

海岸地区边界层风及其输送扩散特性的 观测研究*

蒋维楣 王彦昌 钟世远

(南京大学, 210008)

提要 本文介绍了渤海湾秦皇岛地区实施的一次测试研究。以观测事实的分析为基础,着重对海岸环境的风特性、局地环流现象、内边界层和PBL结构及各种特征参数作了研究,得出一些规律性结果。发现局地海风自08:00开始发展,逐渐增厚向上发展并可维持到18:00开始减弱并转换。平均海风厚度层达300—500m,平均风速2.8m/s。热内边界层高度有实验关系

$$h_0(x) = 69.2 \left(\frac{\Delta T \cdot R \cdot x}{z} \right)^{-1/2}。$$

文中还给出湍流特征量 U_* , T_* , R_i , L 和扩散系数 K_z 的计算结果。这些基本观测结果和参数为进一步的实际应用,提供必要模式参数和实验依据。

为尽量完善地建立符合实际的物理模型并作正确的数学模拟处理,必须通过测试研究清楚描述发生在海岸地区的一些大气过程,并由观测事实为各种理论的和实验的模拟研究提供基本参数。作者在秦皇岛沿海岸地区的一项火电厂工程大气环境影响研究计划中,设计并成功地实施了观测试验。本文介绍该项测试并给出分析所得的一些观测事实,试图寻求一些规律,以供进一步研究应用。

一、观测试验

试验区地处河北省东部边缘,毗邻辽宁省,地理位置为39°56'N, 119°36'E。北依燕山山脉,南临渤海湾。沿海岸地区的地形自岸边向北呈缓缓上升趋势。沿岸有宽约十几公里的平坦地,并有台地将水陆联接。北部有宽约几公里的丘陵地带,平均高度50m左右;再北为燕山余脉,平均海拔高度可达四五百米。海岸地区的局地气象状况,通常比内陆地区更为复杂。于是,测试针对由水陆差异诱生的一些气象特征,如边界层风、温场分布,空中气流轨迹,内边界层结构和湍流扩散的特征参量的确定,布置实施各项观测。在约40×24km²的调查范围内(图1),布设10个地面测风点、5个边界层探测点和一个地面气象观测站,还建立一座气象观测塔。采用了低空探空仪、ADAS系留探测系统、声雷达、气球测风和平衡气球等探测手段,以及双向风标和铁塔梯度观测的自动数据采集系统等观测装置。各项观测除连续自记者外,均以两小时一次的间隔进行。观测试验曾在

* 本项工作的部分测试和分析是与华北电力设计院环保室、中国环境科学研究院大气所等单位共同承担完成的,深致谢意。

收稿日期: 1989年3月10日。

1985年8—9月和1986年5—6月两期实施^[2]。

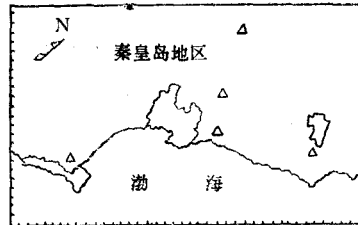


图 1 观测试验研究区域

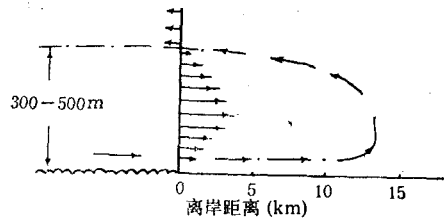


图 2 海陆风环流垂直剖面示例

Fig.1 The study area for the investigation Fig. 2 Vertical section of the Land-Sea breeze circulation
△ 边界层探测点

二、观测分析

根据研究区域的现场测试并搜集常年气象观测资料, 分析得出该地区的主要观测结果如下。

1. 边界层风与流场特征

研究区域地面常年盛行 W-WSW-SW(27%) 和 NE-ENE-E(18%) 的顺岸风。但由于地处水陆交界地区, 北部又有丘陵地影响, 使得边界层风和流场结构比较复杂, 有以下特点。

(1) 地面风与流场 取 27 年气象观测资料, 把 NE, ENE, E 和 SW, WSW, W 的来流归为顺岸风, 把所有除此以外的偏北风频的来流归为离岸风, 偏南风频的来流归为向岸风, 统计分析三种气流形式出现频率, 并列于表 1。

表 1 累年各月气流形式出现频率(%)

Tab. 1 Frequency of the air flow pattern monthly (%)

年 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
向 岸	11	15	19	25	30	33	34	23	17	11	9	7	19
离 岸	22	20	17	15	13	10	9	18	20	21	23	20	17
顺 岸	46	45	45	46	43	40	34	34	38	46	50	53	45

由布设在研究区域内的 10 个地面测风点记录, 作一年地面流场分布形式的分析, 得出地面流场形式分为: 顺岸风型、离岸风型、向岸风型、小尺度局地环流和其它无规则流场等 5 类。分析表明, 各类流场中仍以顺岸风型的出现频率最高(42.4%), 离岸风型次之(30.6%), 而向岸的海风型年出现频率为 14.3%, 尤以夏初、春末之交频率为高。

(2) 海陆风结构与转换 由图 2 可见, 观测发现的局地海陆风基本范围。岸边测点(离岸约 1.5km)实测海上来流层厚度变动为 300—500m, 而平均梯度流层的厚度则在 1000m 以上。通常, 出现局地海陆风环流时, 系统风梯度流的速度较小。统计表明, 海风平均风速为 2.8m/s; 陆风平均风速为 2.2m/s; 过渡期风速最小, 约为 1.5—2.0m/s。由一

日中不同时刻的气球测风资料,分析可知,海风在 07:00—08:00 间开始在低层出现,而后逐渐向上发展,至 11:00 前后,500m 高度以下盛行海风,其上层为陆风。这种状态一直可维持到 18:00 左右,之后海风层厚度开始降低。到 20:00 后海风层渐渐消失,低层转为陆风所替代。陆风盛行时,风速廓线在 300m 左右的高度上有一极大值;而当海风盛行时,风速在低层仍有极大值,但高度降低。由离岸不同距离的三个气球测风点上所得同时的风廓线(不同时刻)资料,不仅可以看到各测点上不同时刻的海陆风演变时间序列,而且还可以明显看到海陆风的转换变化,随伸入内陆距离不同而推迟或提前的现象,风向转换高度随着离岸距离的增加而变高,海风上岸深入内陆可达 15km 范围。岸边点上,白天由陆风转向海风的时间大约在 07:00—10:00 时段,至 16:00 左右发展充分,19:00 后渐渐消退换向;离岸较远的内陆点上则上述时间会相应推迟或提前。

由实测资料按如下判据分析,即以 02:00 为日界,凡 24 小时内流场呈陆—海—陆的周期性转换的,作为出现了一次海陆风环流,结果列于表 2。

表 2 全年各月陆海风转换日数及频率(%)

Tab. 2 Frequency and number of the land-sea breeze exchange day(%)

年 月 日 数 频 率	1985						1986						年
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
	9	9	10	10	9	3	5	4	5	6	5	6	81
	30	30	37	37	30	10	16	13	18	19	18	26	23

由海陆风环流与天气形势的相关性分析发现,当有局地海陆风出现时,大尺度天气系统的气压场变化一般比较均匀,梯度风很小,同时天空晴朗少云,水陆温差较大。参考 Biggs 等^[6]以及 Lyons^[7]的湖陆风出现指数的工作,我们拟合出研究地区指示海陆风出现的经验指数,形如:

$$I = U_{(Z=1000\text{m处})}^2 / C_p \Delta T \leq 5.5 \times 10^{-4}$$

式中, U 为未受海陆环流影响高度上的平均风速; ΔT 为一天中最大水陆温差; C_p 为定压比热。

(3) 风随高度分布 观测表明,风向随高度变化形式有:右旋、左旋、基本不变和无规则型四类。表 3 给出了各类天气形势下它们的出现频率。风速廓线的观测分析表明,边界层内的风速廓线形式分成:单极值、多极值(复杂)。单调递增和基本不变四种类型。它们与各类天气形势的关系以及出现频率示于表 4。

表 3 不同天气形势风向随高度变化类型出现频率(%)

Tab. 3 The occurred frequency of the patterns of the wind direction turning with height under different synoptic situations(%)

变化类型	右 旋	左 旋	基本不变	无规则
高压控制	73	10	5	12
弱低压控制	65	9	10	16
均压场	67	18	8	7
高压后低压前	69	11	0	30
总 体	67	10	9	14

图 3 所示为实测的典型风速廓线(局地海风条件下)形式,同时附有温度廓线,是具有

表 4 不同天气形势风速廓线类型出现频率(%)

Tab. 4 The occurred frequency of the types of the wind speed profile under different synoptic situations (%)

廓线类型	多极值	单极值	基本不变	单调递增
高压控制	51	33	10	6
弱低压控制	34	42	10	14
均压场	40	38	5	17
高压后低压前	53	37	0	5
总体	44	37	7	12

一定代表性的。

观测分析表明,海岸地区气流系统复杂,风切变有一定特征。风垂直切变有明显的日变化和高度差异,亦与大气稳定度状况有关。表 5(a-c)给出了一些观测结果。

(4) 空中气流轨迹 观测分析表明,研究区域空中气流轨迹的形式可分为:规则、反向转换、复杂不规则等三种类型。规则型即指气流轨迹平直,略呈现缓缓变换方向的趋势,但无显著改换;反向转换型即指气流轨迹在 $x-y$ 面上呈现明显的反向转换形式;复杂不规则型即指气流轨迹在 $x-y$ 面上呈现多次转向或呈环形和其它不规则形式,而在 $x-z$ 面上同样呈现扭曲或不规则上升的复杂形式。据 90 组气流轨迹观测结果分析表明,各类出现频率还是以规则类居多(68%),反向转换类居次(22%),复杂不规则类占少数(6.7%)。这反映了海岸地区既有大系统影响下空中气流轨迹的一般性变化规律,又存在局地复杂气流系统影响下的特征、进一步分析地面存在明显海、陆风转向交替的一些日子,该日各观测时次(间隔两小时)的平衡气球飞行高度的气流轨迹亦可明显看到空中海、陆风的转向交替过程。

图 4 示出的是一次比较完整的局地海、陆风环流过程中的气流轨迹,同时画有风向垂直剖面。联合起来看,由于风向自下而上的两次转向(一次自 SE 转向 SW; 另一次自 E 转向 NE),致使平衡气球在 $x-y$ 面上呈现 SE-SW-N-NE 的反转回流,在 $x-z$ 面上气

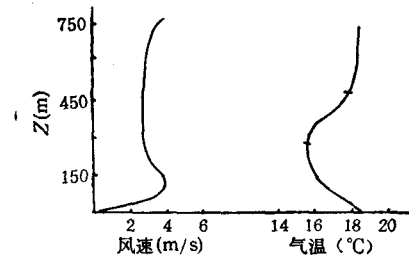


图 3 海风条件下典型的风、温廓线例(岸边测点)

Fig. 3 Typical wind and temperature profiles under sea breeze condition

表 5a 不同高层各类稳定度状况下的 $\Delta U/\Delta Z$ Tab.5a Values of $\Delta U/\Delta Z$ under various stability conditions in different layers

稳定度类	I	II	III	IV
420—360(m)	0.025	0.037	0.043	0.032
360—300	0.018	0.027	0.034	0.037
300—240	0.017	0.023	0.031	0.024
240—180	0.014	0.019	0.031	0.026
180—120	0.015	0.024	0.037	0.040
120—60	0.026	0.029	0.051	0.035

表 5b 不同高度层各类稳定度状况下的 $\Delta\alpha/\Delta Z$ Tab. 5b Values of $\Delta\alpha/\Delta Z$ under various stability conditions in different layers

稳定度类	I	II	III	IV
420—360(m)	0.283	0.483	0.700	0.317
360—300	0.283	0.333	0.550	0.400
300—240	0.300	0.300	0.617	0.233
240—180	0.133	0.300	0.633	0.250
180—120	0.250	0.480	0.633	0.450
120—60	0.433	0.387	0.933	0.883

表 5c 不同风向各类风向切变出现频率(%)

Tab. 5c Frequency of various types of the wind direction shear under different wind directions(%)

切变类型	a	b	c	d
0—90°	44.2	4.7	32.5	18.6
180—270°	18.0	4.9	47.5	29.5
90—180°	15.8	0.9	36.8	46.5
270—360°				
总体	24.6	4.7	39.8	30.8

注: (1)稳定度类以 P—G 级别划分如下: I 类含 A, A-B, B; II 类含 B-C, C; III 类含 C-D, D, D-E; IV 类含 E, E-F, F; (2) 风向切变类以相应层变化的度数划分如下: a 类 >120°; b 类 90—120°; c 类 30—90°; d 类 <30°; (3) 风速切变 ΔU (m/s); (4) 统计总样本数为 240。

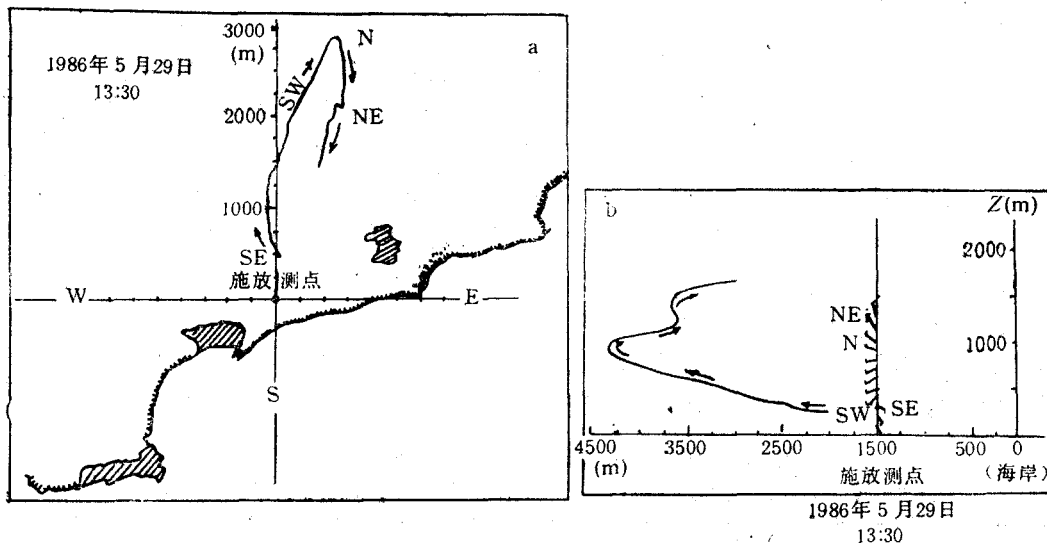


图 4 局地海陆风条件下的气流轨迹实例

Fig. 4 An example of air flow trajectory under local Land-Sea breeze condition.

a. x-y 面上; b. x-z 面上。

球升高同时返流向海上。比较清楚地示出了局地海陆风环流过程中的三维气流系统的结构特征。

2. 海岸内边界层结构特征

由实测风资料,分析出离岸不同距离测点所得风速廓线的拐点高度。然后,与测点离岸距离(x)取对数作图并作线性回归,可得动力内边界层高度 $h_p(x)$ 的实验关系,结果示于表 6。由温度探测资料可以确定热力内边界层的存在及其界面的廓线形式和增长率。分析结果表明,热力内边界层界面的增长率为 $1/30-1/10$,并得出热力内边界层高度 $h_\theta(m)$ 的实验关系如下:

$$h_\theta(x) = 69.2 \left(\frac{\Delta T \cdot R \cdot x}{\bar{U}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中, ΔT 为水陆温差 ($^{\circ}\text{C}$); R 为太阳辐射量 [$\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$]; \bar{U} 为岸边地面平均风速 (m/s); x 为伸入内陆距离 (km)。

表 6 动力内边界层斜率 (k_p) 和高度 (h_p)

Tab. 6 Slope (k_p) and height (h_p) of the mechanical internal boundary layer

$U(\text{m/s})$	<3	3—6	>6	平均
$k_p(x)$	$0.076X^{-0.505}$	$0.066X^{-0.520}$	$0.095X^{-0.765}$	$0.072X^{-0.543}$
相关系数	0.77	0.34	0.88	0.84
$h_p(x)$	$75.18X^{0.497}$	$65.4X^{0.474}$	$87.35X^{0.283}$	$71.88X^{0.455}$
相关系数	0.78	0.93	0.61	0.79

3. 边界层特性参数

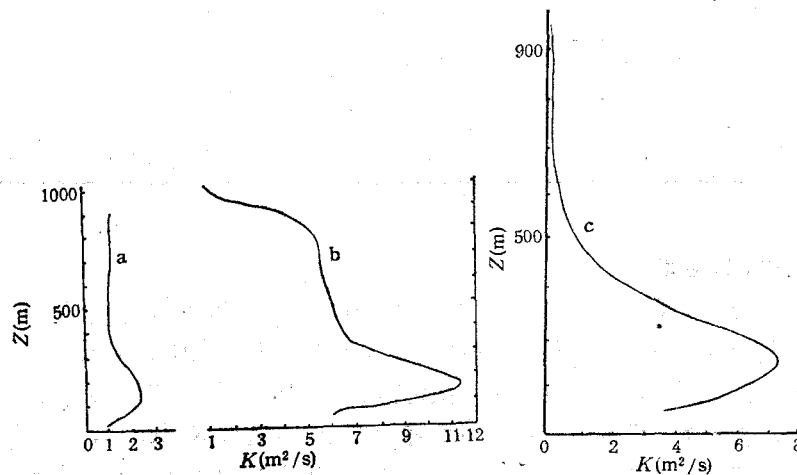
观测表明,通常,风速不大的晴天、正午时间大气层结最不稳定,相应的实测 R_i 数可达 -6.71 ,摩擦速度为 0.6m/s 左右,特征温度为 -0.07K 。在阴到多云、风速较大的中性层结天气条件下,典型的 R_i 趋近于零,摩擦速度为 0.4m/s 左右,特征温度接近于零,表明机械湍流占主导地位。稳定层结状况下摩擦速度小,而随着 R_i 数的增大,特征温度也有增大趋势,这表明夜间辐射冷却,逆温增强,测试期间一些特征参数的计算结果示于表 7。

在测试研究区域,以各种手段,如双向风标、平衡气球和声雷达等,测定了不同层次的湍流扩散特性。由风向、风速分量的脉动强度计算得大气扩散参数,结果表明海岸地区的扩散特性具有明显的分区、分层特点。采用现代的一些湍流交换系数(K)的计算模式计算了近地层不同层结条件下的 K 值分布。中性条件下用 Arya 的公式^[3]和 Lettau 的作法^[6],不稳定条件下用 Yamamoto 模式^[8]和能量方程,稳定条件下用 Estoque II 模式^[5]和能量方程。在吹顺岸风和离岸风时,用陆上风廓线计算,代表陆上大气边界层的湍流交换状况。在吹向岸风时,由于内边界层的存在,且有 $h_\theta > h_p$,故在 h_θ 以上层代表海风廓线, h_p 以下层代表陆风廓线,并依此分别计算代表海上和陆上的 K 值分布。在 $h_\theta-h_p$ 之间,则由线性内插得。结果如图 5 所示。中性层结条件下, 300m 高度上往往出现有逆温层而抑制湍流发展,在其下部近 200m 处 K 值有极大值 ($K_{\max} \approx 8\text{m}^2/\text{s}$),而上部 K 值较小。稳定层结条件下的 K 值显然较小,最大值不超过 $2-3\text{m}^2/\text{s}$;反之,不稳定层结条件下的 K 值则较大,最大值可达 $12\text{m}^2/\text{s}$ (200m 高度)。由 K 值计算所得分布,运用于研究地区空气污染物输送与扩散的三维数值模式中,取得良好效果^[1]。

表 7 湍流特征参数计算结果实例

Tab. 7 Some examples of the calculated result on the turbulent parameters

时 间	Ri	M—O 长度(m)	摩擦速度 (m/s)	特征温度(K)
15:30	-6.71	-1.69	0.61	-0.0734
13:30	-3.22	-18.21	0.49	-0.0598
11:30	-0.28	-98.07	0.40	-0.023
19:30	-0.02	-1087.42	0.40	-0.0001
17:30	0.015	2071.89	0.36	0
19:30	0.08	176.32	0.29	0.0192
05:30	0.10	87.45	0.22	0.0184
21:30	0.18	46.39	0.27	0.0207
21:30	0.28	8.94	0.20	0.0308
02:00	0.46	7.85	0.10	0.0429

图 5 不同层结条件下的 K 值分布Fig. 5 Distributions with height of the K value under various stratifications

a. 稳定; b. 不稳定; c. 中性。

本研究计划主要为工程环境影响评价目的而实施的, 研究分析所得大量观测事实充分反映了海岸地区确实存在一些具有特征的大气现象。

参 考 文 献

- [1] 蒋维楣、蒋亚洪, 1989. 海岸地区空气污染物输送与扩散的数值模拟. 气象学报 47(1): 61—72.
- [2] 蒋维楣、姚惠源、李宗恺, 1989. 海岸电厂工程大气环境影响评价研究. 火电厂工程环境影响研究(第一部分). 南京大学出版社, 3—156 页.
- [3] Arya, S. P., 1982. Engineering Meteorology. Elsevier Scientific Publishing Company, NY, pp. 263—273.
- [4] Biggs, W. A. & M. E. Graves, 1962. A lake breeze index. Tech. Report 5: 35.
- [5] Estoque, M. A., 1973. Workshop on Micrometeorology. Science Press, Ephrata, Pa, pp. 217—270.
- [6] Lettau, H., 1950. A re-examination of the "Leipzig wind profile" considering some relations between wind and turbulence in the frictional layer. Tellus 2(2): 125—129.

- [7] Lyons, W. A., 1972. The climatology and prediction of the Chicago lake breeze. *J. Appl. Meteor.* 11: 1259—1270.
- [8] Yamamoto, G., 1959. Theory of turbulent transfer in non-neutral conditions. *J. Meteor. Soc. Japan* 37: 60—69.

OBSERVATION STUDY ON WIND IN PBL AND ITS TRANSPORT AND DISPERSION IN COASTAL REGION

Jiang Weimei, Wang Yanchang and Zhong Shiyuan

(*Nanjing University*, 210008)

ABSTRACT

The paper describes a research project carried out in coastal region of northern China based on the observations and presents some experimental results of this project. Some regular patterns on the wind characteristics, circulation phenomena, boundary layer structure and various parameters in coastal region have been obtained. Observations show that the transfer time from land to sea breeze is at 08:00 and then develop fully until 18:00 and decay gradually to change the wind direction. The depth of the air flow from sea at point nearby shore falls in range of 300—500m with average velocity of 2.8m/s. The experimental relation of the TIBL is $h_0(x) = 69.2(\Delta T \cdot R \cdot X / \bar{U})^{-1/2}$. In the paper some turbulence parameters have been calculated, such as, U_* , T_* , R_i , L and dispersion coefficient K_* . The observations revealed some realistic characters of the atmospheric processes in coastal region provided basic parameters and experimental bases for future research work.