

## 草原垦荒行星边界层的数值研究\*

陈万隆      陈宇能      陈 江

(南京气象学院, 210044) (夏威夷大学气象系) (南京气象学院)

### 提 要

本文主要用修改的 Nickerson 等(1986)提出的中尺度模式,研究了在我国北方(49°19'N, 119°55'E)草原开垦地所形成的行星边界层。其基本结果是:1) 正午开垦地的“热岛”强度达 4—6°C。下垫面的热力扰动可达 700m 高度,而对流扰动可达行星边界层顶,对流速度为 1—2cm·s<sup>-1</sup>; 2) 一旦草原被大范围开垦,其边界层气候就会朝干热方向演变; 3) 灌溉可以减轻开垦地的“热岛”强度和旱情,但不能阻止气候的干热化过程,4) 行星边界层内局地环流的方向在一昼夜内保持不变,即低层 150—200m 高度以下的气流由草原吹向开垦地,风速达 2m·s<sup>-1</sup>左右,上层为返回气流,速度略小于下层。草原上的湿气流在水平方向伸入开垦地可达 30—50km。

### 一、引 言

人类的农业生产活动往往以改变地球表面的方式,有意识或无意识地影响了天气和气候。一些调查研究表明,大范围破坏森林将导致区域性土壤干燥和降水量减少,相反,以森林代替裸地似乎可增加地方降水<sup>[1]</sup>。

近年来在我国东北和西北地区广泛进行的垦荒活动,对小气候已产生了明显的影响。在草原上大面积开垦荒地的结果,由于开垦地与未开垦地的非均一下垫面与大气的相互作用(即陆面物理过程),不但改变了小气候,而且同时改变了中尺度天气和地方气候。马玉堂等对呼伦贝尔草原及其中的开垦地小气候进行了观测和分析<sup>[2]</sup>。本文将用我们修改的 Nickerson 等(1986)提出的  $\beta$  中尺度模式,对我国北方草原垦荒活动所形成的行星边界层(PBL)特征进行数值研究,以期进一步了解垦荒活动对边界层气候究竟会产生何种程度的影响。

### 二、开垦地物理因子的变化

根据文献<sup>[2-4]</sup>等和本文的研究,我们将呼伦贝尔草原垦荒区地面性质的改变所引起的物理因子变化概括成表 1。由表看出,草原开垦后经过一段时间的蒸发,结果使土壤上层湿度降低(但由于土壤透水性能改善,所以下层土壤湿度有所增加),土壤上层变干,空气湿度减小,蒸发减弱。荒地经开垦,增加了地面粗糙度,减小了地面对太阳短波辐射的反射<sup>[5]</sup>,因而增加了地面吸收短波辐射和净辐射,导致流入土中的热通量和输向大气的感热通量增加,使开垦地变成了热岛。而未开垦的草原上获得的太阳辐射能,主要消耗在草

\* 本文于 1990 年 9 月 1 日收到, 1991 年 3 月 25 日收到修改稿。

被的蒸腾和土壤的蒸发上,相对于开垦地,草原为一冷岛。上述下垫面的热力差异,在草原与开垦地交界处附近形成了一种次级环流,即边界层低层气流从草原吹向开垦地(可称为植被风),上层呈返回气流。开垦地与草原的小气候差异,是由于能量和动量在这种非均一下垫面与大气相互作用下重新达到守恒关系的结果。次级环流对两地的小气候差异起到负反馈的作用,即随着太阳辐射的增强,非均一下垫面热力差异增大,次级环流也就增强;增强的次级环流通过平流和局地对流又调剂并减小了两地小气候差异,而两地小气候差异的缩小反过来又削弱了次级环流的强度。开垦荒地所引起的边界层微气象效应,正是在这种地气相互作用过程中形成的。另一方面,由于开垦地变成热岛,白天感热通量增

表 1 呼伦贝尔草原开垦地物理因子的变化

增	加	减 少
近红外长波反射率	迳流量	短波反射率
净短波辐射	渗流量	土壤容重
净辐射	风蚀作用	土壤容积热容量
红外辐射	大气混浊度	表层土壤湿度
地面粗糙度	边界层内平均上升运动	地面蒸发
湍流系数	最高温度	蒸散
湍流强度	平均温度	空气相对湿度
边界层风速		空气比湿
感热		土壤粘性
土壤导温系数		最低温度
土壤热通量		对流层平均上升运动
下层(10cm以下)土壤湿度		局地云量(?)
		降水量(?)

加,近地层大气湍流运动增强,不断把干松地表上细小的尘粒扬起,天长日久,使土壤的粘砂比降低,砂性增加,土质变劣;而在大风日子里,大风吹走了开垦地上的土粒,其中细小的粘粒成为大气尘埃,随风飘走,而颗粒较大的砂粒沉降在下风面不远的草场上并对草场起到危害作用。这就使得开垦地上的土层迅速变薄和沙化,又造成大片草场的退化<sup>[4]</sup>。至于开垦地上局地云量和降水量会不会减少的问题,由于文献[2]观测资料的积累还不够以及所设置的临时考察站相距太近,所以目前尚难断定。

### 三、模式与土壤热状况的数值模拟

#### 1. 模式简介

本研究所用的大气模式是 Nickerson 等(1986)提出的  $\beta$  中尺度模式<sup>[6]</sup>,但对其作了一些修改。Nickerson 等提出的动力学方程组是以  $(x, y, \gamma)$  坐标系表示的。仿照 Mahfouf 等的研究<sup>[7]</sup>,在上述模式中增加了土壤水分模式,相应的地面边界增加了热量平衡和水量平衡方程,并删掉了原微物理过程,大气边界层改用 Therry 等(1983)的参数化方案<sup>[8]</sup>,植被层的影响则用 Deardorff(1978)的参数化方法<sup>[9]</sup>。土壤层模式的闭合求解采用了 McCumber 等(1981)的方案<sup>[10]</sup>。

本文研究二维的问题。模式大气顶取为 100hPa,模式在垂直方向对  $\gamma$  等分 15 层,水

平范围取 260km,水平格距为 10km,时间步长为 10s。土壤层深度取为 1m,对深度作对数变换并等分 13 层。

差分方案:时间差分取中央差分,空间差分用蛙跃格式,垂直湍流扩散项则用 Crank-Nicholson 格式。

初始条件:在初始时刻,假定气象要素的水平分布是均匀的,并以单站温度和比湿的探空资料和静风条件作为初值。

边界条件:上边界温度和比湿均取为常值,垂直速度( $\dot{v}$ )取为零。地面边界有热量平衡方程和晴天水量平衡方程及  $u = \dot{v} = 0$ 。土壤层下边界的土温和湿度势均取为常值。至于侧边界,取的是周期性边界条件<sup>[11]</sup>。

积分从日出前半小时开始,共积分 24 小时。用 5 点平滑公式对时间积分结果进行平滑。

## 2. 土壤热状况的数值模拟

试验地在呼伦贝尔草原的巴克西(49°19'N,119°55'E)。该站地势平坦开阔,处于半干旱草原与半湿润森林草原的过渡地带。假定数值模拟地点的西半部为草原,东半部为开垦地。开垦地上播种了春小麦。计算日期选择在两次冷空气过后的典型晴天,即 1976 年 5 月 29 日和 6 月 24 日。初值分别用这两天前一日的海拉尔探空站的日平均温度和比湿廓线,水平风速取为静风。土壤层模式的初值条件取土温和湿度势的垂直梯度为零。

根据全国土壤分区,呼伦贝尔草原为黑钙土。但是,在巴克西的开垦地上,由于表土长年风蚀,土壤的粘砂比已降低,砂性增加,土壤沙化<sup>[4]</sup>。故在本试验中,将土壤粗略地作为沙土处理,其物理参数取自文献[10]。表 2 给出数值模拟中用到的有关参数值,它们是依据文献[2]估计得到的。表中  $\sigma_v$  代表植被覆盖度,开垦地土壤湿度括号中的 35%系第五节灌溉试验的取值。

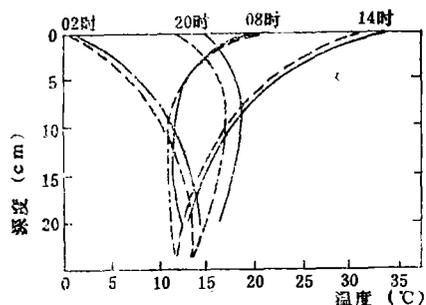


图 1 开垦地土温垂直分布的模拟

(实线:实测值(5, 6月平均); 虚线:计算值(1976, 5, 29))

由开垦地土温垂直分布的数值模拟结果(图 1)看出,除 20 时的土温的计算误差偏大以外,其它时刻的计算值都比较接近实测值(平均偏低 1°C 左右)。土壤热通量的数值模拟结果表明,除下午至上半夜模拟值与用规范法的计算

表 2 试验地区下垫面覆盖状况与上层土壤湿度

日期	草 原			开 垦 地		
	草被高度 (cm)	$\sigma_v$	土壤湿度 (%)	小麦高度 (cm)	$\sigma_v$	土壤湿度 (%)
1976.5.29	9	0.8	22	5	0.4	18
1976.6.24	11	0.9	22	7	0.55	18(35)

值<sup>[2]</sup>具有明显的误差外,其它时刻二者的计算结果是比较接近的,而且日变化的形式也很一致(图略)。

通过以上土壤热状况的数值模拟,验证了本模式的计算结果基本上是合理的,说明它具有比较真实的再现土壤热状况的能力。我们曾用上述不含植被层的数值模式成功地模

拟出二维海陆风环流现象<sup>1)</sup>。这表明上述模式能比较有效地用于热力驱动的次级环流的数值研究。

### 四、未灌溉的非均一下垫面上 PBL 的特征

1976 年 5 月 29 日,开垦地土壤湿度比草原低 4%, 瞬时潜热通量平均比草原减少  $48.4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (平均为后者的 42.9%),但瞬时土壤热通量平均比草原增加  $24.8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 3)。这与文献[2]的计算结果定性上是一致的。

上述非均一下垫面的热力差异必然引起边界层大气运动状态的调整。图 2 表示正午

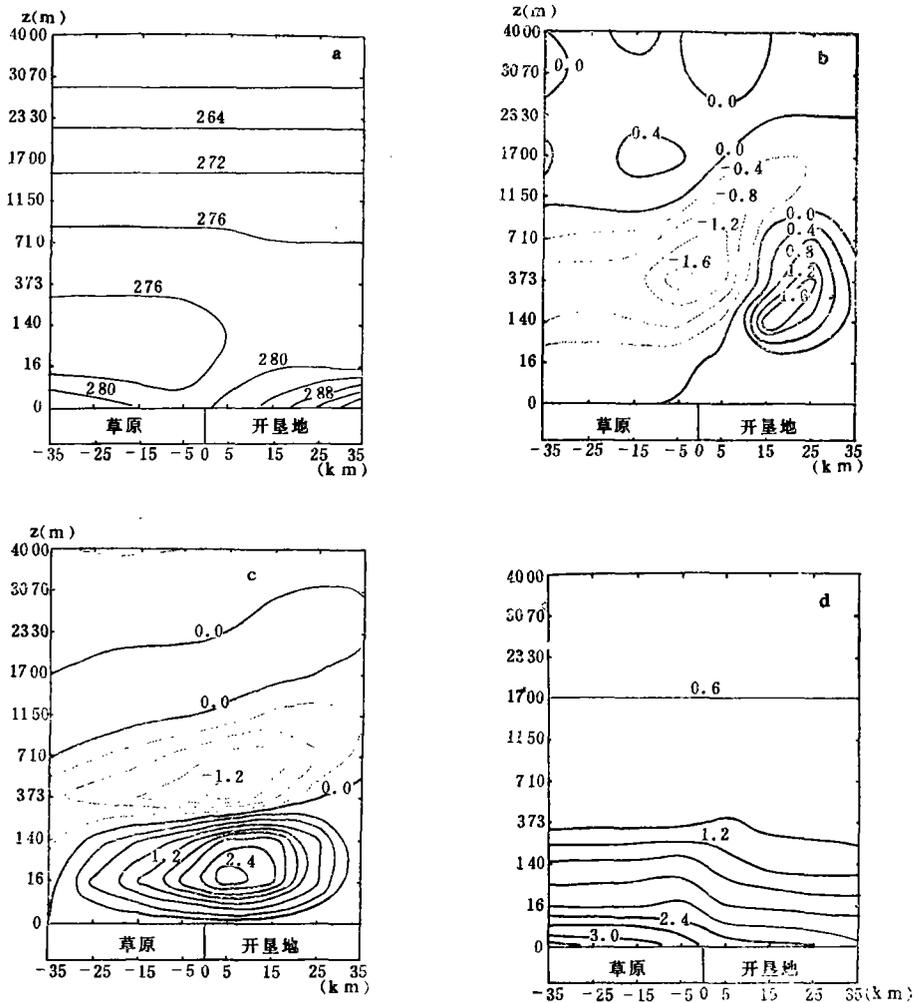


图 2 在未灌溉条件下 12 时(LST)草原与开垦地上气象要素的空间分布(1976,5,29.)

(a) 气温(K), b 垂直速度(cm/s)(上升为正,下沉为负), c 水平风速(m/s)(西风为正,东风为负), d 比湿(g/kg)

1) 陈江等, 二维海陆风环流的数值研究(待发表)。

表 3 非均一下垫面潜热  $LE$  和土壤热通量  $Q(W \cdot m^{-2})$  的日变化(1976.5.29.)

		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4	平均差	百分比 (%)
$LE$	开垦地	40.1	91.4	162.1	183.4	117.6	76.7	63.2	630	20.0	18.2	-8.3	-2.5		
	草原	50.3	184.5	235.6	195.7	161.5	144.9	140.4	117.4	96.7	71.4	-2.6	-10.3		
	差值	-10.2	-93.1	-73.5	-12.3	-43.9	-68.2	-77.2	-74.4	-76.6	-53.2	-5.7	7.8	-48.4	-42.9
$Q$	开垦地	-9.9	94.6	170.4	185.0	45.5	32.3	-93.6	-115.0	-110.8	-101.7	-86.1	-62.6		
	草原	-10.5	-26.6	-8.2	31.6	43.0	11.1	-30.7	-79.9	-39.0	-77.1	-68.0	-62.0		
	差值	0.6	121.2	162.2	153.4	2.5	21.2	-62.9	-35.1	-21.8	-24.6	-18.1	-0.6	24.8	

开垦地与草原在未灌溉条件下 PBL 内气温、垂直速度、水平风速和比湿的空间分布。在气温分布图上,由于白天草原蒸散强,近地层失热多,故在 PBL 低层(10—350m)形成冷区,大气层结趋于稳定,相反,开垦地上获得的太阳辐射能主要用于增热土壤层和近地层大气,结果形成热岛,近地层大气层结不稳定,其气温比草原上平均高  $6^{\circ}C$  左右(图 2a)。在对应的垂直速度分布图上(上升运动为正,下沉运动为负),在 PBL 内开垦地上出现上升运动,草原上为下沉运动,对流中心强度(绝对值)为  $2cm/s$  左右,它的高度约在  $370m$ ;在 PBL 高度(约  $1.1km$ )以上出现了相反的对流形势(图 2b)。白天,这种由下垫面热力强迫作用引起的局地对流扰动可以达到 PBL 的顶部。

正午水平风速的分布特征是,在草原和开垦地 PBL 的低层盛行植被风,即气流由草原吹向开垦地,厚度约为  $150—200m$ ,最大风速中心位于开垦地一边,中心风力达  $2.7m/s$ 。植被风以上至 PBL 顶部出现返回气流,中心最大风速为  $1.2—1.6m/s$ (图 2c)。

在空气比湿空间分布图上,草原近地层为高湿区(绿洲湿岛),垦荒地上为低湿区,草原湿平流可影响开垦地远达  $30—50km$ (图 2d)。

日落以后二地热力差异逐渐缩小,对流活动随之减弱。由于开垦地土壤层在白天积累的热量较多,夜间由土壤下层向表层释放的热量也比草原多(表 3),所以夜间开垦地地面温度仍比草原高,例如 24 时平均高  $0.43^{\circ}C$ 。夜间这种非均匀加热作用,仍能维持类似于白天的局地环流;不过夜间开垦地 PBL 内的上升速度比白天小得多,其厚度仅局限在近地层内,而且 PBL 内大部分区域为下沉运动;水平风速也比白天小;但空气比湿比白天高,分布形势与白天相似(图略)。这是因为夜间整个 PBL 大气层结比较稳定,湍流运动受到抑制,水汽不易扩散。

### 五、灌溉的非均一下垫面上 PBL 的特征

垦荒的主要小气候效应是土壤上层变干燥,边界层风速和湍流增强,易使局地气候干热化<sup>[2,3]</sup>。灌溉除了向作物提供必要的水分外,还能起到减轻干旱和调节气候的作用。假定在 1976 年 6 月 24 日之前进行了一次灌溉,使巴克西垦荒地的土壤湿度达到 35%。下面让我们讨论,在对开垦地进行灌溉后,非均一下垫面对 PBL 的影响。

比较表 4 与表 3 看出,开垦地经灌溉后潜热通量虽略有增加,但它仍旧低于草原上的潜热;土壤热通量比灌溉前增加的幅度更加明显。这就决定了灌溉的开垦地仍具有热岛的特性。图 3 清楚地说明了这一点:正午开垦地近地层气温平均比草原高  $4^{\circ}C$  左右,子夜

表 4 草原与灌溉开垦地潜热 $LE$ 和土壤热通量 $Q(W \cdot m^{-2})$ 的日变化(1976.6.24.)

地方时		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4	平均差	百分比 (%)
$LE$	开垦地	50.2	95.4	168.4	182.4	118.2	79.3	63.4	57.5	34.4	1.5	-0.6	-2.4		
	草原	49.4	179.5	240.9	196.2	173.2	125.5	106.1	80.2	100.1	80.5	-1.0	18.2		
	差值	0.8	-84.1	-72.5	-13.8	-55.0	-46.2	-42.7	-22.7	-63.7	-79.0	0.4	15.8	-38.6	-35.3
$Q$	开垦地	-20.9	94.8	167.2	180.2	87.9	69.1	-27.5	-36.8	-49.7	-57.6	-87.4	-74.4		
	草原	-4.1	-18.7	-24.5	2.6	23.8	8.7	-28.8	-45.1	-71.1	-84.2	-72.7	-63.1		
	差值	-16.8	103.5	191.7	177.6	64.1	60.4	1.3	8.3	21.4	26.6	-14.7	-11.3	51.8	

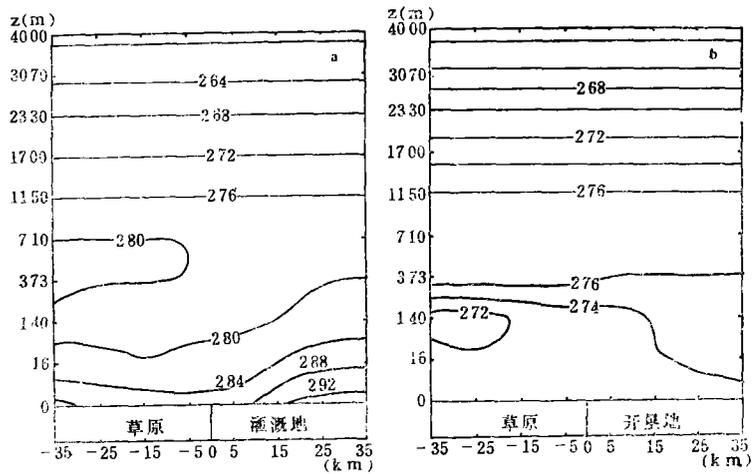


图 3 草原与灌溉地的气温(K)空间分布(1976,6,24)  
(a 12时, b 24时)

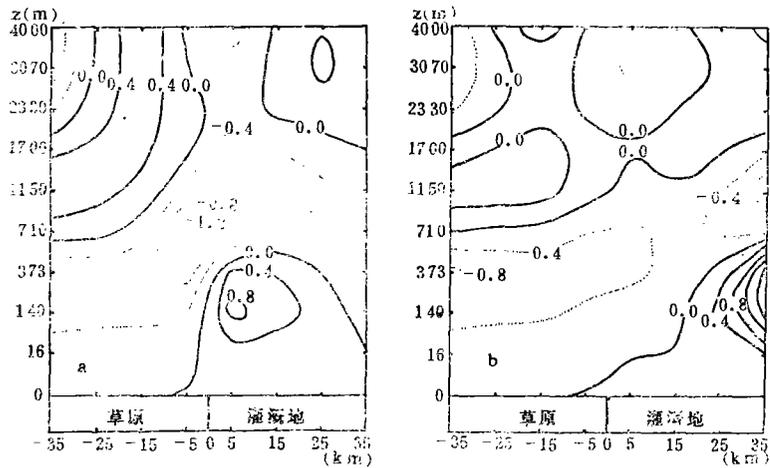


图 4 草原与灌溉地的垂直速度(cm/s)空间分布(1976,6,24)  
(上升运动为正, 下沉运动为负; a 12时, b 24时)

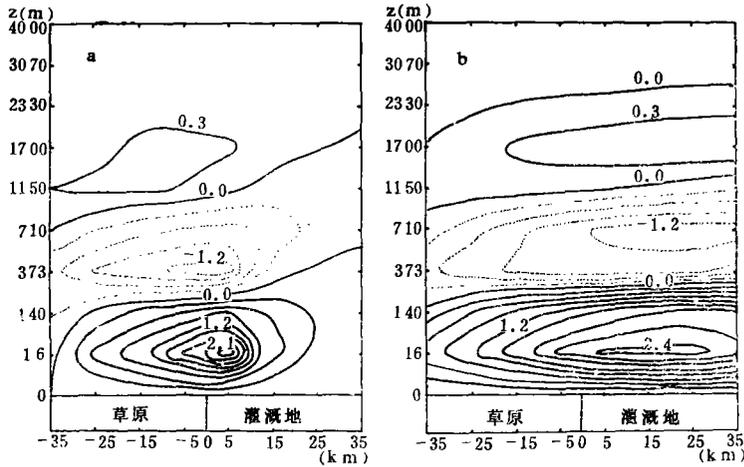


图 5 草原与灌溉地的水平风速  $u$ (m/s)空间分布 (1976,6,24)  
(西风为正, 东风为负; a 12 时, b 24 时)

高  $1^{\circ}\text{C}$  左右。下垫面热力扰动的高度从白天 700m 降到夜间 370m 左右。可见灌溉的确实能减弱热岛的强度。

由图 4a 和图 2b 看出,灌溉后的非均一下垫面上 PBL 内对流运动分布形势仍与灌溉前相似,但对流强度已经削弱。这是由于灌溉后开垦地上热岛强度减弱所引起的。夜间,尽管灌溉地的热岛强度已大大减弱,但这种热力强迫作用仍可引起 PBL 内的垂直运动(图 4b)。

同样,灌溉作用不能改变 PBL 内水平风速的分布形势,唯速度有所减小。图 5 清楚说明,灌溉后在整个昼夜中,PBL 低层吹植被风(西风),上层均出现东风。

旱地灌溉后,无疑能使土壤湿度和 PBL 内空气比湿增大并能减轻旱情。数值计算结果表明,正午和子夜灌溉地近地层空气比湿比未灌溉时分别增加 1.2 和 0.6g/kg,而且草原湿岛特征已不明显,比湿水平梯度大大减小(图略)。

最后顺便指出,无论是白天还是夜间,也无论是灌溉还是非灌溉,在非均一下垫面上 PBL 内,水平风速的垂直分布存在两个极大值,而且低层极大值大于上层的。它类似于海陆风数值模拟的结果<sup>1)</sup>。这种现象的形成,可能是水平动量输送的动力作用(尤其在白天)与垂直方向热力层结作用所引起的动量垂直输送的综合结果<sup>[12]</sup>。

## 六、讨论与小结

修改后的 Nickerson 模式对植被覆盖度表现敏感<sup>2)</sup>。由于植被覆盖阻止短波辐射到达地面,因此,在土壤热状况的数值模拟中,恰当地选择植被覆盖度的数值是很重要的。然而在对实际问题的数值模拟中,植被覆盖度是难以准确选定的。第三节土壤温度模拟的误差,很大程度上与植被覆盖度有关。一般来说,本研究采用周期性侧边界条件是不太

2) 陈江等,中尺度非均一边界层气候数值研究, I. 敏感性试验(待发表)。

合适的。理由是很明显的。但是,在本研究中所取的水平范围为关心的范围两倍以上。换句话说,侧边界基本上是远离关心的区域的,因而对关心区域的影响就比较小了<sup>[11]</sup>。数值积分 24 小时的结果会受到初始条件的一定影响。以上这些问题和不足之处,有待进一步研究改进。

总的说来,修改后的 Nickerson 模式适合于研究非均一陆面物理过程及其引起的 PBL 的气候变化。本研究表明,我国北方草原一旦被大范围开垦,它们的气候就会朝干热方向转变。这与观测事实<sup>[2,3]</sup>是一致的。具体结论如提要中所述。因此,我们应当认真对待草原开垦对生态环境造成的不良后果并进一步加强综合研究和采取治理措施。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Anthes, R. A., Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semi-arid regions, *J. Clima. Appl. Meteor.*, **23**, 4, 541—551, 1984.
- [ 2 ] 马玉堂等, 垦荒的若干小气候效应, *气象学报*, **40**, 3, 353—360, 1982.
- [ 3 ] 谢贤群等, 海拉尔东部开垦地与草场地表热量平衡及其对尘埃输送的影响, *地理学报*, **33**, 2, 156—162, 1978.
- [ 4 ] 周允华等, 干旱草原对土壤粘粒的风蚀作用, “农业生态环境研究”, 438—445, 气象出版社, 1989.
- [ 5 ] 翁笃鸣等, 小气候与农田小气候, 16, 农业出版社, 1981.
- [ 6 ] Nickerson, E. C., et al., The numerical simulation of clouds, rain and airflow over the Vosges and the Black Forest mountains: A mesomodel with parameterized microphysics, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 2, 398—414, 1986.
- [ 7 ] Mahfouf, J. F., et al., The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations, *J. Clima. Appl. Meteor.*, **26**, 11, 1483—1495, 1987.
- [ 8 ] Therry, G., et al., Improving the eddy kinetic energy model for the planetary boundary layer description, *Bound.-Lay. Meteor.*, **25**, 1, 63—88, 1983.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] McCumber, M. C., et al., 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.
- [ 11 ] Pielke, R. A., Mesoscale Meteorological Modeling, 333—334, 509—511, Academic Press, 1984.
- [ 12 ] 何建中等, 边界层低空急流的数值研究, *气象学报*, **47**, 4, 443—449, 1989.

## A NUMERICAL STUDY OF THE PBL CONDITIONS OVER RECLAIMED GRASSLAND

Chen Wanlong

*(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)*

Chen Yi-Leng

*(Department of Meteorology, University of Hawaii)*

Chen Jiang

*(Nanjing Institute of Meteorology)*

### Abstract

PBL conditions over reclaimed grassland in northern China ( $49^{\circ}19'N$ ,  $119^{\circ}55'E$ ) are examined using the improved mesoscale model originally proposed by Nickerson et al. (1986). Basic results are presented as follows: i) the reclaimed section or the "heat island" has noon intensity of  $4-6^{\circ}C$ , the surface disturbance can be felt at 700 m AGL and convective perturbation at the PBL top, with the convective speed of  $1-2$  cm/s; ii) once grassland is reclaimed on a large scale, the PBL climate will develop into further aridity; iii) irrigation can alleviate the intensity and dryness of the "island" but fails to prevent the climate from aridization; iv) the local circulation in the PBL keeps its direction unchanged in 24 hrs, i.e., wind blows toward the "island" at the height below 150—200 m at roughly of 2 m/s and returns at higher levels with a slightly smaller speed. Further, moist flow can extend 30—50 km horizontally inside the reclamation.