

层结大气中烟气扩散的实验和数值模拟^{*}

张伯寅

李长令

桑建国

(北京大学湍流研究国家重点实验室, 北京 100871)

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘 要 利用不同密度分层的盐水模拟稳定大气层结条件, 对复杂地形上的烟气绕流及其扩散规律进行实验研究, 是一个被实践证明行之有效的方法。同时对低层逆温中出现的烟气扩散现象也得到了独特的效果。且水中实验具有可视化的优点, 可以得到直观 displays 图像。通过烟气扩散灰度的变化, 也可对其浓度量化, 使定性研究又取得了进展。特别是对复杂地形所做的数值模拟计算与实验的相互验证, 取得两者相一致的结果。

关键词 层结大气 湍流扩散 模拟实验

1 引言

复杂地形上空烟气绕流及其扩散的研究是一个十分复杂的问题。就其大气条件的变化, 例如中性大气, 稳定层结大气或出现不同程度的低空逆温, 都会给烟气的流动轨迹或扩散规律带来很大的差别。目前, 采用风洞实验实现温度层结, 除技术上有一定的难度外, 所需费用也较大。而使用盐水实现密度分层来达到层结大气的目的, 确是一个经济而又现实的途径。作者经过长时间的实践, 对水及盐水所做的模拟实验曾与京郊珠窝电厂地区烟气扩散的现场实测进行了对比性实验, 已取得了相当一致的结果^[1,2]。

用水及盐水来模拟大气所进行的烟气扩散模拟实验, 从理论上讲必须满足其相似条件, 而其中保证动力学相似更为重要。本文将选择广东省大亚湾地区所处复杂地形上对其烟气扩散规律做详细叙述。

为了有力的证明水槽模拟实验的可靠性和精确性, 除用现场实测来验证外, 本文重点讲述了在同一地形, 同一模拟参数条件下的数值模拟计算并取得了满意结果。

2 水槽模拟实验

2.1 实验装置与方法

实验是在北京大学湍流研究国家重点实验室的 $1\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 18\text{ m}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长) 拖槽中进行的。所谓拖槽即模型被拖车拖动在静止的水介质中产生相对运动。由于介质是静止的有条件在水槽中进行各类不同大气条件的密度分层。本实验选择了三种不同的大气条件, 即: (a) 相当于中性大气条件的均匀密度流动; (b) 相当于稳定层结大气条件的密度随高度连续变化; (c) 在高度上密度发生突变相当于低空逆温。图1给出了水槽中密度垂直分布情况。

1997-06-09 收到, 1997-09-01 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 19572006, 并得到北京大学校长基金的支持

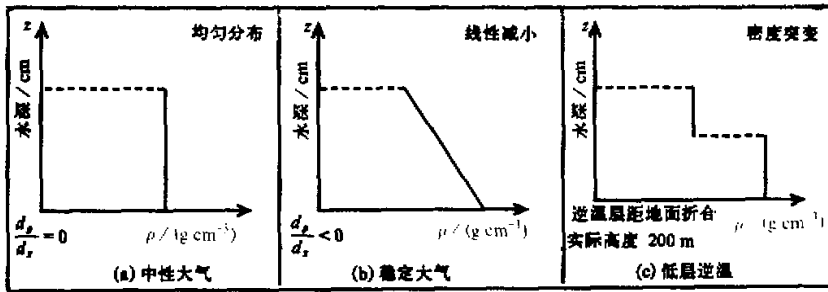


图1 水槽中盐水密度垂直分布图

大亚湾地区所处地形特点为：最高山峰排牙山，海拔 707 m，东西长约 8000 m，南北宽约 4000 m 的一片高山。高山以西有一块平原地带，再往西则是一些高约 200 m 不等的另乱小山包。厂区排放源设在主山脉以南（图 2，见图版 I）。模型按实际地形仿制而成，其水平方向缩小比例为 M1:15000，垂直方向缩小比例为 M1:8000。模型材料选用木材，表面做涂腊防潮处理。实验时拖车速度即代表风速。采用彩液示踪法进行流动显示。彩液通过烟囱释放出来，在地形影响下获取不同条件下的流谱。释放彩液（可称烟流）除需满足相似条件外其彩液在烟囱出口处的密度应与周围环境介质的密度相同，以避免人为的造成烟流的上浮或下沉，而使流型失真。实验过程中从顶部及侧面进行拍摄，以获取不同方向的流动形态。

2.2 相似条件的考虑

利用水介质模拟大气，一般地说应满足如下相似参数：即几何相似、地面大气边界层相似、大气层结状态相似、雷诺数 Re 相似、弗劳德数 Fr 相似等。相似参数的实现并非在任何一类实验中都能得到满足。而且都需要得到满足的相似参数之间又存在着矛盾。例如：雷诺数 Re 与弗劳德数 Fr 同时都存在水槽实验中，雷诺数是表征流动惯性力和粘性力比值的一个参数，根据实际大气运动，一般雷诺数可达 $10^7 \sim 10^{10}$ ，尽管在实验室难以实现，实验中也应愈大愈好，以使实验雷诺数 Re 与实际雷诺数 Re 更接近。而弗劳德数 Fr 是表征大气浮力的影响，其参数值直接受风速影响，为了实现弗劳德数的相似，其风速值又不能太大，太大了浮力效应将被破坏，这就与雷诺数 Re 形成对立。所以在相似参数选择中只能有所取舍，由于本文着重于稳定层结大气的研究，因此主要获取弗劳德数 Fr 相似的满足。此外，弗劳德数 Fr 又可表明大气的静力稳定度，弗劳德数 Fr 愈小，则表明大气稳定度越强，当弗劳德数 Fr 足够小时，雷诺数 Re 已不起主导作用，流动结构主要是层结即重力内波的影响。本文实验中选择弗劳德数 Fr 数值为 0.12~0.73。弗劳德数 Fr 表示为 $Fr = U / NH$ ，其中， $N = \sqrt{-(g/\rho)(\partial\rho/\partial z)}$ (z 是垂直坐标， ρ 是密度， N 称为 Brunt-Vaisala 频率)， U 表示风速， H 表示特征高度，这一参数可以表明大气的稳定度。其物理意义是大气的动能与浮力做功之比。当 $\partial\rho/\partial z = 0$ 时， $Fr \rightarrow \infty$ 相当于中性大气； $\partial\rho/\partial z < 0$ 时，水介质的密度随高度减小，相当于稳定大气情况。针对大气污染扩散的研究，人们关心的是在强稳定层结条件下烟气不易扩散所带来的危害，或说弗劳德数 Fr 应足够小。

此外还需保证烟囱出口附近的相似参数: 即

$$R = W_s / U,$$

$$Re = W_s L / \nu,$$

$$Fr = W_s / \left(g \cdot L \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{1/2},$$

即烟囱出口处的速度比 R , 烟囱出口处的雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 。式中, W_s 为烟气喷射速度; U 为来流风速; L 为特征长度 (烟囱出口直径); $\Delta \rho$ 烟气密度与出口处环境密度之差; ρ 为烟囱出口处当地环境密度; ν 为水的粘性系数。

关于速度比 R 是决定烟羽形态的重要参数, 它决定了烟羽边界夹卷湍流的强度和烟羽的动力抬升, 模拟实验中必须得到满足。通常烟囱设计中, 速度比 W_s / U 按规范有一定的范围, 本实验选择 R 为 1~2。

2.3 实验结果

复杂地形上的烟气扩散是十分复杂的问题。烟气扩散轨迹受地形地物的影响而产生绕流或旋涡, 特别是不同大气条件, 使烟气的形态有着很大的不同, 受影响的范围和地区也有差异^[1]。本文针对广东省大亚湾所在地理位置, 从烟囱中释放烟气, 由于地形地物的作用受风的影响在不同的大气条件下而产生的流态。并选择其中某一种作图形图像处理, 使之烟羽浓度的分布量化。

2.3.1 稳定层结大气条件下的烟气扩散

图 2 (见图版 I) 给出了在东风时, 稳定层结大气条件下烟气扩散的流谱, 并与中性大气条件时作了比较。两者之间的地形相同, 实验条件均相同。从图中直观地看到除了给厂区所在地以及周围地区带来的污染影响外, 从流动特征也可以得到如下结论: 图 2a 中烟囱释放出来的烟气在中性大气条件下, 贴着地形凸起物形成背风绕流。由于中性大气条件, 烟气的湍流扩散激烈, 向周围大气四面八方充分发展, 致使影响到该地区山间的平原地带。从图 2b 稳定层结大气条件时的烟气流谱可以看到, 其基本特点是大气温度随高度不断降低, 也即本实验中用盐水模拟的盐水密度随高度减小。由于层间流体密度差的存在, 使烟气在垂直方向的扩散受到抑制, 湍流扩散大大削弱, 烟气的污染物形成一个狭窄烟羽。由于地形的影响, 流动受阻。在风速较低时, 烟流受障碍物的阻滞再次形成了一个回流区, 或涡旋区。这是典型在层结大气中流动出现的绕三维物体后的二维流动效应。这些现象在实际大气环境中都是存在的。图中上为前视图, 下为俯视图。

2.3.2 逆温层大气条件下的烟气扩散

图 3 (见图版 I) 给出了大亚湾地区所在地形下在西风时, 大气存在着 200 m 逆温层时烟气扩散的流谱, 并与中性大气条件时作了比较。图 3a 是中性大气条件时的流态, 同样看到绕山的烟气扩散活跃, 影响的山区面积也大。而图 3b 进一步表明了逆温层结时由于绕流排出的烟气形成弯曲的烟羽, 绕地形而过。同时由于湍流的发展受到抑制致使烟羽狭长而浓度很高。

通过上述两组不同大气扩散的比较, 除了可以直观看到烟气扩散的流态外同时可以加深对层结大气和低空逆温时出现的烟气扩散状态的认识, 并对污染扩散预报及现场实测采样选点都有重要意义。

2.3.3 烟气扩散流谱的量化

烟气的排放是一个非常复杂的三维烟气团, 就其湍流扩散带来的浓度分布是很难定量测量的。但就其排烟过程从开始最浓继而随着不断扩散而变淡的事实(实验中烟管排出的液流也是如此, 随着液流的扩散使之不断淡化), 如果反映到摄影底片上其浓淡之分必然形成灰度的变化。用灰度值来定量反映烟流的浓度值的变化, 实现烟气扩散流谱的量化。尽管平面灰度的变化, 难以表示整个烟羽的变化, 确仍能粗浅的给人以量的概念。为了进一步说明烟羽流谱的量化, 选择了上述地形在某种大气条件下, 刮西风时一种烟气扩散轨迹的形态, 做图形图像处理。通过图像处理使用 MD30C 扫描仪, 设定扫描为 150dpi, 用 DEC 图像系统控制扫描。用汇编语言程序和 Pip 图像系统分析处理图像数据, 最后得到如图 4a 某烟流经图像处理灰度变化的分布状态。进而对灰度与浓度的关系进行标定, 可以得到浓度与灰度的定量关系, 使图 4b 中的烟羽在一个方向上有一个相对量级的浓度值分布, 使烟气扩散中重要浓度的变化能给人以量的概念。

3 数值模拟

在上述水槽实验研究的同时, 还进行了数值模拟计算, 以使两者结果作出比较, 达到相互验证的目的。同时也检验数值模式在模拟中小尺度复杂地形上流场和湍流扩散的能力。

数值模式包括地形追随坐标系中, 准静力中尺度动力模式和随机行走质点扩散模式两部分。两个模式的细节见文献[3]和[4]。数值模式的计算域和水槽实验中地形模拟范围大致相同, 约为 $19 \text{ km} \times 14 \text{ km}$, 覆盖当地排牙山及其附近地表的主要部分。模式网格取为 $28 \times 16 \times 12$, 水平格距为 7070 m。垂直格点在低层分别为 0, 10, 50, 100, 200, 500 m……。模式顶部为 6500 m, 最上面的四层格点为 Rayleigh 吸收层, 因此只有 2000 m 以下的流场是可用的。对于近地面源短距离输送扩散问题, 这个高度以下的流场可以满足计算平流扩散过程的要求。

在计算流场的同时, 还积分湍流动能方程, 以便得出湍流动能 $q^2 = (1/2)(\overline{U'^2} + \overline{V'^2} + \overline{W'^2})$ 的分布, 由 q 值得出湍流扩散系数 $K = S_m q l$, 其中 l 为混合长, S_m 为比例系数, q 还可为质点模式提供湍流速度的方差^[4,5], $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = (1.12, 0.44, 0.44)q^2$, 给定大气温度层结和来流风速条件, 此模式可模拟出该大气条件下气流流经此山地地形的动力强迫作用所形成的流场。

设定的大气条件可分为三类:

(1) 中性层结: 相当于水槽实验中均匀流体情况。它反映实际大气中, 具有中等强度以上风速, 或太阳辐射不太强(例如多云)情况时的白天边界层, 边界层顶的作用。在近距离扩散中可以不考虑。

(2) 低层逆温: 逆温底的高度为 200~300 m 其下为中性或弱不稳定层。它代表夜间间接地逆温在上午破坏后形成的低层逆温, 或海风热力内边界层顶形成的逆温。内边界层顶一般坡度较小, 在内陆部分可近似看成是水平的。

(3) 连续的稳定层结: 代表夜间间接地逆温状态。

图 5 (见图版 II) 给出了与水槽实验相同的大亚湾地区数值模拟地形图。

上述温度层结配合不同的风向风速条件, 共进行十余组数值计算, 以研究不同大气条件下的地形强迫流场中的扩散状态。考虑到篇幅所限仅就大亚湾地区地形在中性及逆温层结时数值模拟结果叙述如下:

在西风时, 初始风场及入流边界上的风速设为均匀风速 $\bar{U} = 2 \text{ m/s}$ 。初始温度场设为整层中性, $\bar{\theta} = 280 \text{ K}$, 但在海拔高度 30 m 以下设为弱不稳定, $d\theta/dz = -0.2 \text{ K/100 m}$ 。设置这一浅薄对流边界层是为了在开始积分湍流动能方程时, 浮力项能生成一定强度的湍流动能, 使得湍流扩散系数在积分初始阶段不为零。

模式启动后, 风场开始变化。引起风场变化的是地形的形式阻力及湍流动量输送。当积分时 $t > L/\bar{U}$ (L 为计算域长度), 流场基本处于准定常状态。图 6 (见图版 II) 为海拔 100 m 高度处的水平流场。图中的倒三角符号表示地形高于 100 m 的地区。图中风矢量表示出地形动力作用引起的风向风速变化。在风向和地形迎风坡面正交的地方, 由于地形阻力, 使得风速减小, 但风向变化较小。在风向和地形坡面斜交的地方, 主要是绕流引起的风向变化, 风速改变较小。在背风坡, 风向风速都有较大变化。

当流场积分时间为 $t = L/\bar{U}$ 时, 在烟源 100 m 高度处, 开始释放质点, 模拟在准定常流场中的烟云扩散行为, 得到的质点分布也显示在图 6 中。比较图 6 和图 3a 表明在近中性大气中数值解得到的烟云质点传输扩散行为 (即烟流运动轨迹) 和水槽模拟实验均匀流体中烟气示踪物的散布状态相似。在近中性的流动中, 流体微团始终处于随遇平衡状态, 因而可以越过地形障碍, 流体微团中挟带的示踪质点, 也可以自由地流过地形。同时由于地形引起的流场扰动质点侧向湍流扩散较强, 形成较宽的烟云分布。

进而风速设置和前述相同, 温度层结在近地面处也和前例相同。但在海拔 200 m 高度处, 设一 $\Delta\theta = 2 \text{ K}$ 的位温跃变。在其上取稳定层结 $d\theta/dz = 1 \text{ K/100 m}$ 。相当于一个底部高度为 200 m 的逆温层, 覆盖在一近中性的边界层之上。

图 7 (见图版 II) 为海拔 100 m 高度处准定常的流场数值解。此流场图明显反映出排牙山地形造成的绕流现象。在地形的迎风坡, 即排牙山迎风面的山脚附近, 由于地形的阻塞作用, 风速减小, 并在地形南北两侧产生绕流。在北侧气流偏向北, 在地形迎风面南侧, 气流偏向南。绕过地形的气流背风坡向中心辐合。

从图 7 中的质点分布也可看出地形的绕流作用。在源点附近, 烟云轨迹与入流边界上的风向成约 45° 的夹角。烟羽绕过地形南侧, 形成一弧形轨迹。比较图 7 和图 3b 中质点行为 (表明烟流轨迹), 可以看出它们流态基本一致。但由于数值解中, 地形分辨率低于水槽实验中地形模型分辨率, 因而水槽实验中地形造成的烟云轨迹较小的弯曲, 在数值解中没有表现出来。

综上所述选择相同地形, 在刮西风时, 在中性大气和 200 m 逆温层大气条件下, 通过上述图 6、图 7 的数值计算结果与图 3a 和图 3b 模拟实验结果进行比较, 其烟气运动流态基本一致。说明了数值模拟和实验模拟两者的符合程度, 还是令人满意的。

4 结束语

研究复杂地形上不同大气条件的烟气扩散有着很重要的理论和实用价值, 特别是对释放的污染物流动轨迹能给予预报, 进而采取一些预防措施, 是环境保护不可缺少的重

要工作之一。现场实测, 实验室模拟实验, 数值模拟计算是上述研究工作中三个重要手段。三者能够得到相互验证, 达到取长补短效果时, 必然会提高研究水平, 增加对研究工作的可靠性和可信度。本次模拟实验与数值计算、均得到现场实测(释放示踪粒子)进一步核实, 三者取得相当一致结果。利用水槽进行模拟实验在以前并未得到人们的足够重视, 北京大学湍流研究国家重点实验室在水槽实验上, 经过多年来的不断实践, 实验研究手段上不断进化, 并与现场实测, 风洞模拟实验对比所取得的一致性, 已经显示出它的理论和实践的正确, 且水槽实验具有可视性好, 直观的优点。特别是利用水介质密度分层来研究层结大气条件, 更是对实验研究中的一个重要补充。

本文针对大亚湾所在地区复杂地形条件下所进行的水槽模拟实验和数值模拟计算, 是一次重要的尝试, 并选择中性大气和逆温大气条件的烟气扩散结果进行了对比, 并取得了一致结果。进一步验证了各自的实验方法和理论模式的正确性。为今后的大气扩散, 环境保护预报提供一套经济的研究方法。

参 考 文 献

- 1 宣捷, 张伯寅, 1991, 河谷地形中性及稳定大气中烟气扩散规律的水槽模拟实验, 气象学报, 49(1), 85~90.
- 2 Snyder W. H., 1985, Fluid modeling of pollutant transport and diffusion in stably stratified flow over complex terrain, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17, 239~266.
- 3 Sang Jianguo, Bian L. Q. and Shi Z. Q., 1990, Numerical simulations of sea-land breeze in coastal area of Guangdong NPP, China, Report 3 of Research Contract No. 5247 / RB, International Atomic Energy Agency.
- 4 桑建国, 1988, 复杂地形上湍流扩散的数值模拟, 气象学报, 46, 219~226.
- 5 桑建国, 温市耕, 1992, 大气扩散的数值计算, 北京: 气象出版社.

Experimental and Numerical Modeling of Plume Dispersion in Stratified Atmospheres

Zhang Boyin and Li Changling

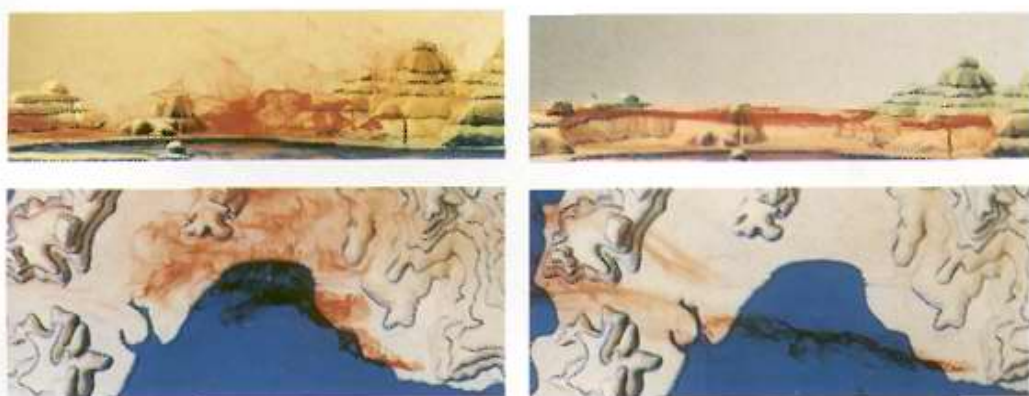
(State Key Laboratory for Turbulence Research, Peking University, Beijing 100871)

Sang Jianguo

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Laboratory observation of plume dispersion and diffusion over complex topography in towing tank experiments with salt water as stratifying agent has proved to be a useful modeling means in the investigation of plume dispersion characteristics over complex terrain in stratified atmospheres. Various phenomena of plume dispersion under conditions of elevated inversion were also usefully modeled. Flow visualization technique made it possible to directly and clearly observe the flow field and the dye darkness can be quantified by means of image processing enabling the plume concentration field to be detected. Numerical modeling of the same problem was also carried out and satisfactory agreement between the computed and the observed results were obtained.

Key words stratified atmosphere turbulent dispersion experimental modeling



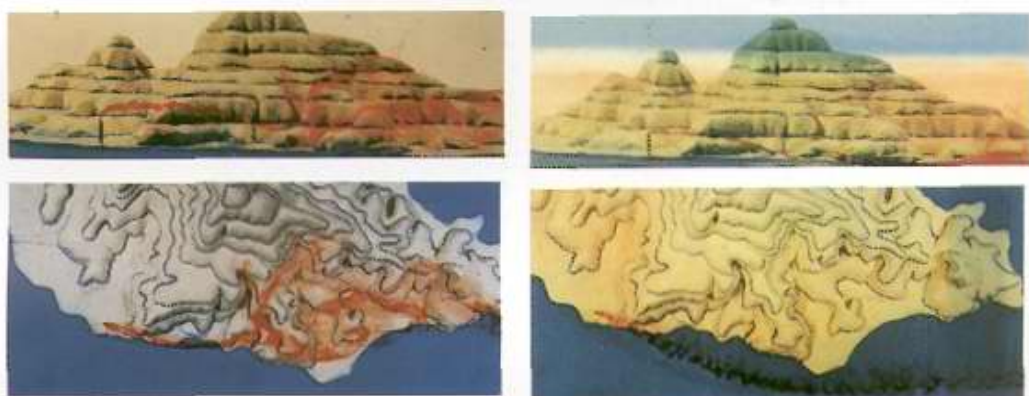
烟图高度: 100 m, $Re=1.36 \times 10^3$

(a) 中性大气条件的烟气扩散图

烟图高度: 100 m, $Re=1.02 \times 10^3$, $Fr=0.21$

(b) 稳定层结大气条件的烟气扩散图

图2 中性大气与稳定层结大气条件时的烟气扩散比较 (风向: 东风)



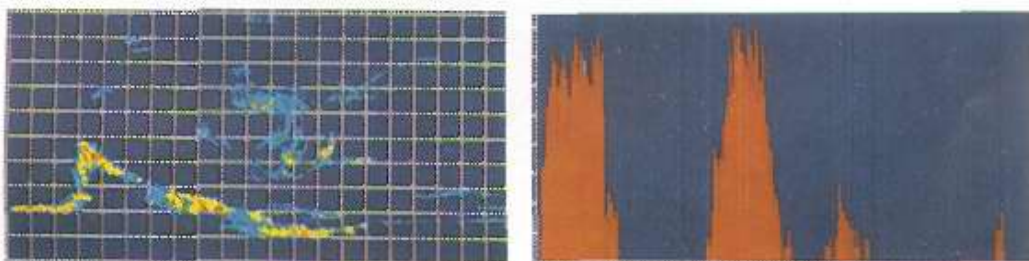
烟图高度: 100 m, $Re=1.36 \times 10^3$

(a) 中性大气条件的烟气扩散图

烟图高度: 100 m, $Re=1.02 \times 10^3$, $Fr=0.73$

(b) 200 m 逆温层条件的烟气扩散图

图3 中性大气与逆温层大气条件时的烟气扩散比较 (风向: 西风)



(a) 图像处理后的烟羽灰度分布

(b) x 方向浓度值分布

图4 烟气扩散流谱的量化

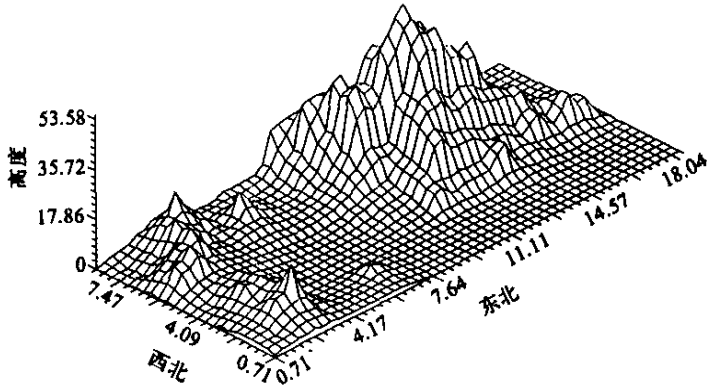


图5 大亚湾地区数值模拟地形图

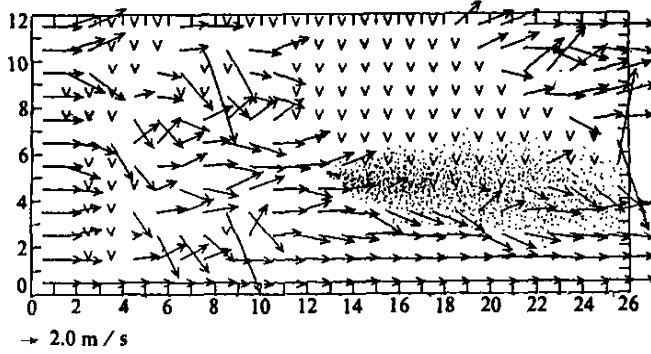


图6 中性大气条件水平流场的数值模拟

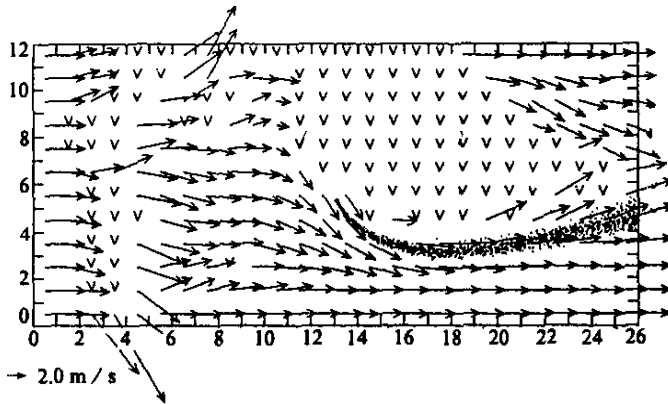


图7 逆温层大气条件水平流场的数值模拟 (逆温层高度: 200 m)