

河谷城市小风条件下的近地层湍流特征

高会旺 管玉平

(青岛海洋大学物理海洋所, 青岛 266003)

陈长和

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

林一骅

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

吴洁晶

(青岛市气象台, 青岛 266003)

摘 要 利用兰州城市和郊区皋兰县冬季同期的湍流观测资料, 分析了城市和郊区的湍流强度、脉动速度标准差和湍流的欧拉时间积分尺度等湍流特征量, 并与其他地区的湍流观测量进行了对比, 从而揭示了兰州河谷城市小风条件下的大气湍流特征。

关键词 湍流强度 脉动速度标准差 时间尺度 湍流特征

1 引言

低层大气中, 大气的运动表现为湍流运动, 因此掌握低层大气湍流运动的特征, 对于研究大气污染物的扩散和自由大气与边界层大气的相互作用都有十分重要的意义。目前对平坦地面上大气边界层湍流结构已有较好的了解, 但对复杂地形上或城市下垫面的湍流特征尚未深入掌握。兰州市地处青藏高原东北侧, 市区位于黄河河谷之中, 平均海拔高度为 1530 m, 市区周围群山环抱, 河谷盆地分东西两部分, 中间是狭窄的连接地段。河谷盆地之中气流闭塞, 边界层内的静风频率高, 冬季尤其明显^[1], 为揭示如此复杂下垫面小风条件下的湍流特征, 本文分析了 1989 年 12 月 1~15 日兰州地区的一次边界层湍流观测资料。

2 资料的观测和处理

1989 年 12 月 1 日到 15 日, 在兰州城市和郊区皋兰县同时布设了大气湍流量观测点, 进行湍流量对比观测。兰州观测点设在兰州大学生物园 (36°06'N, 103°51'E), 所用仪器为 UVW 风速仪; 皋兰县测点设在县气象站, 所用仪器为美制 Gill 双向风标风速仪。兰州大学生物园位于兰州市城关区, 地处两山夹峙的黄河河谷盆地中, 整个盆地内地形较为复杂。皋兰气象站位于兰州市区以北约 50 km 处, 四周为农田, 地形平坦, 1 km 以外有高度为 100 m 左右的低山丘陵, 可代表乡村的情况。

观测试验在两测点同时进行, 间隔 1 h 观测一次, 一日共观测 12 次。仪器安装在距地面 10 m 高的杆上, 每次取样时段长度为 1 h, UVW 风速仪的采样间隔为 2 s, 双向风标风速仪的采样间隔为 5 s。采样间隔不为零的作用相当于一个滤波器使高频涨落

的贡献减少,采样间隔越大湍强越小。因此对风速的标准偏差也会产生一定的影响。资料处理以前,首先对原始资料进行了预处理,包括剔除数据明显不合理的样本和坐标的旋转(使 x 轴指向平均风方向)。采样间隔的不同对湍流特征有一定的影响^[2],为了便于比较,把UVW风速仪的资料首先进行了时间滑动平均,滑动平均时间取4 s,得到间隔为4 s的时间序列,然后再针对此时间序列进行湍流特征的分析。这样与采样间隔为5 s的双向风标资料对比,采样间隔不同的影响就会有所减少。

根据美国环保局(EPA)提供的风仰角脉动标准差划分稳定度的方法^[1],把样本划分为A、B、C、D、E和F六个稳定度级别,为了便于和其他城市分析结果的对比,把A、B和C级合并为不稳定类,D级为中性类,E和F级合并为稳定类。分三类稳定度讨论河谷城市小风条件下的湍流特征。

由三维风速脉动量或风仰角脉动计算 σ_u 、 σ_v 和 σ_w ,进而求得湍流强度。纵向、侧向及铅直向的湍流强度分别为

$$i_u = \left(\frac{u'^2}{\bar{u}^2} \right)^{1/2} = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}, \quad (1)$$

$$i_v = \left(\frac{v'^2}{\bar{u}^2} \right)^{1/2} = \frac{\sigma_v}{\bar{u}}, \quad (2)$$

$$i_w = \left(\frac{w'^2}{\bar{u}^2} \right)^{1/2} = \frac{\sigma_w}{\bar{u}}. \quad (3)$$

同时还计算了湍流欧拉时间积分尺度 L_t 。

受河谷地形和城市下垫面的影响,兰州城市的风速一般较小。这次试验中,采样时段内平均风速小于0.5 m/s的占60%,因此,本文分析的兰州城区的资料具有明显的小风特征。

3 湍流强度分析

湍流强度定量地描述了湍流运动的强弱或湍流能量的大小,也是大气扩散能力的一种量度。它随稳定度的不同而不同,因平均风速的不同而变化,且存在着明显的日变化。

3.1 湍流强度随稳定度的变化

大气层结稳定度是影响湍流强度的重要因素。我们首先分析了湍流强度随稳定度的变化(见图1)。

风速小于0.5 m/s时, i_u 、 i_v 值比较接近,而 i_w 值则相对较小。随稳定度由稳定到不稳定, i_w 由小变大。由中性到不稳定 i_u 和 i_v 明显增大,由稳定到中性, i_u 变化不明显, i_v 的变化出现了稳定时大于中性的特殊现象。风速大于0.5 m/s时, i_v 的变化也出现了稳定大于中性的现象。一般地,稳定时的湍流强度应小于中性时的湍强,这里的情况说明小风条件下的湍流强度有其特殊性。在稳定的层结条件下,虽然铅直方向的湍流运动因大气层结的作用而受到抑制,但水平方向上的湍流运动,由地形扰动或重力波引起的较长周期的风向摆动和风速的阵性,使湍流的低频成分大大增加,造成了稳定

情况下湍流强度异常增大的特殊现象。这与前人的研究中发现在小风稳定时水平扩散较大的结果是一致的^[4]。

图 2a 为风速小于 1.0 m/s 时的情况, 图 2b 为风速大于 1.0 m/s 时湍流强度随稳定度的变化。图中 i_u 、 i_v 和 i_w 由大到小地排列, 其值随稳定度由稳定、中性到不稳定的变化表现为由小到大规则地变化, 这种分布与其他研究者在平坦地形上的观测结果是一致的。

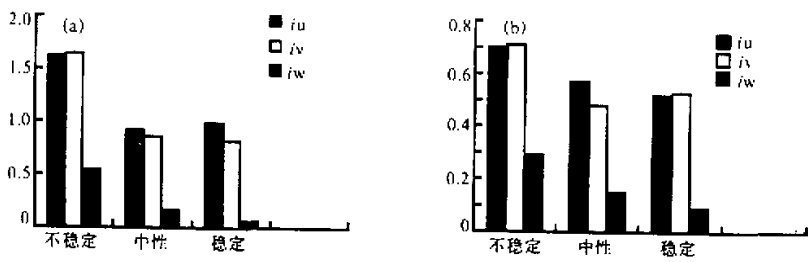


图 1 兰州城区湍流随稳定度的变化
(a) $\bar{u} \leq 0.5$, (b) $\bar{u} > 0.5$

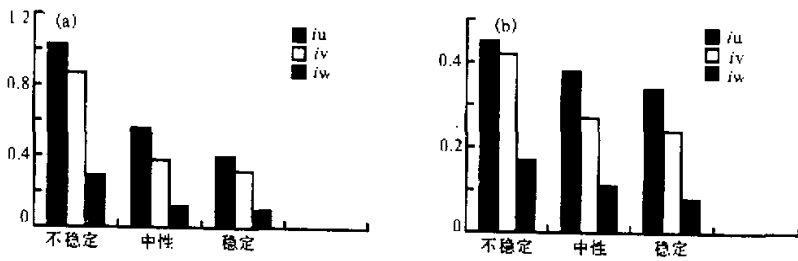


图 2 皋兰地区湍流随稳定度的变化
(a) $\bar{u} \leq 1.0$, (b) $\bar{u} > 1.0$

计算了兰州城区和郊区皋兰县在稳定、中性和不稳定三类稳定度条件下的平均湍流强度, 并与上海宝钢、南京北郊大厂和广州市区的湍流强度观测结果^[5~7]进行了比较。结果列于表 1。

由表 1 可见, 各种稳定度条件下, i_u 和 i_v 都以兰州为最大, 皋兰、广州次之, 上海和南京最小。 i_w 之值广州最大, 兰州、皋兰次之, 上海和南京最小。这种不同是由于

表 1 兰州和皋兰地区湍流强度与其他几个城区观测结果的比较

	i_u					i_v					i_w				
	兰州	皋兰	上海	南京	广州	兰州	皋兰	上海	南京	广州	兰州	皋兰	上海	南京	广州
不稳定	1.29	0.98	0.36	0.29	0.55	1.27	0.76	0.35	0.19	0.55	0.35	0.26	0.26	0.14	0.53
中 性	0.72	0.42	0.16	0.21	0.39	0.65	0.29	0.13	0.09	0.32	0.15	0.11	0.10	0.07	0.30
稳 定	0.74	0.32	0.12	0.18	0.35	0.67	0.24	0.08	0.10	0.28	0.08	0.08	0.04	0.08	0.26
平 均	0.92	0.54	0.21	0.23	0.43	0.86	0.43	0.19	0.13	0.38	0.23	0.15	0.13	0.10	0.32

采样高度、采样间隔和下垫面粗糙度不同造成的。兰州等地区的采样仪器、采样高度和采样间隔见表 2。上海和南京地区的资料是通过观测等容气球的飞行而采得的、观测精度相对较差，其采样高度较高，相应地大气的湍流运动比较微弱；同时，采样间隔较长，采样时间短，其效果是滤去了更多的高频和低频的湍流信息，因此，这两个地区的湍流强度较小。兰州城区的水平湍流强度较大，主要是由于复杂下垫面的动力作用和小风条件造成的。广州地区的垂直湍流强度的值可能偏大。由表 1 还可以看到，垂直方向湍流强度受地面状况的影响不明显，除广州外，其他几个地区的垂直湍强值相差不大。

3.2 湍流强度随平均风速的变化

大气的湍流运动和平均运动是分不开的。表 3 和表 4 是兰州城区和郊区皋兰测点的湍流强度及平均风速。水平湍流强度 i_u 和 i_v 随平均风速的变化较 i_w 为剧烈。兰州城区纵向湍流强度 i_u 和横向湍流强度 i_v 的变化趋势是一致的，其值的大小也比较接近。风速较小时，湍流强度随风速的增大迅速衰减，风速大时变化较平缓。 i_w 随平均风速增大缓慢变小。皋兰地区的 i_u 、 i_v 和 i_w 之值由大到小排列。风速小于 1.2 m/s 时， i_u 和 i_v 随平均风速增大很快下降，风速大于 1.2 m/s 时，其值随风速变化缓慢。 i_w 的变化平缓，风速大于 1.2 m/s 时，其值基本上保持一个常值 0.09，不受风速变化的影响。这和文献[2]的分析是一致的。中性条件下，兰州城区和皋兰地区垂直湍流强度随平均风速基本不变，保持为常值，其值分别为 0.16 和 0.11。皋兰地区水平方向的湍流强度随风速的变化也不明显。

表 2 兰州等地区湍流资料的来源及特点

	兰州	皋兰	上海	南京	广州
采样仪器	UVW 风速仪	双向风标	等容气球	等容气球	UVW 风速仪
采样高度	10 m	10 m	300 m	300 m	35 m
采样间隔	2 s	5 s		15 s	1 s
采样时段	60 min	60 min		10 min	30 min

表 3 不同风速下兰州城区的湍流强度

风速范围 / (m / s)		0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
平均湍强	i_u	2.47	1.24	0.85	0.50	0.45
	i_v	2.10	1.33	0.70	0.55	0.44
	i_w	0.61	0.37	0.21	0.15	0.17
平均风速 / 样本数		0.13 / 9	0.30 / 30	0.50 / 44	0.71 / 25	0.99 / 8
中性湍强	i_u		1.00	0.80	0.51	0.45
	i_v		1.03	0.64	0.47	0.38
	i_w		0.16	0.15	0.14	0.16
平均风速 / 样本数			0.33 / 7	0.52 / 13	0.71 / 7	1.03 / 3

3.3 湍流强度的日变化特征

兰州和皋兰湍流强度的日变化如图 3 和图 4，两地区的水平湍流强度的日变化表现为双峰型分布，垂直湍强的分布为单峰型，但两地出现峰值的时间是不同的。水平湍流强度的日变化与平均风速的日变化有明显的负相关，垂直方向湍流强度的变化也表现出

表 4 不同风速下皋兰的湍流强度

风速范围 / (m / s)		≤ 0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.2~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	>3.0
平均湍强	i_u	1.45	0.63	0.40	0.35	0.35	0.30	0.26
	i_v	1.41	0.49	0.28	0.33	0.26	0.22	0.21
	i_w	0.37	0.18	0.12	0.11	0.09	0.10	0.08
平均风速 / 样本数		0.36 / 13	0.78 / 47	1.21 / 76	1.69 / 19	2.20 / 4	2.77 / 3	3.37 / 3
中性湍强	i_u		0.41	0.40	0.36	0.43	0.37	0.39
	i_v		0.36	0.27	0.34	0.32	0.28	0.31
	i_w		0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11
平均风速 / 样本数			0.87 / 16	1.19 / 52	1.60 / 10	2.22 / 1	2.86 / 2	3.75 / 1

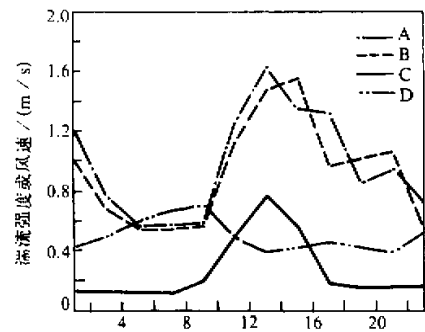


图 3 兰州城区湍流强度及平均风速的日变化
A: i_u , B: i_v , C: i_w , D: $\bar{u}$

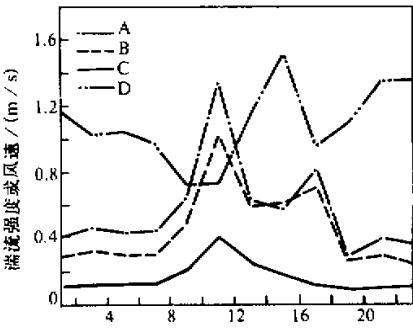


图 4 皋兰湍流强度及平均风速的日变化
A: i_u , B: i_v , C: i_w , D: $\bar{u}$

随风速的增大而减小。这可能是由于风速的增大, 尽管会在一定程度上增加机械湍流, 但同时抑制了热力湍流的发展, 其总体效果导致了湍流强度的减小。

兰州城区一日中各时段 i_u 和 i_v 值比较接近, 而 i_w 则相对较小, 三者的日变化趋势总体上是一致的, 在 13 时到 15 时出现峰值, 这一时段大气层结处于不稳定状态, 有利于湍流的发展。13 时, 平均风速出现最低值, 对应着湍流强度的峰值, 01 时, 平均风速的另一低值对应于 i_u 和 i_v 的一个次峰值。一日中, 05 时到 09 时的风速最大, 与之对应的 i_u 和 i_v 之值最小。 i_w 值在午后较大, 13 时达到峰值。

皋兰地区湍流强度的两个水平分量的日变化趋势是一致的。11 时, 湍流强度出现峰值, 对应着平均风速的最低值, i_u 和 i_v 在 17 时出现一个次峰值, 对应着平均风速的一个次低值。 i_w 值在 09~13 时较大, 11 时达到峰值。

4 脉动速度标准差分析

将莫宁-奥布霍夫相似理论和量纲分析用于低层大气, 得到平坦均匀下垫面近地面层中的下列关系:

$$\frac{\sigma_j}{u_*} = \varphi_j \frac{z}{L}, \quad j = u, v, w \quad (4)$$

其中, σ_u , σ_v 和 σ_w 分别为风速脉动的纵向、横向和垂直分量标准差, φ_u , φ_v 和 φ_w 分别为相应的通用相似函数。大量实验证明无量纲垂直风速方差的相似性较好, 而水平分量脉动易受边界层上层结构的影响。

4.1 中性层结风速分量的标准差

中性层结下 ($z/L=0.0$), 按相似理论, φ_u , φ_v 和 φ_w 应分别为常数, 于是得到:

$$\sigma_j = A_j u_*, \quad j = u, v, w \quad (5)$$

即风速分量标准差仅与摩擦速度有关。以对数风廓线 $u_* = \kappa \cdot \bar{u}(z) / \ln(z/z_0)$ 代入 (5) 式得到

$$\sigma_j = \frac{A_j \cdot \kappa \cdot \bar{u}(z)}{\ln(z/z_0)}, \quad j = u, v, w \quad (6)$$

上式表明, 中性层结时湍流强度与平均风速 $\bar{u}(z)$ 无关, 只与 z/z_0 有关。中性层结时的上述性质已被大量的观测资料所证实。在对湍流强度的分析中, 也证实了中性层结时兰州和皋兰垂直方向的湍流强度不随风速变化的结论。这说明兰州和皋兰的垂直速度脉动能很好地满足近地层的相似律。由表 4 可以看出, 这一结论对皋兰地区水平风脉动也有很好的适用性。而兰州城区水平方向上的风脉动却与此平坦均匀下垫面的性质不同。

根据风速脉动观测资料, 利用涡动相关法可得到摩擦速度 u_* 的值, 再据 (5) 式, 估算得到了 A_j 之值, 见表 5。表中同时给出了平坦地形上的平均值和非均匀地形上的值, 这个平均值是 Panofsky 等对几个平坦地面上的实测结果的简单平均^[8]。皋兰地区三个方向上的无量纲风速分量标准差与 Panofsky 的平均结果都比较一致。兰州城区垂直方向上的无量纲风速脉动标准差与平坦地面上的平均值也符合较好, 而水平方向上的无量纲风速分量脉动标准差有偏大现象, 横向无量纲风速标准差明显偏高。这说明河谷地形和下垫面的粗糙程度对风速垂直分量的标准差影响较小, 而增大了水平方向上的无量纲脉动速度标准差。

表 5 中性条件下各无量纲风速分量的标准差

	$A_u = \sigma_u / u_*$	$A_v = \sigma_v / u_*$	$A_w = \sigma_w / u_*$
兰州	2.49	2.27	1.31
皋兰	2.41	2.00	1.21
平坦地形上的平均值	2.39 ± 0.03	1.92 ± 0.05	1.25 ± 0.03
Rock Springs (非山)	3.20	2.90	1.24
Rock Springs (山上)	4.50	3.80	1.24
Frie, CO	2.65	2.00	1.20

4.2 非中性条件下的风速脉动的标准差

大量的观测证明, 垂直方向的湍流运动以小尺度高频湍流为主。在近地层中, 服从 M-O 相似理论。垂直速度标准差与摩擦速度之比是 z/L 的函数。Merry 等^[9]总结了多

次大气边界层观测资料, 在不稳定条件下给出了如下的经验关系:

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3 \left(1.0 - 3 \frac{z}{L} \right)^{1/3}. \quad (7)$$

此式与许多条件下观测到的资料均符合很好, 即使在粗糙地形上也适用. 因为 σ_w 对地形的变化不敏感. 利用兰州城区的湍流资料计算了不稳定条件下 σ_w / u_* 的值, 其值随 $-z/L$ 的变化如图 5, 同时也给出了利用上式计算的 σ_w / u_* 值. 当 $|z/L|$ 较小时, 湍流资料的观测值较计算值稍偏小, 而当 $|z/L| > 6.0$ 时, 两者能符合较好. 稳定条件下, σ_w / u_* 的变化关系比较复杂, 这里暂不讨论. Panofsky 等人还给出非中性条件下水平方向上的湍流与 z/L 的关系^[10]:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} \approx \frac{\sigma_v}{u_*} = 2.3 \left(1.0 - 0.22 \frac{z}{L} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

利用兰州城区的湍流资料计算的 σ_u / u_* 和 σ_v / u_* 值及上式的计算值如图 6. 由图可见, σ_u / u_* 和 σ_v / u_* 随 $-z/L$ 增大而增大, 观测值与计算值的变化趋势比较一致. 这一现象和一些地区的观测结果符合较好. 对比兰州的观测值与 (8) 式的结果, 总体上, 兰州城区的观测值比 (8) 式的结果偏大. 当 $|z/L| < 6.0$ 时, 一些样本能与 (8) 式很好地符合, 当 $|z/L|$ 较大时, 水平方向的无量纲风速标准差则明显偏大.

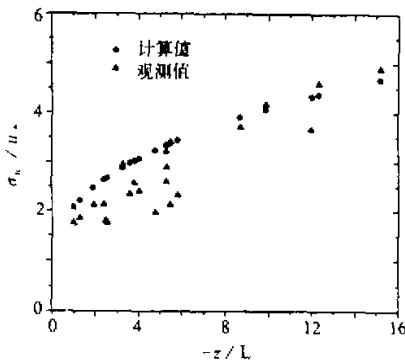


图 5 不稳定条件下 σ_w / u_* 的值

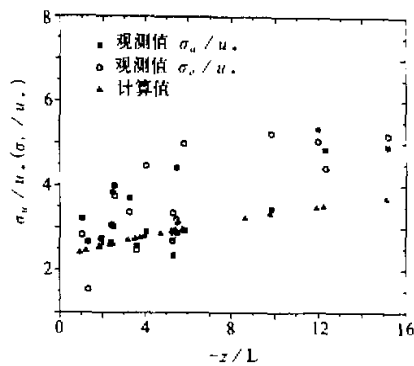


图 6 σ_u / u_* 和 σ_v / u_* 的值

5 湍流时间积分尺度分析

湍流时间积分尺度表征了湍流的平均寿命. 湍流平均尺度大, 则间隔时间 t 后, 两脉动速度的相关性就好, 因此相关系数能很好地反映湍流的平均尺度. 由自相关系数定义的欧拉时间积分尺度为

$$L_t = \int_0^\infty R(t) dt. \quad (9)$$

这里计算了兰州城区和皋兰地区的湍流时间积分尺度, 并与上海宝钢、南京北郊大

表 6 兰州和皋兰的时间积分尺度

	兰州	皋兰	上海	南京	广 东
$L_T(x)$	164	157	87	110	25.8
$L_T(y)$	192	170	167	153	22.6
$L_T(z)$	14	66	161	138	8.4

厂等地的结果进行了比较, 结果如表 6。

由表 6 可见, 除广州外, 其他几个地区的时间尺度横向大于纵向, 纵向大于垂向。广州地区则是纵向时间积分尺度最大。比较不同地区的时间积分尺度, 兰州和皋兰的水平时间积分尺度比其他地区大, 而垂向的时间尺度比其他地区小(除广州)。根据泰勒的“冰冻”湍流假设, 湍流时间尺度的大小也反映其空间尺度的大小。兰州和皋兰地区垂向时间积分尺度较小的可能原因之一是兰州和皋兰观测高度接近地面, 地面附近受到机械效应的影响, 湍流在垂直方向上的发展受到抑制, 因此空间尺度较小, 而使得沿水平方向的尺度增大。兰州与皋兰相比, 其地面粗糙度要大得多, 因此兰州的垂向时间积分尺度也要小得多。上海宝钢和南京大厂地区的垂直方向上的时间积分尺度较大, 这和两地的采样高度较高有关。

6 结论

(1) 受地形和地面粗糙度等因素的影响, 兰州城区的湍流强度明显大于郊区皋兰, 且水平方向上的湍流强度存在着稳定时大于中性时的特殊现象。湍流强度与风速呈负相关关系, 兰州城区的湍流强度随风速的变化较皋兰明显。兰州和皋兰的湍流强度都有明显的日变化特征, 湍流强度峰值的出现时间兰州较皋兰晚。中性条件下, 兰州和皋兰地区的垂向湍流强度基本不随风速变化, 皋兰地区水平湍流强度随风速的变化也不明显。

(2) 中性条件下, 垂直风速脉动标准差与平均风速成正比。对兰州和皋兰而言, σ_w 能很好地满足近地层的相似律。皋兰地区三个方向上的无量纲风速脉动标准差与 Panofsky 等的平均结果一致, 而兰州城区水平方向上的无量纲风速脉动标准差偏大。非中性条件下, 垂直方向上的无量纲风速脉动标准差与 Merry 等的经验公式也比较一致。而水平方向的无量纲风速脉动标准差明显比 Panofsky 等的经验关系偏大。

(3) 兰州城区的时间积分尺度, 横向大于纵向, 纵向大于垂向。采样高度较低和较大的地形起伏、地面粗糙度使垂向时间积分尺度较小, 而增大了水平方向的时间积分尺度。

参 考 文 献

- 1 陈耀妹、王世红, 1993, 复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究, 北京: 气象出版社, 23~27.
- 2 王华聪, 1988, 湍流统计量的数据处理及其特征分析, 环境科学, 9(2), 70~76.
- 3 Pasquill, F. A., 1983, *Atmospheric Diffusion*, 3rd edition, Halstead Press-Wiley, New York, 67~76.
- 4 Sagendorf, J. F. et al., 1976, *Third Symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality*, Amer. Meteor. Soc., 277~282.

- 5 王华聪、蔡存福, 1984, 包钢地形扩散规律的现场试验研究, 环境科学, 5(6), 1~5.
- 6 沈觉成、楚涤修, 1990, 南京北郊大气边界层湍流统计特征的初步探讨, 南京气象学院学报, 13(2), 247~253.
- 7 徐玉貌、周朝楠、李振华等, 1993, 广州市近地层大气的湍流微结构和谱特征, 大气科学, 17(3), 338~348.
- 8 赵鸣、苗曼倩、王彦昌, 1991, 边界层气象学教程, 北京: 气象出版社, 1~84.
- 9 Merry, M. and Panofsky, H. A., 1976, Statistics of vertical motion over land and water, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **102**(431), 255~263.
- 10 Panofsky, H. A. and J. A. Dutton, 1984, *Atmospheric Turbulence: Model and Methods for Engineering Applications*, Wiley-Interscience, New York, 1~397.

Atmospheric Turbulence Features in the Surface-layer over Valley City with Light Wind Speed

Gao Huiwang and Guan Yuping

(Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao 266003)

Chen Changhe

(Department of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Lin Yihua

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

Wu Jiejing

(Qingdao Meteorological Observatory, Qingdao 266003)

Abstract The intensities, standard deviations and integration time scales of velocity components of turbulence in the surface-layer over Lanzhou and Gaolan are studied using the data from a UVW anemometer and a bivane anemometer. The results are also compared with the observations in other areas. The results show that turbulence intensities over Lanzhou are stronger than those in other areas and the integration time scale in vertical direction is smaller and those in horizontal direction are larger than in other areas.

Key words turbulence intensities standard deviation time scale features of turbulence