Locust街的实验^[4]以及Wedding等^[5]的风洞试验都给出了背风面浓度值增大的定量结果。了解背风面的这一特征,对于城市规划、控制机动车辆排放以及设置监测点等都将有重要意义。如果街谷背风面建筑物相对高度较高,虽然 $\theta = 0$,也常出现背风面的浓度值偏高现象。另外,当 $\theta = 0$ 时,容易造成街谷下风方的污染物堆积。Wedding等的风洞示踪试验表明: $\theta = 45^\circ$ 时的稀释效果最佳。一个布局对称,高度相当,留有一定空间间隔的建筑群,由于增加了通风效果,背风面的污染物浓度可显著降低。

此外,Dabberdt等^[4]和Wedding等^[5]还研究了污染物浓度值在街谷内、外随排放源至接收点的距离的衰减规律。

迄今为止,所有的研究多半都局限于风速大于2米/秒的条件,而易于造成污染的小风和静风条件下的实验结果,尚属少见。本文根据在北京市内两条不同类型街谷所做的示踪试验,讨论小风和静风条件下的污染物扩散规律,所选择的两侧有较高建筑物的街谷,可反映布局不合理、易形成原生涡的类型。

二、试验概况

本试验是1985年7月24日—8月18日在北京西四东大街和崇文门外前三门大街(以下分别简称“西四”和“前三门”,两地皆为东西向街)进行的。两处的街长分别为200米和500米,街宽为10米和90米,西四两侧建筑物平均高度为5米,前三门南侧高为36米左右,楼宽85米,楼间间隔(通道)为14米,北侧高度参差不齐(18—36米)且间隔较宽。全部试验都是在8时30分—11时30分进行的。关于流动源(线源)的模拟,在西四沿街中心均匀排列40人,利用(间隔为5米)手控制针筒释放 SF_6 ;在前三门则利用流量计控制气瓶释放 SF_6 ,并载于三辆三轮摩托车分段高速行驶以模拟流动源。两处的释放量按试验前设计都确定为1克/米·小时,每次释放持续1小时。在街谷内路面、快车道边铅直方向和两侧建筑物的各楼层以及南、北方位约250米范围内共设60个取样点,采用针筒手工取样,每次取样时间为10分钟,间隔也为10分,共采集约1600个样品。样品

[3] 林复基等,大气污染研究(日),15,433—439,1980.[4] Dabberdt W. F. et al, Atmos. Environ., 7,603—618,1973.

采集后, 用气相色谱仪进行分析。试验期间, 在街谷内和街旁楼顶(南侧)设 4 个同步气象观测点, 记录了风向、风速、温度、湿度和气压等要素。此外, 还统计了往返各种类型的车流量。

三、试验结果及讨论

1. 街谷流场

附表给出 1985 年 8 月 17 日和 18 日 9 时 40 分—10 时 30 分共 6 次取样的平均风速和风向, 平均时间为 10 分钟。表中所列 6 号楼在街的南侧, 除楼顶为 38 米高外, 其余皆是在离地面 2 米处测量的。从表中的风向数据可见: 如果楼顶风向为东偏南, 则街谷背风侧路面的风向为东偏北, 在街谷内有形成一稳定的螺旋涡的倾向。当楼顶风速 u 大于 0.93 米/秒时, 这一倾向十分明显, 此时的街中心附近的风速约为楼顶风速的 50%, 背风面人行道处的水平风速基本上趋近于零; 而当 $u \leq 0.52$ 米/秒时, 路面基本上处于静风状态(风速小于 0.1 米/秒)。楼的侧面, 由于通道效应, 风向皆为 180° (南), 平均风速约为楼顶风速的 89%; 这一比值较分散, 有依赖于风向和街谷中心线夹角 θ 的趋势。当 $\theta > 40^\circ$ 时, 通道风速大于楼顶风速; $\theta < 35^\circ$ 时, 通道风速小于楼顶风速。

附表 各测点的平均风速(米/秒)和风向(度)

取样序号		14	15*	16*	20	21	22
取样时间		1985年8月17日	1985年8月17日	1985年8月17日	1985年8月18日	1985年8月18日	1985年8月18日
平均风速和风向		10:20—10:30	10:40—10:50	11:00—11:10	9:40—9:50	10:00—10:10	10:20—10:30
测量地点							
6 号楼中部	风速	1.20	0.52	0.23	0.93	1.18	1.14
	风向	120	130	—	97	125	118
楼顶(高38米)	风向	120	130	—	97	125	118
6 号楼中部 楼前人行道 (距地面 2 米)	风速	0.04	0.03	0.01	0.06	0.06	0.04
	风向	50	—	—	75	75	75
6 号楼中部 快车道南侧 (距地面 2 米)	风速	0.33	0.08	0.07	0.80	0.63	0.47
	风向	50	—	—	80	80	80
6 号楼东侧 通道 (距地面 2 米)	风速	1.10	1.00	0.40	0.80	0.60	0.40
	风向	180	180	180	180	180	180

* 风向未注明者, 摆动皆大于 180° 。

2. 街谷横截面浓度分布

图 1 和图 2 是附表中所列各次取样的街谷楼中部横截面上示踪剂浓度分布。图 1 为第 20—22 次(1985 年 8 月 18 日 9 时 40 分—9 时 50 分、10 时—10 时 10 分、10 时 20 分—10 时 30 分)三次取样的结果, 楼顶平均风速 $u = 1.08$ 米/秒, 平均风向为 110° , 风向和街谷中心线的平均夹角 $\theta = 30^\circ$, 稳定度为中性。从图中可见, 至少在 1 小时左右的取样期间, 街谷背风面出现了持续的示踪剂堆积现象, 显然这是由于街谷内的原生涡所造成的。图 2 为

第14—16次(1985年8月17日10时20分—10时30分、10时40分—10时50分、11时—11时10分)三次取样结果,为弱不稳定,所对应的风速、风向及夹角 θ 见附表。从图2a可见,第14次取样的浓度分布和图1相似,而图2b及2c(第15和16次)的浓度分布在街两侧近似呈对称分布型。从图1及图2可见:只要楼顶风速接近或大于1米/秒,即使 $\theta = 7^\circ$,街谷内仍可出现原生涡;而一旦楼顶风速减小到一定值(如0.6米/秒)时,街谷内的原生涡将消失,浓度将近似地呈对称分布。这和关于小风扩散问题^[6]的结论是一致的。因为 u 在2—0.6米/秒之间时,虽然风向脉动角较大,仍可确定一平均风向;而当 $u < 0.6$ 米/秒时,风向脉动可遍及 360° ;这时,对于几分钟以上的取样时间,已无迎风和背风的区别。出现原生涡时,背风面的平均浓度约为迎风面的8倍左右,两侧部分对称点的比例可高达一个量级以上。美国St·Louis市Locust街^[4]的实验结果表明,背风面和迎风面的CO平均浓度比值在 $\theta = 30^\circ$ 时约为2;Wedding等人的风洞试验(用 ^{85}Kr 示踪剂)^[5]得出的比值约为3。前三门大街背风面出现的这一高比值,可能主要因楼间通道窄小,建筑布局不合理所致。而 θ 很小仍出现原生涡,主要是由于背风面的建筑物较高所引起。图1和图2a还表明:在背风面,浓度随源到接收点距离衰减的幂指数为 -2.7 (Dabberdt等人^[6]认为这一指数为 -1),迎风面为 -0.68 ;在铅直方向,沿楼层高度的浓度变化虽不甚明显,但在 $H/2$ 处常出现一略偏高的极大值,且楼顶浓度大于面向街谷一侧高层的浓度。前三门大街的这一特征,可能是由于快车道旁的松墙(平均高度约2.5米)对烟羽扩散起了一定阻挡和抬升的作用。

图1(稳定度为中性)和图2a(为弱不稳定)还表明,稳定度等热力因素对形成原生涡的作用是次要的。

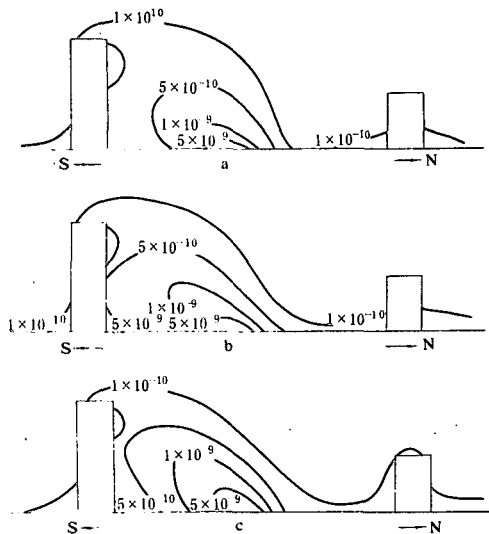


图1 街谷横截面 SF_6 浓度分布

(a, b, c, 分别对应第20、21、22次取样, 单位为 v/v)

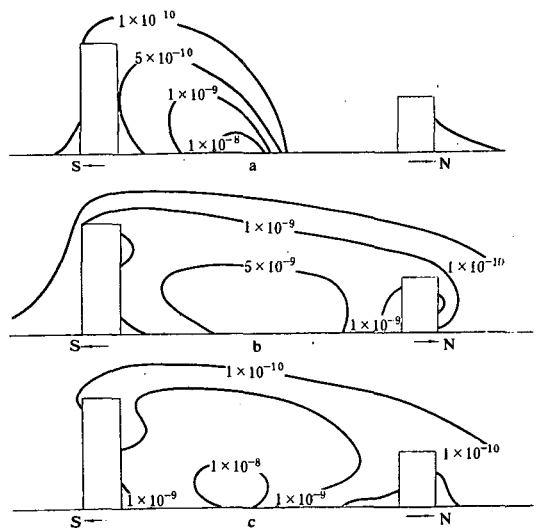


图2 街谷横截面 SF_6 浓度分布

(a, b, c 分别对应第14、15、16次取样, 单位为 v/v)

3. 街谷路面上的浓度分布

图3a是通道风速较小时(0.4米/秒)在街谷内基本上保持原生涡的地面浓度分布。从

[6] 祖铁林, Proceedings of the 2nd Asian Congress of Fluid Mechanics, 918—923, 1983.

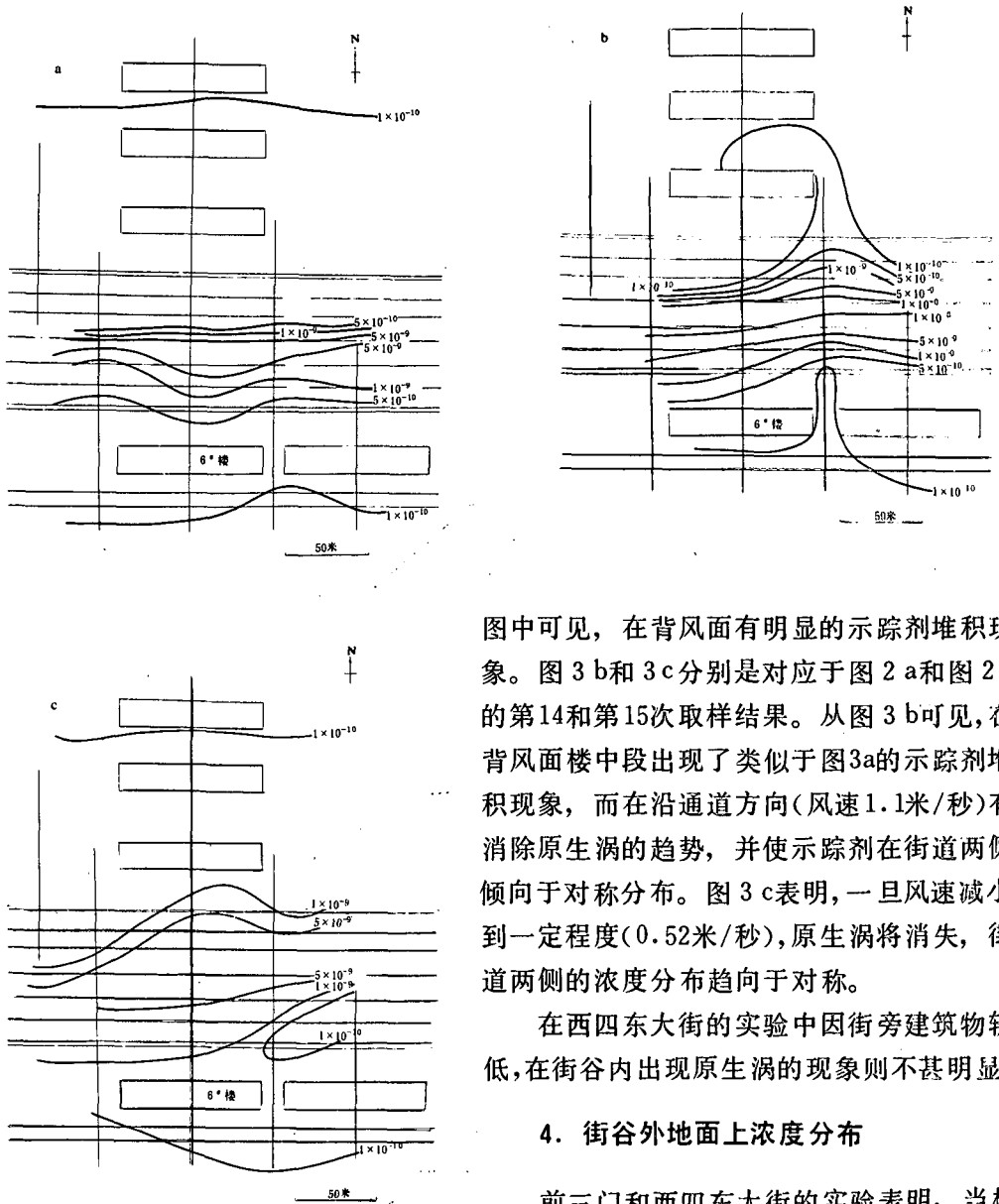


图 3 街谷路面 SF_6 浓度分布
(a, b, c 分别对应第 22、14、15 取样, 单位为 v/v)

图中可见, 在背风面有明显的示踪剂堆积现象。图 3 b 和 3 c 分别是对应于图 2 a 和图 2 b 的第 14 和第 15 次取样结果。从图 3 b 可见, 在背风面楼中段出现了类似于图 3 a 的示踪剂堆积现象, 而在沿通道方向(风速 1.1 米/秒)有消除原生涡的趋势, 并使示踪剂在街道两侧倾向于对称分布。图 3 c 表明, 一旦风速减小到一定程度(0.52 米/秒), 原生涡将消失, 街道两侧浓度分布趋向于对称。

在西四东大街的实验中因街旁建筑物较低, 在街谷内出现原生涡的现象则不甚明显。

4. 街谷外地面上浓度分布

前三门和西四东大街的实验表明: 当楼顶风速为 0.5 米/秒左右, θ 的平均值为 45° 时, 街谷外两侧约 250 米范围内, 都可检出示踪剂。其浓度分布相对于街谷近似地呈对称型, 浓度值随自街中心向两侧的横向距离 x 衰减的幂指数为 -1.34 (上风方) 和 -1.21 (下风方)。如果楼顶风速 $u = 1$ 米/秒, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 上述幂指数为 -1.54 (上风方) 和 -0.74 (下风方), $\theta = 30^\circ$ 时为 -1.17 (上风方) 和 -0.73 (下风方), $\theta = 10^\circ$ 时为 -1.08 (上风方) 和 -0.71 (下风方)。Wedding 等根据风洞试验 ($u = 2$ 米/秒) 得出: $\theta = 45^\circ$ 时, 这一指数为 -1.25 (垂直于该街谷的街道) 和 -1.50 (平行于该街谷的街道); $\theta = 90^\circ$ 时为 -0.65 ; $\theta = 25^\circ$ 时为 -0.98 。

上述结果表明：前三门和西四东大街实验的下风方浓度衰减指数和Wedding等的风洞实验值相比，随 θ 角的变化总趋势是一致的。其差别主要在于风洞中不可能完全模拟出实际风场的真实情况，特别是小风条件下，风向摆动较大，实际 θ 值常常是一较宽的变化范围，不可能像风洞实验那样，稳定为一个常值。实验还表明，街谷外距街谷中心线垂直距离约200米的路面浓度也比街谷中心路面浓度大约低2个量级，这说明严重污染主要局限于街谷附近。

四、街谷模式

由扩散方程出发，对涡扩散系数 K 和风速 u 做沿离地面距离 Z 成幂指数变化的假设后，可以得到线源浓度场的解析解。这一结果，以及类似地在正态分布假设下给出的结果，由于是在平坦下垫面条件下得到的，只能用于路边建筑物低于5米的浅街谷（如西四东大街）。对于风速小于0.6米/秒的静风条件，可以将这一类模式推广应用于较深的街谷（如前三门），但扩散参数需采用小风扩散参数（如Turner扩散参数），这一结论和东京公害局的建议是一致的。采用梯度理论，在二维条件下，用基本方程进行数值解，可在街谷内解出与实测结果类似的原生涡，在考虑有化学反应（例如光化学烟雾的形成）的条件下，这种方法是可取的。对于惰性气体（如CO）通常不采用这种数值模拟方法，因为其结果还不如采用简单模式得到的更符合实际。

基于前三门实验结果，把原生涡从湍流中分离出来， σ_z 只反映小尺度湍流扩散，可直接应用 $P-G$ 或Turner扩散参数。这种把相对于高频湍流较大的尺度分离出来的办法，对于处理湍流问题具有一定的普遍意义。假定原生涡的流线是由楼高 H 和街宽 W 决定的椭圆线 S ，其法线为 ρ ，再进一步假定烟羽沿 S 呈正态分布，则在 S 、 ρ 坐标系中，背风侧路面和楼面的 ΔC 可由下式表示：

$$\Delta C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q_L}{\sigma_z (u \sin \theta + 0.5)} \exp \left\{ -\frac{\rho^2}{2\sigma_z^2} \right\} \quad (1)$$

式中 Q_L 是线源源强， σ_z 是 S 的函数， ρ 是接受点距烟羽中心线的法距， S 、 ρ 可利用椭圆积分（级数展开式取前两项已足够）和法距方程转换为 X 、 Z 。式中采用了文献[6]的经验做法，在包含楼顶风速 u 的一项中加了常数0.5。从(1)式可见，上述思路实质上是认为烟羽逐渐自源向背风面抬升，直至 $H/2$ 附近再向迎风面回旋。实际应用时，可用经验方法确定 S 和 ρ 。根据上述 S 、 ρ 和 X 、 Z 的理论关系，取参数 x 和 z 为自变量，

$$x = 2X/W, \quad z = 2Z/H, \quad r^2 = x^2 + z^2, \quad (2)$$

$$S = 0.46Wr^{0.94} \quad (3)$$

$$\rho^2 = 37.15 \left[\sin^2 \left(\frac{\pi}{2}(x+z) \right) \right]^{1.4} + 62.8z^{0.975} \quad (4)$$

迎风面

$$\Delta C = 0.235Q_L / [W(u \sin \theta + 0.5)r^{0.68}] \quad (5)$$

五、结 论

本文主要侧重于利用 SF_6 示踪剂研究街谷线源的扩散规律和浓度分布。试验结果表明: 当楼顶风速 u 接近1米/秒或大于1米/秒时, 可在街谷中形成一稳定的原生涡, u 小于0.6米/秒, 原生涡将消失; 当背风面楼层较高, 楼间通道较窄时, 即使 θ 很小, 也可在街谷中出现原生涡, 背风面与迎风面的污染物浓度比可高达8。浓度值沿楼层的变化不甚显著, 由于原生涡和路边松墙的阻挡和抬升作用, 可使楼层中段的浓度值偏高。楼间通道可起削弱原生涡的作用, 当通道风速较大时, 这一作用尤为明显。在街谷外的下风方, 不同 θ 值条件下的浓度值随下风距离衰减的负幂指数和已有的风洞实验结果的趋势比较一致。但在小风条件下, 上风方有按较大的负幂指数衰减的浓度分布。距街谷中心线垂直距离约 200 米的路面浓度比街谷中心路面浓度大约低 2 个量级, 这说明严重污染主要局限于街谷附近。采用从湍流中把原生涡和小尺度湍流分离开的做法, 可给出一个符合实测结果的街谷模式。

A STUDY OF ATMOSPHERIC DIFFUSION EXPERIMENT IN CITY STREET CANYONS

Zu Tielin Wang Mulin Guo Xiangchen Fang Xiumei

(*Atmospheric Chemistry Laboratory, AMS*)

Abstract

A series of tracer experiments in city street canyons under light wind was conducted to investigate the atmospheric diffusion of vehicle-generated pollutants. When the roof-level wind speed u was near or larger than 1 m/s, a standing primary vortex formed in the street canyon, and as u was less than 0.6 m/s, the primary vortex vanished. The ratio of mean tracer concentrations on leeward side to that on windward side was about 8 for street canyons where the space between buildings was small. The tracer concentrations were near constant along vertical direction of buildings faced to the canyon, but it seems higher in the middle of the building heights than otherwheres, because the tracer plume may be resisted and raised by pine trees beside the lane. It was also found that the tracer concentration decayed with distance in a larger negative exponential order for the upwind direction than that for the downwind direction. According to the experiments mentioned above a practical diffusion model was developed for predicting concentration of inert and vehicle-generated pollutants in the city street canyon. In the model the turbulent diffusion was divided into two kinds of motion: the primary vortex and the microscale turbulence.