

中尺度非均一边界层气候的数值研究^{*}

(I) 敏感性试验

陈江^{**} 陈万隆

(南京气象学院, 南京, 210035)

陈宇能

季国良

(夏威夷大学, 美国)

(兰州高原大气物理研究所, 兰州, 730000)

提 要

模式是以 Nickerson 等(1986)的静力大气模式与 McCumer 等(1981)的土壤模式相耦合为基础, 而且仅考虑平坦地形和无天气系统扰动的晴朗天气条件作敏感性试验, 以便研究非均一下垫面状况对行星边界层气候的影响。试验表明, 模式计算结果对植被覆盖因子和背景水平风速十分敏感, 然而对植被粗糙度则不大敏感。

一、引 言

陆地与大气之间以各种时间尺度和空间尺度进行着物质和能量的交换。与此同时, 这种交换过程在不同的时、空范围内对大气环流和气候产生了一定程度的影响。

最近 30 年, 国外对中尺度非均一下垫面引起的次级环流及其对行星边界层大气的影响进行了广泛的数值研究^[1,2,3]。近几年国内一些研究者开始对非均一行星边界层问题发生了兴趣^[4,5,6,7]。但是, 国内的研究中均未考虑植被层的热力作用, 而植被的影响是不容忽视的。

在我国北方, 大范围的开垦草原会产生不良的小气候效应^[8]。因此, 研究我国北方非均一下垫面引起的局地环流和边界层气候, 对于指导合理的利用土地资源和改善生态环境是有所裨益的。

本研究包括两部分内容。第一部分是参照 Mahfouf 等^[9]的工作, 而将 Nickerson 等^[10]的静力大气模式与 McCumber 等^[11]的土壤模式耦合起来, 并引进 Deardorff^[12]的植被层影响的参数化方案, 在此基础上对模式的敏感性进行了数值试验。第二部分则是用此模式对

1990年10月30日收到, 1992年1月4日收到修改稿。

* 国家气象局气象科学研究基金资助课题。

** 现在新疆维吾尔自治区气象业务中心工作。

我国夏季呼伦贝尔草原和河西走廊的一些非均一下垫面所引起的局地环流和边界层气候进行了数值研究。而本文着重讨论模式对植被覆盖因子及其粗糙度和背景风场等因素的敏感性试验结果。

二、模式简介

本文的大气模式采用的是 Nickerson 等^[10]提出的原始静力大气运动方程组的二维形式,垂直方向用 γ 坐标表示,而且我们删掉了其中的云微物理过程,行星边界层的湍流参数化改用 Therry 等^[13]提出的简化的参数化方案。模式大气顶取为 100hPa,并对 γ 等分 15 层。

土壤模式可取一维的土壤热传导方程和水分通量方程。这是因为土壤中热量和水分的垂直输送比水平输送要大得多。这样,土壤模式可表示成

$$\rho_s \cdot C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D_v \frac{\partial \eta}{\partial z}) + \frac{\partial k_v}{\partial z} \quad (2)$$

式中 T_s 表示土温, ρ_s 和 C_s 分别代表土壤密度和比热, λ 表示土壤导热率, η 表示容积水含量, D_v 和 k_v 分别代表土壤的水力扩散系数和水分渗透系数。

为了求解方程(2),本文采用了 McCumber 等^[11]的闭合方案,并将土壤深度坐标 z 转换成 $\zeta = \ln(1+z/d)$, 这里 $d \equiv 1\text{cm}$, $0 \leq z \leq 100\text{cm}$, 然后对 ζ 等分成 13 层来求解土壤模式。

当下垫面有植被时,则采用 Deardorff^[12]提出的感热通量 H_{sh} 和蒸散 E_h 的植被层参数化方案,即

$$H_{sh} = \rho_a c_p c_{H_2O} u_{af} (T_G - T_{af}) + 1.1 N \rho_a c_p c_f u_{af} (T_f - T_{af}) \quad (3)$$

$$E_h = \rho_a c_{H_2O} u_{af} (q_G - q_{af}) + N \rho_a c_f u_{af} [q_{sat}(T_f) - q_{af}] r'' \quad (4)$$

式中 ρ_a 表示空气密度, c_{H_2O} 表示植冠层下地面热量(或水汽)的输送系数, c_f 表示无因次传输系数, u_{af} 表示植冠层内 z_a 高度上的平均风速, N 表示净叶面积指数, r'' 表示单位叶面积上叶面实际蒸腾量与可能蒸腾量的比值; T 和 q 分别表示温度和比湿,而它们的下标 G 、 a 、 f 和 af 则分别表示它们在地面、空气、叶面和贴近叶面空气的值。 $q_{sat}(T_f)$ 表示叶温为 T_f 时的饱和比湿。

至于贴近叶面空气的温度 T_{af} 和比湿 q_{af} , 是用下列加权公式计算的:

$$T_{af} = (1 - \sigma_f) T_a + \sigma_f (0.3 T_G + 0.6 T_f + 0.1 T_G) \quad (5)$$

$$q_{af} = (1 - \sigma_f) q_a + \sigma_f (0.3 q_G + 0.6 q_f + 0.1 q_G) \quad (6)$$

这里 σ_f 称为植被覆盖因子,定义为在单位地面面积上太阳短波辐射被植被遮挡而不能到达地面所占的面积成数, $0 \leq \sigma_f \leq 1$, 当 $\sigma_f = 0$ 时表示地面没有任何植被, 当 $\sigma_f = 1$ 时表示地面完全被植被覆盖。其它符号同上。

叶面(平衡)温度 T_f 可由植冠层顶和地面的热量平衡方程确定。Deardorff^[12]给出了式(3)和式(4)的计算步骤。

上述二维大气-植被-土壤模式的边界条件是:

上边界 $p=100\text{hPa}$; $\gamma=0$, T 和 q 取为常值;

地面: $u=\gamma=0$ 及晴天条件下地面的热量平衡方程和水量平衡方程, 即

$$R_s + R_L - \sigma T_0^4 - H - LE - Q_s = 0 \quad (7)$$

$$E_s - E = 0 \quad (8)$$

式中 R_s 和 R_L 分别表示下垫面接收的太阳短波净辐射和大气向下长波辐射(按 Mahfouf 等采用的方案^[9]确定), σ 表示 Stefan-Boltzmann 常数, H 和 LE 分别代表下垫面的感热通量和潜热通量, Q_s 为土壤热通量, E_s 表示土壤水分通量, E 为下垫面的蒸发(或蒸散)通量。其中

$$H = \begin{cases} -\rho_a c_p k \frac{\partial T}{\partial z}, & \text{当下垫面为裸地时} \\ H_{sh}(\text{即式(3)}), & \text{当下垫面有植被覆盖时} \end{cases} \quad (9)$$

$$E = \begin{cases} -\rho_a L k \frac{\partial q}{\partial z}, & \text{当下垫面为裸地时} \\ E_s(\text{即式(4)}), & \text{当下垫面有植被覆盖时} \end{cases} \quad (10)$$

这里 k 表示热量或水汽的湍流系数, 它是根据湍流动能平衡方程闭合求解法确定的^[13]。 c_p 和 L 分别表示空气定压比热和潜热系数。而土壤热通量由下式确定:

$$Q_s = -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (11)$$

以及土壤水分通量表示为

$$E_s = \rho_s k_n \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (12)$$

式中 ψ 表示土壤水分势, 它定义为从土壤中脱水而克服其毛细作用和附着力所需要的势能。

土壤层下边层(1m 深处): T_s 和 ψ 取作常值(对于沙地, ψ 取为 $-12.1\text{cm}^{[3]}$)。

侧边界采用周期性边界条件。模式大气的水平范围取为 260km , 水平格距为 10km 。积分时间步长取为 10s 。初始时刻, 假定气象要素在水平方向呈均匀分布, 且大气处于准静止状态, 并以单站温度和湿度的探空资料和规定的风速廓线作为初值。积分从日出前半小时开始, 敏感性试验积分 12 小时, 其它数值试验积分 24 小时。时间积分结果采用 5 点平滑公式平滑。

下面我们依次讨论模式对植被覆盖因子、背景风场和植被粗糙度的敏感性试验结果。

三、植被覆盖因子的变化

为了突出非均一下垫面对大气的热力强迫作用, 敏感性试验选择在晴天静稳条件下, 故初始风速可假定为 10^{-3}m/s , 风向为西风。试验地选在甘肃省张掖的西北方 40°N ; 100°E 的地方, 试验日期在 7 月 15 日。温度和湿度场的初值用的是张掖探空站 7 月平均的温度和比湿的廓线资料。

假设试验地区西部为草地, 草高 10cm , 东部为裸露沙地, 且地形平坦。草地的土壤湿度假定为 30% , 而裸地的土壤湿度为 5% 。本试验的植被覆盖因子 σ_f 变化在 $30\%—90\%$

范围内。

图 1 表示植被覆盖因子 σ_f 分别为 30% 和 70% 时的水平风速空间分布。由图 1(a) 和 (b) 看出, 虽然植被覆盖因子不同, 但其水平风速的空间分布形势却很相似, 即在行星边界层下半部(约 700m 高度以下), 气流由草地流向裸地(即吹植被风), 而在边界层上半部出现返回气流(吹东风)。最大风速中心偏在两下垫面的交界线以东 5km 处上方。同时看出, 随着植被因子的增大, 水平风速, 尤其是最大风速中心的值表现出明显增大的现象, 且低层比高层更为突出。

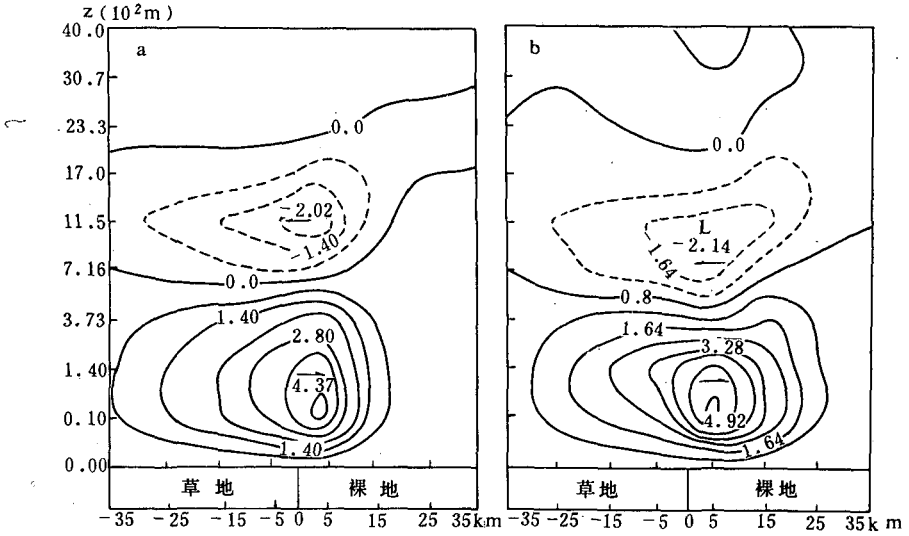


图 1 不同植被覆盖因子条件下水平风速(m/s)的剖面图(a) $\sigma_f=30\%$ (b) $\sigma_f=70\%$
(12:00(LST); 西风为正, 东风为负)

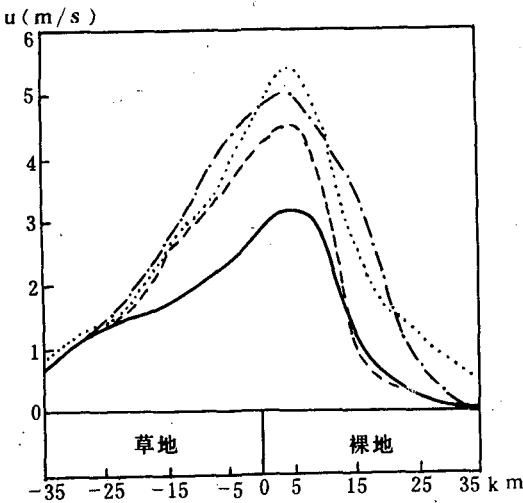


图 2 140m 高度上水平风速(m/s)的水平分布
(12:00(LST)) (实线 $\sigma_f=30\%$, 虚线 $\sigma_f=50\%$, 点划线 $\sigma_f=70\%$, 点线 $\sigma_f=90\%$)

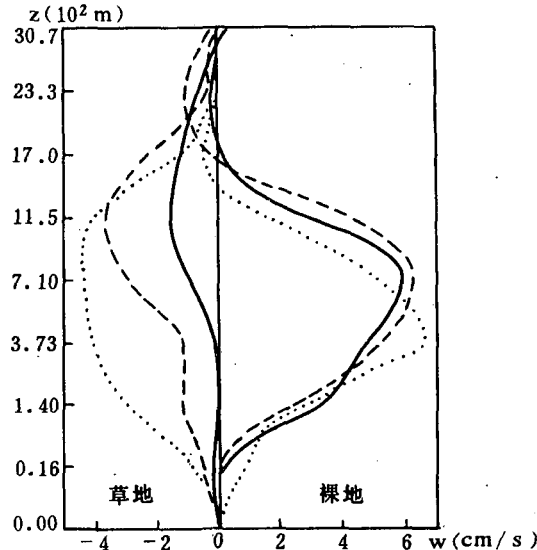


图 3: 草地和裸地在相邻 25km 水平范围内垂直速度(cm/s)的平均廓线(12:00(LST); 图例同图 2)

在草地与裸地两下垫面交界附近 25km 范围内,140m 高度上水平风速随植被覆盖因子增大而增加的现象是很清楚的(图 2)。

同水平风速一样,垂直速度(绝对值)也随着植被覆盖度的增加而增大,例子可见图 3。

上述计算结果说明,草地的植被覆盖度愈大,植被消耗在蒸腾上的热量愈多,而输送到大气中的感热和流入到土壤中的热量就愈少,因而引起的植被与裸地的热力差异也就愈大,以及行星边界层内的局地环流也就愈强。

四、植被粗糙度的变化

试验地点选在海拉尔附近的巴克西(49°19'N,119°55'E),日期也为 7 月 15 日。并假定天气晴朗,无天气系统扰动和地形的影响。植被取为森林,土壤湿度情况与上节一致。

在 Deardorff^[12]设计的植被层影响的参数化方案中,植被粗糙度 z_0 取为植被平均高度 H 与零平面位移 d 差值的 1/3,而零平面位移取为 $\frac{3}{4}H$ 。因此, $z_0 = \frac{H}{12}$ 。试验区森林平均高度 H 分别取作 3,7 和 15m,因此相应的粗糙度 z_0 分别为 0.25,0.58 和 1.25m。

类似上节的初始条件,以海拉尔探空站的 7 月平均温、湿度廓线作为初值,风廓线的初值规定为 $u(z) = 10^{-3}m/s$ 。

表 1 给出 140m 高度上水平风速和垂直速度对森林粗糙度变化的响应情况。由表看出,尽管粗糙度是在成倍增加的,但是水平风速和垂直速度却变化很小。

表 1 森林粗糙度的改变对 140m 高度上风速的影响(12:00 时)

粗糙度 $z_0(m)$	$u(m/s)$						$w(cm/s)$					
	森林(km)			裸地(km)			森林(km)			裸地(km)		
	-25	-15	-5	5	15	25	-25	-15	-5	5	15	25
0.25	0.65	1.61	2.65	3.41	4.51	4.80	-1.0	-1.3	-2.2	-0.8	-0.3	1.0
0.58	0.70	1.69	2.85	3.45	4.56	4.85	-1.0	-1.3	-2.2	-0.9	-0.2	1.1
1.25	0.80	1.60	3.00	3.55	4.65	4.89	-1.0	-1.0	-1.5	-1.2	0.0	1.2

在离两下垫面交界线东、西各 25km 的地方,垂直速度的廓线随森林粗糙度的变化也很不明显(图略)。

上述结果主要由于模式考虑植被对大气的动力影响不足所致。Vukovich 等^[14]所做的圣路易(St. Louis)市粗糙度的敏感性试验也得出模式对粗糙度变化不敏感的结论。这些都与模式设计的性能有关。

五、背景风场的变化

一般的非均一行星边界层的速度场是由背景风场同局地环流叠加而成的。本节试验中,以改变 2.3km 高度以上的平均风速 \bar{U} 来检验本模式对背景风场的敏感程度。假定在 2.3km 高度以上,初始水平风速 \bar{U} 不随高度变化,在其下风速按对数律随高度增大。试验中 \bar{U} 分别取 12,18,24 和 32m/s 等四种速度,风向均为西风,其它试验条件与第三部分相同。

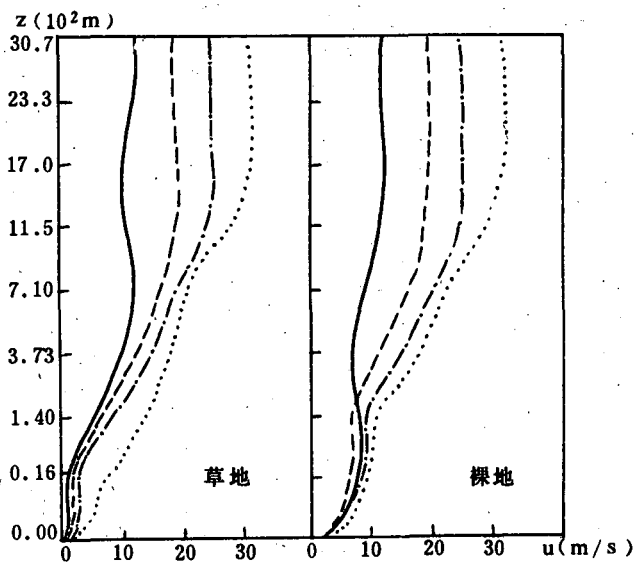


图 4 草地与裸地相邻各 25km 处水平风速(m/s)的垂直分布(12:00(LST))
(实线 $\bar{U}=12\text{m/s}$,虚线 $\bar{U}=18\text{m/s}$,点划线 $\bar{U}=24\text{m/s}$,点线 $\bar{U}=30\text{m/s}$)

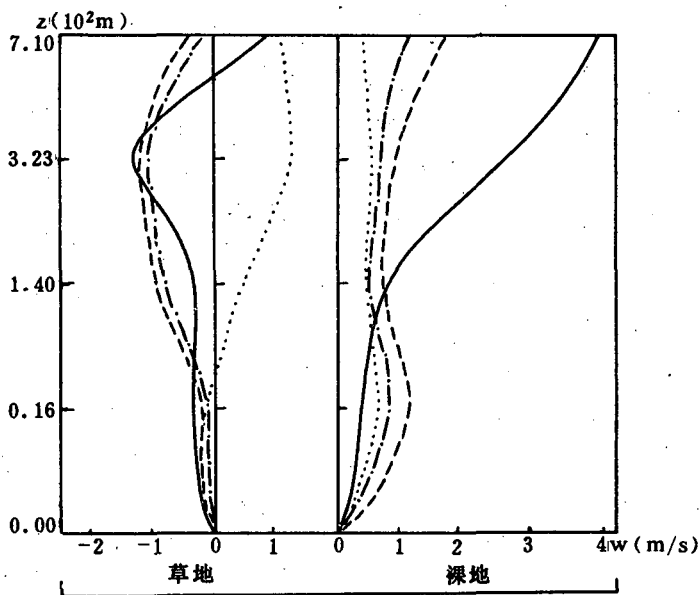


图 5 相邻两下垫面在水平范围各为 25km 内的平均垂直速度(cm/s)廓线
(说明同图 4)

图 4 表示离两下垫面交界处东、西各 25km 处水平风速廓线随背景风速 \bar{U} 的变化。由图看出,由于背景风速较大,整层气流一致吹西风,且一般随背景风速增强而增大。在行星边界层上部,背景风速抵消了局地返回气流(东风),风速随高度的变化比较均匀一致,而在行星边界层下部风廓线则呈现出比较复杂的关系。

在两下垫面附近平均垂直速度分布图上(图 5),草地上方的平均下沉速度一般随背景风速 \bar{U} 的增大而减小,在 \bar{U} 为 30m/s 时,草地上方边界层内的下沉运动几乎全部消失,

并转变为上升运动;在裸地上方,平均上升速度也随着背景风速的增强而减小。

总之,局地对流强度随着大尺度平流的增强而减小。当背景风速足够大时,中尺度局地环流将被大尺度流场所抵消。

六、结 论

本文采取稍作修改的 Nickerson 等二维中 β 尺度静力学模式与 McCumber 等土壤模式相耦合,并引进 Deardorff 的植被层参数化方案,然后以此大气-植被-土壤耦合模式对植被覆盖因子和粗糙度以及背景风速等进行了敏感性试验,初步得到以下几点结论:

1. 模式对植被覆盖因子是很敏感的。非均一行星边界层内的水平风速和对流强度随着植被覆盖因子的增加而明显增强,表明本模式对下垫面非均匀热力强迫作用的响应是灵敏的。

2. 同上述试验形成明显的对照是,模式对植被的粗糙度(或植被平均高度)的响应是很不灵敏的。这与植被参数化所设计的动力性能有关。

3. 背景水平风速的变化对模式输出的结果影响很大。一般情况下,随着背景风速的增大,行星边界层内的水平风速是增大的,而对流强度则是减小的。

参 考 文 献

- [1] Atkinson, B. W. 著,大气中尺度环流,(大气中尺度环流翻译组),气象出版社,124-220,1987年。
- [2] Haugen, D. A. 主编,微气象学,(李兴生等译),科学出版社,267-318,1984年。
- [3] Pielke, R. A. ,中尺度气象模拟,(张杏珍等译),气象出版社,1990年。
- [4] 黄荣辉、严邦良,一个描述河陆风变化的数值模式及其数值试验,大气科学,13,1,11-21,1989。
- [5] 苏从先、胡隐樵,绿洲冷岛的行星边界层结构,气象学报,45,3,322-328,1987。
- [6] 曾旭斌、周明煜、李兴生,斜坡地形下城市热岛和陆风相互作用的三维数值模拟,大气科学,13,3,358-366,1989。
- [7] 金浩、王彦昌,三维海陆风的数值模拟,大气科学,15,5,25-32,1991。
- [8] 马玉堂等,垦荒的若干小气候效应,气象学报,40,3,353-360,1982。
- [9] Mahfouf, J. F. , et al. ,The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations, *J. Clim. and Appl. Meteorol.* , 26, 11, 1483-1495, 1987.
- [10] Nickerson, E. C. , et al. ,The numerical simulation of clouds, rain and airflow over the Vosges and the Black Forest mountains: A meso-beta model with parameterized microphysics, *Mon. Wea. Rev.* , 114, 398-414, 1986.
- [11] McCumber, M. C. and R. A. Pielke, Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model, part I: Soil layer, *J. Geophys. Res.* , 86, 9929-9938, 1981.
- [12] Deardorff, J. W. , Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.* , 83, 1889-1903, 1978.
- [13] Therry, G. , et al. , Improving the eddy kinetic energy model for the planetary boundary layer description, *Boundary Layer Meleo.* , 25, 63-88, 1983.
- [14] Vukovich, F. M. and J. W. Dunn, A theoretical study of the St. Louis heat island; Some parameter variation, *J. Appl. Meteor.* , 17, 1585-1594, 1978.

A NUMERICAL STUDY ON MESOSCALE INHOMOGENEOUS BOUNDARY LAYER CLIMATE: PART (I) SENSITIVITY EXPERIMENT

Chen Jiang Chen Wanlong

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210035)

Chen Yuleng

(Department of Meteorology, University of Hawaii, USA)

Ji Guoliang

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics,

Academia Sinica, Lanzhou, 730000)

Abstract

The paper presents a sensitivity experiment in order to study the influence of the inhomogeneous surface conditions on the PBL climate, using a coupled model with flat terrain and clear sky and calm day in an undisturbed synoptic condition, in which the hydrostatics atmosphere model and the soil model were developed by Nickerson et al. and McCumber et al., respectively. The results show that it is highly sensitive to changes of the vegetative cover and background windspeed, and less to the roughness of the vegetation.