

· 研究报告 ·

公路隧道可吸入颗粒物扩散模型研究

陈敏竹¹, 马卫华¹, 钟秦¹, 常为民², 柏仇勇²

(1 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 运用大气扩散理论, 得到了隧道内自然通风和纵向通风状态下的可吸入颗粒物 (PM_{10}) 扩散模型, 并由隧道口 PM_{10} 浓度、隧道截面积、隧道内风速, 以及车流量和类型等参数, 获得了整条隧道内的不同 PM_{10} 浓度分布。模型表明, 随着隧道深度的增加, PM_{10} 浓度逐渐增大。通过采用纵向通风的玄武湖隧道各参数, 得到了 3 组不同条件下的 PM_{10} 扩散模型, 并用所得模型计算了隧道内不同深度处 PM_{10} 的浓度。沿隧道不同深度测得的 PM_{10} 浓度值的比较结果表明, 实际测定值围绕计算值上下波动, 两者之间具有良好的 consistency。

关键词: 可吸入颗粒物; 隧道; 大气扩散模型; 机动车

中图分类号: X831 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2007)05-0012-03

Research on Diffusion Model of PM_{10} Concentration for Highway Tunnel

CHEN Min-zhu¹, MA Weihua¹, ZHONG Qin¹, CHANG Weimin², BAI Qiuyong²

(1 Chemical Engineering School of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094 China; 2 Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210036 China)

Abstract The PM_{10} diffusion model was obtained under the condition of nature and longitudinal ventilation according to atmospheric diffusion theory. The distribution of PM_{10} concentration was described in virtue of the parameters such as PM_{10} concentration of entrance, the section of tunnel, wind speed in tunnel, traffic flow and types of vehicle etc. The result showed the longer of the tunnel, the higher of PM_{10} concentration. The three groups of PM_{10} diffusion models under different conditions were established with Lengthwise parameters of Nanjing Xuanwu lake tunnel for calculating PM_{10} concentration in each length of the tunnel. It was found that calculating data were moving around actually detective data closely.

Key words PM_{10} ; Tunnel; Atmospheric Diffusion Model; Vehicle

随着公路建设的快速发展, 隧道建造已成为缓解交通压力的有效手段。隧道内行驶的各类机动车是流动污染源, 其排放污染物中的颗粒物所占比例较大, 主要由燃料不完全燃烧和非燃料燃烧产生。其中, 燃料燃烧产生的可吸入颗粒物 (PM_{10}), 容易经呼吸道进入人体肺部并沉淀下来, 导致癌症、慢性病、肺气肿、皮肤病等疾病。因此, 建造的隧道不仅要求解决交通问题, 隧道内的空气质量也是需要考虑的重要方面。可以通过加通风竖井 (或称风塔)、安装集尘器、安装纵向通风风扇等方法^[1]改善隧道内空气质量。

但是风塔的建造不仅增加建设、运行和维护费用, 而且影响城市的美观, 当风塔设在市中心, 尤其

是风塔周围高楼较多时, 风塔内的多台排气风机噪声很大, 对附近区域环境的可持续发展带来负面影响^[2]。国外已开始在一些隧道设计中, 摒弃了风塔的建设, 提出了无风塔的纵向通风 (机械风向与机动车运行方向相同) 方案。

现运用大气扩散理论, 在自然通风 (无机械通风系统运行) 和较受欢迎的纵向通风状态下, 建立公路隧道内 PM_{10} 的扩散方程, 利用该模式可简便

收稿日期: 2007-03-14 修订日期: 2007-05-30

基金项目: 江苏省自然科学基金重点资助项目 (BK 2004216); 江苏省环境监测科研基金资助项目 (0616)

作者简介: 陈敏竹 (1981-), 女, 江苏昆山人, 硕士研究生, 从事自来水公司管理工作。

计算隧道内 PM_{10} 的浓度分布, 为评价营运隧道的空气质量、改善运行环境提供依据。

1 模型建立

机动车排出的空气污染物的扩散, 主要受风的平流和大气湍流扩散影响^[3], 污染物的湍流扩散可以降低其局部的高浓度。取隧道内的平均气流方向为 x 轴方向, 以隧道入口处作为 x 轴的起点, 建立直角坐标系。由于隧道内湍流扩散的影响很小, 所以 x 方向的湍流扩散与风速平流项相比可以忽略^[1]。假设风速和隧道内大量机动车组成车流的污染物排放强度和某一位置污染物的浓度在短时间内不随时间变化, 污染物在某一位置的浓度不随时间变化, 则隧道内机动车排入大气的污染物浓度分布遵从大气平流扩散方程^[4-5]:

$$u \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + Q_i \quad (1)$$

式中: $C_i(x, y, z)$ —— i 污染物的质量浓度, mg/m^3 ;

u —— 风速, m/s ;

K_y, K_z —— 污染物在 y 和 z 方向的扩散系数, m^2/s ;

Q_i —— i 污染物的源、汇项, $mg/(m^3 \cdot s)$ 。

由于隧道的 y 和 z 方向的尺度远小于 x 轴方向的尺度, 所以污染物在隧道横截面上快速扩散均匀, 方程 (1) 中沿 y 和 z 方向的浓度视为恒定。

隧道内的污染源主要为机动车排放的污染物, 源项主要为机动车的排放和由隧道通风道引入的污染物; 汇项为从通风道排出的污染物和污染物在隧道内的沉降及衰减转化。衰减过程符合 1 级反应动力学规律, 则:

$$Q_i = q_i + \alpha_1 C_{mi} - \alpha_0 C_i - d_i C_i - k_i C_i \quad (2)$$

式中: q_i —— 隧道内机动车排放源强, $mg/(m^3 \cdot s)$;

α_1, α_0 —— 通风系统进入和排出隧道的通风系数, s ;

C_{mi} —— 通风系统引入空气中污染物 i 的质量浓度, mg/m^3 ;

d_i —— 污染物 i 在隧道内的沉降系数, s ;

k_i —— 污染物 i 在隧道内的衰减系数, s ;

因此:

$$u(x) \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} = q_i + \alpha_1 C_{mi} - \alpha_0 C_i(x) - d_i C_i(x) - k_i C_i(x) \quad (3)$$

隧道内的风速满足方程:

$$\frac{du}{dx} = \alpha_1 - \alpha_0 \quad (4)$$

积分得:

$$u(x) = u_0 + (\alpha_1 - \alpha_0)x \quad (5)$$

式中: u_0 —— $x = 0$ 处的风速, 即隧道入口处的风速, m/s ;

当隧道通风系统为自然通风或纵向通风时, 进入和排出隧道的通风系数均为 $\alpha_1 = \alpha_0 = Q$ 由于 PM_{10} 在大气中的寿命较长, 不易沉降, 可认为隧道内沉降系数 $d_i = Q$ 衰减系数 $k_i = Q$ 由此, 将方程 (5) 代入方程 (3) 积分得隧道内 PM_{10} 的浓度方程:

$$C(x) = C_0 + \frac{qx}{u_0} \quad (6)$$

式中: C_0 —— 隧道入口处的 PM_{10} 质量浓度, mg/m^3 。

假设隧道截面积不变, 忽略隧道的坡度, 机动车排放源强 q 为:

$$q = \frac{1}{60S} \sum_{j=1}^n \lambda_j A_j \quad (7)$$

式中: S —— 隧道横截面积, m^2 ;

λ_j —— j 类机动车排放 PM_{10} 的单车排放因子, $mg/(m \cdot \text{辆})$;

A_j —— j 类机动车的车流量, $\text{辆}/m \cdot \text{h}$ 。

通过测定隧道入口处的 PM_{10} 浓度 C_0 和风速 u_0 大小, 由隧道内各类型机动车的排放因子和相应的车流量, 便可快速推算隧道内不同深度的 PM_{10} 浓度。由式 (6) 可看出, 随深度的增加, PM_{10} 浓度将逐渐增大, 隧道有积聚污染物的效应。

2 模型验证

2.1 实验

2.1.1 仪器及原理

PM_{10} 浓度由美国 TSI 公司生产的便携式气溶胶监测器 (Dusttrak Aerosol Monitor-8520) 测定, 风速由意大利哈纳公司生产的携带式微电脑多用途风速仪 H99518 (Kestrel 3000) 测定。

气溶胶监测器采用电池或交流供电的激光系统, 基于 90° 直角光散射原理, 利用内置气泵将气体微粒吸入光学室中, 再由光的散射测量微粒浓度。该仪器可直接显示并记录 PM_{10} 的浓度, 使用时, 可根据需要设定仪器记录时间间隔和取平均值的时间段长度。

2.1.2 实验安排

以玄武湖隧道为例, 验证自然通风和纵向通风隧道内 PM_{10} 扩散模型。

2006 年 1 月和 3 月进入玄武湖隧道, 沿隧道内道路测定 PM_{10} 浓度, 同时记录风速、机动车流量及类型等相关因素。采样时, 设置仪器记录时间间隔为 5 s, 取平均数值的时间段长度为 1 s。

2.1.3 隧道特征

玄武湖隧道位于南京市玄武湖底下, 结构特征为: 总长 2.66 km, 暗埋段 2.23 km, 宽 23 m, 双向 6 车道, 单洞净宽 13.26 m, 通行净高 4.5 m。隧道内为单向行驶, 因为单向行驶时, 隧道内的车辆在行驶过程中能形成“相对稳定”的气流场, 形成狭管效应, 即车辆在隧道运行时, 推动了隧道内的空气运动, 使洞内风速大大高于洞外风速, 加快气流将污染物带出隧道的速率^[6]。而双向行驶, 易造成隧道内气流紊乱, 不利于污染物排出, 并加重污染物在隧道内堆积。为改善隧道内的空气质量, 玄武湖隧道设计采用纵向通风措施, 符合 PM_{10} 扩散模型的适用条件。

2.2 结果与讨论

测定时段内的统计结果表明, 在玄武湖隧道内通行的机动车几乎无柴油车, 以汽油为燃料的机动车占绝对优势, 其中小轿车约占 65%, 轻型汽油车约占 20%, 中型汽油车约占 10%, 重型汽油车约占 5%。4 类机动车 PM_{10} 的排放结果见表 1^[7]。

玄武湖隧道单洞净宽 13.26 m, 通行净高

表 1 4 类机动车 PM_{10} 的排放结果 $mg/(m \cdot 辆)$

类型	4 类机动车 PM_{10} 的排放结果 $mg/(m \cdot 辆)$			
	轿车	轻型汽油车	中型汽油车	重型汽油车
PM_{10} 排放因子	0.023	0.025	0.139	0.152

4.5 m, 由此计算横截面积 S 为 $59.67 m^2$ 。根据假设条件, 风速和污染物排放强度在短时间内不随时间变化, 故式 (6) 中的 q/u_0 在测定期间可视为定值。为直观表示, 设 $l = q/u_0$, 单位为 $mg \cdot m^{-4}$, l 的大小直接反映隧道内 PM_{10} 浓度随 x 的变化快慢。将各类型机动车的排放因子代入模型, 计算 l 以得到相应条件下的 PM_{10} 扩散模型, 表 2 为 3 组实验中的各项数据。

表 2 建立玄武湖隧道 PM_{10} 扩散模型的实验数据

编号	$\rho(PM_{10}) / (mg \cdot m^{-3})$	v (风速) / $(m \cdot s^{-1})$	Q (总车流量) / $(辆 \cdot min^{-1})$	S / m^2	$l / (10^{-4} mg \cdot m^{-4})$
1	0.631	1.9	50.0	59.67	3.047
2	0.699	2.6	35.7	59.67	1.590
3	0.383	2.2	38.5	59.67	2.026

通过验证实验得到的隧道内 PM_{10} 扩散模型依次为 $C = 0.631 + 3.047 \times 10^{-4} x$, $C = 0.699 + 1.590 \times 10^{-4} x$ 和 $C = 0.383 + 2.026 \times 10^{-4} x$ 。比较由 3 个模型计算得到的隧道内 PM_{10} 浓度和直接用仪器测定获得的 PM_{10} 浓度, 见图 1(a)(b)(c)。

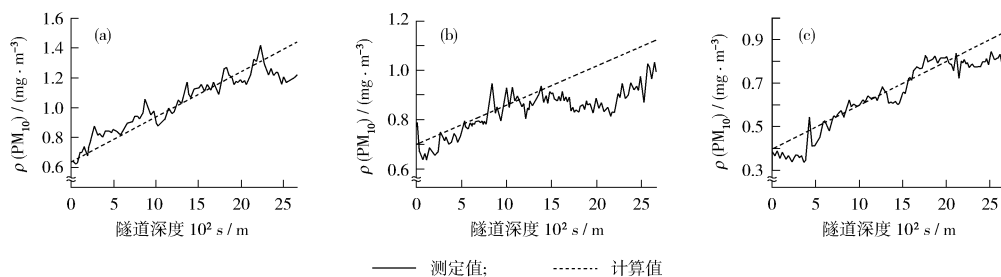


图 1 模型计算值与测定值比较

3 个系列的曲线图均表现了 PM_{10} 浓度的模型计算值随深度递增, 测定值围绕计算值上下波动, 总趋势与计算值一致, 表明计算值与测定值的相关性较好。图 1(a)(b)(c) 的计算值与测定值相对误差分别为 $-20.6\% \sim 22.4\%$ 、 $-16.5\% \sim 29.6\%$ 和 $-18.2\% \sim 39.6\%$, 计算值与测定值相差不大。因此, 可以利用该模型, 根据隧道口的 PM_{10} 浓度、

风速, 隧道内通行的机动车污染源强及隧道的建筑结构等资料, 预测隧道内不同深度的 PM_{10} 浓度, 较为准确地求得隧道内颗粒物的污染情况。

3 结论

应用大气平流扩散方程, 针对隧道的特殊建筑
(下转第 34 页)

表 4 降解试验结果

化合物	理论值 $\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	2 h		18 h		24 h	
		测定值	回收率	测定值	回收率	测定值	回收率
		$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	%	$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	%	$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	%
烟嘧磺隆	38.0	36.5	96.1	37.4	98.4	36.1	95.0
噻磺隆	32.0	31.7	99.1	31.5	98.4	30.8	96.2
甲磺隆	23.5	24.7	105	24.9	106	21.9	93.2
氯磺隆	36.0	34.1	94.7	34.9	96.9	33.7	93.6
苯磺隆	24.0	20.0	83.3	21.2	88.3	18.4	76.7
氯嘧磺隆	30.0	28.0	93.3	28.5	95.0	27.3	91.0
环胺磺隆	26.8	24.8	92.5	25.4	94.8	23.5	87.7

表 5 滤膜影响试验结果 ($n=5$)

化合物	理论值 $\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	加标后过滤		过滤后加标	
		测定均值	RSD	测定均值	RSD
		$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	%	$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	%
烟嘧磺隆	38.0	40.8	7.7	39.3	7.9
噻磺隆	32.0	33.0	5.1	35.7	2.6
甲磺隆	23.5	25.7	2.4	24.8	3.7
氯磺隆	36.0	39.0	1.9	35.2	1.6
苯磺隆	24.0	21.6	5.2	20.6	4.1
氯嘧磺隆	30.0	31.4	3.0	29.0	1.9
环胺磺隆	26.8	26.2	2.3	25.3	1.9

3 结论

(1) 水样加 1.0 mol/L 乙酸铵保存剂, 于冷藏柜中 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存 18 h 内, 7 种磺酰脲类除草剂均无降解, 24 h 后苯磺隆和环胺磺隆存在一定程度的降解。

(2) 对混浊水样, 使用 WAT 200538 d 47 mm $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 水相滤膜过滤, 对 7 种磺酰脲类除草剂的测定均无影响。

(上接第 14 页)

构造, 建立了自然通风和纵向通风状态下隧道内 PM_{10} 的扩散模型, 并以玄武湖隧道内 PM_{10} 排放因子为例, 验证了模型的可靠性, 结果表明模型计算值与实际测定值的一致性较好。

通过已知的隧道口的 PM_{10} 浓度、风速, 隧道内通行的机动车污染源强及隧道的建筑结构等资料, 可预测自然通风和纵向通风隧道内不同深度的 PM_{10} 浓度, 评价隧道内空气质量。

[参考文献]

[1] 胡宇峰, 陆志良. 汽车隧道内气流及污染问题研究 [J]. 中

(3) 采用梯度淋洗方法, 缺点是分析时间长, 优点是分离效果好, 抗干扰能力强。

(4) 采用固相萃取 - 高效液相色谱法同时测定水中 7 种磺酰脲类除草剂, 操作简便, 分离完全, 峰形好, 线性范围宽, 灵敏度高, 精密度和准确度均符合要求。

[参考文献]

- [1] 朱良天. 农药 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004 380-385.
- [2] 王志举, 吴晓东. 液相色谱 - 质谱联用法测定水中氯磺隆的研究 [J]. 现代农业科技, 2005(10): 21-22.
- [3] 杨俊柱. 反相高效液相色谱法分析噻磺隆 [J]. 安徽化工, 2001, 109(1): 33-34.
- [4] 刘海燕, 黄超. 甲磺隆 - 氯磺隆 - 噻吩磺隆混剂液相色谱分析 [J]. 农药科学与管理, 2005, 26(12): 5-7.
- [5] 程薇, 陈祖义, 洪良平. 14C - 苯嘧磺隆在土壤中的吸附与解吸研究 [J]. 南京农业大学学报, 1994, 18(4): 100-104.
- [6] 李娟, 赵永刚, 丁曦宁. 固相萃取 / 高效液相色谱法测定地表水中氨基甲酸酯类农药 [J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(1): 27-28.

国公路学报, 2004, 17(4): 109-113

- [2] 匡江红, 常健. 城市地下交通隧道的废气排放问题 [J]. 城市公共事业, 2004, 18(1): 18-19.
- [3] SENFELD JH. Atmospheric chemistry and physics of air pollution [M]. New York: John Wiley & Sons 1986.
- [4] 邓顺熙, 梁鹏. 公路汽车排气污染物扩散模式的研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(3): 80-84.
- [5] 邓顺熙, 刘人通. 公路隧道空气质量模式及应用 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 27-30.
- [6] 徐振涛, 蒋维楣. 南京鼓楼隧道汽车排气对环境的影响 [J]. 环境监测管理与技术, 1998, 10(6): 22-24.
- [7] 吴焯, 郝吉明, 李伟, 等. 利用 PART5 模式计算机动车尾气管的颗粒物排放 [J]. 环境科学, 2002, 23(1): 6-10.