

山地对积云的影响数值模拟

孔凡铀 黄美元 徐华英

(中科院大气所)

提 要

使用二维平面对称暖积云模式模拟了三种理想地形对随环境风移动的积云的作用,试验了山地处理技术,计算结果与观测事实比较一致。结果表明,积云移过孤立山地或移入山区时受到增强,雨量增大;而移出山地的积云则被减弱。地形作用在积云发展初期较明显。山地表面加热形成的山地环流回流下沉运动区对向山地靠拢的积云有一定削弱作用。

一、基本模式

采用加有水平环境风场的二维平面对称暖积云模式,微物理过程参数化^[1]。在模拟域下边界引入三种理想地形:孤立山坡型;平原—上坡—高原型和高原—下坡—平原型(见表1)。上、下边界取为刚性、自由滑动条件,即在山地表面附近允许有沿山坡的切向风存在。两侧边界开放。模式中所采用的温、湿度垂直分布使得在4.5千米以下为对流性不稳定层。速度为5米/秒的初始水平环境风由左向右吹。初始液水场(云水和雨水)为零。

模拟区域宽30千米,高12千米, $\Delta x = \Delta z = 500$ 米, $\Delta t = 10$ 秒。初始对流位于域中部,由2千米高度上的温、湿度扰动激发,然后在环境风作用下移向山地。为保证模拟积云最终不致移出模拟域外,整个网格系统按平均水平风速移动。

二、山地处理技术

在数值模式下边界引入地形有两种主要方法。一种是采用铅直坐标变换,将满足一定函数关系的光滑山地曲面变换为平下界面(Clark, 1977)^[2]。变换后的模式域为矩形,下边界条件易于提出。但由于方程组中增加了附加项,增加了计算的复杂性。本文采用

直接在加有山地的模拟域中求解控制方程的办法。数学处理上较为简单,且不要山地表面光滑条件。作为初步研究,本文只计算了山地斜坡倾角为 45° 的一种特殊情况。为了研究山地热成环流对积云的作用,在孤立山坡型山地迎风面(假定为向阳坡)考虑了日照加热因素,使山坡表面温度高于同高度环境空气温度。模式中用山地边界条件来反映这种山地表面增温效应:假设迎风坡受到日射加热后,表面温度与环境大气温度的差值随高度线性增大,在1千米高的山脊上为 2.5°C 。这个差值就作为偏差温度场在山地边界上的边界值。另外两种地形未考虑热力作用。

模式中加入山地后,水平环境风场会受到扰动而出现垂直运动分量。因此,流场的初始化问题十分重要。桑建国等(1984)^[3]将水平环境风加入到山地模式中,去掉初始水汽场让模式空运行若干时步,待建立起较稳定的流场后即取为初始流场。本文所用的方法是:先在无山地域中建立起水平均匀流场($U=5$ 米/秒),然后叠加上地形,并强迫取山地边界条件。从而得到一个受地形扰动的流场。不去除水汽场的空运行试验表明,这个流场经过8分钟就可达到准定常状态。为节省计算时间,本文直接取初始时刻获得的山地扰动流场作为初始流场。这样计算出的算例与经过20分钟空运行后加入对流扰动所得结果在积云演变特征、最大云顶高度和流场结构等方面没有明显区别。云内最大升速相差不超过15%,最大雷达反射率因子差异低于1%。

三、计算结果

各个算例所对应的地形参数和物理参数均列于表1中。模拟积云分为弱对流系统和较强对流系统两类。在无山地影响的对比个例中,前者过程最大升速5.6米/秒,最大云厚4千米;后者过程最大升速12米/秒,最大云厚7.5千米,生命史都是60分钟左右。下面分别讨论各种地形对积云的作用特点。

1. “孤立山坡”型

图1绘出了强、弱积云受到1千米高孤立山坡作用时云内最大上升速度 w_{\max} 随时间演变曲线。初生积云与山地之间取不同的距离,等于模拟了对流系统在不同发展阶段移到山地的情况。本文所取的三种距离(见表1)分别对应于初生阶段、发展旺盛阶段以及成熟、消亡阶段。虚线为无地形时的算例结果,作为对比。

从图1中可以清楚看出,加入孤立山坡地形的模拟积云在移过山坡前均加强。图1中所有各例在发展阶段强度都超过相应的对比个例。这主要是由于水平环境风场受到地形抬升,山前出现一个较大范围的上升气流区。计算表明,速度为5米/秒的水平风受1千米高的山坡抬升后,在上风方距山坡15千米处仍可产生 10^{-1} 米/秒量级的上升速度。初生积云距山坡越近,增强的幅度也越大。以强对流系统为例(图1a),在第12分钟时B5、B6和B7例的 w_{\max} 分别比对比个例大41.7%、25.0%和8.3%。这个事实说明,孤立山地对处于初生、发展阶段的积云强度影响较大,而对成熟、消亡阶段的积云强度影响相对小些。各例中除B5以外,其过程峰值最大升速也均超过对比个例。但比较图1a和1b则可发现,弱对流系统的超出值明显高于强对流云:前者超出38.6%以上,而后者改变幅度在12.5%以内。这个事实间接证明,山前大范围抬升重建了大气环境场,使层

表1 山地影响算例表

地形	算例	积云生成位置距山地距离(千米)	山高(千米)	山地热力作用	湍流交换系数K(米 ² /秒)	对流强弱	注
无地形	B0				250	弱	无山地对比例, E0用作下降地形
	C0				500	强	
	E0				250		
孤立山地 →U ₀ 	B1	3	1	*	250	弱	加“*”表示在山坡迎风面增加地面热力效应
	B2	6.5	1				
	B3	6.5	1	*			
	B4	10.5	1	*			
	B5	3	1	*	500	强	
	B6	6.5	1	*			
	B7	10.5	1	*			
	B8	10.5	2	*			
“平原—上坡—高原”型 	D1	3	1		250	弱	
	D2	6.5	1				
	D3	10.5	1				
“高原—下坡—平原”型 	E1	3	1		250		
	E2	6.5	1				
	E3	10.5	1				

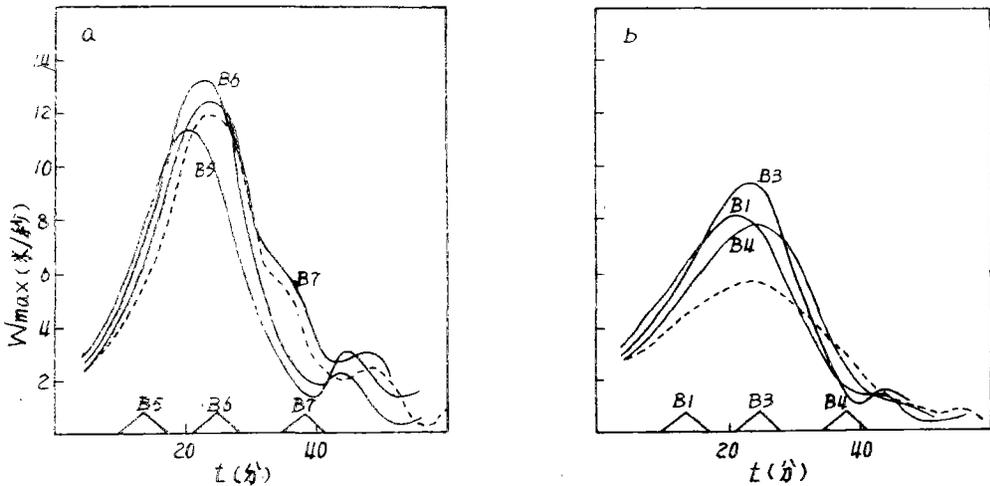


图1 孤立山地影响下 w_{max} 随时间变化曲线。各例积云经过山地的时间标在 t 轴上
 a. 强积云影响, 虚线对应C0例; b. 弱积云影响, 虚线对应B0例

结变得更加不稳定，从而促进不稳定能量的释放，使弱积云发展受到较大程度增强。同时，生命时间均缩短(图1 b)。

图1的另一个特征是：在积云移过山坡后，各条曲线都迅速下降，最后低于对比个例(B7除外)。最先过山的云首先减弱，这表明山后存在的下沉气流区加速了过山积云的消亡过程。B5例之所以过程峰值最大升速低于对比个例，就是由于积云很早就移过山地，长时间受削弱的结果。B7例则因为整个生命期都基本处于山前，其强度总是高于对比个例。

积云消散过程中的振荡特性也在图1中清楚的表现出来。

山坡高度不同，对积云强度的影响程度是不一样的。图2两条曲线分别对应于山高1千米和2千米的算例(B7和B8)，其它条件均相同。不难看出，山高为2千米的B8例增强更为迅速。其过程峰值最大上升速度比B7例高9.2%。在第20分钟时， w_{max} 甚至超过B7例21.6%。

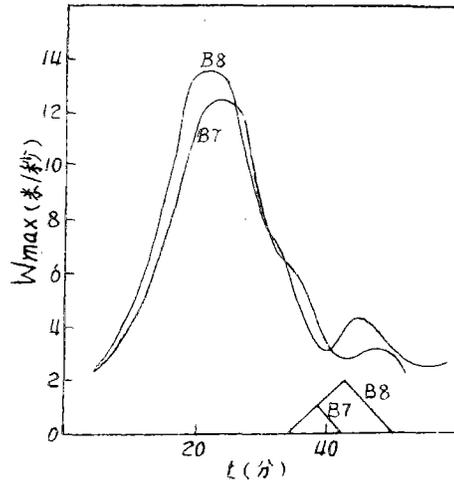


图2 不同山高时 w_{max} 的比较

为了研究山坡表面辐射加热对过境积云的作用，分别模拟了在山坡迎风面(向阳坡)考虑和未考虑表面增温效应两种情形，其结果绘于图3。B2例除了未考虑热力作用外，

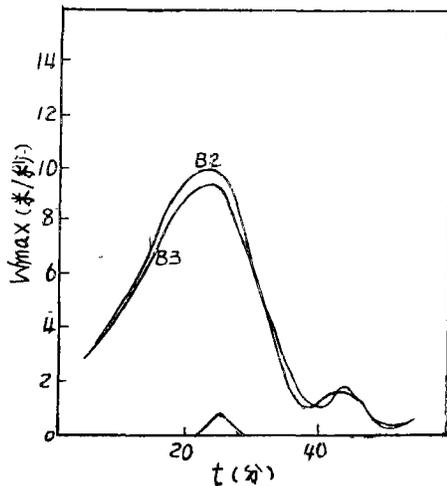


图3 B2、B3例 w_{max} 时变曲线。通过山地所经历时段标在t轴上(山地剖面)

其它条件全与B3例相同。可以看出，两条曲线十分靠近，幅度变化不到10%。值得注意的是，考虑地形加热效应的B3例过程峰值最大升速还略低于不加热力作用的B2例。这似乎难以理解，我们可分析一下无环境风场和对流扰动场的纯热成山地环流的垂直运动分布特点。模式中不加入水平环境气流和对流扰动，在孤立山坡左表面即迎风面通过地面加热就可以形成一个纯热成环流场，图4就是这个环流场的垂直运动分布。该图中山地热成环流上升区只出现在靠近山地中上部2~3千米以下很小的区域。下沉运动尽管数值较小，但区域较大。由左面上风侧移向山地的积云在未趋近山脚前一直受到这种弱下沉运动的影响。即使后来移到山地上方，也因为上升区较低较小，加之积云很快掠过而没能受到明显增强。根据上述分析，可以认为在本文计算所用条件下，热力作用在山地对外来积云的影响中不起主

上述分析，可以认为在本文计算所用条件下，热力作用在山地对外来积云的影响中不起主

要作用，它的存在反而会使积云受到轻微负影响(即减弱)，起主要作用的是动力抬升。这个结论与山地热成环流可以促使地形积云形成的事实(Orville, 1965)^[4]并不矛盾：

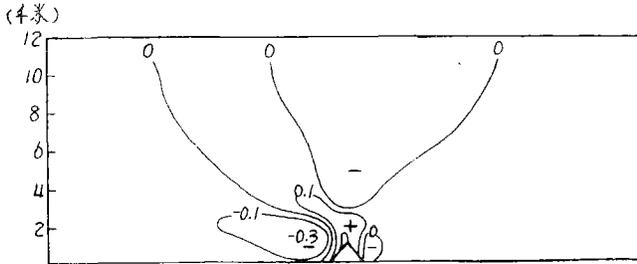


图4 纯热成山地环流(孤立山地)的垂直速度分布。下边界中部的三角形表示山地剖面。图中所标数据单位为米/秒

在山顶上方气层有合适的温、湿层结配置下，地面加热差异引起的谷风环流抬升山顶气层，经过一段时间后可在山脊上方形成局地云。可以认为这是一种静态成云过程，不稳定能量可以不断累积于山脊上方，直到成云。进一步的数值试验仍然是有必要的。

2. “平原—上坡—高原”型

研究这种地形作用有助于了解积云移入山区时所呈现的演变特征。这一组算例(D₁、D₂和D₃)仍用B0例作为对比个例。斜坡上不考虑增温效应，只研究这种上升地形对对流系统的动力强迫抬升作用。各例的w_{max}时变曲线见图5，“山区”高度均为1千米。

由图5可见，受到“平原—上坡—高原”地形抬升后，各例积云迅速增长，强度大幅度超过对比个例，过程峰值最大升速比对比个例的高出一倍多。同时比孤立山坡地形作用下相应的B1、B3和B4例的峰值最大升速也大了34%以上(图1b)。这说明积云移入山区所受到的增强要大大超过移过同高度孤立山坡时所受到的增强。图5还揭示了与孤立山坡影响例相类似的特征，即积云生成位置距离山坡愈近，受山地增强作用愈显著。D3例积云移至山坡时已处在减弱阶段，受到较小增强，但仍可以看出，在山地抬升作用下，D3例的减弱速度变缓。

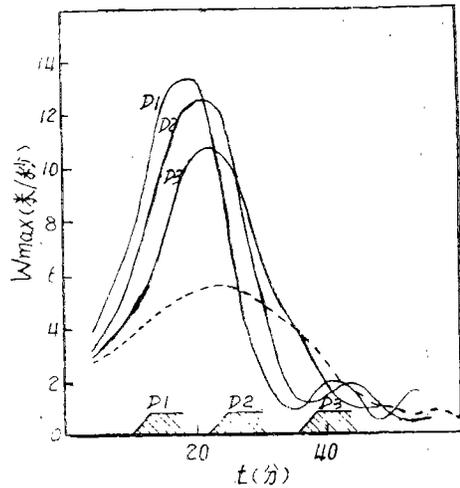


图5 D₁、D₂和D₃三例的w_{max}时变曲线。虚线对应B0例

仔细比较图5和图1还可看到一个特点：图5中的D₁和D₂两例尽管在上坡前增长得十分快，但其生命史也要短些。两条曲线首次降到最低点的时间比相应的B₅、B₆例提前了5分钟左右。图6是D₂例模拟积云在移到山坡前(第12分钟和20分钟)的二维相对流场(即相对于水平均匀环境风场的流场)。整层均匀水平环境风受到抬升挤压后，在高原上的低层形成一大范围较强的水平气流，这在12分钟图上尤其明显，这个强水平气流将云上部向前出流吸向低层(见第20分钟流场)。可能正是由于这个低层较强水平气流使得移上高原的积云缺乏来自前方低层的水汽和热量供给，致使积云很快消亡，缩短了生命

史。从图 6 可见，20 分钟时积云移到坡前，这时低层强水平气流已经阻断了积云前下部的入流，使其丧失继续发展的潜力。

对 D1、D2 和 D3 例还计算了地面累计总降水量的分布情况，结果见图 7。三例的地面总降水量均超过了对比个例（图中虚线）1.7 倍以上，斜坡上方还对应有一降水量次高值区。这个次峰显然是地形抬升增强积云所造成的。这种地形增雨在实际观测中也得到证实。

3. “高原—下坡—平原”型

这种地形例相当于积云由山区移入平川的情形，图 8 是所计算各例强度的时间分布。对比个例 E0（虚线）是以整个高原为下表面算出，初始扰动中心相应提高了 0.5 千米。

由于环境水平风场在下坡处发生辐散，出现下沉运动分量，使各例强度都有一定程度减弱。其中 E1 例积云初生位置距平原最近，在发展前期（10 分钟左右）就移下高原。从图 8 中可见，16 分钟以前 E1 例积云强度的增加较另两例平缓，进入平原后才有一些

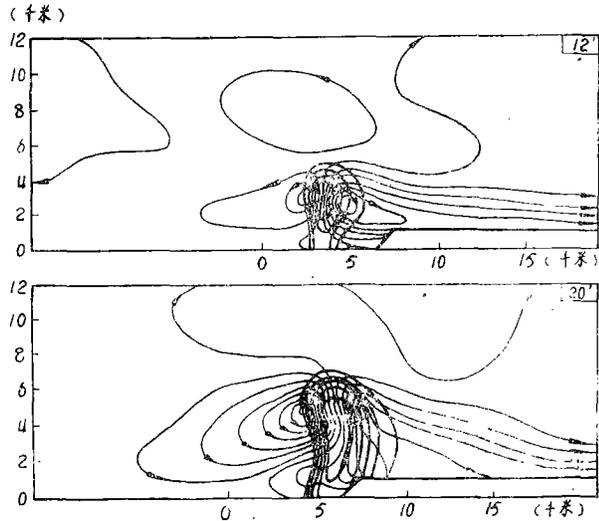


图 6 D2 例在 12 分钟和 20 分钟时的二维相对流场（细线）和雷达回波场（粗线）分布。粗线间隔 10dBz，外廓线为 10dBz

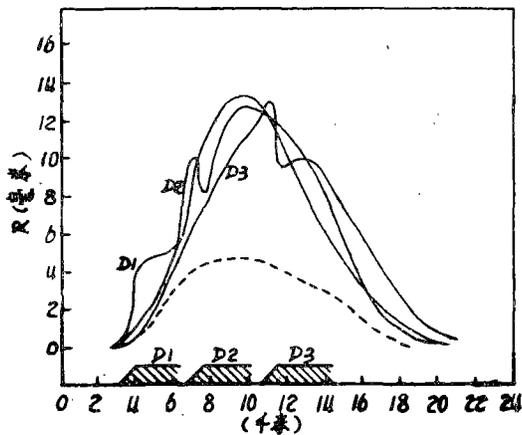


图 7 D1、D2 和 D3 例的地面总降水量空间分布，虚线对应 B0 例

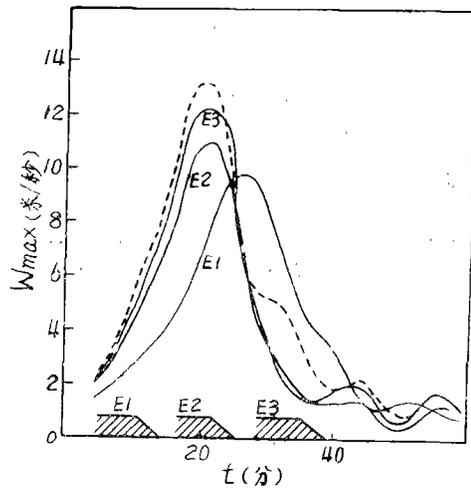


图 8 E1、E2、E3 三例的 w_{max} 时变曲线，虚线对应 E0 例

发展,过程峰值出现时间延后,峰值强度也最小。E3例则与对比个例偏离不明显,只是在消亡阶段(30分钟以后)当云体移近平原时才出现较明显偏离。

四、小 结

对山地影响的这种研究还只是个初步尝试,本文只讨论了整层均匀环境风和理想地形的情形。但大部分计算结果还是在一定程度上反映出山地对过境积云的主要影响特征,这些特征归纳起来有下面几点:

1.积云移过孤立山地,或由平原移入山区时均有利于其发展,由高原移往平原或盆地时不利于发展。“平原—上坡—高原”地形对积云的促进作用比孤立山地的要强,较高的山对积云增强也显著一些。

2.1~2千米高的山地对弱积云影响最显著,对较强盛积云影响相对较弱。

3.对较短生命期的孤立积云而言,山地对初生和发展阶段积云影响较强,而对成熟、消亡阶段积云影响相对较弱。

4.在环境风足够强、山地表面与同高度大气温差不十分大时,山地对过境积云的影响主要是动力强迫作用,热成环流作用相对不明显。局地环流的回流下沉运动区范围较大,对外来积云有一定程度削弱。

5.“孤立山地”和“平原—上坡—高原”地形有明显增雨作用,在地形上升区段对应有降水次峰出现。

6.在整层均匀环境风时,积云移入山区后,由于低层较强水平气流切断前方水汽和热量供应,可加快消亡过程。

参 考 文 献

- [1] 徐华英、李桂忱、郝京甫,积云降水过程的数值模拟研究,中国南方云物理学和人工降水论文集,110页,1980。
- [2] Clark, T.L., A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation, *J. Comput. Phys.*, Vol.24(1977), 186页。
- [3] 桑建国和Reiter, E. R., 过山波动对积云生成启动机制作用的数值试验, *大气科学*, 8卷(1984), 126页。
- [4] Orville, H.D., The numerical study of the initiation of cumulus clouds over mountainous terrain, *J. Atmos. Sci.*, Vol.22(1965), 684页。

NUMERICAL MODELING OF THE EFFECTS OF MOUNTAINS ON WARM CUMULUS CLOUDS

Kong Fanyou Huang Meiyuan Xu Huaying

ABSTRACT

The effects of three ideal types of terrain on clouds which move with ambient wind have been simulated by using a two-dimensional slab-symmetric warm cloud model. A simple technique of terrain processing is used. And the results of this modeling are fairly consistent with observations.

The modeled clouds moving over isolate mountains or into mountain areas undergo some enhancement, with larger amount of rainfall, whereas those moving out of mountain areas become weakened a lot. The effect of terrains is more obvious in the early developing stage of the clouds.

The downdraft of the local circulation formed because of the heating of the mountain slope has a slight negative effect on the development of the approaching clouds.