第49卷 第1期　　气 象 学 报　　Vol. 49 ,No. 1
1991年2月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Feb., 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*

宣 捷　张伯寅

（北京大学力学系）

王道藩　崔新成　曹新荃　张国君

（湖南省气象科研所）

张振傅

（湖南省环保局）

本世纪70年代末和80年代初国外已有人用分层拖曳水槽研究大气污染扩散[1]。本文作者1983年进行的实验研究也引起了国内外同行的广泛兴趣[2]。本文对典型河谷地形中，中性及稳定大气条件下流动及烟气扩散规律得到了一系列定性结果。该结果具有相当的代表性，将对河谷地形污染扩散规律的进一步定量研究，提供明确的物理图象。

1. 前　言

在环境预评价中，需要对具体的地形和气象条件下排放源给自然界带来的危害进行综合评价。其中特别需要弄清由烟囱释放出的有害气体的扩散规律，从而提出相应的防治措施，如烟囱摆放的位置及其合理的高度等。

图1是地形模型，其比例垂直方向为1/3000，水平方向为1/10000。这是一个群山环抱之中的较宽河谷地带。谷地大致东西走向，最宽处约为1800 m，两侧山峦起伏，相对于谷底最大高度为242 m，烟囱东侧有一大一小两个三维小山包。



图1　地形模型

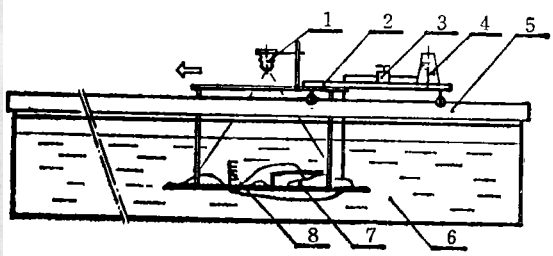


图2　实验装置示意图
（1照像机　2拖车　3电磁阀　4彩液瓶　5导轨　6水槽　7实验模型　8排管）

现场提供的气象资料表明，该地年主导风向为偏东风，本实验模拟的即为东风下的烟气扩散情况。逆温情况取自附近县城的探空资料，资料给出了两个逆温高度：30—80 m 和100—140 m。

* 本文于1988年7月11日收到，1989年3月17日收到最后修改稿。

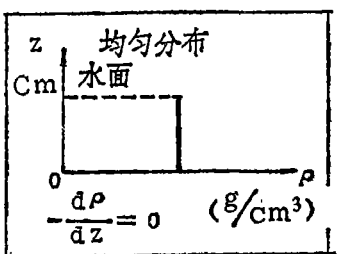
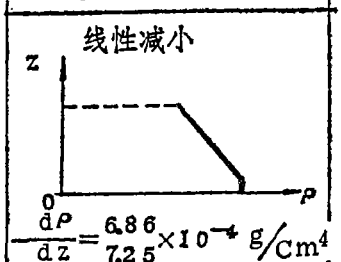
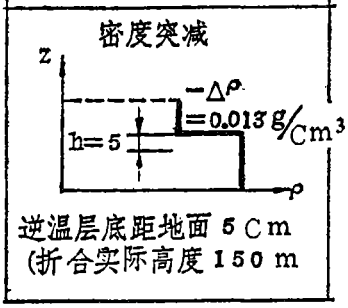
本文中模拟实验研究，将根据这些条件进行实验方案的设计，同时对相似律问题做了较深入的讨论。实验结果与现场实测资料的比较是相当一致的，进一步说明了水槽实验的有效性。

2. 实验装置及内容

实验在拖曳式水槽中进行，水槽长 6 m，宽 0.4 m，高 0.5 m(图 2)。采用彩液示踪法显示技术来表示流场的流谱。为了显示相应的复杂流场结构，在烟囱的上游(东方)安置了两组释放彩液的排管，一组垂直分布，一组是可以调节高度的水平分布。应注意的是彩液的密度应与它释放处环境介质的密度相同，以避免彩液的上飘或下沉造成流谱失真。

实验内容分三部分进行，见表 1。即均匀密度流动，相当于中性大气情况；密度随高度连续减小，相当于稳定大气情况；两层密度($\rho_{上}<\rho_{下}$)流动，相当于一定高度上存在逆温层的情况。

表 1 实 验 分 类 内 容

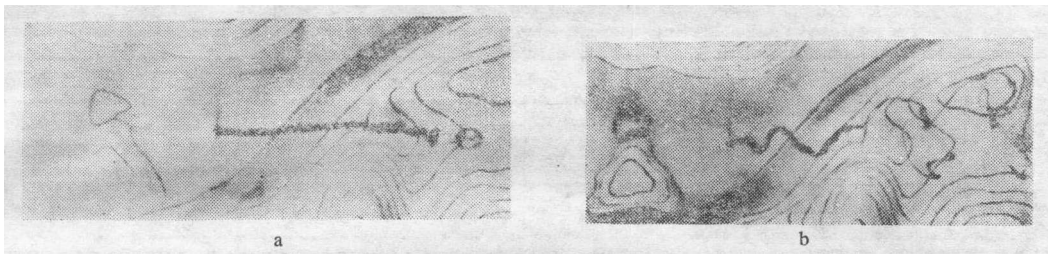
分类	密度垂直分布情况	拖动速度 U	雷诺数 Re	弗洛德数 Fr	速度比 $\frac{W_s}{U}$	烟囱高度 h_s	水平流场显示高度
中性大气		0.5—2.9 (cm/s)	290—1750	∞	3.0—9.6	2.0cm, 3.4cm, 4.0 cm (相当于实际高度60 m, 100m, 120m)	2.5 cm, 3.5cm, 4.0 cm, 4.5 cm (相当于实际高度 75 m, 105m, 120 m, 135 m)
稳定大气		0.8—2.2 (cm/s)	420—1150	0.15—0.42	3.0—8.4	3.4 cm (相当于实际高度 100 m)	2.5 cm (相当于实际高度 75 m)
高架逆温		0.6—2.2 (cm/s)	310—1150	$Fr'=\frac{U}{H'\sqrt{\frac{-g\Delta\rho}{\rho H'}}}$ (H′=5cm逆温层底高度) F′为0.08—0.28	3.0—11	3.4 cm (相当于实际高度 100 m)	2.5 cm (相当于实际高度 75 m)

3. 相似律的讨论

实验中除模型的几何相似外，主要相似参数取雷诺数 Re(Reynolds number)，弗洛德数 Fr(Froude number)和速度比 W_s/U(W_s：表示烟气出口速度)。其它有关相似参数可参阅文献[3,4]。

1) 雷诺数 Re：

$Re=\frac{UH}{\nu}$（其中 H 是特征山峰的相对高度；ν 是水的动力学粘滞系数）。雷诺数对流动的湍流结构有着决定性的影响，然而在实验室条件下不可能达到实际大气流动的雷诺数（10^7—10^9），特别是在环境流体力学中的模拟实验还要受到其它相似参数（如弗洛德数）的牵制，可达到的雷诺数更要低得多。正确而可行的办法是保证一个最低的临界雷诺数 Re_c，从而保证对所研究的流动现象起决定作用的那一部分湍流结构的正确再现。



a　hs=60 m　Ws/U=9.6　Re=409　Fr=∞

b　hs=60 m　Ws/U=9.6　Re=745　Er=∞

图 3　不同雷诺数对流场及烟羽摆动幅度的影响

图 3 中两张照片的对比看到，在其它条件相同时，不同雷诺数的烟羽形态不同。实验表明取 Re_c =600 时已基本保证现象的真实再现。或说只要 $Re>Re_c$，则烟羽中心线平均位置对雷诺数的进一步增大不再敏感。

2）弗洛德数 Fr：

$Fr=\frac{U}{NH}$（其中 $N=\sqrt{-\frac{g}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial z}}$，$z$ 是垂直坐标，N 称为 Brunt-väisälä 频率）。这一参数可以表明大气的静力稳定度。弗洛德数愈小（即理查孙数 Ri 愈大）则表明大气稳定度愈强。当弗洛德数足够小时，雷诺数不再起主导作用，流动结构主要受层结（Stratification）即重力内波的影响。

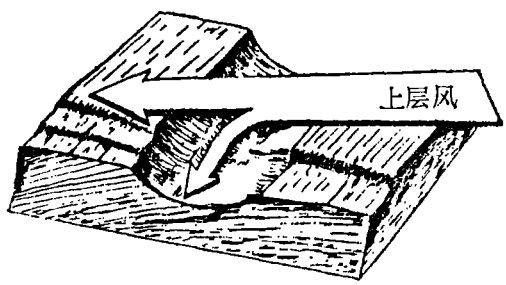


图 4　顺沟风示意图

3）速度比 Ws/U：

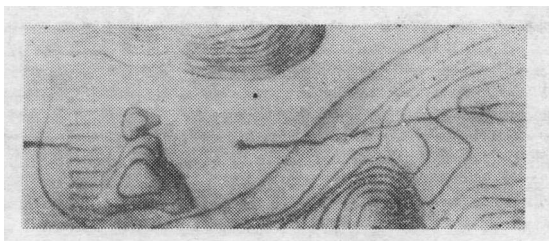
速度比是决定烟羽形态的重要参数。烟囱出口处附近烟羽可视为一个湍流射流，该参数决定了烟羽边界处卷挟湍流的强度以及烟羽的抬升（动量抬升）。实验中取烟气出口速度 $Ws=6.7$ cm/s，配以不同的平均风速（拖动速度）U，使 Ws/U 控制在 3—10 的范围，符合通常烟囱设计规范。

4．实验结果

实验中的现象表明，无论是平均流场（风场）还是烟羽形态，在中性与稳定大气中均有显著不同。从而地面污染浓度分布亦有很大差异。

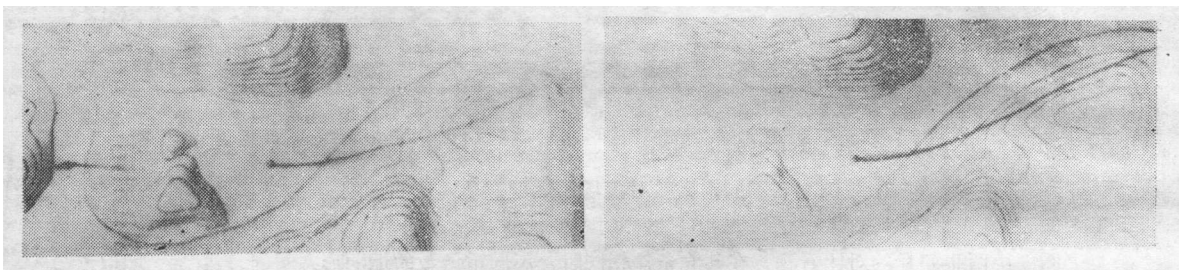
1）在平均速度场中出现顺沟风

顺沟风是山区风的一个明显特征。山谷中的低层风顺沟流动。与高层风成一定的角度（图 4 是顺沟风的示意图）。实验中观测到离地面 60 m高度以上流线基本上是平直的（东风），说明中性大气中，顺沟风的厚度是不大的。然而在稳定大气中，顺沟风的特点则较为显著。图 5 中表现为山谷中风向顺地形水平偏折角更大，顺沟风的厚度亦大。这是因为密度的垂直稳定分层抑制了垂直方向的扰动，流体尽



a

hs=100 m Ws/U=3.0 Re=1152 Fr=0.42



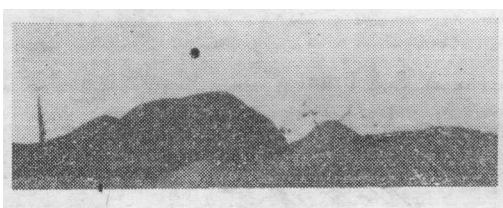
b

hs=100 m Ws/U=4.8 Re=733 Fr=0.27

c

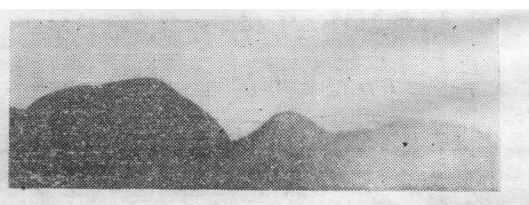
hs=100 m Ws/U=8.4 Re=419 Fr=0.15

图 5 稳定分层大气中风的顺沟流动及烟羽中心线的偏折



h_s=100 m W_s/U=4.5 Re=786 Fr=∞

图 6 涡旋的脱落及烟羽的周期性下倾摆动



h_s=100 m W_s/U=1.8 Re=733 Fr=0.2

图 7 重力波和波状烟羽

量由侧面绕过障碍物，而不从上面越过。从图中看到稳定度愈大(Fr 数愈小)则风向顺地形水平偏折角度愈 大。

流场的变化直接影响烟羽形态中心线位置的变化。在中性条件时，烟羽中心线基本是沿东风方向，在下游山坡处随地形抬升而越过。在稳定条件时，则烟羽从下游山坡处顺山坡的一侧绕 过。表 2 中给出了不同稳定度条件下烟羽的水平偏折角不同。

表 2 中还给出了两组分流高度 Hc_1 和 Hc_2。依照文献[5]，对于三维回转体小山包，在强稳定分层中有分流高度 Hc 即：$Hc=h(1-Fr)$，其中 h 表示山包高度。这时流动可分成两层，Hc 高度以下只有水平绕流，流动是二维的。Hc 高度以上流体可以垂直翻越障碍物。对于一个二维山脊(与 风 向垂直)，Hc 代表上游阻塞气流的厚度[6]。这样的规律应用于本文中具体的河谷地形，我们发现 有两 个特征山高即：烟囱下游流向偏右侧山峰较高，约 242 m；流向略偏左侧一片平缓山坡高度为 96—112 m。分流高度分别为 Hc_2 和 Hc_1。由表 2 可见，实验中选 择 100 m 高的烟囱(hs=100 m)有：$Hc_1<hs<Hc_2$。这样就解释了图 5 中所表现的烟羽水平偏折。由于 $hs<Hc_2$ 故在流向右侧山峰作用下，烟羽向左水平偏折，且偏折角与稳定度有关。而 $hs>Hc_1$ 故烟羽有足够的动能爬越流向略偏左的那片平缓山坡。这样，我们给出了一个如何在实际复杂地形中应用分流高度(dividing streamline height)原 理的例子。

2) 垂直流场中出现的背风涡旋(Lee vortex)和背风波(Lee Waves)

烟囱位置处于上游两个三维山包的尾流之中。在中性条件下，尾流中涡旋的脱落造成流动的湍流化，

表 2　烟羽水平偏折角与稳定性的关系

Fr	烟羽水平偏折角 α	分流高度H_{c1}(m)	分流高度H_{c2}(m)
0.42	～9°	65	140
0.27	～13°	82	177
0.15	～20°	95	206

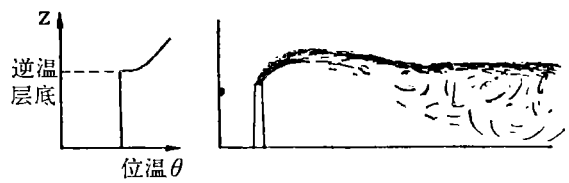
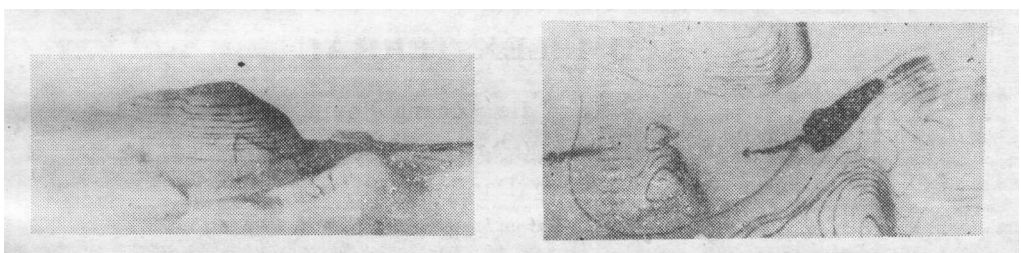


图 8　逆温层底之下烟羽(山区)的触地情况



h_s=100 m　W_s/U=8.4　Re=419　Fr=0.10

图 9　逆温层下烟羽(山区)的触地情况

增大烟羽水平及垂直的摆动。可造成近距离地面的较严重污染。图 6 中可以清晰的看出 由于脱落涡形成的烟羽扭曲摆动幅度较大，出现周期性下压的现象，这种现象与风洞模拟实验[7]和现场 测量之地面浓度数值分布都是一 致的。

在稳定条件下，流场中尾流及涡旋受到明显的抑制，涡旋脱落现象不明显。由于地 形的影响主要表现为重力波(图 7)，其烟羽形态呈波状。

3) 熏烟型污染与烟羽的触地

实验中发现，当强逆温与复杂地形组合时，会造成严重的熏烟型污染(图 8)，这 是由于上面有强而持久的逆温层，而逆温层底以下为中性或弱不稳定空气时，其上部的逆温 层抑制了污染物的向上扩散，而下部相对较强的湍流造成了垂直方向的混合，导致了烟羽向下弯折，直接碰 触地面，在该处造成局部的严重污染 (图 9)。实验表明，不同弗洛德数即不同逆温强度和风速 情 况 下，触地位置有变化。逆温强，风速小，触地位置在河岸处。逆温弱、风速大时触地位置为山坡顶 部。这是 100 m 高烟囱的结果，若烟囱高度低于此数值，触地位置可能更近一些。此外熏烟型污染地面的 最大浓度数值，显然要超出按照任何均匀混合模式计算得到的地面浓度结果。这个问题有待于 进一步研究。

5. 结束语

本实验在确定位置上摆放烟囱，当不考虑逆温时 100 m的高度是可以接受的。此外对于大气稳定度，通常认为它影响烟羽的扩散参数 σ_y 和 σ_z，以及烟羽抬升高度。 但本实验做为一个明显的例证，表明

大气稳定度在复杂地形条件下还影响着平均烟羽中心线的走向和形状。这一点对准确计算地面污染浓度有着实际意义。

参 考 文 献

[1] Snyder, W. H., Fluid modeling of pollutant transport and diffusion in stably stratified flows over complex terrain, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17 239—266, 1985.
[2] 张伯寅等，过山气流对烟气干扰的水槽模拟实验研究，气象学报，45，2，159-168，1987。
[3] 张伯寅等，在分层流体拖槽中烟云扩散的实验研究，气动力学杂志，1982 年第 4 期，56—61页。
[4] 宣 捷，大气污染扩散模拟实验中的分层拖曳水槽，电力环境保护，1986年第 1 期，38—42页.
[5] Hunt, J. C. R., et al., Flow structure and turbulent diffusion around a three-dimensional hill, Part I. Flow structure, EPA report EPA-600/4-78-041, 1978.
[6] Castro, I. P., et al., The structure of strongly stratified flow over hills: dividing streamline concept, *J. Fluid Mech.*, 152, 249—288, 1985.
[7] 宣 捷等，一个山区化工厂大气扩散的风洞模拟实验，气象，1984 年第 6 期，11—18页。

A LABORATORY SIMULATION OF POLLUTANT TRANSPORTATION OVER A COMPLEX TERRAIN

Xuan Jie Zhang Boyin
(Department of Mechanics, Peking University)
Wang Daofan et al.
(Meteorological Research Institute of Hunan Province)

Abstract

The pollutant transportation in atmosphere over complex terrain is of great concern in China. Presented in this paper is an experimental approach for simulating the atmosphere diffusion under different meteorological, topographic and releasing conditions, based upon a concrete real prototype. The agreements between the results obtained and that from field measurements turn out satisfactory, showing the possibility of applying the laboratory results in engineering design practices.