

交通隧道 CO 动态浓度控制指标研究\*

邢荣军<sup>1</sup>,徐湃<sup>1</sup>,蒋树屏<sup>2</sup>,郑友成<sup>3</sup>

(1.重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074;2.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400067;  
3.重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074)

**摘 要:**合理的交通隧道通风控制浓度目标限值,不仅能够为司乘人员提供健康良好的行车环境,而且能够节约大量的电能。本文从纵向通风方式的污染物浓度分布趋势入手,分析了车辆通过隧道时人体受到污染物的暴露当量的表达式。进而研究了 CO 与人体的相互作用机理,应用初始条件得到了 CFK 方程的解析解及数值解。将 3%作为人体血液中 COHb 浓度的最大允许值,并且综合考虑污染物浓度  $c$  和通过时间  $t$  两个指标,提出了一种基于动态浓度控制方式的污染物负载指标表达式。通过实例计算对所提出的控制指标进行验证,结果显示,本文提出的方法能够适应交通流不断变化的特点,对通风控制更具有合理性和可靠性。

**关键词:**交通隧道;动态浓度;毒气负载;控制指标

中图分类号:U453.5      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)02-0530-06

Research on CO Dynamic Concentration Control Indicator in Traffic Tunnel

Xing Rongjun<sup>1</sup>, Xu Pai<sup>1</sup>, Jiang Shuping<sup>2</sup>, Zheng Youcheng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China; 2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P.R.China; 3. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China)

**Abstract:** The target limit of reasonable traffic tunnel ventilation's controlled concentration, not only provide a health driving environment for the driver and passenger, but also can save a lot of electricity. This paper starts from the distribution trends of pollutant concentration in the model of longitudinal ventilation, the pollutant exposure equivalent expression around the human body is analyzed, when vehicles pass through a tunnel. And then the mechanism of the interaction between CO and the human body is also analyzed. The analytical solution and numerical solution of the CFK equation are obtained by using the initial conditions. Using 3% as the maximum allowable value of COHb concentration in human blood, and two indicators which are pollutant concentration  $c$  and passing time  $t$  are comprehensively considered, and this paper proposes a pollutant load index expression based on the control method of dynamic concentration. The proposed control indicator is verified through calculation of example, as an obvious result, the method presented here is able to accommodate the characteristics of traffic flow changing, and is more rationality and reliability for ventilation control.

**Keywords:** traffic tunnel; dynamic concentration; toxic gas load; control indicator

\* 收稿日期:2017-10-21(修改稿)  
作者简介:邢荣军(1981-),男,陕西渭南人,博士,讲师,主要从事隧道与地下工程通风节能、结构健康监测等领域的教学与科研工作。E-mail: xingrong-12@ 163.com  
基金项目:重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2015shmszx30013);重庆市社会事业与民生保障科技创新专项重点项目(cstc2015shms-ztx30001);重庆市前沿与应用基础研究计划(cstc2015jcyjA40056);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500536);重庆高校创新团队建设计划项目(CXTDG201602013)

0 引言

隧道作为交通基础设施的特殊构造物,其运营环境一直以来受到人们的关注<sup>[1]</sup>。一方面,汽车通过隧道时排放的有害气体污染隧道内空气,影响司乘人员的身体健康;另一方面,重载柴油车辆通过时排放的烟尘和产生的粉尘吸收光线,降低隧道内空气能见度,对行车安全造成不利影响。在隧道废气 CO、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等众多物质中,CO 以其在隧道中浓度最高、毒性最大,且在封闭的隧道环境中难以转化等特点,成为对交通安全影响和人体健康危害最大的空气污染物。因此,应把 CO 浓度限值作为通风控制目标的重要指标之一<sup>[2-3]</sup>。

目前,隧道通风方式主要是以纵向通风为主的机械通风,按最不利工况对隧道内空气施加一定的动能,用于克服隧道进出口大气压差、自然风(逆向时)、沿程摩阻等因素产生的阻力,以达到通风换气的目的。CO 浓度限值设置越低,隧道内空气质量相对越好,所需电能越多;反之,设置越高,隧道内空气质量相对越差,所需电能越少<sup>[4]</sup>。因此,CO 浓度合理限值的研究,不仅能有效保障隧道环境空气质量,而且对能耗的科学计算也具有重要意义。

1 公路隧道内空气污染物分布特征

目前,我国采用纵向通风方式的单向交通隧道通风计算时,通常假设污染物浓度的分布大致呈三角形分布,在入口处的浓度值最小,出口处的浓度值最大,如图 1 所示。

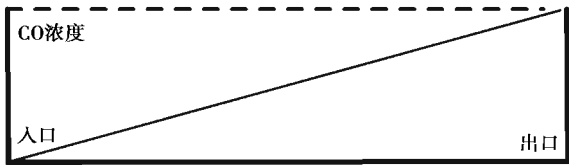


图 1 纵向通风污染物浓度理想曲线

Fig. 1 Ideal curve of longitudinal ventilation pollutant concentration

图 1 中 CO 浓度曲线是在假设交通流规则(隧道内车型统一,行使速度一致,且沿隧道纵向均匀

分布),不受自然风影响情况下的理想状态。

车流是产生污染物的源头,其受到车速、车流密度、车流量以及车型等各种交通流参数的影响。同时,车辆随机的进洞、出洞导致洞内污染物浓度随着车辆位置、速度、车型的变化发生瞬态变化。

在实际运营的隧道中,交通流为随机状态,在时刻发生着变化,导致隧道内污染物浓度曲线随之发生变化如图 2 所示。不过,从入口到出口总的趋势来看,污染物浓度呈上升趋势<sup>[5-8]</sup>。

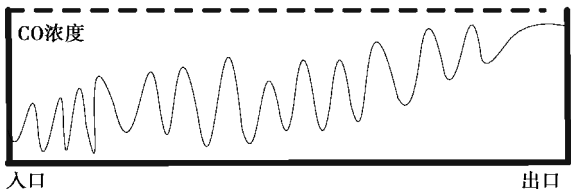


图 2 纵向通风污染物实际曲线

Fig. 2 Actual curve of longitudinal ventilation pollutant

李祖伟等<sup>[9]</sup>对运营公路隧道空气污染物纵向分布进行了数值模拟研究,指出 CO 的污染物浓度从入口到出口方向在起伏变化,总体上来看呈上升趋势,同时给出了大、中、小不同车型比例的浓度曲线。Deng 等<sup>[10]</sup>对 Yingpan 隧道的 CO 污染物进行了实测分析研究,给出了左洞和右洞随着进洞距离的污染物浓度变化曲线,表明受隧道内交通流的影响,导致 CO 浓度分布曲线呈不规则状态。李鸿博等<sup>[11]</sup>通过计算分析得出,在一定浓度限值( $\leq 500$  ppm)内采用平均浓度和三角形浓度曲线计算出的结果基本吻合。

2 隧道 CO 污染物生理标准及危害评估

2.1 现行交通隧道 CO 浓度限值标准

CO 作为隧道污染物浓度控制的重要指标之一,其浓度限值一直受到国内外研究者的普遍关注。世界隧道协会(PIARC)根据世界卫生组织(WHO)推荐的 CO 短期暴露标准,给出了公路隧道通风设计的 CO 浓度限值标准。日本、澳大利亚等国也制订了相应的标准,如表 1 所示。

表 1 国外 CO 浓度限值标准统计表

Table 1 Statistics of CO concentration  
limit standards abroad

标准、规范	CO 浓度限值/ppm	
	正常工况	阻滞工况
PIARC1995	100	150
PIARC2004	100/70	150/100
PIARC2012	70	100
澳大利亚标准 2003	200	≤87, 15 min; ≤50, 30 min
日本《道路隧道技术标准(通风篇)及其解说 2001》	100~150	150~200
日本《道路隧道技术标准(通风篇)及其解说 2008》	100	150~200

我国公路隧道通风设计标准《公路隧道通风设计细则 2014》对 CO 浓度设计指标也给出了相应的限值,如表 2 所示。

表 2 国内 CO 浓度限值标准统计表

Table 2 Domestic standards of CO concentration limit

标准、规范	CO 浓度限值/ppm	
	正常工况	阻滞工况
《公路隧道通风照明设计规范 1999》	200	300, 不超过 20 min
《公路隧道通风设计细则 2014》	100	150, 不超过 20 min

由表 1、表 2 可知,国内外对于 CO 浓度限值的标准基本保持一致,分别为:正常工况 100 ppm 和阻滞工况 150 ppm。

2.2 CO 与人体作用机理

CO 造成的危害是通过与血液中的血红蛋白结合形成碳氧血红蛋白(COHb)。CO 结合血红蛋白的能力比氧气强约 220 倍,因此在通过隧道时,呼吸的少量 CO 就可以引起大量的血红蛋白被结合为 COHb。结合后的 COHb 不能发挥在血液中传输氧气的正常功能(以氧血红蛋白 O<sub>2</sub>Hb 的形式),会造成血液输送氧气的能力下降,身体机能缺氧。试验发现,当 COHb 的浓度达到 2.5%~3.0%时,受损个体心脏功能减弱,血流改变,继续

暴露后红血球浓度发生变化。

1965 年, Coburn 等提出了一种数学方程式用来描述 COHb 在人体血液当中的含量,其方程(CFK 方程)表述如下:

$$\frac{d[CO]}{dt} = V_{CO} - \frac{[COHb]P_{O_2}}{[O_2Hb]M} \frac{1}{1/D_L + (P_B - P_{H_2O})/V_A} + \frac{P_{CO}}{1/D_L + (P_B - P_{H_2O})/V_A} \tag{1}$$

式中:  $\frac{d[CO]}{dt}$  为人体吸入 CO 的速率, ml/min;  $V_{CO}$  为人体产生 CO 的速率, ml/min;  $[COHb]$  为血液中碳氧血红蛋白含量, 用单位体积血液含 CO 的体积表示, mL/mL;  $[O_2Hb]$  为血液中氧合血红蛋白的含量, 用单位体积血液含 O<sub>2</sub> 的体积表示, mL/mL;  $P_{O_2}$  为肺部氧气分压, mmHg;  $M$  为 Haldane 常数, 表示 CO 和血液的亲合力与 O<sub>2</sub> 和血液亲和力的比值;  $D_L$  为 CO 在人体肺部质量转换系数, ML/(min · mmHg);  $P_B$  为大气压力, mmHg;  $P_{H_2O}$  为水蒸气压力, mmHg;  $V_A$  为大气与肺部活性区(肺泡)之间的空气交换率, ML/min;  $P_{CO}$  为呼吸空气中 CO 的分压, mmHg。

方程中假设  $d[CO] = V_b d[COHb]$ , 并且假设  $[O_2Hb]$  是常数, 与  $[COHb]$  无关, 只有  $[COHb]$  和时间  $t$  为变量。通过分离变量后, 式(1)可变为一个阶非齐次线性方程, 如式(2)所示:

$$\frac{d[COHb]}{dt} + P[COHb] = Q \tag{2}$$

式中:

$$P = \frac{P_{O_2}}{[COHb]MV_b} \cdot \frac{1}{1/D_L + (P_B - P_{H_2O})/V_A}$$
$$Q = \frac{V_{CO}}{V_b} + \frac{P_{ICO}/V_b}{1/D_L + (P_B - P_{H_2O})/V_A}$$

应用初始条件  $t = 0, [COHb]_t = [COHb]_0$ , 对式(2)进行积分计算, 得到方程(1)的解析解为:

$$\frac{A[COHb]_t - BV_{CO} - P_{ICO}}{A[COHb]_0 - BV_{CO} - P_{ICO}} = \exp\left(-\frac{At}{BV_b}\right) \tag{3}$$

式中:  $A = P_{O_2}/(M[O_2Hb])$ ,  $B = (1/D_L) + (P_B - P_{H_2O})/V_A$

方程(1)的数值解为:

$$[COHb]_{t+\Delta t} - [COHb]_t = \frac{V_{CO}}{V_b} + \frac{P_{CO}}{BV_b} - \frac{[COHb]_t P_{O_2}}{BV_b [O_2Hb]_t M} \tag{4}$$

式(4)即为式(1)的差分方程形式, 如图 3 所示。

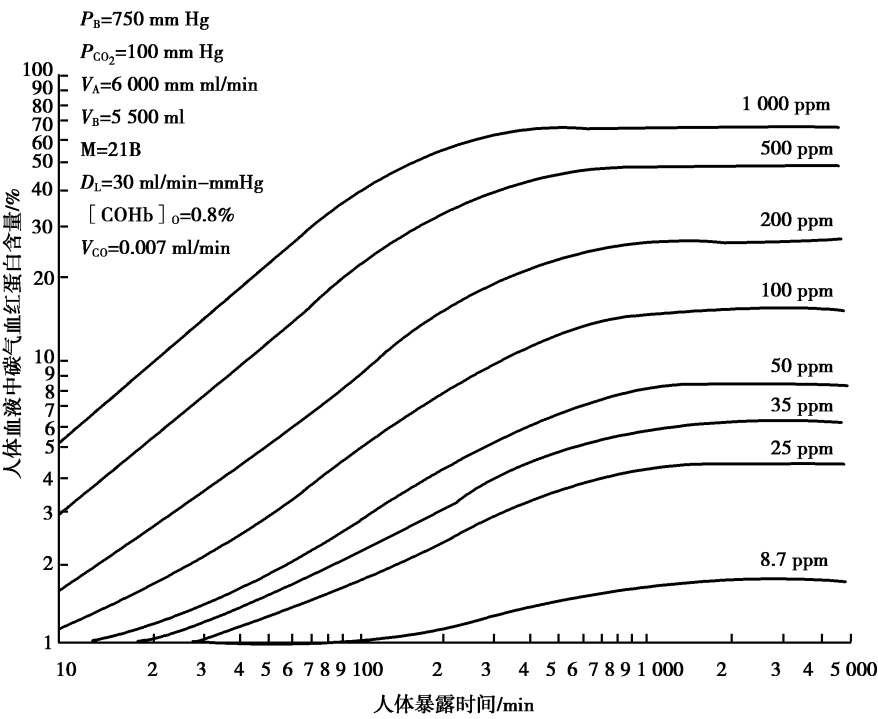


图3 血液中 COHb 含量与暴露时间  $t$  的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of COHb levels vs. exposure time  $t$

2.3 污染物浓度的危害评估

污染物的暴露量由暴露时间和暴露浓度共同决定。

2.3.1 暴露量

人体对某种化学物质的暴露,通常指人体的外部边界皮肤、口、鼻等与化学物质的接触。暴露浓度被定义为接触暴露发生的位置上化学物质的浓度。对隧道废气污染而言,暴露浓度一般近似认为等于口鼻呼吸区域处大气污染物的浓度。一段时间内污染物的暴露即暴露量,是暴露评价中的重要指标。暴露量可用下式表示:

$$Eq = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot dt \tag{5}$$

式中: $Eq$  为暴露量; $t$  为暴露时间; $C(t)$  为随时间变化的暴露浓度。

在暴露评价研究中,剂量是另一主要的评价指标。剂量有多种内涵,潜在剂量 (potential dose) 是常用的一种,即被吞咽、吸入或涂抹于皮肤的化学品的量。潜在剂量可用下式表示:

$$D_p = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot IR(t) \cdot dt \tag{6}$$

式中: $D_p$  为潜在剂量; $IR(t)$  为随时间变化的吸入速率,其他符号含义同上式。潜在剂量的单位为质量单位,如 mg。吸入速率的单位为体积/时间,如  $m^3/h$ 。空气吸入速率的确定来源于美国 EPA 的暴露因子手册 (Exposure Factors Handbook): 对于年龄在 16~60 岁的成年人而言,坐下或站立 (在公交或地铁上) 以及行走时的平均空气吸入速率分别为  $0.288 m^3/h$  和  $0.72 m^3/h$ 。

2.3.2 毒气负载指标

毒气的危害大小使用毒气负载指标进行度量。毒气负载 (Toxic Load) 是定量评估有害气体暴露对生物体身体伤害的主要方法,起源于著名的 Haber 准则: $Ct=k$  (常数)。即对于某种有毒气体,当暴露浓度  $C$  与暴露时间  $t$  的乘积固定时,生物体产生的生理反应将一致。然而,近几十年进行的动物实验表明,浓度和时间对生物体生理反应的作用并非等同,并因此产生了许多 Haber 准则的修正公式<sup>[12-14]</sup>。毒气负载模型可看作这些公式的一般形式,其数学公式如下:

$$L = C^m t^n \tag{7}$$

式中: $L$  为有毒气体负载值,是生物体伤害大小的量化指数; $m$  和  $n$  分别为  $C$  和  $t$  的作用指数,反映



了暴露浓度和暴露时间对  $L$  的贡献大小。 $m$  值较大,说明短期的高浓度暴露较长期的低浓度暴露的危害大;相反,则说明暴露时间在决定  $L$  时起主要作用。根据毒气体成分及暴露时间不同时, $m$  和  $n$  的取值将不同,相同  $L$  值产生的生物体生理反应也会不同<sup>[15]</sup>。

2.3.3 平均浓度

测得隧道中的平均浓度可用式(8)来表示:

$$\text{平均浓度} = C_{\text{avg}} = \frac{1}{\Delta t} \int c dt \tag{8}$$

式中: $c$  为仪器测得的瞬时浓度; $t$  为监测时间。

3 动态浓度控制指标

3.1 污染物负载动态浓度指标

国内外现有的浓度指标是以正常工况和阻滞工况给于不同的浓度值来作为控制目标。考虑到污染物负载指标中的参数时间  $t$  在现有标准中均未考虑,丢失了重要的信息,故笔者提出了一种动态浓度控制的污染物负载指标,既反映了浓度信息,同时对通过隧道时间也做了约束,其表达式如(9)所示。

$$L_{\text{co}} = C_{\text{avg}}^m t^n \tag{9}$$

式中: $C_{\text{avg}}$  为隧道内 CO 平均浓度; $t$  为通过隧道时间; $m$  为浓度指数; $n$  为时间指数。

考虑到车辆通过隧道的时间一般在 30 min 以内,取  $m=1, n=1$ ,式(9)简化为:

$$L_{\text{co}} = C_{\text{avg}} t \tag{10}$$

3.2 实例计算

以重庆市某隧道(其中左洞长 3 555 m,右洞长 3 562 m)为例,正常工况(60 km/h)下通过隧道的时间为 4 min,异常工况(20 km/h)下通过隧道的时间为 11 min。考虑规范<sup>[16]</sup>中通过隧道不超过 20 min 为例分别计算,计算值如表 3 所示:

表 3 不同行驶工况下 COHb 浓度值

Table 3 COHb concentration under different driving conditions

浓度 /ppm	不同行驶工况下 COHb 浓度最大值/%		
	正常工况 (60 km · h <sup>-1</sup> )	阻滞工况 (20 km · h <sup>-1</sup> )	异常工况 ≤20 min
50	0.20	0.58	1.12
100	0.25	1.03	2.13

续表3

浓度 /ppm	不同行驶工况下 COHb 浓度最大值/%		
	正常工况 (60 km · h <sup>-1</sup> )	阻滞工况 (20 km · h <sup>-1</sup> )	异常工况 ≤20 min
150	0.30	1.48	3.10
200	0.34	1.92	4.03

不同行驶工况下污染物浓度负载计算限值如表 4 所示。

表 4 不同行驶工况下污染物浓度负载

Table 4 Pollutant concentration load under different driving conditions

浓度/ppm	不同行驶工况下 CO 动态浓度值/ppm · min		
	正常工况 3 min	阻滞工况 11 min	异常工况 20 min
50	150	550	1 000
100	300	1 100	2 000
150	450	1 650	3 000
200	600	2 200	4 000

通过表 4 的计算结果分析可知,不再将具体的 CO 浓度值作为唯一的控制指标,而是采用车速快时,浓度值高、车速慢时,浓度值低的动态控制思想。采用动态浓度控制的污染物负载指标作为隧道通风系统的控制参数,使得系统的控制更具有灵活性和鲁棒性。

4 结论

分析了交通隧道纵向通风方式的污染物浓度分布趋势,结合 CO 与人体相互作用的 CFK 方程及毒气负载指标的 Haber 准则,提出了一种动态浓度控制的污染物负载指标。

(1)CO 与人体中的血红蛋白结合能力比氧气强约 220 倍,是造成危害的主要根源。将血液中 COHb 的浓度限定在 2.5%~3.0%作为负载控制的基本限值。

(2)以人体对某种化学物质的暴露方式和剂量大小为基础,分析了暴露评价的基本方式和毒气负载指标的计算准则,提出了一种动态浓度控制的

污染物负载指标。

(3)结合现有规范中的污染物浓度指标限值,以重庆地区某隧道为例,对本文提出的动态浓度控制指标进行了计算验证。计算结果显示,本方法同时考虑了浓度 $c$ 和通过时间 $t$ 对控制目标的约束,控制方式更为合理和可靠。

# 参考文献(References)

- [1] 袁雪戡,蒋树屏,谢永利.秦岭终南山特长公路隧道关键技术研究[M].北京:人民交通出版社,2010. (Yuan Xuekan, Jiang Shuping, Xie Yongli. Research on the key technique of super long highway tunnel at Qinling Zhongnan Mountain [M]. Beijing: China Communication Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 严涛,王明年,郭春,等.单洞对向超特长隧道通风方案优化研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1545-1579. (Yan Tao, Wang Mingnian, Guo Chun, et al. Study on ventilation scheme optimization for two-way extra-long tunnel of in one tube [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012,8 (Supp.1): 1545-1579. (in Chinese))
- [3] 韩直,方建勤,洪伟鹏.公路隧道节能技术[M].北京:人民交通出版社,2010. (Han Zhi, Fang Jianqin, Hong Weipeng. Energy saving technology of highway tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [4] Brandeis J, Bergmann D J. A numerical study of tunnel fires[J]. Combustion Science and Technology, 1983, 35 (1-4):133-155.
- [5] Chu B, Kim D, Hong D, et al. Tunnel ventilation control using reinforcement learning methodology [J]. Jsme International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, 2006, 49 (4): 1003-1010.
- [6] Bila J. Analysis of ventilation process of a road tunnel and its control system[J]. Modelling and Simulation, 2001:350-354.
- [7] Bogdan S, Birgmajer B. Fuzzy-predictive control of a road tunnel ventilation system [J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005, 1: 151-156.

- [8] Fang B, Zhang Q, Zhang GQ and He DJ. A study of evaluation method of energy conservation under two different control modes for the tunnel ventilation system [A] // Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and Third International Conference on Built Environment and Public Health[C]. Guilin, 2009: 710-717.
- [9] 李祖伟,何川,方勇,等.运营公路隧道空气污染物纵向分布的数值模拟[J].现代隧道技术,2005,42(4):68-71. (Li Zuwei, He Chuan, Fang Yong, et al. Numerical simulation of the longitudinal distribution of air contaminant in an operating highway tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005,42(4):68-71. (in Chinese))
- [10] Deng Y W, Chen C, Li Q, et al. Measurements of real-world vehicle CO and NOx fleet average emissions in urban tunnels of two cities in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 122:417-426.
- [11] 李鸿博,郭小红,乔春江,等.公路隧道CO设计浓度限值的分析研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):788-783. (Li Hongbo, Guo Xiaohong, Qiao Chunjiang, et al. Study on the upper limit of CO concentration in highway tunnel design [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (4): 788-783. (in Chinese))
- [12] Witschi H. Some notes on the history of Haberšlaw[J]. Toxicological Sciences, 1999, 50(2): 164-168.
- [13] Miller F J, Schlosser P M, Janszen D B. Haberšrule: a special case in a family of curves relating concentration and duration of exposure to a fixed level of response for a given endpoint[J]. Toxicology, 2000, 149(1):21-34.
- [14] Rozman K K. The role of time in toxicology or Haber's c x t product[J]. Toxicology, 2000, 149(1):35-42.
- [15] U.S. Environmental Protection Agency. Acute exposure guide levels [EB/OL]. 1996. <http://www.epa.gov/opt/aegl/index.htm>, 2009-06-08.
- [16] 中华人民共和国交通部.《公路隧道通风设计细则》(JTGT D702-02-2014)[S].北京:人民交通出版社,2014. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Guidelines for design of ventilation of highway tunnels (JTGT D702-02-2014) [S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese))