

- ▶ 1.空气质量指数(AQI)评价模型
- ▶ 3.单污染源空气污染扩散模型(高斯烟羽模型)

## 1.空气质量指数(AQI)评价模型

### (1)总结EPA AQI 和 GB 3095计算过程

### Step1: 选定污染物

国标(GB3095)和美标(EPA AQI)均选定PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>

Step2: 用线性插值公式计算IAQI

对于第  $i$  种污染物, 其浓度为  $C_i$ , 确定其所在浓度区间  $[C_{i,\text{low}}, C_{i,\text{high}}]$  及对应AQI区间  $[I_{i,\text{low}}, I_{i,\text{high}}]$  (国家标准GB 3095和EPA AQI各有不同阈值)。

$$\text{IAQI}_i = \frac{I_{i,\text{high}} - I_{i,\text{low}}}{C_{i,\text{high}} - C_{i,\text{low}}} (C_i - C_{i,\text{low}}) + I_{i,\text{low}}$$

 **Note**

核心假设：单污染物分指数（IAQI）计算中，污染物浓度与健康危害在分段区间内呈线性关系

## HJ 633—2012

表 1 空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值

空气质量分指数 (IAQI)	污染物项目浓度限值									
	二氧化硫 (SO <sub>2</sub> ) 24 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> )	二氧化硫 (SO <sub>2</sub> ) 1 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> ) (1)	二氧化氮 (NO <sub>2</sub> ) 24 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> )	二氧化氮 (NO <sub>2</sub> ) 1 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> ) (1)	颗粒物 (粒径小于等于 10 μm) 24 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> )	一氧化碳 (CO) 24 小时平均/ (mg/m <sup>3</sup> )	一氧化碳 (CO) 1 小时平均/ (mg/m <sup>3</sup> ) (1)	臭氧 (O <sub>3</sub> ) 1 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> )	臭氧 (O <sub>3</sub> ) 8 小时滑动平均/ (μg/m <sup>3</sup> )	颗粒物 (粒径小于等于 2.5 μm) 24 小时平均/ (μg/m <sup>3</sup> )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	50	150	40	100	50	2	5	160	100	35
100	150	500	80	200	150	4	10	200	160	75
150	475	650	180	700	250	14	35	300	215	115
200	800	800	280	1 200	350	24	60	400	265	150
300	1 600	(2)	565	2 340	420	36	90	800	800	250
400	2 100	(2)	750	3 090	500	48	120	1 000	(3)	350
500	2 620	(2)	940	3 840	600	60	150	1 200	(3)	500

说明：

(1) 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)、二氧化氮 (NO<sub>2</sub>) 和一氧化碳 (CO) 的 1 小时平均浓度限值仅用于实时报，在日报中需使用相应污染物的 24 小时平均浓度限值。

(2) 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 1 小时平均浓度值高于 800 μg/m<sup>3</sup> 的，不再进行其空气质量分指数计算，二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 空气质量分指数按 24 小时平均浓度计算的分指数报告。

(3) 臭氧 (O<sub>3</sub>) 8 小时平均浓度值高于 800 μg/m<sup>3</sup> 的，不再进行其空气质量分指数计算，臭氧 (O<sub>3</sub>) 空气质量分指数按 1 小时平均浓度计算的分指数报告。

**Table 6. Breakpoints for the AQI**

These Breakpoints...							...equal this AQI	...and this category
O <sub>3</sub> (ppm) 8-hour	O <sub>3</sub> (ppm) 1-hour <sup>1</sup>	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24-hour	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24-hour	CO (ppm) 8-hour	SO <sub>2</sub> (ppb) 1-hour	NO <sub>2</sub> (ppb) 1-hour	AQI	
0.000 - 0.054	-	0.0 – 9.0	0 - 54	0.0 - 4.4	0 - 35	0 - 53	0 - 50	Good
0.055 - 0.070	-	9.1 – 35.4	55 - 154	4.5 - 9.4	36 - 75	54 - 100	51 - 100	Moderate
0.071 - 0.085	0.125 - 0.164	35.5 – 55.4	155 - 254	9.5 - 12.4	76 - 185	101 - 360	101 - 150	Unhealthy for Sensitive Groups
0.086 - 0.105	0.165 - 0.204	(55.5 - 125.4) <sup>3</sup>	255 - 354	12.5 - 15.4	<sup>3</sup> 186 - 304	361 - 649	151 - 200	Unhealthy
0.106 - 0.200	0.205 - 0.404	(125.5 - 225.4) <sup>3</sup>	355 - 424	15.5 - 30.4	<sup>3</sup> 305 - 604)	650 - 1249	201 - 300	Very unhealthy
0.201-( <sup>2</sup> )	0.405+	225.5+	425+	30.5+	<sup>3</sup> 605+	1250+	301+	Hazardous <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Areas are generally required to report the AQI based on 8-hour O<sub>3</sub> values. However, there are a small number of areas where an AQI based on 1-hour O<sub>3</sub> values would be more precautionary. In these cases, in addition to calculating the 8-hour O<sub>3</sub> index value, the 1-hour O<sub>3</sub> value may be calculated, and the maximum of the two values reported.

<sup>2</sup> 8-hour O<sub>3</sub> values do not define higher AQI values (≥ 301). AQI values of 301 or higher are calculated with 1-hour O<sub>3</sub> concentrations.

<sup>3</sup> 1-hr SO<sub>2</sub> concentrations do not define higher AQI values (≥200). AQI values of 200 or greater are calculated with 24-hour SO<sub>2</sub> concentration.

<sup>4</sup> AQI values between breakpoints are calculated using equation 1 to this appendix. For AQI values in the hazardous category, AQI values greater than 500 should be calculated using equation 1 and the concentration specified for the AQI value of 500. The AQI value of 500 are as follows: O<sub>3</sub> 1-hour—0.604 ppm; PM<sub>2.5</sub> 24-hour—325.4 µg/m<sup>3</sup>; PM<sub>10</sub> 24-hour—604 µg/m<sup>3</sup>; CO ppm—50.4 ppm; SO<sub>2</sub> 1-hour—1004 ppb; and NO<sub>2</sub> 1-hour—2049 ppb.

### Step3: 计算AQI

国标和美标均采用

$$AQI = max(IAQI_i)$$

```
\begin{table}[htbp]
\centering
\caption{AQI 标准对照表}
\label{tab:aqi_standard}
\begin{tabular}{|c|c|c|}
\hline
\textbf{AQI范围} & \textbf{EPA描述} & \textbf{GB 3095描述} \\
\hline
0-50 & Good & 优 \\
\hline
51-100 & Moderate & 良 \\
\hline
101-150 & Unhealthy for Sensitive Groups & 轻度污染 \\
\hline
151-200 & Unhealthy & 中度污染 \\
\hline
201-300 & Very Unhealthy & 重度污染 \\
\hline
301+ & Hazardous & 严重污染 \\
\hline
\end{tabular}
\end{table}
```

AQI范围	EPA描述	GB 3095描述
0-50	Good	优
51-100	Moderate	良
101-150	Unhealthy for Sensitive Groups	轻度污染
151-200	Unhealthy	中度污染
201-300	Very Unhealthy	重度污染
301+	Hazardous	严重污染

## (2)创新与改进

GB 3095和EPA AQI均直接采用 $max(IAQI_i)$ 作为最终AQI，网上查阅江浙沪地区AQI，发现基本为 $PM_{2.5}$ 的IAQI，不能充分反映污染的程度。因此，我们尝试用层次分析法AHP优化计算，为便于区分，我们将这种做法计算所得的空气质量指数称为EAQI

### AHP

1. 原理
- 通过构建污染物重要性判断比较矩阵，将专家知识转化为定量权重。进而综合反映各污染物对AQI的影响
2. 构造判断矩阵
- 专家对污染物两两比较重要性（1-9标度法）

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同样的重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者极其重要
9	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
1~9 的倒数	表示相应两因素交换次序比较的重要性

```
\begin{table}[htbp]
\centering
\caption{AHP 判断矩阵标度含义}
\label{tab:ahp_scale}
\begin{tabular}{|c|p{10cm}|}
\hline
\textbf{标度} & \textbf{含义} \\
\hline
1 & 表示两个元素相比，具有同样的重要性 \\
\hline
3 & 表示两个元素相比，前者比后者稍重要 \\
\hline
5 & 表示两个元素相比，前者比后者明显重要 \\
\hline
7 & 表示两个元素相比，前者比后者极其重要 \\
\hline
9 & 表示两个元素相比，前者比后者强烈重要 \\
\hline
2,4,6,8 & 表示上述相邻判断的中间值 \\
\hline
1~9 的倒数 & 表示相应两因素交换次序比较的重要性 \\
\hline
\end{tabular}
\end{table}
```

查阅资料，结合江浙沪地区实际情况，得出比较判断矩阵如下表

	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
SO <sub>2</sub>	1	4	1/2	1/3	1/3	1/2
CO	1/4	1	1/3	1/4	1/4	1/3
NO <sub>2</sub>	2	3	1	1/2	1/2	1
O <sub>3</sub>	3	4	2	1	1	2
PM <sub>2.5</sub>	3	4	2	1	1	2
PM <sub>10</sub>	2	3	1	1/2	1/2	1

```
\begin{table}[htbp]
\centering
\caption{比较判断矩阵}
\label{tab:aqi_matrix}
\begin{tabular}{|c|cccccc}
\hline
& SO\textsubscript{2} & CO & NO\textsubscript{2} & O\textsubscript{3} & PM\textsubscript{2.5} & PM\textsubscript{10} \\
\hline
\textbf{SO\textsubscript{2}} & 1 & 4 & $\frac{1}{2}$ & $\frac{1}{3}$ & $\frac{1}{3}$ & $\frac{1}{2}$ \\
\textbf{CO} & $\frac{1}{4}$ & 1 & $\frac{1}{3}$ & $\frac{1}{4}$ & $\frac{1}{4}$ & $\frac{1}{3}$ \\
\textbf{NO\textsubscript{2}} & 2 & 3 & 1 & $\frac{1}{2}$ & $\frac{1}{2}$ & 1 \\
\textbf{O\textsubscript{3}} & 3 & 4 & 2 & 1 & 1 & 2 \\
\textbf{PM\textsubscript{2.5}} & 3 & 4 & 2 & 1 & 1 & 2 \\
\textbf{PM\textsubscript{10}} & 2 & 3 & 1 & $\frac{1}{2}$ & $\frac{1}{2}$ & 1 \\
\hline
\end{tabular}
\end{table}
```

3. 计算权重向量

- 求矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $W = [w_1, w_2, ..., w_n]^T$
  - 归一化:  $w_i = \frac{w_i}{\sum w_i}$
- 计算得 $\lambda_{\max} = 6.154, W = [0.684, 0.335, 1, 1.780, 1.780, 1]^T$ ,归一化为 $[0.104, 0.051, 0.152, 0.271, 0.271, 0.152]^T$

4. 一致性检验

- 计算一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$
  - 查随机一致性指标  $RI$
  - 要求  $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$  (否则调整判断矩阵)
- 计算得 $CI = 0.038$ , 查表得 $RI(6) = 1.24$ , 则 $CR = 0.0306 < 0.1$
- 通过一致性检验

5. 得出权重 $w_i$

SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
0.104	0.051	0.152	0.271	0.271	0.152

优化结果

1.  $EAQI = \max(w_i * IAQI_i)$ ,  $IAQI$ 加权后取最大值
2. 重新划定EAQI阈值如下：

EAQI范围	EPA描述	GB 3095描述
0-13.5	Good	优
13.5-27	Moderate	良
27-40.5	Unhealthy for Sensitive Groups	轻度污染
40.5-54	Unhealthy	中度污染
54-81	Very Unhealthy	重度污染
81+	Hazardous	严重污染

3. 优点：可结合实际情况（季节、政策、最新研究等）动态调整判断矩阵，进而优化各种污染物的权重，使AQI能充分反映空气污染情况.

3.单污染源空气污染扩散模型(高斯烟羽模型)

核心假设

- (1) 污染源(本题即为烟囱)均匀稳定连续排放污染物
- (2) 区域风向风速稳定
- (3) 污染物在水平和垂直方向上的浓度分布呈正态分布
- (4) 污染物在输送过程中质量守恒

大气点源污染物的实际扩散中，由于大气污染物的密度很小，地面对其有很大的反射作用。为简化问题，以下认为地面对污染物的反射系数为1，因此污染物没有耗散，满足(4)

核心方程

以污染点源在地面的投影为坐标原点， $x$  轴沿风向， $y, z$  分别为风向切向、地表水平面垂向，建立高斯模型坐标系

$C(x, y, z, H)$  :位置  $(x, y, z)$  的污染物浓度( $mg/m^3$ ); ( $H$ 为参数)

$Q$ : 污染物质量排放率( $mg/s$ );

$u$ : 风速( $m/s$ );

$H$ : 污染源有效高度( $m$ );

$\sigma_y(x), \sigma_z(x)$ : 横向扩散参数和垂直扩散参数( $m$ ),随下风距离 $x$ 而变化

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)\right]$$

问题求解

1.初步求解

- (1) 高架点源地面浓度公式，令 $z = 0$ ，得

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2(x)} + \frac{H^2}{\sigma_z^2(x)}\right)\right]$$

- (2) 在(1)的基础上，进一步令 $y = 0$ ,可得下风轴线(沿 $x$ 轴方向)上的浓度分布公式

$$C(x,0,0,H)=\frac{Q}{\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(x)})$$

(3) 扩散参数经验公式  
用 *Pasquill–Gifford* 曲线拟合表达式 (单位: m):

$$\sigma_y(x)=\gamma_1 x^{\alpha_1}, \quad \sigma_z(x)=\gamma_2 x^{\alpha_2},$$

其中  $(\gamma_1,\alpha_1,\gamma_2,\alpha_2)$  依大气稳定度类别 A-F 选取。  
中国国家标准GB/T 3840-91中对大气稳定度划分的规定如下:

表 B2 大气稳定度的等级

地面风速 <sup>1)</sup> m·s <sup>-1</sup>	太 阳 辐 射 等 级					
	+3	+2	+1	0	-1	-2
≤1.9	A	A~B	B	D	E	F
2~2.9	A~B	B	C	D	E	F
3~4.9	B	B~C	C	D	D	E
5~5.9	C	C~D	D	D	D	D
≥6	D	D	D	D	D	D

注: 1) 地面风速(m·s<sup>-1</sup>)系指离地面10 m 高度处10分钟平均风速,如使用气象台(站)资料,其观测规则与中央气象局编定的《地面气象观测规范》第八章相同。

表 D1 横向扩散参数幂函数表达式系数值  $\sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1}$ 

(取样时间0.5 h)

稳定度	$\alpha_1$	$\gamma_1$	下风距离, m
A	0.901 074	0.425 809	0~1 000
	0.850 934	0.602 052	>1 000
B	0.914 370	0.281 846	0~1 000
	0.865 014	0.396 353	>1 000
B—C	0.919 325	0.229 500	0~1 000
	0.875 086	0.314 238	>1 000
C	0.924 279	0.177 154	1~1 000
	0.885 157	0.232 123	>1 000
C—D	0.926 849	0.143 940	1~1 000
	0.886 940	0.189 396	>1 000
D	0.929 418	0.110 726	1~1 000
	0.888 723	0.146 669	>1 000
D—E	0.925 118	0.098 563 1	1~1 000
	0.892 794	0.124 308	>1 000
E	0.920 818	0.086 400 1	1~1 000
	0.896 864	0.101 947	>1 000
F	0.929 418	0.055 363 4	0~1 000
	0.888 723	0.073 334 8	>1 000

表 D2 垂直扩散参数幂函数表达式系数值  $\sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2}$ 

稳定度	$\alpha_2$	$\gamma_2$	下风距离, m
A	1.121 54	0.079 990 4	0~300
	1.513 60	0.008 517 71	300~500
	2.108 81	0.000 211 545	>500
B	0.961 435	0.127 190	0~500
	1.093 56	0.057 025	>500
B—C	0.941 015	0.114 682	0~500
	1.007 70	0.075 718 2	>500
C	0.917 595	0.106 803	>0
C—D	0.838 628	0.126 152	0~2 000
	0.756 410	0.235 667	2 000~10 000
	0.815 575	0.136 659	>10 000

续表 D2

稳定度	$\alpha_z$	$\gamma_z$	下风距离, m
D	0.826 212	0.104 634	1~1 000
	0.632 023	0.400 167	1 000~10 000
	0.555 36	0.810 763	>10 000
D—E	0.776 864	0.111 771	0~2 000
	0.572 347	0.528 992 2	2 000~10 000
	0.499 149	1.038 10	>10 000
E	0.788 370	0.092 752 9	0~1 000
	0.565 188	0.433 384	1 000~10 000
	0.414 743	1.732 41	>10 000
F	0.784 400	0.062 076 5	0~1 000
	0.525 969	0.370 015	1 000~10 000
	0.322 659	2.406 91	>10 000

分析查得参数应用于高斯烟羽模型

2.模型修正

(1)风速较小时修正

以上分析在风速 $u > 1.5m/s$ 时能得到较好的结果,但在风速 $u < 1.5m/s$ 时没有明显的风向, 而且烟囱出风口处的风速可能大于 $u$ , 与模型的假设不符.

此时有经验公式:

$$C_r = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{q}{2\pi ur\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)$$

其中 $C_r$ 表示距污染点源距离为 $r$ (单位:  $m$ )处的污染物浓度

(2)烟气抬升高度修正

烟囱排出的烟气一开始主要受到热力和动力作用上的抬升, 然后才会以扩散作用为主. 烟气到达一定高度后趋于稳定, 此高度为烟气抬升高度, 用 $\Delta H$ 表示.

- 有风,中性或不稳定时  
① 当烟气热释放率  $Q_h \geq 2100\text{ KJ/s}$  且  $\Delta T \geq 35\text{K}$  时:

$$\Delta H = n_0 Q_h^{n_1} H^{n_2} / u$$

$\Delta H$ : 烟气抬升高度 (m)  
 $n_0$ : 烟气热状况及地表状况系数  
 $n_1$ : 烟气热释放率指数  
 $n_2$ : 排气筒烟气高度指数

- ② 当  $1700\text{KJ/s} \leq Q_h \leq 2100\text{KJ/s}$  且  $\Delta T \geq 35\text{K}$  时:

$$\Delta H = \Delta H_1 + (\Delta H_2 - \Delta H_1) \frac{Q_h - 1700}{400}$$

其中:

$$\Delta H_1 = \frac{2(1.5V_s D + 0.01Q_h)}{U} - \frac{0.048(Q_h - 1700)}{U}$$

$V_s$ : 烟囱出口处烟气排放速度 (m/s)  
 $D$ : 烟囱出口直径 (m)  
 $\Delta H_2$ : 按①中公式计算



③当  $Q_h \leq 1700\text{KJ/s}$  或  $\Delta T < 35\text{K}$  时:

$$\Delta H = \frac{2(1.5V_s D + 0.01Q_h)}{U}$$

- 有风且稳定

$$\Delta H = Q_h^{1/3} \left( \frac{dT_a}{dZ} + 0.0098 \right)^{-1/3} U^{-1/3}$$

其中  $\frac{dT_a}{dZ}$ : 烟囱几何高度以上的大气温度梯度 (K/m)

- 静风和小风时

$$\Delta H = 5.50Q_h^{1/4} \left( \frac{dT_a}{dZ} + 0.0098 \right)^{-3/8}$$

- 其中  $\frac{dT_a}{dZ}$  取值宜小于  $0.01\text{K/m}$
- 当  $-0.0098 < \frac{dT_a}{dZ} < 0.01\text{K/m}$  时, 取  $\frac{dT_a}{dZ} = 0.01\text{K/m}$
- 当  $\frac{dT_a}{dZ} \leq -0.0098\text{K/m}$ ,  $\Delta H$  按①中计算