

山区空气污染与气象

中国科学院大气物理研究所 编著

科学出版社

56.4218

山区空气污染与气象

——以峨边县为例——

● ● ● ● ●

山区空气污染与气象

中国科学院大气物理研究所 编著

科学出版社

1978

内 容 简 介

本专集是在我国山区进行气象观测和大气扩散实验所积累的资料基础上,对山区空气污染有关的气象规律(风,温度)以及大气扩散规律作的总结。主要总结了山区低层大气(300米以下)的辐射逆温特征,山区风场一般特征,风速廓线,山区空气污染物输送和扩散与气象条件的关系,大气扩散参数的几种计算方法;并给出我国山区的大气扩散参数。最后还介绍了一个烟气上升高度的夹卷数值模式。

本专集可供工业和国防部门从事安全防护工作的设计人员,环境保护工作部门的大气污染专业人员,大专院校大气物理专业师生以及气象部门有关人员参考。

山区空气污染与气象

中国科学院大气物理研究所 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年9月第一版 开本:787×1092 1/16
1978年9月第一次印刷 印张:5 1/2 插页:7
印数:0001—9,000 字数:122,000

统一书号:13031·814

本社书号:1162·13—15

定价:1.00元

前 言

大气边界层的风和温度场结构以及大气湍流扩散规律与空气污染有着密切的联系。过去,工业的发展多集中在平原地区,因此,平原地区的低层大气结构和大气扩散规律研究较多,形成了空气污染气象学这门学科,它是环境科学的一个重要组成部分。近年来,由于在山区建厂越来越多,因而山区和复杂地形条件下低层大气特征和大气扩散规律的研究也越来越为人们所重视。

我国是社会主义国家,是一切从人民利益出发的,同时,我们又是发展中国家,在迅速发展工业的同时,也会出现环境污染问题,因此,必须采取预防为主方针。全面规划,合理布局,综合利用,化害为利是防止空气污染,改善环境的重要途径。

无产阶级文化大革命以来,我们遵照伟大领袖和导师毛主席理论联系实际的有关教导,和所内外,院内外兄弟单位一起,为解决我国山区工业建设中的空气污染问题,深入现场,进行了广泛的实践,对山区气象条件进行了考察,并作了大气扩散试验,为工厂的有害气体排放位置和高度选择,厂区和居民区的合理布局等方面提供了依据。

这本专集就是上述观测试验资料的分析总结。本文总结了我国山区空气污染有关的气象条件(风和温度),和大气扩散规律,介绍了山区低层大气(300米以下)的辐射逆温特征,山区风场的一般特征,风速廓线以及山区的空气污染物输送和扩散与气象条件的关系,并介绍了大气扩散参数的几种计算方法,给出了我国山区的大气扩散参数,最后还介绍了一个烟气上升高度的夹卷数值模式。

本专集可供工业和国防部门从事安全防护方面工作的设计人员,环境保护方面工作的空气污染专业人员,大专院校大气物理专业师生以及气象部门有关人员参考。

和我们一起参加此项试验工作的单位还有中央气象局研究所气候室、地理所陆地摄影组、有关省市气象台站及有关工厂和工业设计部门的同志们,他们为圆满完成试验工作和提供试验条件等方面做了大量的工作,在此表示感谢。

限于我们的实践经验和水平,其中会有不少缺点和错误,恳切希望同志们予以批评指正。

中国科学院大气物理研究所四室

目 录

一、山区辐射逆温特征	1
二、山区风场的特征	7
三、山区近地层风速廓线分析	29
四、山区空气污染物的输送、扩散与气象条件的关系	40
五、大气扩散参数	56
I 用地面最大浓度资料计算大气扩散参数	56
II 用烟幕立体摄影方法计算大气扩散参数	62
III 用激光雷达测烟资料计算大气扩散参数	68
IV 用风向脉动资料计算大气扩散参数	72
六、烟气上升高度的夹卷模式	81

一、山区辐射逆温特征

从污染源排出后的有害物质对大气的污染程度取决于大气本身的扩散能力。有时,大气扩散能力很强,使污染物浓度很快降到卫生标准;有时,大气扩散能力很弱,高浓度的污染物得不到扩散而造成危害。这都由当时的气象条件决定。风(包括平均风及脉动)和温度层结(即气温随高度分布)是影响污染物扩散的两个主要气象因子。其次,还有湿度和降水等。

平均风起到输送污染物的作用,湍流使得污染物向周围扩散。显然,风越大,湍流越强,扩散越好。

温度层结是大气稳定度的一个指标。层结可分为三类:空气温度随高度增高而降低的情况在气象上叫“递减”,此时暖而轻的空气在下面,冷而重的空气在上面。轻者要上升,重者要下沉,大气处于不稳定状态,使得空气上下对流,湍流发展,容易使污染物扩散;反之,气温随高度增高而增高的情况叫“逆温”,此时暖而轻的空气位于冷而重的空气之上,大气处于稳定状态,抑制了上下对流和湍流交换,使得下层污染物难以扩散;介于两者之间,即气温基本不随高度变化,这叫“中性”,此时扩散情况介于前面两种情况之间。

综上所述,一般情况下,最不利大气扩散的气象条件是小风加逆温。例如震惊一时的“伦敦烟雾事件”就是发生在这种气象背景下的。当时连日气温递增,风速极小,使空中灰尘浓度比平常增加十倍,二氧化硫浓度增加六倍,成为四千人死亡的大悲剧。

所以,详细了解大气低层风和温度层结的特征,掌握其规律,从而避开不利条件,利用有利条件,最大限度地发挥大气的扩散作用,对山区建厂的合理布局和烟囱高度选择等具有重要的实用意义。

本文仅对山区辐射逆温资料进行分析讨论。

(一) 时 间 变 化

在天气晴朗,风速又不很大的日子里,温度层结具有明显的日变化。

夜间,由于地表面向大气放射长波辐射而没有太阳短波辐射的收入,使得地表及下层大气温度降低,造成了冷空气堆积,而上层空气冷却较慢,这样便形成了逆温。白天,地表接受太阳直接照射,温度升高,产生对流,低层逆温遭到破坏,代之以递减层结。日出和日落前后,因为地表辐射收支达到平衡,上下层气温差别甚小,接近等温。

图1给出了四川杜家沟气温与温度梯度日变化曲线。由图可知,白天10时到18时这个时段内,大气温度处于递减状态,10时和18时两个时刻邻近短时间内为中性层结,其它时间维持逆温。上午从逆温到递减的转换期发生在10时左右,比太阳出山时间8时约晚两小时;下午从递减到逆温的转换期发生在18时左右,比太阳下山时间19时约提前一个小时。

图2是湖南地区秋季逆温的平均结果,可以看到,逆温从19时前后开始生成,随着入

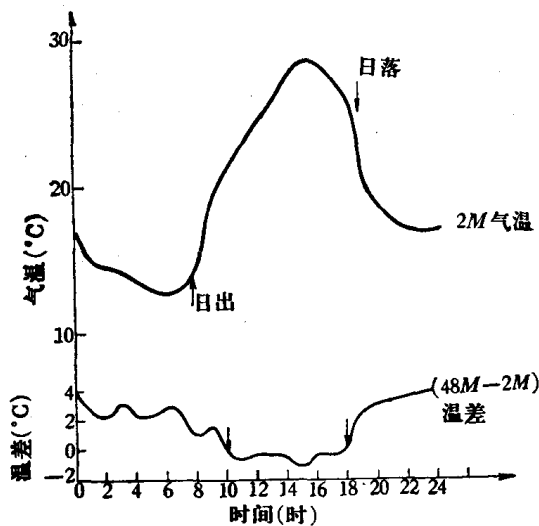


图1 气温与温度梯度日变化
(四川杜家沟, 1969年3月26日)

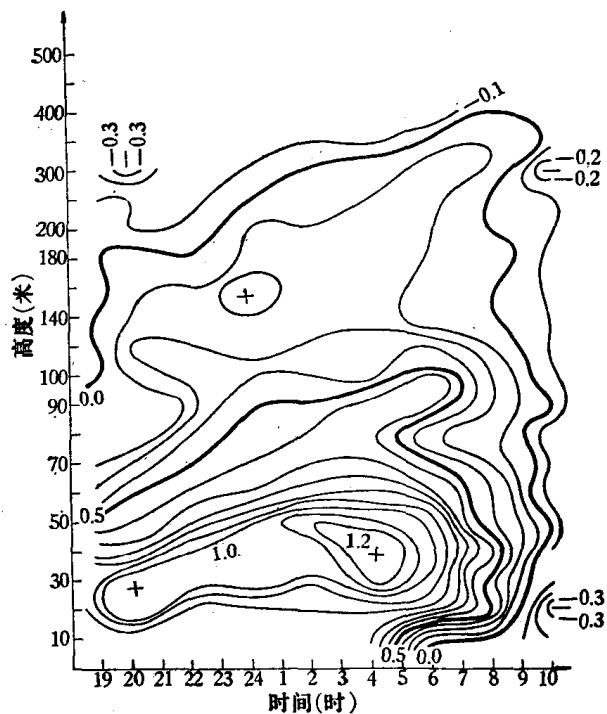


图2 晴天温度层结
(湖南大壩, 1968年10月18—26日; 等值线间隔为 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{米}$)

夜时间增长而发展加厚(等值线向右上方倾斜的现象表明逆温的生成和消失都从近地层开始)。

傍晚 20 时和下半夜 4 时前后出现两个逆温中心, 经分析这与两个时刻附近降温率较大有一定关系。

掌握温度层结日变化规律, 有助于合理安排工厂的排放时间。并可大致地估计一天当中不同时间的污染程度。

(二) 空间分布

一般说来, 不管在平原或山区, 城市或农村, 都会形成辐射逆温, 只是其强度, 厚度和内部结构会因地形及下垫面性质(植被, 土壤含水量, 导热率等)不同而不同。表 1 列出了不同地点逆温层的某些特征。可以看出, 各地逆温差别是比较大的。

山区逆温的重要特点之一是存在多个中心, 即在整层逆温中具有几个强度极大值。了解这些中心的强度与所在位置, 对确定高架源的最佳排放高度很有意义。这种多中心生成的物理过程可用图 3 定性地进行分析。

图中的三个小山包相当于高度不同的三个地表面, 山坳是积聚冷空气的“池子”。与此相应地便在 z_1 , z_2 和 z_3 三个不同高度上形成了三个逆温中心。

观测发现二、三百米以下的低层大气, 虽然往往只有一层逆温, 但其内部强度分布也不是完全均匀的。有时只有一个强中心, 有时则有几个强中心。

图 4 是 1969 年春季四川杜家沟地区实际观测结果。两个测点相距约五、六百米。杜

表1 不同地点逆温层特征

时 间		地 点	逆温层顶高度 (米)	最 强 逆 温 中 心	
年	月			高度(米)	强度(°C/10米)
1968	10	湖南 大垄	120	30	1.05
1970	10	湖南 六垄口	100	20	1.10
1970	10	湖南 六垄底	60	20	1.30
1970	2	湖南 枫叶沟	120	50	0.95
1970	10	河南 板桥	100	30	0.17
1969	3	四川 杜家沟	140	10	0.45
1969	3	四川 黑水沟	200	30	0.33
1970	1	四川 青龙沟	80	10	0.07
1970	7	四川 青龙沟	90	20	0.04
1970	7	北京 东风沟	90	10	0.56
1973	3	北京 北郊	150	20	0.25
1973	3	北京 八达岭	60	40	0.10

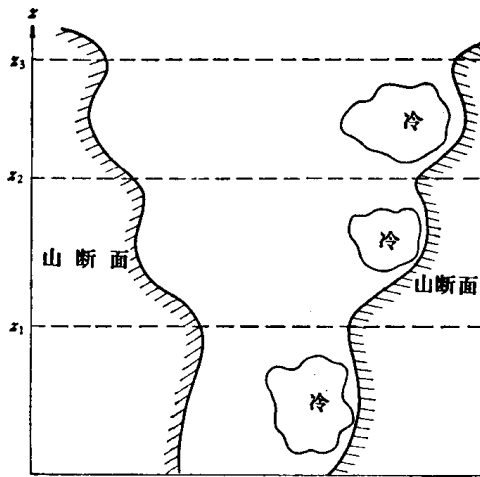


图3 逆温中心与地形的关系

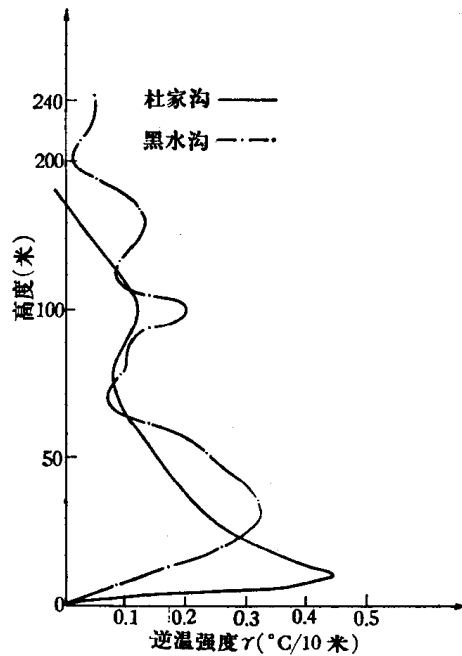


图4 不同地形逆温比较

黑水沟, 1969年4月6—8日, 19:00—06:00 平均(9次);
杜家沟, 1969年3月23—26日, 19:00—06:00 平均(22次)

家沟相对高度约150米, 沟底宽度30—40米, 坡度较小, 地形比较简单。这里只出现一个强中心, 位于10米附近。在50米以下逆温较强, 平均强度为0.3°C/10米; 黑水沟两侧的山较高, 相对高度达600米, 沟宽为300米, 坡度较陡, 地形复杂。这里经常出现三个逆温中心。平均高度分别在30米、100米和160米附近。强度分别为0.34°C/10米、0.20°C/10米和0.14°C/10米。通常情况下, 逆温中心强度随高度增加而减弱。

(三) 季节变化

一天24小时之中, 逆温的持续时间在冬季要比夏季长, 春秋两季差不多, 这是由日照

时间的季节变化所决定的。就强度而言，低层辐射逆温也以冬季为最强，夏季最弱，春秋居中。

图 5 是四川青龙沟冬夏两季辐射逆温强度分布图。该地区冬季逆温中心强度平均为 $0.25^{\circ}\text{C}/10$ 米，夏季为 $0.04^{\circ}\text{C}/10$ 米，前者比后者大六倍。

逆温厚度随季节变化尚无系统资料作为参考，我们统计了北京地区 1969 年 10 月和 1970 年 1 月、4 月、6 月南苑气象台的探空资料，给出了低层（300 米以下）逆温层顶高度和整层逆温强度的季节变化曲线，如图 6 所示。由图可知，逆温季节变化有这样的特点：冬季逆温强而厚度薄，夏季逆温弱而厚度厚。春秋两季差别不大。应该指出，上述资料是对所有低空逆温的统计结果，其中未排除少数非辐射逆温。

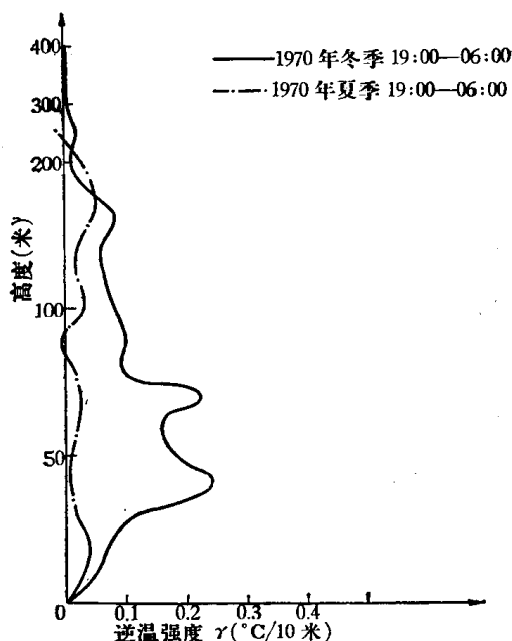


图 5 逆温强度的季节变化
(四川青龙沟)

实线为 14 次平均，点划线为 19 次平均

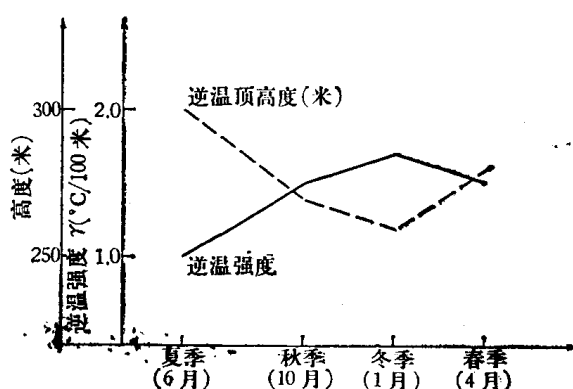


图 6 逆温层顶高度和整层逆温强度的季节变化

虚线：逆温层顶高度(米)；
实线：逆温强度($^{\circ}\text{C}/100$ 米)

(四) 逆温与天气的关系

对于碧空小风天气，地表在白天是太阳短波辐射的吸收体，夜间是长波辐射的放射体，温度日较差很大，使得低层大气在白天为超绝热层结，夜间则为强烈逆温。在阴雨天或大风天，由于昼夜吸收与放射的辐射均减弱，而且上下交换剧烈，因此低层大气常处于等温状态。在曇天($3 \leq \text{低云量} \leq 7$)的日子里，由于天空有云，白天短波辐射部分地被云吸收和反射，减小地面增温；夜间，云层反射长波辐射使地面降温减弱。逆温强度介于晴天和阴天之间。图 7 是四川黑水沟晴天、阴天和曇天三种天气条件下的逆温强度曲线。可见晴天逆温最强，阴天逆温最弱，曇天介于两者之间。

值得指出的是，阴天小风条件下，仍然可以出现逆温，而且强度不小，但是比当地晴天逆温肯定要弱。图 8 便是一个实例，这说明在预报污染形势或估计扩散好坏时，不能忽视

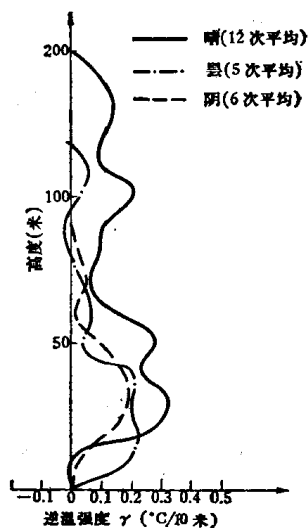


图7 逆温强度与天气状况的关系

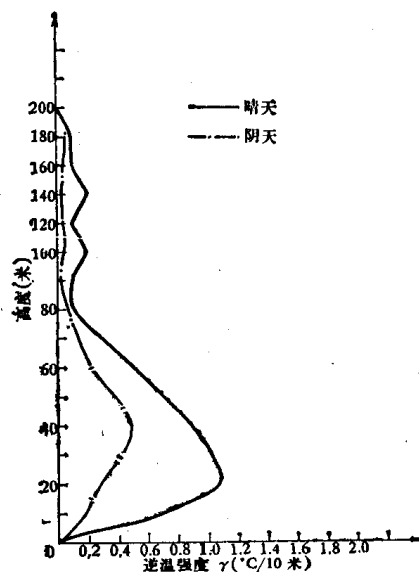


图8 晴天、阴天夜间温度层结对比(湖南六奎口)
晴天: 1970年10月4—8日, 19:00—06:00, 20次平均;
阴天: 1970年10月1—3日, 19:00—06:00, 13次平均

阴天小风逆温的气象条件。

(五) 逆温与温度日较差之间的关系

逆温观测一般采用系留气球或铁塔进行, 两者都需要比较复杂的仪器设备。如果能找到逆温与气象要素之间的确切关系, 从而利用地面的气象资料判断低空逆温的强弱, 这将给实际工作带来很大的便利。

观测发现, 对于一定的天气条件, 逆温强度和层次都比较稳定少变。以下经验也是人所共知的: 每当夜间天气晴朗, 风速又很小时, 次日早晨总可看到烟囱出来的烟道平铺成带状, 很久不能散去, 这表明逆温很强。相反, 如果夜间阴天、或刮大风、下雨, 那么次日早晨就看不到炊烟堆积停滞的现象, 这表明逆温很弱, 甚至中性。由此推知, 风速越小, 日较差越大, 逆温越强; 风速越大, 日较差越小, 逆温越弱。实际经验表明, 当风速很小时, 逆温强度几乎只与温度日较差有关。为此, 利用湖南六奎地区1968年10月和1970年10月的系留气球探空资料, 统计了风速小于1米/秒, 日较差在4.8—16.3℃范围内, 逆温强度 γ 与地面气温日较差 ΔT 之间的关系。发现两者存在很好的线性相关。相关系数高达0.96(置信度为99%), 进而确立了 γ 依 ΔT 的回归方程:

$$\gamma = 4.50 + 0.768(\Delta T - 10.7) = 0.77\Delta T - 3.7$$

式中 γ 为整层逆温的总强度, 以℃/10米表示, ΔT 为前一天离地面2米处最高温度减去当天同高度最低温度, 以℃表示。

从这个关系出发, 利用比较容易取得的地面温度观测资料, 便可大致地作出该地区晴天小风条件下, 逆温强度的初步预告。至于可靠性和准确性, 则有赖于进一步实验验证。

(六) 山区、平原辐射逆温对比

平原地区和山区在逆温强度、厚度及分层特点方面究竟有何不同？这是值得关心的问题，为了这个目的，我们于1973年夏季在北京八达岭山区和北郊平原进行了定点定时对比观测，经分析可得以下初步结果。

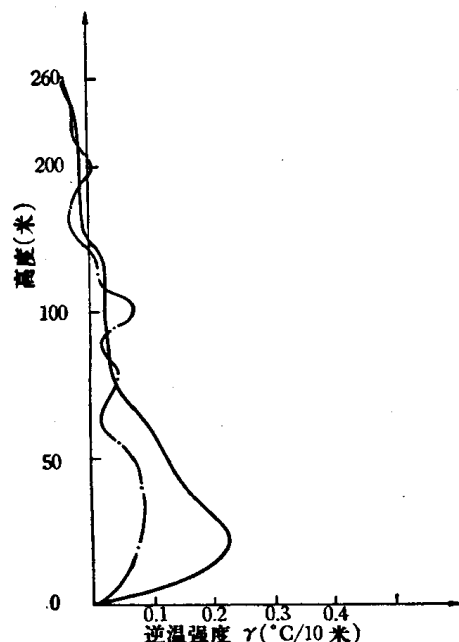


图9 山区、平原逆温对比
点划线：石桥子，1973年7月15—16日，
19:00—06:00，12次平均；
实线：北郊，1973年7月15—16日，
19:00—06:00，19次平均

1. 强度对比

图9是两地同时观测到的逆温强度随高度的变化。由图可见，平地辐射逆温要比山区强，其最大平均强度在北郊为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{米}$ ，在八达岭山区为 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{米}$ 。这显然是由于山区辐射面复杂而造成的。对于平原，当夜间冷却时，地面附近的空气冷却比较快，上层空气冷却比较慢，因此上下温差大逆温强。而在山区，除了贴近地面的气层冷却外，周围山坡也是辐射冷却面，它们将引起较高气层的冷却，这样上下层温差小，逆温当然也弱。

2. 层次对比

从图9还可看到，辐射逆温在平原地区只有一层，而且基本上是一个中心，层顶高度在150米附近，其中60米以下强度较强，60米以上显著减弱，中心位置在20米处。八达岭山区逆温顶高度在140米附近，中心较多，分别位于40米，80米和100米，对应的强度为 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{米}$ ， $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{米}$ 和 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{米}$ 。

二、山区风场的特征

资本主义国家的工业盲目集中于平原地区和大城市，工业污染对人体健康和自然环境已带来了很大的危害。综合利用，合理布局是防治工业污染和改善环境的重要措施。

山区的气象条件比平原复杂。在山区建厂更需要了解山区大气污染的气象条件和大气扩散规律，以便进行合理排放和厂区的合理布局。

近十几年来，国内外对山区复杂地形的大气边界层和扩散规律的研究很多。风场是影响大气扩散的重要因子之一。因此，对山区风场的特征进行观测和研究是很重要的。

山区的风场尽管比平原复杂，但有其规律可循。可以利用其有利于扩散的一面，避开其不利于扩散一面，达到减少污染的目的。

本文利用我国六个省市的八个山沟的测风资料，对山区风场的一般特征、垂直结构、以及一些特殊现象作了分析，为山区工业的合理布局，排放高度的选择以及排放时间的控制等提供了依据。

(一) 资料来源和观测方法

1969—1973年，我们先后在6个省市的8个山沟进行了山区风场和温度场的观测，其观测方法有以下五种：

1. 单经纬仪和双经纬仪测风(小球测风)

白天采用10号气球(升速为100米/分)，夜间用20号气球(升速为200米/分)。每间隔30秒读一次数，跟踪到1500米为止。每天观测四次(02时，08时，14时，20时)。02和14时分别代表夜间和白天的情况，而08和20时一般代表过渡时期。

这类资料主要用于分析山谷风的垂直结构和高空风的风向频率。

2. 架子和悬索上的风和温度梯度的观测

架子有的设在沟底，有的设在半山坡或山头。在较狭窄的山沟，我们横贯山沟拉悬索，在悬索上挂梯子进行梯度观测。

架子或悬索上的梯子离地面高度不等。一般在20—80米之间。在架子或梯子上面安装热线风速仪、瞬时微风仪以及电接风向风速仪。温度元件采用铂金丝电阻温度计。

这类资料用于分析坡风、山谷风，风向频率，以及温度梯度。

3. 气艇测风

用气艇携带热线风速仪测风速，而气艇平衡时，头部指向风的来向，可粗略估计风向。

有两种观测方法。一种是使气艇固定在某一指定高度，作风速随时间变化的连续观测，另一种是由地面向上每间隔10米读数，取得风向、风速随高度变化的资料。

这类资料用于分析坡风和过山气流。

4. 地面风场的观测

仪器主要用瞬时微风仪和电接风向风速仪。

这类资料用来分析山谷风、风向频率、小风特征、山风浪潮以及水平流场等。

5. 系留气球测温度梯度

温度元件采用铂金丝温度计。

本文使用的资料种类和观测时间列于表 1 中。

表 1 资 料 总 表

地 名	经纬仪小球测风	梯度资料	地面风场	系留气球	气艇资料
四川青龙沟	1970年1月28日至3月20日 1970年7月17日至8月16日		10月2日至10月5日 瞬时微风仪		3月4日至 3月19日 150米
湖北高峡沟	1971年8月26日至 10月17日	8月28日至9月3日 45米	9月20日至9月21日 瞬时微风仪	8月28日至 9月3日	8月28日至 9月3日 0—150米
浙江大岙	1973年9月4日至 10月22日		9月16日至9月17日 电接风向风速仪		
浙江杨岙	1973年9月4日至 10月22日				
河南竹园沟	1969年8月8日至 9月6日	8月8日至9月11日 40米	8月8日至9月11日 瞬时微风仪		
四川黑水沟	1969年3月19日至 4月23日	3月25日至3月26日 48米			
湖南枫叶沟			1970年10月 电接风向风速仪		
北京东风沟			电接风向风速仪		

(二) 山区风场的一般特征

山区风场的垂直结构比平原复杂。山区大气近地面层的风场主要是地形风。在地形风上面是梯度风。

地形风主要包括坡风、山谷风(包括反向山谷风)、大尺度地形风(大型山谷风、大型坡风,后者也称山区平原风^[1])。关于地形风以及海陆风的形成都用环流定理解释。这里不作详细说明。我们只定性地说明地形风的形成过程。

晴天夜间,由于地面辐射冷却比空气快,山坡上接近地面的一层空气比同高度的山沟上空的空气冷,其密度也大,这层冷空气沿山坡向下流动,形成下坡风。由山沟两侧山坡上流到沟内的冷空气在沟内汇集起来,再向山沟外流动,这就是山风。反之,白天,地面接

受太阳辐射,接近山坡的空气很快增温,而同高度上的空气较冷,形成水平密度梯度,使得暖空气沿山坡爬升,形成上坡风。山沟外的冷空气向山沟内补充,形成谷风。

梯度风是与大尺度天气系统相伴的风场,其风向在几十公里到几百公里内基本相同。下面根据我们的观测资料,分析山区风场的一般特征。

1. 坡 风

湖北高峡沟的走向大致为由北向南。我们在其西坡上(其位置相对于沟底高度为300米,比山头低100米)观测风向、风速随高度的分布,根据上述山沟走向及观测点的位置,下坡风指向山沟,其风向应是偏西风。而山风应是偏北风。山坡上空,自下向上先是指向山沟的下坡风,然后转为沿主沟方向的山风。下坡风的厚度与天气状况和上层风速有关。晴天小风条件下,下坡风厚,阴天大风则下坡风浅薄。因此,下坡风频率自下向上减小。图1给出100米以下各高度下坡风和山风出现的频率,在20米以下全是下坡风,90米以上主要是山风。

下坡风平均风速廓线如图2所示。最大平均风速出现在30米高度,这与 Prandtl^[2] 的观测结果相同。

在下坡风观测的同时,我们也进行了温度垂直梯度的观测。观测结果表明,在40米高度以下有一逆温层(图3)。既然近地面空气受地面辐射冷却而形成下坡风,下坡风所对应的温度场当然是下面低,上面高。

2. 山 谷 风

我们考察这8个山沟的地理位置虽然不一样,观测的季节也不一致,但都有明显的山

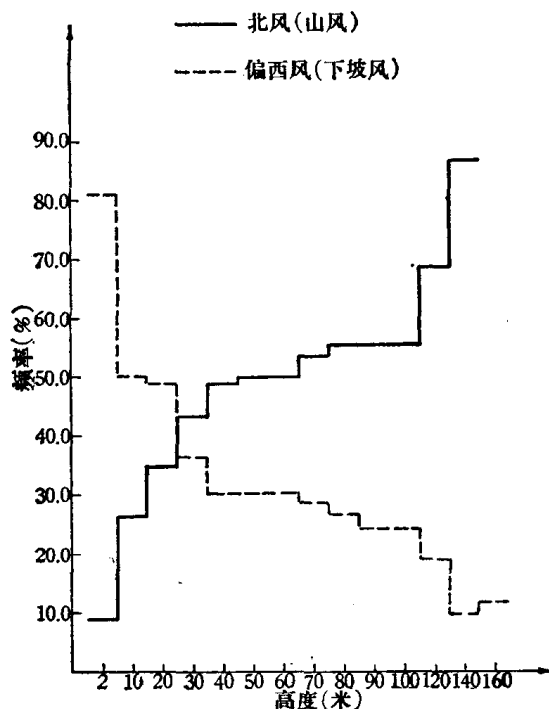


图1 下坡风和山风频率随高度的变化

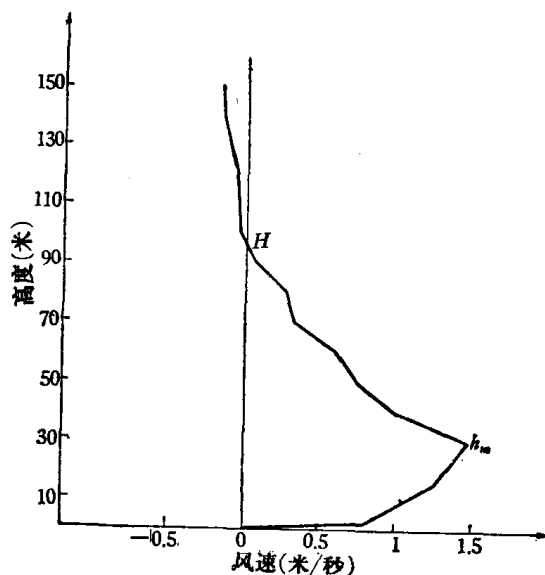


图2 湖北高峡沟坡风廓线图(14次平均)

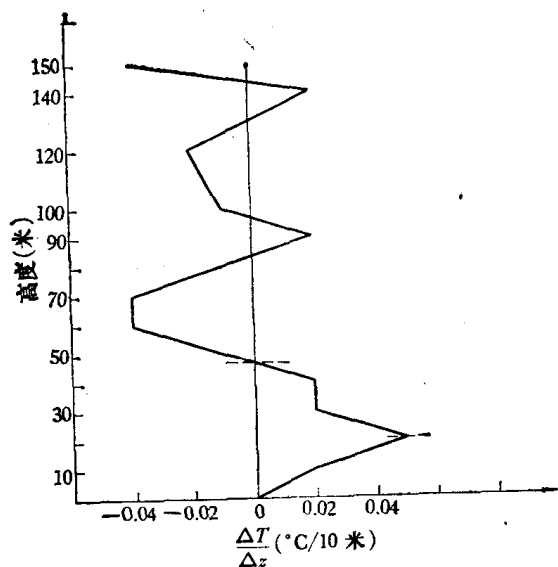


图3 高峡沟山坡晴天晚上温度梯度图(22次平均)

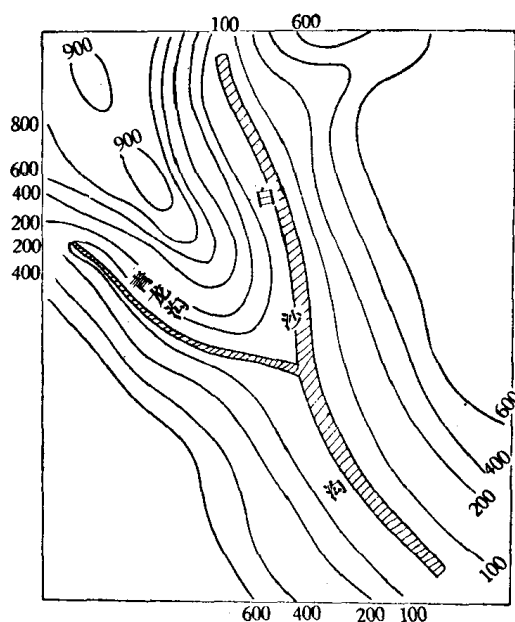


图4 四川青龙沟地形概略图

谷风。

图4是四川青龙沟的地形概略图。青龙沟的走向为 $290-110^\circ$ 。因此,山风为偏西风,谷风为偏东风。图5表示青龙沟晴天山谷风风向日变化规律。从中看出,21时到第二天7时为山风(出沟风),10时到18时为谷风(进沟风),7时到10时为山风转变为谷风的转换期,18时到21时为谷风转变成山风的转换期。同时,我们给出河南竹园沟风向频率日变化图6,可看出转换期间风向是不稳定的,进出沟风均有机会出现,时而出沟,时而进沟,表现出间断性,这时,如有污染物大量排入沟中,往往输送不走,在沟中停留时间很长,造成严重污染。

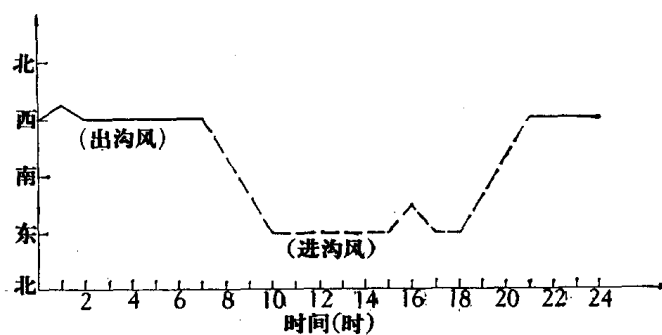


图5 青龙沟山谷风平均风向的日变化

为了说明在同一山沟中不同位置转换期开始时间是否一致的问题,我们分析了在高峡沟各个不同位置的10个测风点资料,从57次开始时间统计中,只有7次有一个站与其它站相差1小时,其余都一致。差一个小时的只占12.3%。因此我们可以认为在一个山沟里山风或谷风出现几乎是同时的。

图7表示青龙沟晴天山谷风风速日变化规律。从中看出,三个不同高度上山谷风风速

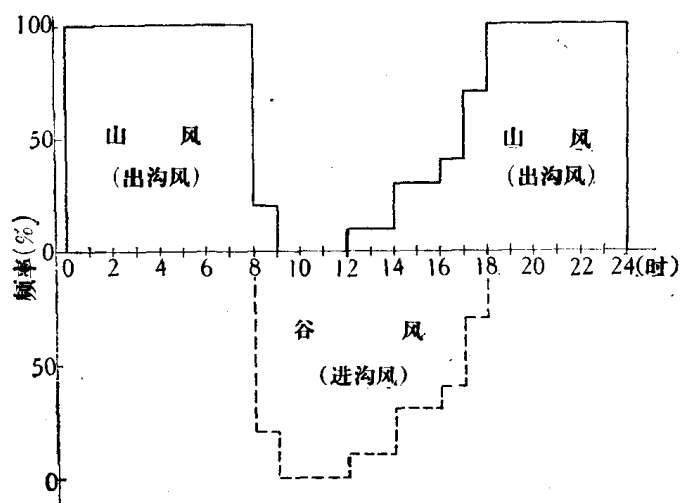


图 6 河南竹园沟风向频率的日变化

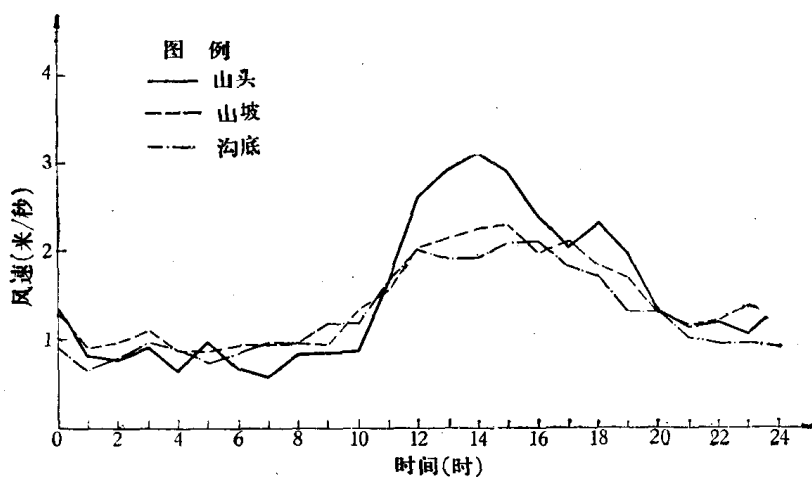


图 7 青龙沟山谷风风速的日变化

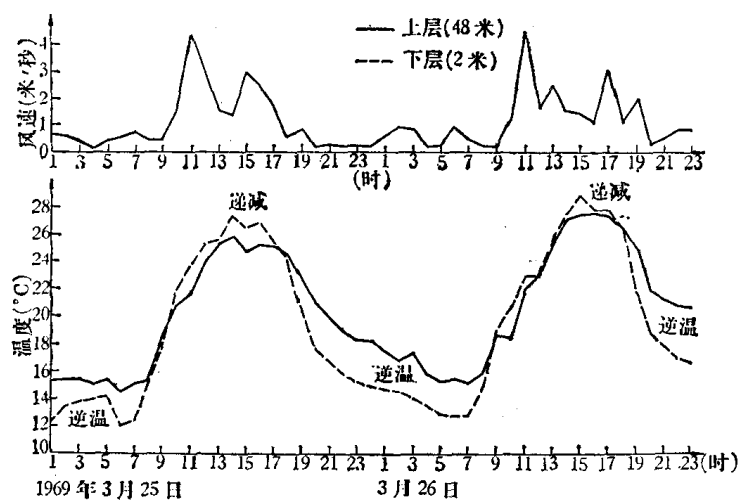


图 8 四川黑水沟温度和风速的日变化

日变化都是非常清楚的，谷风期间风速达最大，山风期间风速较小，谷风最大风速约为山风的三倍。