

地形对湖南省内污染物输送的动力作用^{*}

段德寅

(湖南省气象科研所, 长沙 410007)

高守亭

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 结合湖南地形走向, 从理论分析和实验两个方面着手研究了气流遇山时产生的受阻、爬越及绕流引起的平行于山的急流、过山后的类“水跃”以及绕山后的右偏转对于污染物输送的动力作用, 科学地分析了散布在湘西、湘西南的污染源所排放的污染物沿山的走向在山的迎风面自北向南及自西向东输送从而造成湘东南的污染。而气流过山后的类“水跃”现象对污染物有明显的垂直输送作用, 且绕流的右偏转使污染物向山的右侧输送, 危害了山右侧的自然景观及人类的活动。

关键词 地形 急流 类“水跃” 污染物输送

1 引言

湖南省地处长江以南, 南岭以北, 东邻江西, 西靠云贵高原及四川山地, 地势走向为北、东低, 南、西高。湘、资、沅、澧四大水系自南向北贯穿全省流入长江, 还有雪峰山、衡山坐落省内。所以, 湖南省的污染物输送受地形、河川走势的影响极大。由于历史的原因, 很多内地军工厂移迁至湘西山区, 散布在山凹、溪畔及坪坝之上, 因工厂都有相当大的规模, 所以厂内污染物的排放均变成了当地的污染源。因此, 被山脉环抱的污染物的输送问题, 急需在理论和实验两个方面加以解决。为此, 本文研究了地形对污染物输送的动力作用。

2 平行于山脉的急流对污染物的输送作用

图 1 是遇到山脉受阻时气流走向示意图。从图 1 可以看出, 入流深度为 d_0 的偏冷气流遇到山脉时会因受阻而堆积抬高。这种情况在冬半年湖南省内常有发生, 所谓“南岭静止锋”就是因冷空气从长江流域进入省内遇到南岭受阻而发生的。问题在于, 冷空气遇山受阻后的动力效果是什么? 对污染物输送有何影响? 为了弄清这种动力效应, 我们不妨建立一个两层模式来进行考察, 上层是没有摩擦的自由大气, 下层是必须考虑摩擦力的边界层气流。下层的定常流的无量纲动力方程为

1999-05-12 收到

^{*} 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403资助

$$Ro \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v = - \frac{\partial p}{\partial x} + E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$Ro \left(u \frac{\partial v}{\partial x} \right) + u = - \frac{\partial p}{\partial y} + E \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

其中, Ro 是 Rossby 数; $E = \nu / (fH^2)$ 是 Ekman 数, ν 是动力粘性系数, 取为常数, f 是科里奥利参数, H 是特征山高。

边界条件取为

$$u = v = 0, \quad z = h_0 \text{ (地表及山坡表面)}, \quad (4)$$

$$u = u_1, v = v_1, \quad z = h_0 + \Delta h \text{ (在边界层顶)}, \quad (5)$$

u_1, v_1 是上层自由大气的流速, $\Delta h = h - h_0$ 。

上层自由大气的基本方程为

$$Ro \left(u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) - v_1 = - \frac{\partial p_1}{\partial x}, \quad (6)$$

$$Ro \left(u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + u_1 = - \frac{\partial p_1}{\partial y}, \quad (7)$$

下标“1”表示上层。 u_1 可以从连续性方程中直接求出, 即

$$u_1 = - (h_2 - d_0) / (h_2 - h) \quad (8)$$

(7) 式的右端可用地转风 u_g 来代替, 因此, (7) 式可写为

$$Ro \left(u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + u_1 = u_g = -1, \quad (9)$$

如图 1 所示, 入流在 x 轴的反方向, 故取 u_g 为特征速度时应为 -1。把 (8) 代入 (9) 后得到

$$v_1 = \frac{Ro}{h_2 - d_0} \int_x^\infty [h'(x) - d_0] dx' + V_\infty, \quad (10)$$

在远离山脉处, 我们可以取 $V_\infty = 0$ 。这样, 上层的 u_1, v_1 都较容易地求出来了。由于确定了方程组的边界条件, 方程 (1) ~ (3) 完全可以定解。

在通常定义下, Rossby 数为 $Ro = U / fL$, 这里 L 是水平长度特征尺度, 可以取为 $L = L_R = NH / f$ [1]。这样, Rossby 数为

$$Ro = \frac{U}{fL_R} = \frac{U}{NH} = Fr. \quad (11)$$

于是, Rossby 数就可以用 Froude 数 Fr 来代替。这样做的好处在于, 对冷气流遇山受阻来说, 气流的层结效应是重要的, 应当在研究中体现出来, 选用 Froude 数恰是体现层结作用的一个有效办法。这样, 方程 (1) ~ (3) 就变成了含有 Fr, E, d_0 及 h_2 4 个参数的方程。在参数空间 (Fr, E, d_0, h_2) 内就可以讨论气流受阻时风系的变化。

因为边界层方程(1)~(3)是一个非线性方程组,直接求出解析解是困难的,但我们可以通过定性分析并把方程变成差分形式利用迭代方法去计算,得出同定性分析一致的数值解。

通过物理分析可知,当冷空气遇山受阻时,空气因爬山增加位能而消耗动能,同时山的迎风面逐渐堆积起来,使冷空气越堆越厚,且坡度变陡,这样在垂直于山的 x 方向气压梯度力明显加大(设 y 方向平行于山脉)。由于空气堆积的原因,在山的迎风面冷空气因受阻和爬升而消耗动能,入流速度大大减小,入流速度的垂直切变也变得不明显,所以摩擦作用项作用变小。而在 x 方向主要是地转平衡,因为气压梯度力的加大,必须有相应的科里奥利力与之平衡。因为 f 可以认为是确定的,所以科里奥利力的加大,必然使得平行于山脉的 y 方向上的 v 分量明显加大,形成平行于山的急流。这种现象在每次冷空气遇山受阻时都有不同程度的表现。具体到“南岭静止锋”,由于冷空气自北向南吹,如上分析,其结果必产生一个自西向东吹的平行于山的急流,即把湘西南地区因“三线”工厂漫布而产生的污染源所排放的污染物及有毒有害气体自西向东吹,污染了湘南、湘东南地区。因为湖南地形是东面及北面低,所以偏东北气流向西南吹时,遇到湘西山区,不仅受阻抬升,而且同时也要产生平行于山脉的自北向南吹的急流,把湖南湘西北半部的污染物向南输送。这种输送同南岭北侧的自西向东的急流输送汇在一起,就形成了沿山地的污染物自北向南又向东的弧形输送。

为了把定性分析进一步定量化,我们利用公式(1)~(3)及相应的边界条件,计算了平行于山的急流的强度。在 $Fr=0.4$, $E=0.1$ 而迎风气流的无量纲深度 $d_0=0.5$ 及 $h_2=3.0$ 时计算出来的平行于山的急流如图2所示。从图2可以看出,急流中心最大强度可达入流速度的1.3~1.4倍(图中数字是无量纲的),这为污染物沿平行于山的定向输送提供了有利的条件。我们还考证了无量纲参数 Fr 及 E 对急流强度 V_m 的影响,计算结果如图3、4所示。从图3可以看到,急流的强度对 Fr 的依赖很小,这就是说大气的层结效应对急流的强度影响是很小的。所以无论空气的冷暖变化如何,急流的强度并不受明显的影响,也说明,就平行于山的急流对污染物的输送而言,季节变化是不大的。图4显示了急流强度同 E 数的关系,可以看出,急流强度受 E 大小的影响较大,说明急流强度受摩擦影响明显,当摩擦较小时急流明显增强。具体到湖南山地,因山坡上长满松柏、翠竹及油茶树,一年四季变化较小,只是近地层植被如花草,有冬枯夏荣的变化,所以就摩擦效应来说,一年四季变化并不太大,但夏季略大于冬季,所以冬季产生的急流相对应当较强。加之冬季受寒潮的影响,吹入湖南省内的东北气流也明显,因此这种沿山的污染物输送冬季明显的强于夏季。

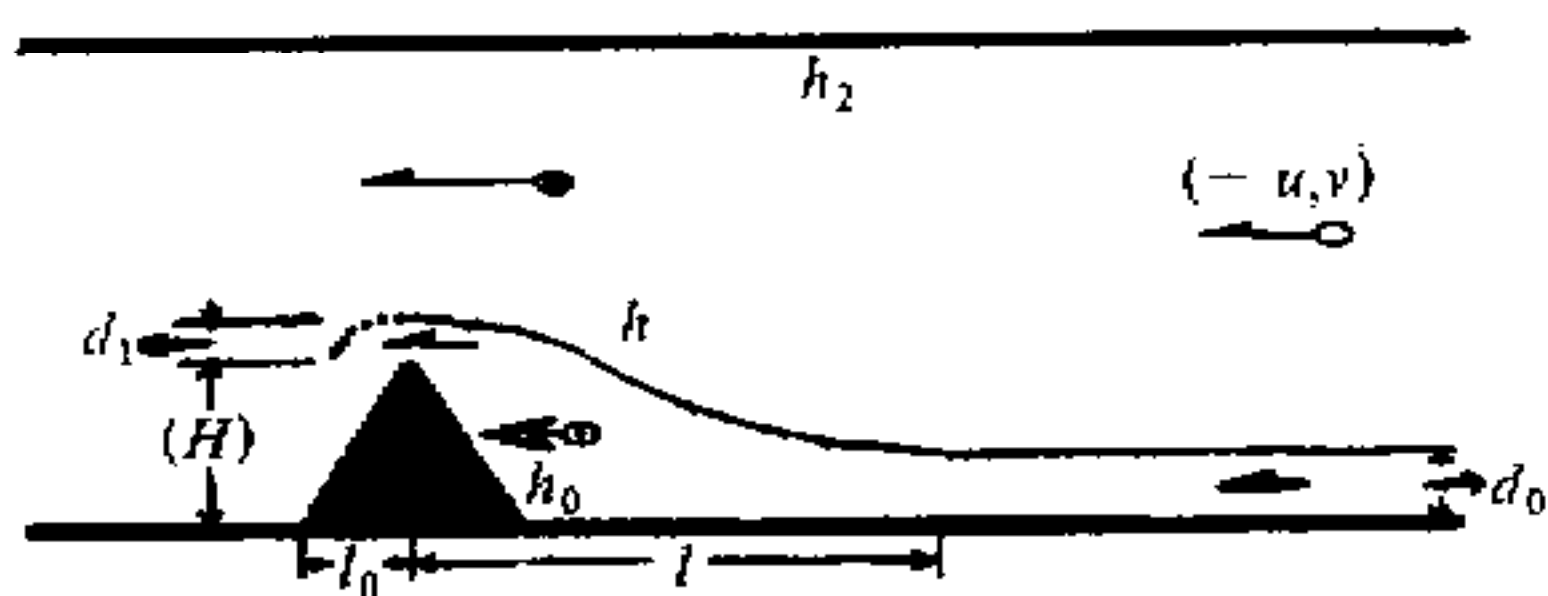


图1 气流遇山受阻时的示意图

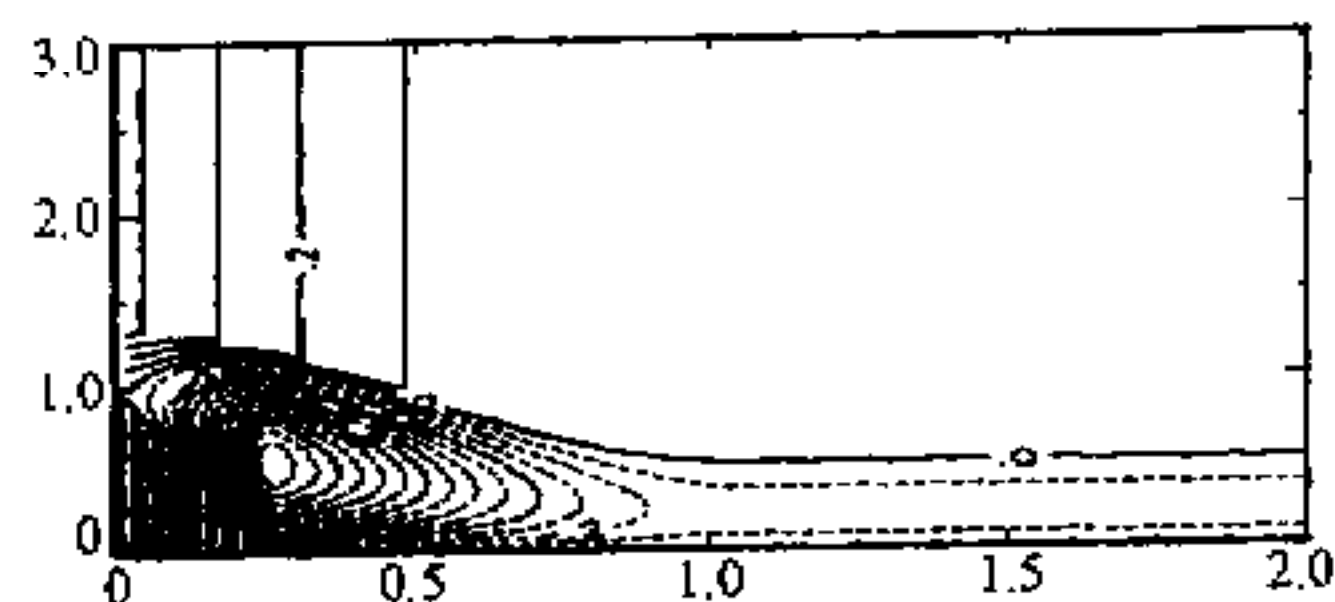
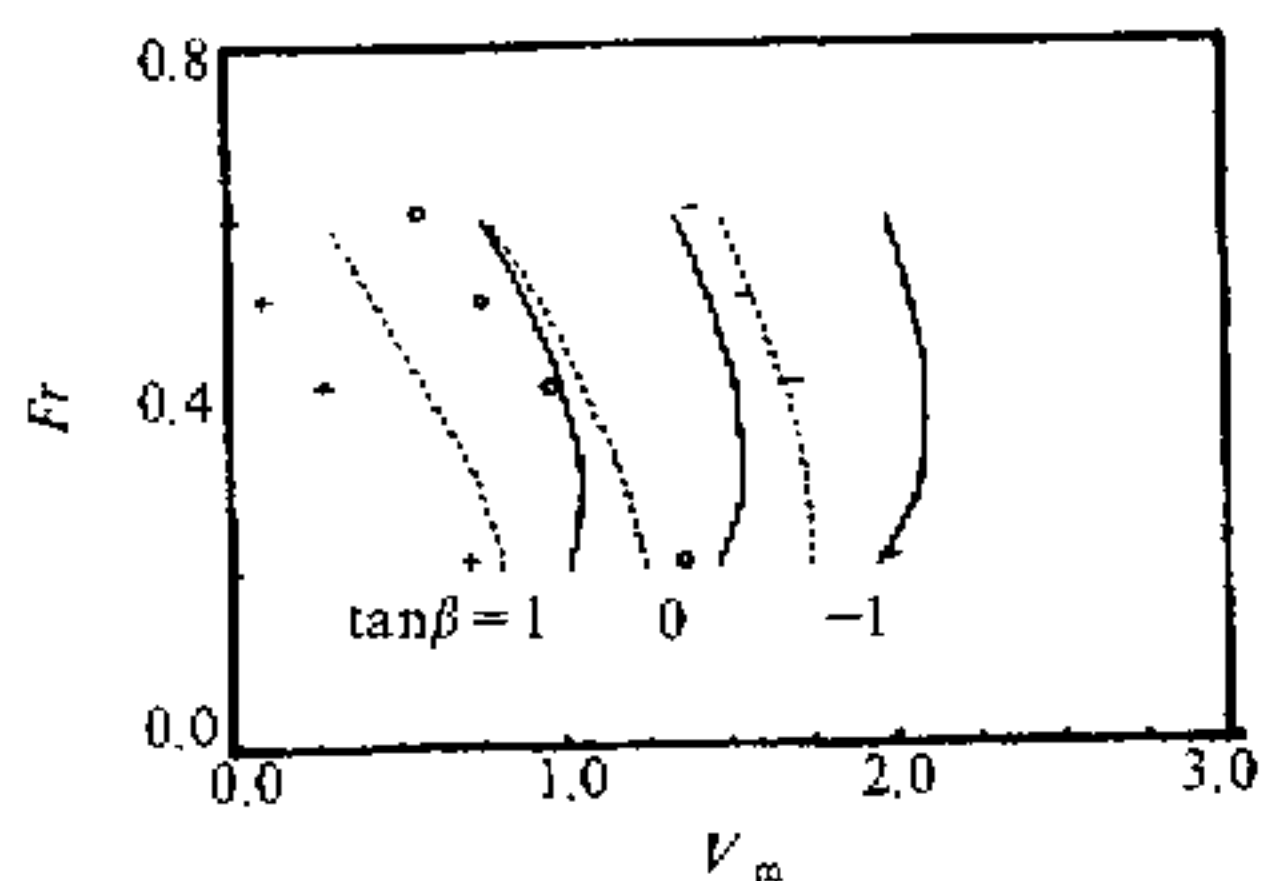
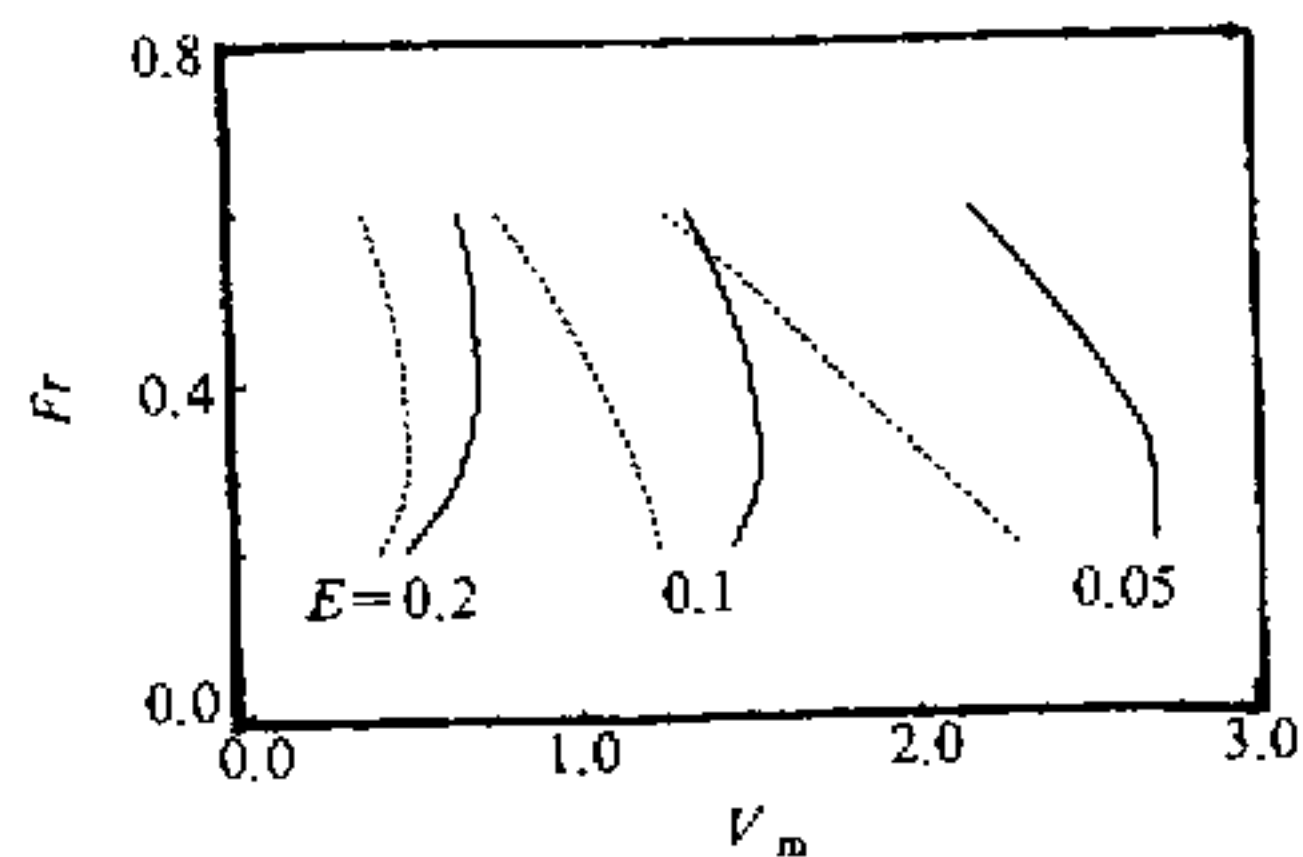


图2 平行于山的急流分布

图3 在 (V_m, Fr) 空间中 V_m 同 Fr 的关系图4 在 (V_m, Fr, E) 空间中 V_m 同 Fr, E 的关系

3 污染物的背风侧输送

上节主要讨论了山的迎风侧由于气流遇山受阻而形成的平行于山的急流对污染物的输送。本节则重点讨论气流爬过山时在山的背风面对污染物输送的影响。在以往的大量研究中已经知道, 气流过山后会形成背风波, 这种波动会对污染物的输送有一定影响。但是背风波是在稳定层结下靠质点的浮力恢复作用而形成的, 就空气质点来说, 是围绕其平衡位置的往返振动, 而空气质点本身并没有离开其平衡位置。所以, 污染物不可能在背风波的作用下引起明显的输送, 最多是引起污染物的“stokes 漂移”^[2] (像在静止的水塘里投一砖块引起波动而使水面上的有关物质慢慢漂移过来)。所以, 背风波对污染物输送的影响不是主要的, 主要的是气流过山后产生的类“水跃”现象对污染物输送的影响。

当气流过山时 (无论是暖湿气流翻越南岭还是冷干气流翻越雪峰山), 由于旋转和层结的作用, 气流会在重力作用下, 以最小势能的状态沿山向下滑, 使位能变成了动能, 到了山脚动能达到最大, 冲击在山脚处的空气层, 结果在山脚处出现速度不连续, 而形成类“水跃”现象 (图5)。为了说明这种现象, 不妨设空气下滑到山脚时的速度为 u_1 , 而对应的气层厚度为 H_1 , 发生“水跃”侧的速度为 u_2 , 对应气层为 H_2 , 由质量守恒可知:

$$u_1 H_1 = u_2 H_2 = Q. \quad (12)$$

同时, 在“水跃”发生前面积 H_1 上受到的平均压力是 $\rho g H_1^2 / 2$, 而“水跃”侧受到的平均压力为 $\rho g H_2^2 / 2$, 从动量原理可知:

$$\frac{1}{2} \rho g H_1^2 - \frac{1}{2} \rho g H_2^2 = \rho Q (u_2 - u_1). \quad (13)$$

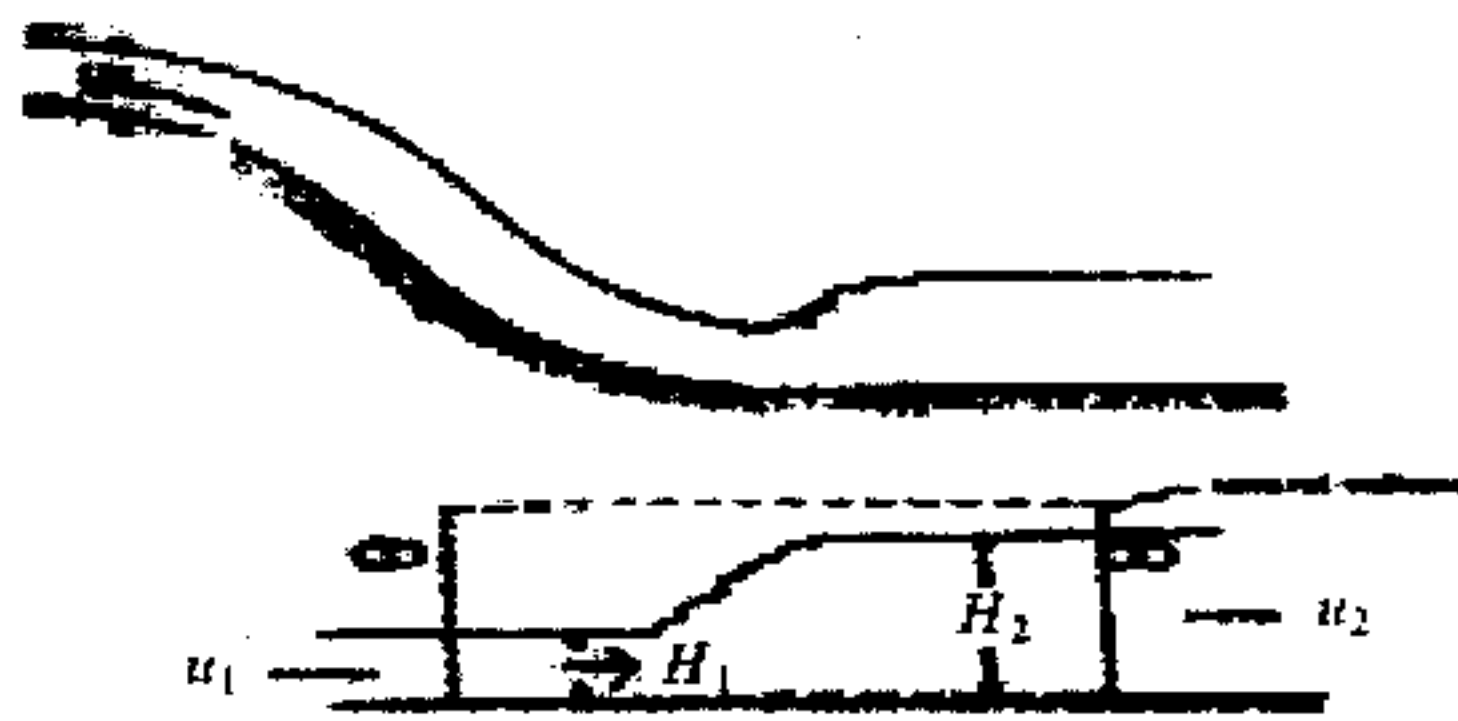


图5 气流过山时类“水跃”示意图

利用(12)式后可知:

$$\frac{g}{2}(H_1^2 - H_2^2) = Q \left(\frac{Q}{H_2} - \frac{Q}{H_1} \right), \quad (14)$$

经过整理后, 有

$$\left(\frac{H_2}{H_1} \right)^2 + \frac{H_2}{H_1} - 2Fr^2 = 0, \quad (15)$$

其中, $Fr^2 = Q^2 / gH_1^3 = u_1^2 / gH_1$ 。由(15)解得:

$$H_2 = \frac{1}{2}(-H_1 \sqrt{1 + 8Fr^2})H_1. \quad (16)$$

因产生类“水跃”现象, 从物理上分析则有 $H_2 > H_1$ 。要满足这一条件从(16)式则知必有 $Fr > 1$ 。由于 $Fr = u_1^2 / gH_1 = u_1^2 / C_1^2 > 1$, 则 $u_1 > C_1$ (C_1 是重力波速)。可见, 发生类“水跃”现象并不是经常的。比如, 爬过山的而沿山下滑的气流厚度 $H_1 = 10$ m, 则 $gH_1 \approx 100 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 则 $C_1 = \sqrt{gH_1} \approx 10 \text{ m/s}$, 故 u_1 必须要大于 10 m/s 。这就是说只有在强风时如寒潮爆发期、季风爆发活跃期等情况下才可能发生类“水跃”现象。尽管如此, 一旦类“水跃”现象发生, 则因背风面气层的抬高, 必有垂直运动发生, 于是把近地层的污染物从边界层内“冲”了上去。污染物到了较高层, 会随风漂流水平输送到远方。这个问题的重要性在于, 在山区, 近地面经常出现逆温层, 在逆温层控制下, 污染物(特别是废气)没法扩散出去, 结果造成局地污染严重。但当发生类“水跃”时, 由于气层的上冲, 逆温层被破坏, 污染物就可以排放出去, 所以这是一件很有益的事情。图6是气流过山的转槽实验中显示的污染物分布。在图6中, 上图是没有发生类“水跃”现象时污染物的分布, 是均匀的, 而下图是发生类“水跃”时污染物的分布, 可以看出在类“水跃”区, 污染物有集中上冲的现象。这样就极有利于污染物在类“水跃”区向较高层输送。特别是在逆温层存在时, 因“水跃”出现, 污染物可以冲破逆温层而进入逆温层上层, 并被输送出去。



$Ro=0.16$

$Fr=0.04$



$Ro=0.56$

$Fr=0.14$

图6 转槽实验中显示的污染物分布

4 绕山气流对污染物的输送

第 2、3 节讨论了迎风坡及背风侧污染物的输送问题, 本节重点讨论气流遇山绕流时, 绕山气流对污染物的输送。

对于近似滞弹性的流体, 伯努利方程可写为^[3]

$$1 - V^2 = 2\varphi^* + \eta^2 / Fr^2, \quad (17)$$

其中, φ^* 是气流移近山时引起的同其离地形较远的上游同一水平面上的气压偏差; η 是质点因遇山受到扰动而离开平衡位置的垂直位移。在 (V, η) 相空间中, 方程 (2) 实际上是具有轴长为 1 和 Fr 的椭圆。如果 (17) 式中气压偏差 φ^* 可以忽略, 那么驻点发生的条件是质点的最大垂直位移 $\eta_{\max}$ 满足 $\eta_{\max} = Fr$ 。当 $Fr < 1$ (这是大气中最经常发生的) 时, 那些位于无量纲高度 $z \leq 1 - Fr$ 的那些质点必然要维持在 $z \leq 1$ 的高度之下, 这些质点只能是绕流, 不可能爬过大地形。这就是说气流遇山时, 绕流的质点是大量的, 而真正爬过山的是少数。所以气流绕山是地形对气流动力作用的主要现象, 是不可回避的问题。

为了考证气流绕山时发生的现象, 我们专门做了转槽实验, 具体结果见图 7。从图 7 中可以看到, 在旋转层结流中, 气体绕过障碍物时, 左侧绕流一致向右偏, 结果气流在山后的右侧进行辐合。这种现象是普遍存在的, 造成这种偏转的原因主要是气压梯度力、科里奥利力及摩擦力三者平衡的结果。这种流型分布就把绕山气流从左侧大量输送到右侧, 如果在山的左侧恰有污染源 (如工厂、煤矿等) 存在, 就会造成由污染源排放的废气、废物随风漂流到山的右侧, 使右侧的自然区或居民区受到污染, 所以在开展建厂、开矿等工程项目时, 应预先考虑这一问题。

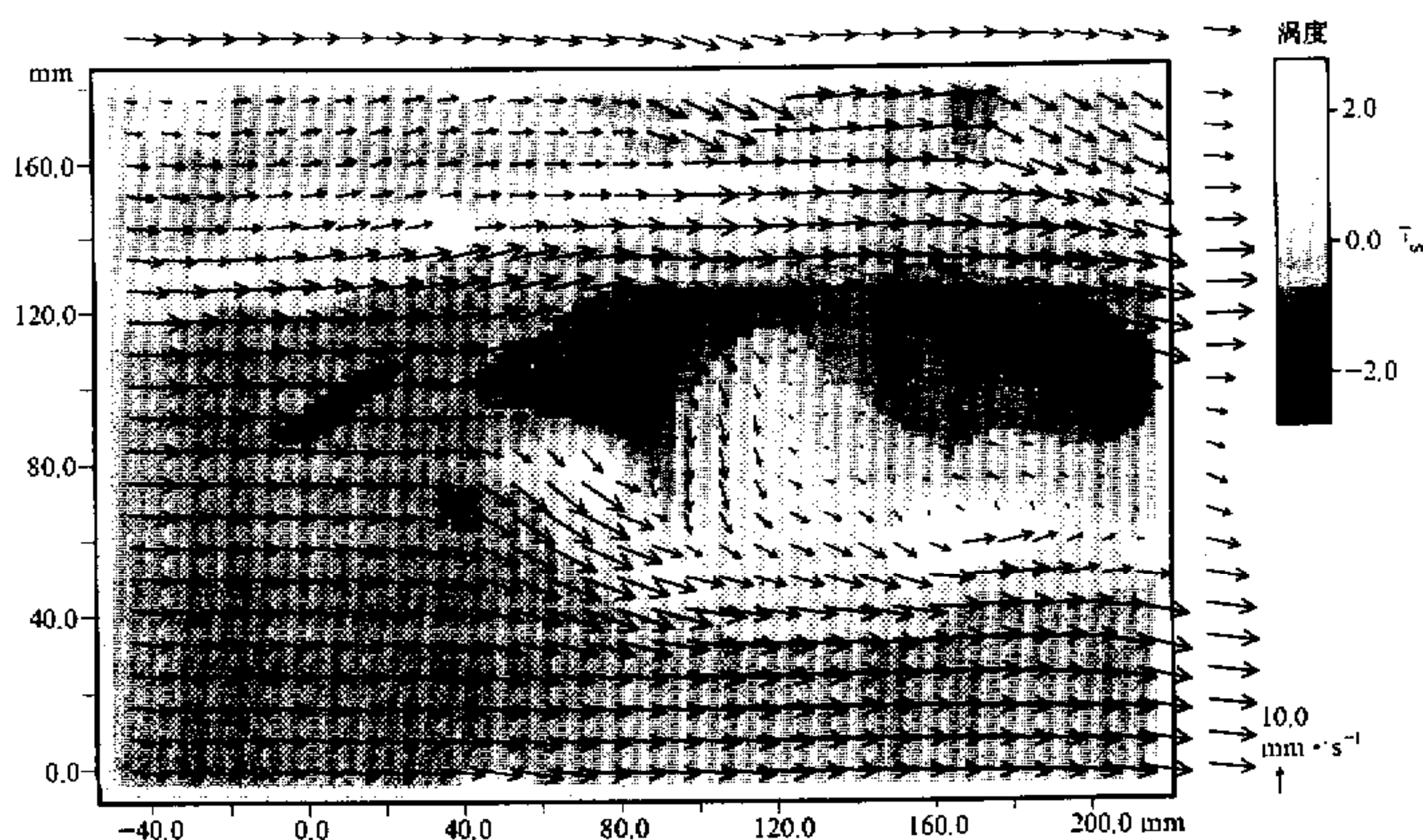


图 7 气流绕山的流型分布

5 讨论和结论

湖南是一个地形复杂的省份, 河川多呈南北走向, 而山脉又以东西走向为主, 加上有平坝式小盆地及狭管形或喇叭口式地形分布, 所以除气流遇山受阻、爬流及绕流外, 还有盆地的焚风效应、狭管射流效应以及风沿河道走效应等。这使得受地形影响的污染物输送明显复杂化, 如焚风效应使得污染物输送有明显的日变化, 狭管射流效应使得污染物输送具有明显的集中及强扩散现象, 河川风道的作用又使污染物沿河道漂流、漫游。限于篇幅本文只集中研究了有明显地形作用时, 由于气流的受阻、爬越及绕流对污染物的动力输送作用。由于研究的手段是理论分析同实验相结合, 发生的现象在实验结果中可以看十分清楚, 所以结果可靠, 为避开因地形引起的污染而采取措施提供了科学的依据。

参 考 文 献

- 1 Xu Qin and Gao Shouting, 1996, A theoretical study of cold air damming with upstream cold air inflow, *J. Atmos. Sci.*, 53, 312~326.
- 2 Kundu, P. K., 1990, *Fluid Mechanics*, Academic Press, 219~221.
- 3 Smolarkiewicz, P. K. and R. Rotunno, 1990, Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part 2: up wind flow reversal zone, *J. Atmos. Sci.*, 47, 1489~1511.

The Dynamic Effect of Topography on Pollutant Transport in Hunan Province

Duan Deyin

(Meteorological Institute of Hunan Province, Changsha 410007)

Gao Shouting

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Combining with Hunan province's topography distribution, in this paper, the pollutant transport of mountain-parallel jet induced by air flow damming in front of mountains, "quasi-hydraulic jump" after air flowing over the mountain and air flow deflecting around mountains is studied through both theoretical analyses and experiments in the laboratory. The pollutants discharged by pollution sources scattered in the west and southwest Hunan province are transported by mountain parallel jet from north to south and from west to east along the mountains. The "quasi-hydraulic jump" of air flow over the mountain transports pollutants vertically. Air flow deflecting around mountains leads to transport pollutants to the right of the mountain lee side. In that area, natural scenery and human activities are severely harmed.

Key words topography mountain-parallel jet quasi-hydraulic jump pollutant transport