

HIWAY-2模式对研究宁六公路(丁解直线段) 汽车污染的应用

曹文俊 朱汶 黄燕*
(大气物理学系)

摘要 用美国公路空气污染模式(HIWAY-2),计算了宁六公路(丁解直线段)因汽车行驶所造成的 NO_x 污染。将 NO_x 浓度的计算值与实测值作了对比,求出了不同稳定度时的修正系数。对宁六公路丁解段两侧的汽车污染作了研究。

关键词 空气污染模式,地面空气污染浓度,汽车排气

随着工农业生产的发展,公路交通事业也势必发展。宁六公路,是贯通苏南、苏北的交通要道。由于车流量逐年增加,公路两侧由汽车行驶所造成的空气污染(简称为汽车污染)日益成为人们所关心的问题。目前国内对于点源扩散的研究较多,但对线源的研究较少。本文通过对宁六公路汽车污染的研究,试图提供一套对线源研究的具体方法,这对我国公路附近的汽车污染研究,无疑是很有参考价值的。

本文所用的 NO_x 浓度资料,是在1989年4月16、17日和10月5日、9日在宁六公路丁解段测得的。采样仪器是KZL型全自动 NO_x 大气监测仪,采样时间是10分钟。在 NO_x 浓度监测期间,还对气象要素(如:云、温度、气压、湿度、风等)作了同步观测,对车流量作了统计。本文采用的 NO_x 评价标准是国家二级标准($0.15 \text{毫克} \cdot \text{米}^{-3}$)。在宁六公路丁解段的监测点附近,周围没有大的建筑物和障碍物,地形开阔、平坦。

大气稳定度分类法本文采用Pasquill-Turner分类法,具体的分级标准见文献[1]。本文将A-C级稳定度统称不稳定类, D级是中性, E-F级统称稳定类。决定稳定度的方法是:①由观测时间和测点的地理纬度,求出太阳高度角。②由太阳高度角和云量,求出太阳辐射的等级。③由太阳辐射等级和10米高度处的风速决定稳定度的等级。

1 计算浓度的公式及各参数的确定

1.1 坐标系

图1绘出了线源与接收点(监测点)的相对位置。图1中的 $O'RS$ 是地理坐标系,其中 $O'R$ 轴指向东, $O'S$ 轴指向北。 AB 是线源的位置,其中 A 、 B 两点是有限长线源的两个端点,它们的坐标分别是 (R_A, S_A) 和 (R_B, S_B) 。设 D 是 AB 线源的长度。 K 点是污

*黄燕是我院1989届毕业生,参加本文野外观测工作的还有张景红、孟辉

染物的接收点(监测点),其坐标是 (R_K, S_K) , β 是线源AB与正北方向的交角。设 (R, S) 是线上任一点O的坐标, AO的长度设为1, 则O点的坐标可用以下方程组求得

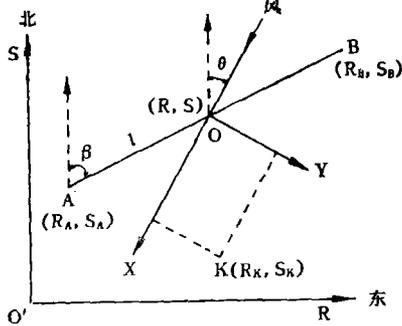


图1 线源与监测点的相对位置

$$\begin{cases} R = R_A + 1 \cdot \sin\beta \\ S = S_A + 1 \cdot \cos\beta \end{cases} \quad (1)$$

再过O点作一动坐标系OXY, 其坐标原点取在O点, X轴指向平均风的顺风向, Y轴指向X轴的左侧(见图1)。设X轴与正北方向的夹角为 θ , 则接收点K在OXY坐标系中的顺风向距离 x (米)与横截风向距离 y (米)可用下面方程组求得

$$\begin{cases} x = (S - S_K) \cdot \cos\theta + (R - R_K) \cdot \sin\theta \\ y = (S - S_K) \cdot \sin\theta - (R - R_K) \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

因 (R, S) 是 l 的函数, 故 (x, y) 也是 l 的函数。

1.2 计算 NO_x 浓度的公式

因宁六公路位于较平坦的地形, 大气湍流状态平稳。汽车排放的 NO_x 污染物在短距离扩散中可不计其沉降作用。故可假定汽车排放的 NO_x 污染物的扩散满足高斯扩散模型条件。据文献〔2, 3〕, 有限长线源对测点K(图1)的浓度贡献, 可用高斯烟羽的点源方程、沿线源进行积分而得

$$C_1 = \frac{q_1}{u} \int_0^D f \cdot dl \quad (3)$$

其中 u 是风速(米·秒⁻¹), 在美国公路空气污染模式中, 开阔地形上的风速常以2米高度的风速代替〔2〕。D是线源长度, 本文中D取1000米。 q_1 是线源源强(克·秒⁻¹·米⁻¹)。f是点源扩散函数(米⁻²)。C₁是浓度。点源扩散函数f的形式, 随以下条件而选用不同的计算式

1.2.1 若是稳定条件, 或混合层高度 $L \geq 5000$ 米, 则

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (4)$$

其中 σ_y 是横向扩散参数(米), σ_z 是垂直向扩散参数(米), z 是监测点的离地高度(米), H是有效源高(米)。

1.2.2 在不稳定或中性层结条件下, 若 $\sigma_z > 1.6L$, 则可假定: 混合层内的浓度分布均匀。若源高与监测点的高度小于L, 则

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y \cdot L} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (5)$$

在其他不稳定或中性条件下, 则

$$\begin{aligned} f = & \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right. \\ & + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \sum_{N=1}^{\infty} \left[\exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H-2NL}{\sigma_z} \right)^2 \right) \right. \\ & + \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H+2NL}{\sigma_z} \right)^2 \right) + \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H+2NL}{\sigma_z} \right)^2 \right) \\ & \left. \left. + \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H-2NL}{\sigma_z} \right)^2 \right) \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

(6) 式中的求和项收敛得很快, 求和项中一般只需取 4 或 5 项就足够了。

据文献〔2—4〕, 在实际工作中常对(3)式用近似公式进行计算。按梯形法则, (3)式的一级近似估算式〔2,3〕为

$$C_1 = \frac{q_1 \cdot \Delta l}{u} \left\{ \frac{1}{2} [f_p(0) + f_p(10\Delta l)] + \sum_{i=1}^9 f_p(i \cdot \Delta l) \right\} \quad (7)$$

其中 $\Delta l = D/10$, f_p 应按现场实况而分别采用(4)—(6)式。

由(4)—(7)式可知, 只要能求出 q_1 、 σ_y 、 σ_z 及 L , 就可算出公路(地面源)对监测点(K)的浓度贡献。

1.3 L、 q_1 、 σ_y 、 σ_z 的计算法

1.3.1 求 L

由于缺少 NO_x 浓度监测时的同步温度探测资料, 本文采用 Nozaki (1973) 公式〔5〕计算 L

$$L = \frac{121}{6} (6 - p_1) \cdot (T - T_d) + \frac{0.168 p_1 (u_{10} + 0.25)}{12 f_1 \cdot \ln(z/z_0)} \quad (8)$$

其中 p_1 代表稳定度等级, A 级时 $p_1 = 1$, B 级时 $p_1 = 2$, …… F 级时 $p_1 = 6$ 。T 是地面气温($^{\circ}\text{C}$), T_d 是露点温度($^{\circ}\text{C}$), u_{10} 是离地 10 米高处的平均风速, z_0 是粗糙度, 本文取 $z_0 = 0.4$ 米。 f_1 是地转参数(秒^{-1}), 据测点纬度($32^{\circ}20'N$), $f_1 = 2\Omega \sin\varphi = 7.797 \times 10^{-5}$ (秒^{-1})。z 取 10 米。 T_d 可用下式计算

$$T_d = 235 / [7.45 \times 2.3 / \ln \frac{e_1}{6.11} - 1] \quad (9)$$

(9) 式中 e_1 是水汽压(百帕)。只要由地面气温、湿度、风的观测值及稳定度等级, 由(8)、(9)式可求得 L。

1.3.2 求 q_1

据文献〔2, 3〕, q_1 可用下式计算

$$q_1(\text{微克} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{米}^{-1}) = \frac{EF((\text{微克} \cdot \text{辆}^{-1} \cdot \text{千米}^{-1}) \times TV(\text{辆} \cdot \text{小时}^{-1}))}{1000(\text{米} \cdot \text{千米}^{-1}) \times 3600(\text{秒} \cdot \text{小时}^{-1})}$$

$$= 0.2778 \times (EF) \times (TV) (\text{微克} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{米}^{-1}) \quad (10)$$

其中(EF)是排放系数, (TV)是交通量, 它们的含义见文献〔6〕。迄今为止我国尚未公布各种汽车的平均排放系数, 故本文暂采用美国公路车辆在1980年的 NO_x 的各种车辆的平均排放系数进行计算 q_1 , 即取 $(EF) = 2.2 \times 10^6 (\text{微克} \cdot \text{千米}^{-1} \cdot \text{辆}^{-1})$ 〔7〕。

1.3.3 求 σ_y 、 σ_z

为了考虑汽车行驶时产生的尾流对污染物浓度分布的影响, 需在 σ_z 、 σ_y 上分别加上初始扩散值 σ_{z1} 和 σ_{y1} 。据文献〔2〕, 求 σ_z 的公式为

$$\sigma_z^2 = \sigma_{za}^2 + \sigma_{z1}^2 \quad (11)$$

其中 σ_{za} 代表由环境空气湍流引起的垂直方向的扩散参数, 可按下列式计算

$$\sigma_{za} = \begin{cases} 110.62 \left(\frac{x}{1000} \right)^{0.93198} & \text{不稳定} \\ 86.49 \left(\frac{x}{1000} \right)^{0.92332} & \text{中性} \\ 61.141 \left(\frac{x}{1000} \right)^{0.91465} & \text{稳定} \end{cases} \quad (12)$$

上式中 x 是离源距离(米), σ_{za} 的单位是米。(11)式中的 σ_{z1} 代表由汽车尾流引起的垂直向初始扩散值, 按下式计算

$$\sigma_{z1} = 3.57 - 0.53 \cdot U_{\perp} \quad (13)$$

其中 U_{\perp} 代表垂直于公路的风速分量(米·秒⁻¹)。若 $U_{\perp} > 3.91$ (米·秒⁻¹), 则取 $\sigma_{z1} = 1.5$ 米。

求 σ_y 的计算式为

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y1}^2 + \sigma_{ya}^2 \quad (14)$$

(14)式中 σ_{ya} 代表环境湍流引起的横向扩散参数, 其值按下式计算

$$\sigma_{ya} = 465.1 \times \left(\frac{x}{1000} \right) \times \tan \theta_p \quad (15)$$

其中 σ_{ya} 与 x 的单位是米。 θ_p 是水平烟羽扩散的半角(度), 由下式给出

$$\theta_p = c - d \cdot \ln \left(\frac{x}{1000} \right) \quad (16)$$

不同稳定度时的 c 、 d 值见表1。(14)式中的 σ_{y1} 代表汽车尾流引起的横向初始扩散值, 常取 $\sigma_{y1} = 2\sigma_{z1}$ 。

表1 不同稳定度时的 c 、 d 值(度)

稳定度级	c	d
不稳定	18.333	1.8096
中性	14.333	1.7706
稳定	12.5	1.0857

2 计算结果和讨论

2.1 计算值与实测值的比较

计算 NO_x 浓度的步骤、方法如下: 根据交通量由(10)式求出 q_1 。由观测的时间、云量、风速可决定稳定度等级。由(11)~(16)式及表1, 可求出 σ_z 、 σ_y 。根据稳定度等级及观测的湿度, 由(8)、(9)式可求L值。再由(7)、(4)、(5)、(6)式及K点的坐标就可计算出K点的浓度值。

因上述 σ_y 、 σ_z 的算法及表1取自文献[2], 为检验 NO_x 浓度计算值的正确性, 表2列出了检验结果。因宁六公路丁解段的 NO_x 浓度监测点设在大厂镇西南侧, 为了消除来自大厂镇的 NO_x 对公路测点 NO_x 浓度测值的影响, 故所选用的 NO_x 浓度实测值, 都是在偏西风或东南风的条件下测得的, 因此公路监测点上所得的 NO_x 均来自公路上的汽车污染源。考虑到即使在同一稳定度条件下因交通量及风速都不同, 故表2中给出了实测值(c')与计算值

表2 NO_x 浓度实测值与计算值之比

稳定度级	不稳定	中性	稳定
平均比 \bar{r}	0.821	0.851	0.875
样本数 n	45	31	10

(c_1)的各次比值的平均值(\bar{r}), 即 $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c'_i}{(c_1)_i}$ 。由表2可见: ①虽然不同稳定度时的 \bar{r} 有些不同, 但总的来看, NO_x 浓度计算值的误差不太大, 说明文献[2~4]的模式与参数基本上可用于宁六公路丁解直线段。②为使某种稳定度下的浓度计算值与浓度实测值相一致, 需将浓度计算值乘以该稳定度下的 \bar{r} 。故可把 \bar{r} 视为浓度的修正系数。

2.2 计算结果

宁六公路丁解段的公路半宽度是11米。为了了解该公路段两侧的汽车污染, 本文计算了当风向垂直于该公路段时公路侧面的污染状况。取动坐标系的Y轴平行于公路, X轴垂直于公路并指向下风向, 坐标原点取在公路中心。分别计算了风速为1.5、2、3、4、5、6(米·秒⁻¹), 稳定度分别为不稳定、中性、稳定, 及交通量为1000辆·小时⁻¹, 不同x处的 NO_x 浓度值。计算的部分结果见表3。表3中的 c_1 是 NO_x 浓度的计算值, c_2 是

表3 NO_x 浓度随x的变化 (TV=1000辆·小时⁻¹, $u=3$ 米·秒⁻¹)

稳定度		不稳定		中性		稳定	
浓度值(微克·米 ⁻³)		c_1	c_2	c_1	c_2	c_1	c_2
距	10	385.9	316.8	439.7	367.8	480.9	420.8
	20	212.8	174.7	260.2	229.9	348.7	305.1
	30	126.0	103.5	171.5	146.5	245.3	214.7
	40	81.8	67.1	116.0	99.1	176.1	154.1
高	50	57.0	46.8	83.0	70.9	130.7	114.3
	60	42.0	34.5	62.2	53.1	100.1	87.5
	70	32.2	26.4	48.3	41.2	78.9	69.0
	80	25.5	20.9	38.6	33.0	63.6	55.7

NO_x 浓度的预测值($c_2 = c_1 \cdot \bar{r}$)。因宁六公路丁解段靠近大厂镇,故不稳定、中性、稳定时的L值可分别采用大厂镇的1027米、862米、572米*。图2绘出了不同稳定度,不同风速时 NO_x 浓度(预测值)随距离(x)的变化曲线。

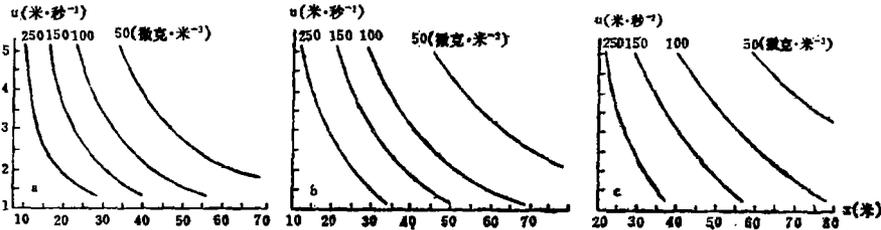


图2 不同稳定度条件下的 NO_x 浓度曲线(微克·米⁻³)

2.3 讨论

2.3.1 关于 NO_x 浓度的超标范围

据本文计算,若取 $\text{TV}=1000$ 辆/小时,则 NO_x 浓度的超标范围如表4所示。由表4得:若风速一定,则超标范围随稳定度增大而扩大。若稳定度一定,则超标范围随风速减小而扩大。例如,若风速是2(米·秒⁻¹),当稳定度从不稳定层结变成稳定层结时,则其超标范围从公路两侧的28.5米以内区域扩大至公路两侧52.5米以内区域。若稳定度是中性,当风速从5(米·秒⁻¹)减小至1.5(米·秒⁻¹)时,则其超标范围从公路两侧的22米以内区域扩大至公路两侧的44米以内区域。

表4 NO_x 浓度的超标范围($\text{TV}=1000$ 辆·小时⁻¹)

x(米) u(米·秒 ⁻¹)	稳定度级		
	不稳定 (A-C级)	中性 (D级)	稳定 (E-F级)
1.5	35	44	61
2	28.5	37	52.5
3	23	29.5	42
4	19.5	24.5	36
5	17.5	22	30.5

2.3.2 NO_x 浓度与稳定度、风速、扩散距离的关系

由表3、图2得:①若稳定度与风速一定,则浓度随x增大而变小。例如在中性层结、风速为3(米·秒⁻¹)时,当x从20米变至50米,则 NO_x 浓度从229.9(微克·米⁻³)变至70.9(微克·米⁻³)。②若稳定度与x值一定,则浓度随风速增大而变小。例如x=40米、稳定层结时,当风速从2(米·秒⁻¹)增大至5(米·秒⁻¹)时,则 NO_x 浓度从196.7(微克·米⁻³)减小至106.8(微克·米⁻³)。③若x与u一定,则浓度随稳定度增加而变大。例如在x=20米、u=1.5(米·秒⁻¹)时,该点的浓度值在不稳定层结时是282.4(微克·米⁻³)、在稳定

*取自“扬子乙烯工程环境影响报告书”大气专题报告, p.35, 扬子石油化工公司, 1984年10月

层结时是440.4(微克·米⁻³)。

2.3.3 关于图2的应用

图2虽是根据TV=1000(辆/小时)的条件绘出的浓度随风速和距离(x)的变化曲线,但用该曲线图可求出当TV与u改变后在任一点(x)的浓度值。据(7)式、(10)式,浓度正比于TV、反比于u。因此,当交通量从(TV)₀变成(TV)、风速从u₀变成u时,可用下式求出任一点(x)的NO_x浓度(c₃)

$$c_3 = c_0 \cdot \frac{u_0}{u} \cdot \frac{(TV)}{(TV)_0} \quad (17)$$

其中(TV)是预计的交通量(辆·小时⁻¹); u是预计的风速; c₃是预测的NO_x浓度。(TV)₀=1000(辆·小时⁻¹); c₀是在x处、风速为u₀时的浓度值,由稳定度、计算点位置(x)及u₀,利用图2可得到c₀值。再将c₀值乘以 $\left(\frac{u_0}{u} \cdot \frac{TV}{1000}\right)$,即得x点在未来条件下的浓度估算值(c₃)。

从图2还可求出当TV=1000(辆·小时⁻¹)时,在同一风速、不同距离(x)处的浓度值,也可求出在同一距离、不同风速时的浓度值。

3 结束语

(1)美国EPA的公路空气污染模式(HIWAY-2)可用来估算我国公路附近的汽车污染,但所得的浓度计算值应作适当修正。宁六公路丁解段的NO_x浓度的修正系数见本文表2。但因各地公路附近的下垫面及景观不一样,故各公路的浓度修正系数可能不一。

(2)对于公路附近的汽车污染来说,空气污染随风速减小和稳定度增大而加重,这与文献〔6〕的结果一致。在交通量为1000辆·小时⁻¹的情况下,宁六公路丁解段在不同层结、不同风速时的NO_x浓度的可能超标范围见表4。随着公路车流量增加超标范围还将扩大。

(3)利用(17)式及图2,可初步估算宁六公路丁解段公路两侧任一点(x)在不同交通量、不同风速时的NO_x浓度值。

由于我们的NO_x浓度的采样时段还不够长,样本数还不够多,因此,本文对模式的验证是初步的。在我国目前仅公布了北京BJ-212和上海SH-760A型汽车的EF值,未公布其他许多车型的EF值的情况下,本文暂用美国的1980年的EF值计算源强,这有可能不完全符合我国实况。由于这些原因,本文对宁六公路丁解段的研究结果,仅供环保及规划部门对公路两侧的设计、规划工作时的参考。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家标准, GB3840-83, 制订地方大气污染物排放标准的技术原则和方法, 北京: 城乡建设环境保护部, 1984: 8-9
- 2 Petersen W B, User's guide for HIWAY-2: A highway air pollution model, U.S.EPA, 1980:

- 1—17, 60—69
- 3 Petersen W B. User's guide for PAL: A Gaussian-plume algorithm for point, area, and line sources, U.S.EPA, 1978; 21—25, 41—76, 84—86
- 4 Petersen W B. User's guide for PAL 2.0: A Gaussian-plume algorithm for point, area, and line sources, U.S.EPA, 1987; 11—23
- 5 火电厂工程环境影响研究编集组. 火电厂工程环境影响研究. 南京大学出版社, 1989; 62—63
- 6 曹文俊等. 南京气象学院学报, 1989; 12(3): 307—314
- 7 Compilation of air pollutant emission factors. Second edition, U.S.EPA, 1973; D.7—1

APPLICATION OF THE HIWAY-2 MODEL IN THE RESEARCH ON THE NANJING-LIUHE HIGHWAY AIR POLLUTION CAUSED BY AUTOMOBILE EMISSION

Cao Wenjun, Zhu Wen, Huang Yan*

(Department of Atmospheric Physics)

Abstract By using the U.S. highway air pollution model(HIWAY-2), the NO_x pollution caused by automobile emission along the Nanjing-Liuhe Highway(Dingjie straight segment) is estimated. The calculated NO_x concentration is compared with that actually measured, resulting in the correction factors of different stability. The NO_x pollution on both sides of the segment is also investigated.

Key words air pollution model, ground air pollution concentration, automobile emission

*A graduate of the NIM in 1989. The authors wish to thank Zhang Jing hong and Mon Hui for their field observations for this study