

## 对大气污染因子——辐射逆温的讨论\*

顾庭敏 宫德文 郑全岭 滕迎建

(山东省气象局)

随着现代工业技术的发展,城市和工业区污染的问题更多的受到人们的关心和重视,人们迫切要求了解造成大气污染的各种气象条件,如行星边界层内的温度场、风场、湿度场。其中辐射逆温生消、演变是影响近地面空气污染的重要气象因素。近地面逆温的存在限制了横向也限制了垂直向的湍流。因此,从烟囱中排放到逆温层中的污染物在其最初的浮力和垂直动能消失时,便停滞或随风移动污染近地面大气。为了减少工业发展而带来的污染,提供逆温的特征数据已成为选择有利扩散层,确定超高烟囱设计高程的主要气象依据之一。

我们于1980年1月10日至2月9日对山东石横(平原)进行了逆温考查,共测得150余时次边界层温度梯度资料,其中含24个夜间逆温过程,现就逆温特征作如下论述。

### 1. 逆温生消规律

小风少云是辐射逆温形成的必要条件。白昼,由于日射,地面和近地层空气增温。日落前,地面热量由收入转为支出,下垫面有效辐射加强,大气冷却始于最低高度,而后慢慢波及到较高的高度。铅直向的温度梯度由白天的 $\frac{\partial T}{\partial Z} < 0$ 转变成 $\frac{\partial T}{\partial Z} > 0$ ,辐射逆温形成。逆温形成后,如小风少云天气持续,逆温高度随之抬升。由实测资料得出:逆温层平均以每小时20米速率增厚,一般在日出前后达到最高。此后,逆温层高度开始下降。日出后,地面增温,近地面形成逆温层复盖下的混合层结构,混合层内湍流发展,原停留在大气中的污染物将迅速沿水平和垂直向扩散。在遇到混合层顶后,垂直向扩散完全停止。由于湍流作用,使得原停滞在空中的污染物又有下沉趋势,通常称:“下沉型”或“熏蒸型”。当混合层内有若干污染源时,地面与顶盖间的空气可以变得很脏。若顶盖压低,又持续时间过长,将出现大气严重污染的潜势。这种日出后的近地面混合层结构,通常持续1.5—2.0小时,至10时前后整层逆温消失为止。近地面最大逆温强度一般出现在子夜后的3—5时之间。逆温层顶的最大高度出现时刻落后于最大强度出现时刻。

在满足小风条件下,辐射逆温的发生发展及其强度还受到云状及云量的制约。由实测资料分析得出:低云阴天不易形成逆温,高云阴天不影响逆温出现。如考察期间1月18—19日夜间云状为As—→Sc op,云量为10,地面风速 $< 1\text{m/s}$ ,该日无逆温出现。温度递减率为 $-0.6$ — $-0.9^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。又1月11—12日夜间为高云Cs fil,云量10,地面风速 $< 1\text{m/s}$ ,该日有逆温出现,但逆温高度低而强度弱。逆温高度只有该期间平均逆温高度的

\* 本文于1980年5月4日收到,1981年5月10日收到修改稿。

0.7 倍,温度递增率为  $0.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。由 150 余次逆温观测资料综合分析得出,辐射逆温生成和发展的气象指标大致为:风速  $< 3\text{m/s}$ 、中低云量  $< 7/10$ 。

典型的晴朗无风的夜间,逆温层顶高具有跳跃性抬升的特征(如图 1)。图 1 似有这样的迹象,即在无风晴朗的夜间,逆温强度不断增加,当逆温层顶底部的强度积累到大致超过  $0.25^{\circ}\text{C}/20\text{m}$  时,逆温层顶便出现一次跳跃性的抬升,随即混合加强,逆温强度减小,逆温层顶高可稳定一短时间。随着辐射冷却,逆温强度又不断增强,以待第二次跳跃抬升。图 1 中有五次跳跃性抬升,均属此现象。在其它逆温过程的个别时段内也有此现象。

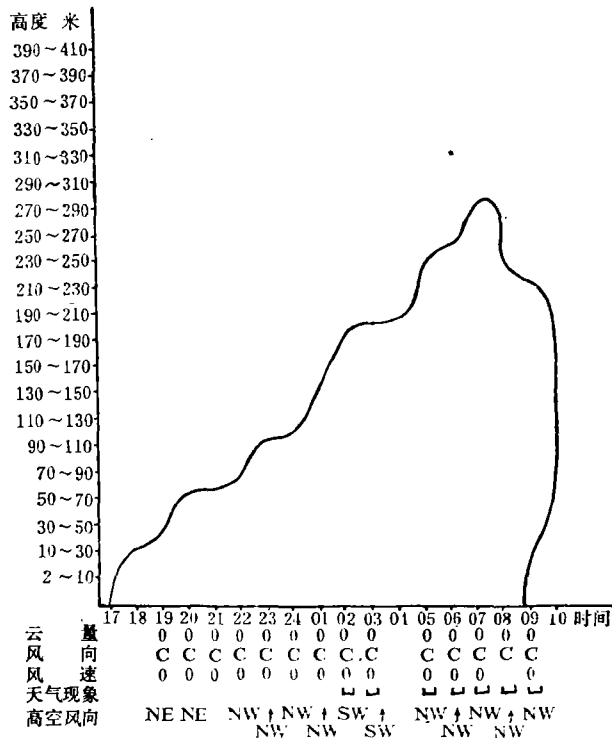


图 1 温差(31/1-1/2)时空分布及逆温层顶高廓线

## 2. 逆温频率分布

由实测得到逆温日出现频率为 80%。在逆温的发生、发展和消亡过程中,其顶高是有变化的。一次逆温过程的最大顶高为逆温峰高。测得逆温峰高为 420 米,最低为 80 米,平均为 274 米,有半数逆温层峰高在 230—300 米间。

各高度的逆温频率分布,取决于气候状况和下垫面条件。就冬季而言,内陆平原区不仅气候稳定,而且由于下垫面热状况的单一性,故逆温高度频率服从正态分布,由表 1 资料分组统计得图 2、图 3;滨海地区,不仅风较内陆平原偏多,且下垫面系不同热状况的海面和陆面,对逆温都有影响,情况较为复杂,故个别逆温可达到较高的高度,因而逆温平均高度大于众数高度,逆温高度频率为正偏分布。由位于渤海的龙口 1978—1980 年三个冬季 79 次逆温资料分组统计得到表 2、图 4。由此似可作这样的论述:逆温高度的频率分

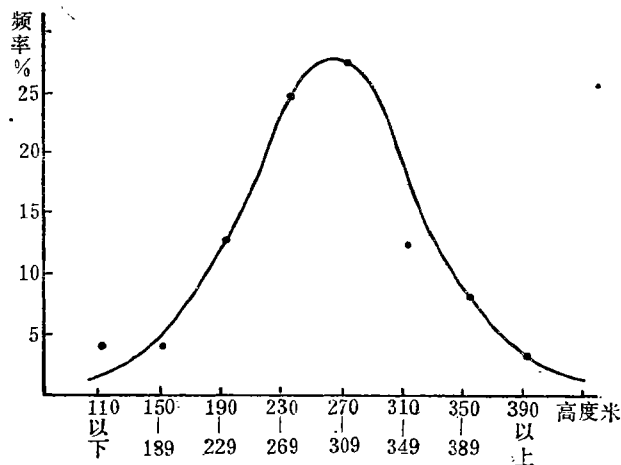


图 2 逆温高度频率分布

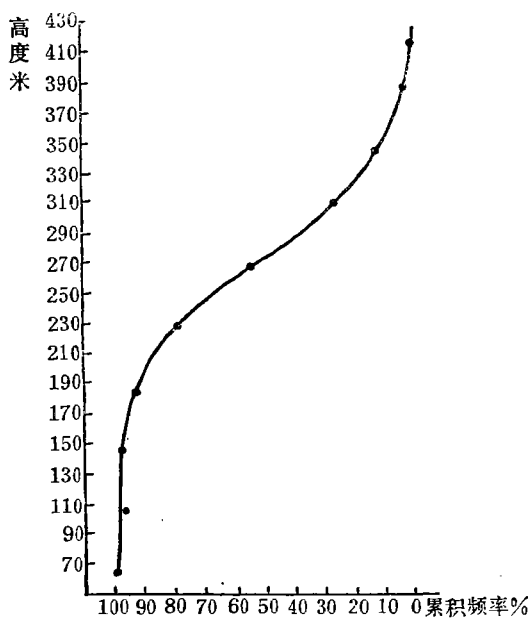


图 3 逆温高度保证率曲线

布,在冬季内陆平原区为正态分布,平均高度附近出现逆温顶高的机率多;滨海地区为正偏分布,即较多的逆温在平均高度以下,而个别的逆温可达到较高的高度。

为了鉴定考察年逆温机率的代表性,按逆温指标,普查得到当地 1970—1980 年冬季与考察同期的逆温天数,平均为 22.5 天,出现频率为 74.9%,标准差为 2.7 天,相对变率为 12%(表 3)。由此得知,石横冬季逆温日的年际变化尚不算大。考察年冬季逆温日数比常年偏多 1.5 天,属正常年,具有冬季逆温的代表性。

表 1 历次逆温峰高及其强度一览表

项目		日期										
		一 月						二 月				
		10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	19-20	20-21	21-22
时 段		04-08	05-08	21-06	21-24	19-07	20-07	22	23-07	17-09	17-09	21-08
观测次数		4	4	8	4	8	10	1	3	13	14	2
逆温峰高(M)		260	190	300	250	300	270	340	160	340	370	250
三十米	值°C/20M	0.70	0.10	0.85	0.70	1.25	0.75	0.20	0.25	0.40	0.80	0.45
以上	高度(M)	70-110	0-110	50-150	30-70	30-70	30-70	70-110	70-150	70-110	70-110	70-110
最大强度	时 刻	6:30		6:30	24:00	5:30	5:30	22:00	6:00	21:30	1:30	8:00
高空风向		SSE							SE	S	N	SE

项目		一 月					二 月							
		22-23	23-24	24-25	25-26	30-31	31-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
时 段		20-09	22-08	21-08	18-02	19-10	19-09	18-09	17-08	22-02	21-06	17-09	17-03	23-10
观测次数		11	9	9	6	15	15	15	10	2	9	12	9	8
逆温峰高(M)		290	420	300	240	290	300	340	190	80	260	380	200	260
三十米	值°C/20M	0.90	0.50	0.45	0.70	0.70	0.85	0.85	0.75	0.50	1.40	0.50	0.65	0.70
以上	高度(M)	30-70	70-110	30-70	30-70	30-70	30-70	70-110	30-70	30-70	70-110	30-70	30-70	30-70
最大强度	时 刻	6:45	7:10	5:30	2:00	23:24	6:00	2:00	2:00	22:30	3:00	22:00	24:00	3:00
高空风向		NE	E	SE	SE	SW	NW	S	N	NE	SW	NE		NE

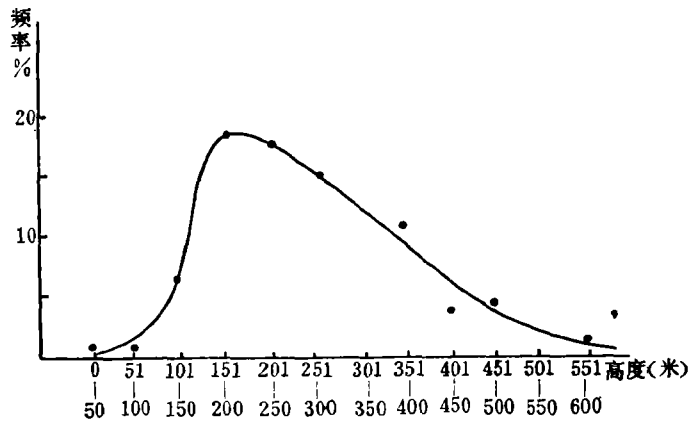


图 4 龙口逆温高度频率分布(滨海)

表 2 龙口逆温顶高出现频率

高度(M)	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	251-300	301-350	351-400	401-450	451-500	501-550	551-600
频 率	1.3	1.3	7.6	19.0	17.7	15.2	12.7	11.4	3.8	5.1	2.5	2.5
累积频率	100.1	98.8	97.5	89.9	70.9	53.2	38.0	25.3	13.9	10.1	5.0	2.5

表 3 冬季 1 月 10 日—2 月 9 日逆温天数及其频率

年 份	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	平 均
天 数	23	26	18	23	19	26	25	25	20	24	22.5
频 率	77	87	60	77	63	87	83	83	67	80	74.9

### 3. 逆 温 强 度

通常以一定厚度内的增温幅度表示逆温强度。在一次逆温过程的时空内，又以温度递增的最大层为强逆温层。石横强逆温层出现在离地 30—70 米或 70—110 米的逆温层内，即在逆温层的下半部，厚度以 40 米居多。一般出现在子夜后至 05 时前，持续时间较短仅 3 小时左右，强度为  $0.5-0.8^{\circ}\text{C}/20\text{m}$ ，个别可达  $1.25^{\circ}\text{C}/20\text{m}$ 。

由平缓的机械作用引起的混合过程将使大气产生搅动，并使夜间逆温加厚而强度减弱。即强度随高度减弱。但是，不同日期即使逆温高度相同，常因白昼地面受热情况和夜间风、云、湿度不一，其强度也是不尽相同的。故历次整层逆温的平均强度与高度的相关性差，但逆温的最大强度受当地气候条件（白昼地面受热，夜间风、云、湿度）的限制，在逆温资料充分多的情况下，可以得到整层逆温最大强度与顶高的密切相关。根据对 150 余个时次的整层逆温资料的整理，得到 70—420 米各高度的最大强度随高度呈良好的线性反相关（见表 4、图 5）。即最大强度随高度迅速减小，300 米处的强度只有 80 米之半。

表 4 整层最大逆温强度 ( $^{\circ}\text{C}/100\text{M}$ )

顶 高	70	110	150	190	210	230	250	270	290	330	370	410
$RT_M$	4.1	3.4	3.8	3.0	2.5	3.0	2.8	2.2	2.2	1.8	1.5	0.8
$RT_{0.8}$	3.7	2.9	3.1	2.7	2.5	2.5	2.4	2.2	2.1	1.6	1.5	0.8

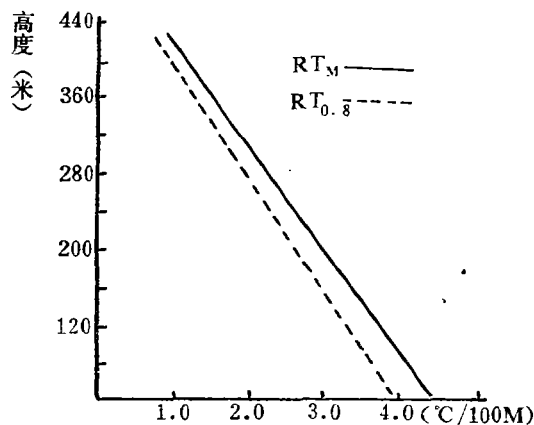


图 5 最大逆温强度随高度的变化

整层最大逆温强度( $RT_M$ )与顶高( $H$ )的相关系数 $r = -0.96$ ,关系式为:

$$RT_M = 4.75 - 0.009H$$

保证率 80% 的逆温强度( $RT_{0.8}$ )与顶高( $H$ )的相关系数 $r = -0.97$ ,关系式为:

$$RT_{0.8} = 4.23 - 0.008H$$

上式中  $RT_M$  和  $RT_{0.8}$  的单位为  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

#### 4. 最大温差

众所周知,在逆温层内的排放烟源,其烟体离烟囱后,受动力和热力作用抬升,当动能耗尽时,主要受热力作用浮升。其热浮力的大小取决于烟体温度( $T_s$ )与环境温度( $T_a$ )的差值( $T_s - T_a$ )。 $T_s - T_a$  越大,烟体浮力就大,有利垂直扩散;反之,相对不利于烟体的垂直扩散。由此得出环境温度也影响到该高度烟体的热浮力。因而,讨论逆温层内各高度的烟体垂直扩散稀释能力时,必须注意各高度相对地面的增温值,即温差值的大小。

对辐射逆温而言,其最大温差值( $\Delta T_M$ )及其保证率为 80% 的温差值( $\Delta T_{0.8}$ )随高度的变化是有规律可循的。由资料整理得到  $\Delta T_M$  和  $\Delta T_{0.8}$  随高度分布为抛物线型,见图 6 表 5。由图表得知,转折高度在 270 米,此高度以下,温差值随高度增加,  $T_s - T_a$  随高度减小。顶高在 270 米时与地面的温差最大,可达  $6.3^{\circ}\text{C}$ ,该高度是烟体热浮力变化的转折高度。图 6 曲线的转折高度,大致可视作地面辐射冷却作用能波及到的最高高度,即强辐射逆温的最高高度。石横由于辐射作用逆温加强而顶高抬升的最大高度为 270 米,即强辐射逆温以 270 米为界。更高的逆温层并非由于地面强烈的辐射冷却所导致,多半是由于具有一定风速加大了空气混合,迫使逆温层顶抬升到较高的高度。图 6 的最大温差随高度的表达式为:

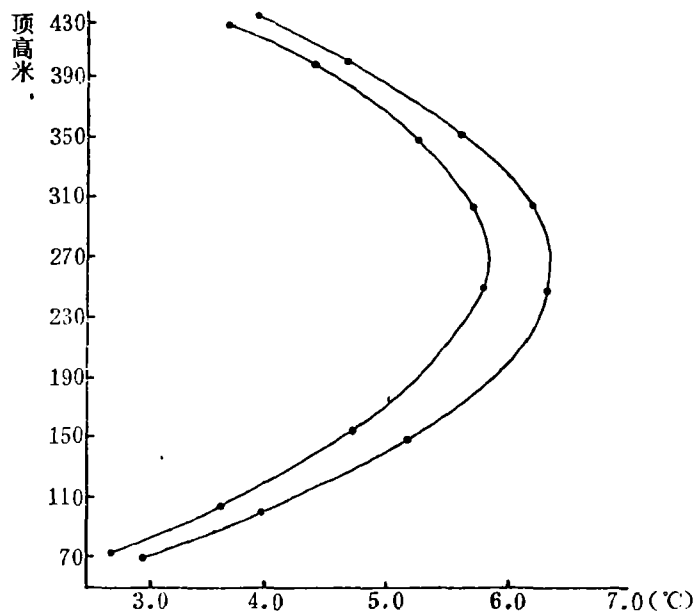


图 6 顶高与地面最大温差

表 5 顶高与地面最大温差

顶 高	70	110	150	200	250	300	350	400	430
$\Delta T$	2.90	3.85	5.10	5.90	6.25	6.15	5.60	4.60	3.78
$\Delta T_{0.8}$	2.60	3.48	4.62	5.36	5.70	5.64	5.18	4.32	3.61

$$\Delta T_M = -9 \times 10^{-5} H^2 + 0.0475 H$$

保证率 80% 的最大温差随高度的表达式为：

$$\Delta T_{0.8} = -8 \times 10^{-5} H^2 + 0.0428 H$$

### 5. 各高度的逆温特征值

由于当地冬季风、云日变化地方性特点，即使白天风速较大，若无系统影响，每晚约 19 时后，风速将迅速减小，逆温便自地面形成并向上发展，一般在日出后消失。因此逆温持续时间较长，各高度的逆温特征也不相同。由表 6 得知，无论是逆温次数、频率、强度和逆温持续时间均随高度而递减。唯逆温层顶与地面最大温差随高度先增后减，转折高度在

表 6 各高度逆温特征

项 目 \ 高度(M)	100	150	200	230	270	300	330	360	390	410	420
逆温日数(天)	23	23	21	18	15	9	5	3	1	1	1
逆温出现频率(%)	77	77	72	55	49	25	15	8	3	3	3
占逆温总日数的频率(%)	97	96	90	68	55	30	18	10	4	4	4
最大强度(°C/100M)	3.8	3.4	3.0	2.5	2.3	2.1	1.8	1.5	1.3	1.1	0.8
逆温层顶与地面最大温差	3.8	5.1	5.9	6.2	6.3	6.2	5.8	5.5	4.8	4.6	4.0
逆温月总时数	224	207	141	65	45	25	16	4	2	1	
平均每次逆温时数	9.7	9.0	6.7	3.7	3.0	2.8	3.2	1.3	2.0	1.0	
平均每天逆温时数	7.5	6.9	4.7	2.2	1.5	0.8	0.5	0.1	0.6		

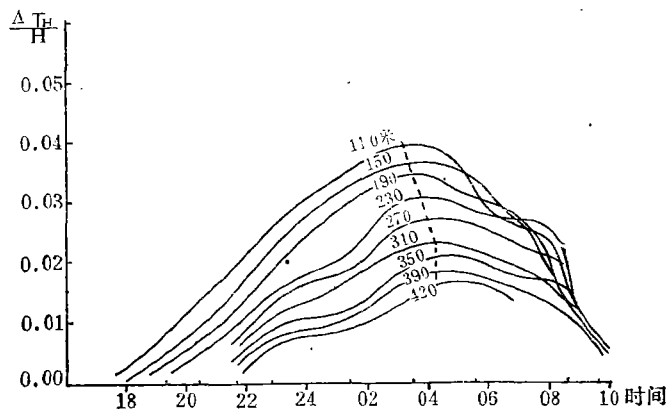


图 7 各高度  $\frac{\Delta T_H}{H}$  随高度的变化(1980 年 1 月 20—21 日)

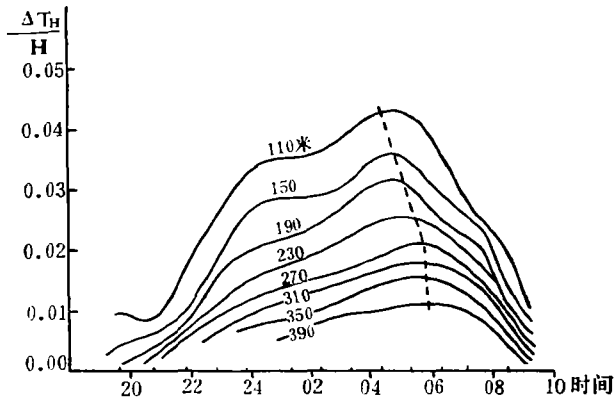


图 8 各高度  $\frac{\Delta T_H}{H}$  随高度的变化(1980年1月31日—2月1日)

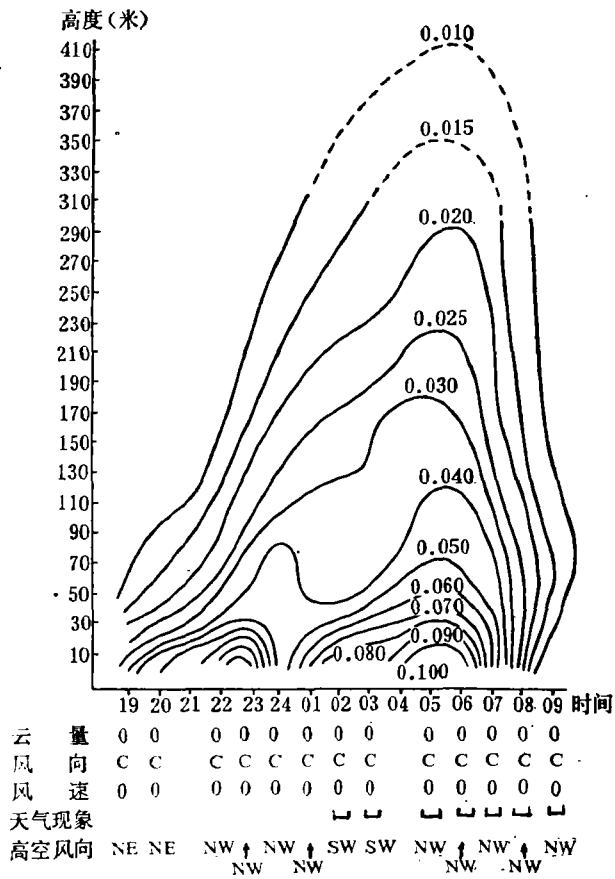


图 9 1月31日—2月1日  $\frac{\Delta T_H}{H}$  时空分布



270 米。综合诸特征,可以看出 270 米以上,各项逆温特征量减小显著,300 米以上尤为显著。300 米高度可视为垂直向扩散条件明显差异的界限。

### 6. 逆温指数时空变化

在逆温层内,计算自地面至某高度的平均增温率( $\frac{\Delta T_H}{H}$ ),或称逆温指数,可以较好地表示和比较各高度的逆温强和弱的程度。分析逆温过程中 $\frac{\Delta T_H}{H}$ 值随时间和高度的变化,就可描述出逆温全过程的强度演变。由图 7、图 8 可知,冬季,日落前,逆温自地面形成并向上发展, $\frac{\Delta T_H}{H}$ 随高度而减小,各高度的 $\frac{\Delta T_H}{H}$ 随时间的变化是起伏性的。在近地面层(约百米以下)为双峰型,其上为单峰型。在近地面几十公尺内,大致在 22 时和 05 时左右有两个逆温中心(图 9、10)。子夜前的高值中心出现后,由于动量向上输送,高值中心消

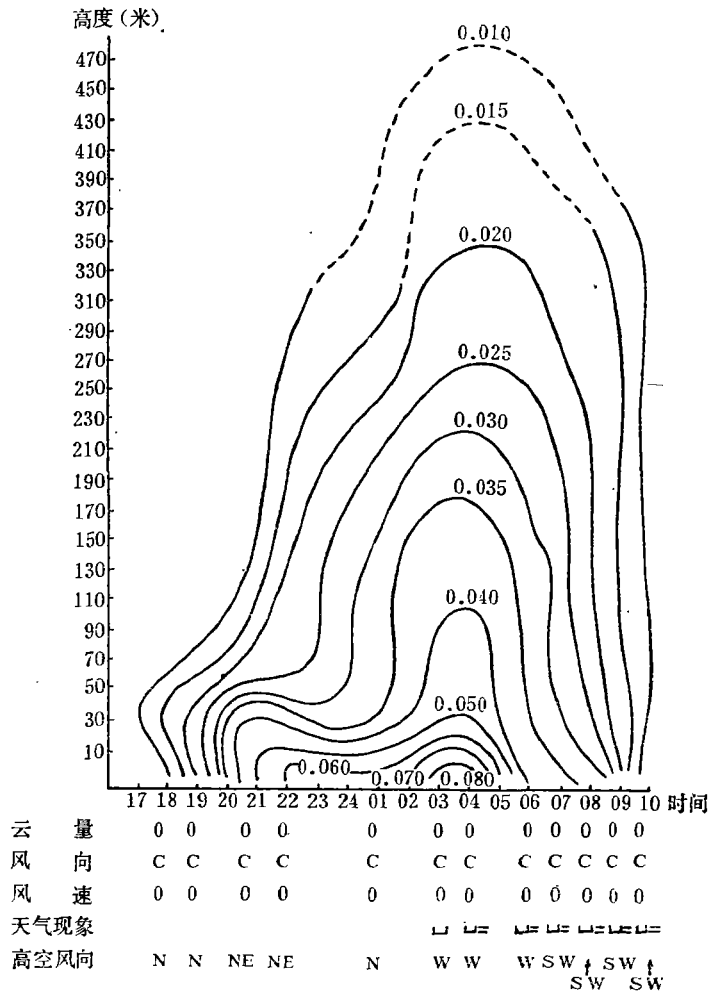


图 10 1 月 20 日—21 日  $\frac{\Delta T_H}{H}$  时空分布

失,强度减弱。随着地面辐射冷却,逆温强度又不断增大,至 05 时左右又发展成高值中心,此高值中心可影响到整层逆温随日出而减弱消失。各高度逆温指数 $\left(\frac{\Delta T_n}{H}\right)$ 最大值出现时刻,在近地面层内较为一致,因地面粗糙度引起湍流,使空气混合较快的缘故。由图 7、8 可见,在 100 米以上最大逆温强度出现时刻大致是每上升 50 米落后 25 分钟,但在 300 米以上位相差明显。日出前,逆温变弱,地面逆温首先破坏,一般在日出后 2 小时,即在 9—10 时,整层逆温全部消失。

本文使用的资料是在 1979 年冬季连续 30 天测到的,期间共测到 24 个夜间接地辐射逆温。因此,本文所分析的就冬季平原地区的辐射逆温而言有一定代表性。文中提及的晴朗无风的夜间逆温层有跳跃性抬升的现象,逆温发生发展的气象指标,最大温差随高度分布的线型,逆温指数随高度的振幅和位相变化等,只是在一定条件下分析得到的,是否带有普遍性还有待进一步研究。