

大气稳定度参数的计算方法及几种稳定度分类方法的对比研究

曹文俊 朱 汶*

(南京气象学院, 大气物理系, 南京)

提要 本文对总体理查逊数 (BR_L) 法、理查逊数 (R_L) 法、莫宁-奥布霍夫长度 (L) 法、城市稳定度分类法 (L_D 法)、修订的帕斯奎尔法 ($P \cdot S$ 法)、温差法 ($\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 法) 等大气稳定度分类法作了对比研究。研究表明, 最好用莫宁-奥布霍夫长度法和理查逊数法判断稳定度。用总体理查逊数法划分稳定度也较好、并比较实用。

关键词: 总体理查逊数; 理查逊数; 城市稳定度分类法。

气体污染物离开污染源后, 其浓度分布决定于大气的扩散能力, 后者又决定于大气的扩散稳定度 (简称稳定度)。长期以来很多学者进行了如何划分大气稳定度问题的研究。Pasquill 于 1961 年首次提出了用常规观测的风、云、日射状况等资料将大气稳定度分为 A 至 F 6 级^[1], 常简称为 P_L 分类法。Turner 后来改进了 Pasquill 决定辐射强度等级的方法^[2], P_L 法就改进为 $P-T$ 法。我国环境保护部门根据我国常规观测中一般只进行总云量、低云量观测的特点, 对 $P-T$ 法中的云量栏作了修改, 提出了 $P \cdot S$ 法^[3]。有的只根据两个高度的温度差而决定大气稳定度, 称为温差法 ($\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 法)^[4]。还有人在考虑了大气湍流的产生可由动力与热力的原因后, 提出了按理查逊数 (R_L)、莫宁-奥布霍夫长度 (L)、总体理查逊数 BR_L (Bulk Richardson Number) 的数值大小进行稳定度分类^[5]。D. Golder 于 1972 年提出了用地面粗糙度 (z_0) 与 $\frac{1}{L}$ 来判断大气稳定度^[6]。F. L. Ludwig 等于 1976 年提出了城市稳定度分类法 (L_D)^[7]。迄今为止, 虽然人们对大气稳定度已提出了几十种分类方法, 对各种稳定度分类方法之间的可比性也进行了研究^[8-10], 但仍未完全解决这个问题。

本文对大气稳定度的 $P \cdot S$ 分类法、 L_D 分类法、 R_L 分类法、 L 分类法、 BR_L 分类法、 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 分类法作

了对比研究。所用的资料是 1988 年 4 月 30 日至 5 月 18 日, 从南京气象学院 50m 气象塔自动资料采集处理系统所测得的资料及同步的地面观测资料。本文使用了气象塔 4 层 (3.7m、7.9m、15.6m、50m) 的温、风资料 (共 174 组)。风速测量采用光电式风速感应器, 测量精度达 0.1m/s; 温度感应元件为铂电阻, 测温精度优于 0.1 度。

南京气象学院气象塔位于城郊。在本文中地面粗糙度 (z_0) 取 0.4m**。

一、大气稳定度分类法及某些稳定度参数的计算公式

(一) 理查逊数 (R_L) 法

R_L 值用下式计算^[11]:

$$R_L = \frac{g}{T} \left[\frac{\Delta T}{\sqrt{z_1 \cdot z_2} \left(\ln \frac{z_2}{z_1} \right)^{+ \gamma_0}} \right] \times \left[\frac{\sqrt{z_1 \cdot z_2} \cdot \ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right)}{\Delta u} \right]^2 \quad (1)$$

式中, $\bar{T}$ 是气层的平均绝对温度; g 是重力加速度

收稿日期: 1988 年 9 月 13 日

* 周颖 (研究生) 参加了部分的计算与统计工作。

** 见扬子乙烯工程环境影响报告书 (大气专题报告附件一, p. 68), 1984. 10.

(m/s^2), ΔT 与 Δu 是两个高度上的温度差与风速差, γ_0 是干绝热减温率, z 代表高度(m)。由(1)式计算得的 R_i 值, 代表几何平均高度($\bar{z} = \sqrt{z_1 \cdot z_2}$)处的 R_i 值。本文中取 $z_1 = 3.7\text{m}$, $z_2 = 15.6\text{m}$, 故由(1)式求得的是 7.9m 处的 R_i 值。

本文用表1^[12]的公式, 先由粗糙度(z_0)求出 L , 再由公式(2)及(3)^[13], 可得 R_i 的划分稳定度级的具体标准(见表2)。

$$\begin{cases} \text{不稳定} \left(\frac{z}{L} < 0 \right): & R_i = \frac{z}{L} & (2) \\ \text{稳定} \left(\frac{z}{L} > 0 \right): & R_i = \frac{z}{L} (1 - \beta R_i) & (3) \end{cases}$$

式中 β 变化于 $4.7 \rightarrow 7.0$ 。本文计算时取 $\beta = 5$, 这与Dyer (1974)的取值是一致的。用公式(2)、(3)计算时, 取 $z = 7.9\text{m}$ 。

(二) 总体理查逊数 (BR_i) 法

$\frac{1}{L}$ 与 z_0 的关系 表 1

P-G稳定度级*	$\frac{1}{L}$ 与 z_0 的关系式
A	$\frac{1}{L} = 0.05[\lg_{10}(z_0) - 1]$
B	$\frac{1}{L} = 0.026[\lg_{10}(z_0) - 1]$
C	$\frac{1}{L} = 0.015[\lg_{10}(z_0) - 1]$
D	$\frac{1}{L} = 0.004[\lg_{10}(z_0) - 1]$
E	$\frac{1}{L} = -0.009[\lg_{10}(z_0) - 1]$
F	$\frac{1}{L} = -0.023[\lg_{10}(z_0) - 1]$
G	$\frac{1}{L} = -0.038[\lg_{10}(z_0) - 1]$

* P-G是Pasquill-Gifford的缩写

在(1)式中, 有 Δu , 故风速测量中若有较小误差, 也可引起 R_i 的较大误差。实际工作中有时用总体理查逊数(BR_i)代替 R_i 。 BR_i 的定义式为:

$$BR_i = \frac{g}{T} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \cdot \frac{\bar{z}}{u^2} \quad (4)$$

式中, $\bar{z}$ 是气层顶(15.6m)与气层底(3.7m)高度的几何平均值(7.9m), u 是该两个高度上风速的几何平均值, $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 是该两高度间的位温变化率。

由(4)式可求得 $\bar{z} = 7.9\text{m}$ 处的 BR_i 值。

决定 BR_i 值对应于Pasquill分类中A→F各级的数值范围的方法是: 用表1及公式(2)、(3)求出 R_i , 再由 z_0 及 R_i 查阅文献[6]的计算图, 就可得到一组与Pasquill分类法相对应的 BR_i 值(见表2)。

(三) 莫宁-奥布霍夫长度 (L) 法

L 值可由 R_i 或 BR_i 求得。由 R_i 求 L 的计算式是^[6]:

$$\begin{cases} R_i < 0 \text{ (不稳定)}: & L = \frac{z}{R_i} & (5) \\ R_i > 0 \text{ (稳定)}: & L = z(1 - 5R_i)/R_i & (6) \end{cases}$$

据文献[6], R_i 与 BR_i 有以下关系:

$$R_i = (BR_i) \cdot u^2 / \left[\frac{\partial u}{\partial (\ln z)} \right]^2 \quad (7)$$

由(5)、(6)、(7)式可得 L 的另一算法:

($BR_i < 0$ (不稳定):

$$L = \frac{z}{u^2 (BR_i)} \times \left[\frac{\partial u}{\partial (\ln z)} \right]^2 \quad (8)$$

($BR_i > 0$ (稳定):

$$L = z \left\{ 1 - \frac{5u^2 (BR_i)}{\left[\frac{\partial u}{\partial (\ln z)} \right]^2} \right\} \times \frac{\left[\frac{\partial u}{\partial (\ln z)} \right]^2}{u^2 (BR_i)} \quad (9)$$

BR_i 法、 R_i 法、 L 法的稳定度分类标准*

表 2

稳定度级	A	B	C	D	E	F
BR_i 法	$BR_i < -0.028$	$-0.028 \leq BR_i < -0.018$	$-0.018 \leq BR_i < -0.0091$	$-0.0091 \leq BR_i < 0.0052$	$0.0052 \leq BR_i < 0.04$	$0.04 \leq BR_i$
R_i 法	$R_i < -0.4197$	$-0.4197 \leq R_i < -0.2264$	$-0.2264 \leq R_i < -0.1049$	$-0.1049 \leq R_i < 0.0276$	$0.0276 \leq R_i < 0.0938$	$0.0938 \leq R_i$
L 法	-14.3	-27.5	-47.7	-178.8	79.5	31.3

* 用于3.7—15.6m的气层, $\bar{z} = 7.9\text{m}$, $z_0 = 0.4\text{m}$

城市稳定度分类法

表 3

地面风速 (m/s)	白 天 $h_0 > 15^\circ$			不透光云量 $\geq \frac{9}{10}$ (日、夜), 或 $h_0 \leq 15^\circ$	夜 间 云 量	
	强 日 照	中 等 日 照	弱 日 照		$\geq \frac{5}{10}$	$\leq \frac{4}{10}$
<2	A	B	B	D	E	E
2~3	A	B	C	D	D	E
3~5	B	C	C	D	D	D
5~6	C	C	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

用(5)、(6)、(8)、(9)式计算时,取 $z = 7.9\text{m}$ 。用的是3.7m与15.6m两个高度的温、风资料,求得的 L 代表7.9m处的值。

利用表1的公式,可得到对应于Pasquill分类 $A \rightarrow F$ 各级的 L 值的范围(见表2)。

(四) 城市稳定度分类法 (L_D 法)

Ludwig等提出的城市(包括城郊)稳定度分类法的要点是:先由云量(n)和太阳高度角(h_0)求日照参数(ϕ)

$$\phi = (1 - 0.5n) \cdot \sin h_0 \quad (10)$$

式中, $0 \leq \phi \leq 1$ 。 ϕ 的大小可代表日照强度,分为弱日照($\phi < 0.3$)、中等日照($0.3 \leq \phi \leq 0.55$)、强日照($\phi > 0.55$)三种。求得 ϕ 后,再根据地面风速、 h_0 、 n 、 ϕ 按表3就可决定稳定度级别。其中 h_0 可按文献[3]的公式计算而得。

(五) 修订的Pasquill分类法 ($P \cdot S$ 法)

$P \cdot S$ 法是我国广泛使用的稳定度分类法,适用于平原。由日照、云量、地面风速就可决定稳定度。

(六) 温差法 ($\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 法)

空气的垂直运动与温度的垂直分布($\frac{\Delta T}{\Delta z}$)有关,故 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 可用来判断稳定度。本文根据气象塔的第5层(50m)与地面温度的资料计算 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$,并以中国科学院大气所的 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 的稳定度标准来判断稳定度。(具体分类标准见文献[10])。

二、计算结果和讨论

表4是各种稳定度分类法的计算结果。其中

R_i 、 R'_i 的计算式是(1)式, BR_i 、 BR'_i 是按(4)式计算的, L_B 、 L'_B 是由(8)、(9)式计算的, L_i 、 L'_i 是由(1)、(5)、(6)式计算的。 R_i 、 BR_i 、 L_B (L_i)的稳定度分级标准分别是表2的 R_i 值、 BR_i 值、 L 值, R'_i 、 BR'_i 、 L'_B (L'_i)的稳定度分级标准分别是文献[10]提供的2~8m的 R_i 值、 BR_i 值和 L 值。本文还计算了 BR_i 对 BR'_i 、 R_i 对 R'_i 、 L_B 对 L'_B 、 L_i 对 L'_i 的相关系数(见表4)。其计算方法是:对同一组气象资料,分别按 BR_i 、 BR'_i 、 R_i 、 R'_i 、 L_B 、 L'_B 、 L_i 、 L'_i 的稳定度分级标准进行稳定度分类。因 BR'_i 、 R'_i 、 L'_B (L'_i)的分级标准是按文献[10]的实测资料决定的,故本文取它们作为划分稳定度的标准。再以1、2、3、4、5、6分别代表稳定度的级别A、B、C、D、E、F,就可算得表4中的相关系数。因表4中的各相关系数均较高(≥ 0.89),这表明表2的 BR_i 、 R_i 、 L 等的稳定度分级标准是可用的。

为了比较上述各种稳定度分类法的相对优劣,本文用表4的计算方法,计算了任一稳定度分类法与其余稳定度分类法(除 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 以外)的相关系数之平均值($\bar{R}$),见表5。

表6列出了 L_D - $P \cdot S$ 法、 L_D - BR_i 法、 L_D - R_i 法、 BR_i - L_i 法、 R_i - L_i 法等稳定度分类法对同一时刻稳定度分类的统计结果。由表5、表6分析得:

(一) L_D 法、 BR_i 法、 L 法(L_B 与 L_i)、 R_i 法和 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 分类法的稳定度A级的值都大于 $P \cdot S$ 法的A级值。由于本文用的是城郊资料,但 $P \cdot S$ 法适用于平原,把 $P \cdot S$ 法用于城郊时必会出现A级稳定度偏少。

(二) L_D 与 $P \cdot S$ 法相比, L_D 法的不稳定类(A、B、C级)多于 $P \cdot S$ 法的不稳定类(表6)。若将 $P \cdot S$ 法的分类结果平均向不稳定方向提半级

各种稳定度分类方法的计算结果

表 4

分 类 方 法			稳 定 度 等 级						相关系数 (R)
			A	B	C	D	E	F	
			频 数						
BR _i	BR _i	N* %	31 17.8	19 10.9	24 13.8	69 39.7	22 12.6	9 5.2	0.92
	BR _{i'}	N %	9 5.2	46 26.4	38 16.1	73 42.0	17 9.8	1 0.6	
R _i	R _i	N %	21 12.1	12 6.9	17 9.8	77 44.3	19 10.9	28 16.1	0.89
	R _{i'}	N %	9 5.2	20 11.5	37 21.3	79 45.4	9 5.2	20 11.5	
L	L _R	N %	20 11.5	23 13.2	18 10.3	103 59.2	8 4.6	2 1.2	0.89
	L _{R'}	N %	4 2.3	9 5.2	34 19.5	124 71.3	2 1.2	1 0.6	
	L _i	N %	18 10.3	12 6.9	8 4.6	104 59.8	7 4.0	25 14.4	0.93
	L _{i'}	N %	3 1.7	7 4.0	21 12.1	115 66.1	7 4.0	21 12.1	
P·S法		N %	2 1.1	46 26.4	28 16.1	74 42.5	13 7.5	11 6.3	—
L _D 法		N %	29 16.7	40 22.9	13 7.5	77 44.3	15 8.6	0 0.0	
ΔT/Δz法		N %	52 30.0	13 7.5	7 4.0	35 20.2	29 16.7	38 21.8	

* N是各级稳定度的样本数。

(其中D级不提, F级提1级), 则L_D法与P·S法的分类结果大致相同。L_D与P·S法的相关系数达0.87, L_D(或P·S法)对其他分类法的相关系数低于0.6, L_D与其它稳定度分类法(除 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 外)的平均相关系数略高于P·S法的值(表5)。L_D法的不稳定类多于R_i法(或略多于BR_i法)的不稳定类, L_D法的稳定类(E、F级)少于R_i法(或略少于BR_i法)的稳定类, 但它们的中性类是相近的(表6)。

(三) R_i与L_i法的相关系数最高(0.95)。这表明在具有两个高度的准确风、温度测值的情况下, 用R_i、L_i法判断稳定度较好。表6表明, R_i法

的不稳定类和稳定类是多于L_i法的相应类, R_i法的中性类明显少于L_i法的中性类。

(四) BR_i与L_i法的相关系数达0.73, 这表明在测风资料的精度较低时, 可应用BR_i法判断稳定度。BR_i与其它稳定度分类法(除 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 外)的相关系数平均值高于L_D法、P·S法的平均值(表5)。从表6看出, BR_i法的不稳定类多于L_i法的不稳定类, BR_i法的中性类少于L_i法的中性类, 两者的稳定类是差不多的。

(五) 本文的 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 分类法与其它分类法相比

有很大差异, 这是否与温、风探测高度不同有关还需作研究。但文献[10]等指出, 温差法在不稳定时

各种稳定度分类方法之间的相关系数

表 5

分 类 方 法	分 类 方 法						
	$P.S$	R_i	BR_i	L_i	L_D	L_B	$\Delta T/\Delta z$
$P.S$	—	0.56	0.51	0.50	0.87	0.24	-0.31
R_i	0.56	—	0.59	0.95	0.56	0.59	-0.20
BR_i	0.51	0.59	—	0.73	0.52	0.39	-0.20
L_i	0.50	0.95	0.73	—	0.49	0.60	-0.21
L_D	0.87	0.56	0.52	0.49	—	0.29	-0.31
L_B	0.24	0.59	0.39	0.60	0.29	—	-0.21
$\Delta T/\Delta z$	-0.31	-0.20	-0.20	-0.21	-0.31	-0.21	—
$\bar{R}$ (相关系数平均值)	0.53	0.73	0.60	0.73	0.54	0.47	-0.24

几种稳定度分类法对同一时刻稳定度分类的统计值

表 6

次 数 L_D 法	BR_i 法						次 数 $P.S$ 法	L_D 法						次 数 R_i 法	L_i 法					
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
A	15	5	7	2	1	—	A	2	—	—	—	—	—	A	19	3	—	—	—	—
B	8	5	7	16	2	1	B	24	21	2	—	—	—	B	—	10	3	—	—	—
C	2	—	2	9	—	—	C	1	17	7	3	—	—	C	—	—	5	12	—	—
D	5	9	7	40	13	2	D	2	2	3	66	—	—	D	—	—	—	77	—	—
E	—	1	1	2	5	6	E	—	—	—	7	5	—	E	—	—	—	16	3	—
F	—	—	—	—	—	—	F	—	—	—	—	10	—	F	—	—	—	—	3	26

次 数 L_D 法	R_i 法						次 数 BR_i 法	L_i 法					
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
A	10	7	8	2	—	2	A	12	4	3	12	—	—
B	4	3	7	21	—	3	B	5	4	1	8	—	—
C	2	—	1	8	3	—	C	2	4	4	14	—	—
D	5	2	1	43	11	14	D	—	—	—	68	2	4
E	—	—	—	2	5	8	E	—	—	—	5	5	11
F	—	—	—	—	—	—	F	—	—	—	—	—	9

是不能当作稳定度指标的。故需再研究 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 法与其它稳定度分类法的关系。

(六) 从理论上, 本文的 6 种稳定度分类法分三类: $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 法只考虑了热力因子, L_D 与 $P \cdot S$ 是根据地面常规观测资料进行稳定度分类的, BR' 法、 R_i 法、 L 法考虑了热力因子和动力因子。由于这三类稳定度分类法的依据不同, 故很难用不同的分类法而得出相同的稳定度分级。表 5 表明, 相同类的稳定度分类法 (如 BR' 与 R_i 、 L_i 法; L_D 与 $P \cdot S$ 法) 之间的相关系数较好, 但不同类的稳定度分类法之间的相关系数都较差。故不同类的稳定度分类法之间的可比性较差。

三、结 语

(一) 用 R_i 法判断稳定度时, (1) 式是计算 R_i 的实用式。

(二) 用 L 法判断稳定度时, 可用 (1)、(5)、(6) 式计算 L 。划分稳定度的标准可采用表 1 的计算值。

(三) L_D 法、 BR' 法、 R_i 法、 L 法、 $P \cdot S$ 法、 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 法等稳定度分类法的分类结果很难一致。依据相同的稳定度分类法之间的相关系数一般较好, 依据不同的稳定度分类法之间的相关系数一般较差。

(四) L 法、 R_i 法适用于两个高度都有准确的温、风资料。若风资料的精度欠佳, 用 BR' 法判断稳定度较好。

(五) L_D 法比 $P \cdot S$ 法多考虑了城市粗糙度等的影响, 用 L_D 法判断城市 (城郊) 稳定度优于 $P \cdot S$ 法。若将 $P \cdot S$ 法的稳定度分类结果向不稳定方向作适当提级 (本文平均提半级), 则 L_D 法与 $P \cdot S$ 法的分类结果能趋于基本相同。

(六) 依据不同的稳定度分类法之间的可比性较差, 有待于寻找稳定度的其它分类法。

参 考 文 献

- [1] Pasquill, F., *Meteo. Mag.*, 90, 33 (1961).
- [2] Turner, D.B., *J. Appl. Meteo.*, 3(1), 83(1964).
- [3] GB3840—83, 制订地方大气污染物排放标准的技术原则和方法, 8-9, 城乡建设环境保护部, (1984).
- [4] Demarrais, G.A., *Atmos. Envir.*, 12(10), 1957—1964(1978).
- [5] 徐大海等, *环境科学学报*, 3(1), 52(1983).
- [6] Golder, D., *Boundary Layer Meteo.*, 3, 47—58(1972).
- [7] Ludwig, F.L. et al., *J. Appl. Meteo.*, 15, 1172—1176(1976).
- [8] Sedfian, L. et al., *Atmos. Envir.*, 14(7), 741 (1980).
- [9] 陈泮勤, *环境科学学报*, 3(4), 357—363(1983).
- [10] 袁素珍、雷孝恩, *中国环境科学*, 2(3), 29—34 (1982).
- [11] 苗满清等, *大气科学*, 11(4), 420—429(1987).
- [12] Houghton, D.D., *Handbook of Applied Meteorology*, 921—923(1985).
- [13] Larsen, S.L., *Atmos. Envir.*, 20(7), 1325—1332(1986).

CALCULATING METHODS OF THE ATMOSPHERIC STABILITY PARAMETERS AND COMPARISON OF SOME STABILITY CLASSIFICATION SCHEMES

Cao Wenjun

Zhu Wen

(Department of Atmospheric Physics, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing)

Abstract

Some stability classification schemes (Bulk Richardson Number, Richardson Number, Monin-Obukhov length, urban stability classification scheme, revised Pasquill stability category, temperature difference method) are examined. It is shown that Monin-Obukhov length and Richardson Number methods are best methods for examining stability classification, Bulk Richardson Number method is a better method and is especially convenient for use.

Key words: Bulk Richardson Number, Richardson Number, Urban stability classification scheme.