

绿洲效应的模拟及内外因子的敏感性实验

刘树华^{1, 2} 胡予¹ 胡非² 梁福明¹ 王建华¹ 刘和平¹

1 北京大学物理学院大气科学系暴雨和旱涝灾害教育部重点实验室大气边界层和湍流研究组, 北京 100871

2 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 利用一个已发展的陆面物理过程参数化方案与大气边界层数值模式耦合, 模拟了半干旱区绿洲戈壁非均匀下垫面的陆面物理过程及其与大气边界层的相互作用, 成功地描绘了绿洲戈壁局地气候效应, 并进行了绿洲戈壁局地气候效应对于降水、绿洲水平尺度和植被结构等若干内外因子的敏感性实验。结果表明: 绿洲的最小临界尺度为 5~10 km 之间, 最大临界尺度为 55~65 km 之间, 而最利于绿洲维持的尺度范围为 20 km 左右, 这一结论与我国西部地区现存的绿洲尺度统计结果十分一致; 绿洲植被覆盖率为 0.6 左右时, 最利于绿洲发展。另外对植被空间分布方式和绿洲植被组成比例上也进行了数值实验, 并对影响绿洲生存和持续发展的内、外因子气候效应的影响力量级进行了分级。这些结果对于深入了解绿洲气候的形成和维持机理具有重要的意义。

关键词 陆面物理过程参数化方案 绿洲效应 内外因子 敏感性实验

文章编号 1006-9895(2005)06-0997-13

中图分类号 P463

文献标识码 A

Numerical Simulation of Oasis Effect and Its Sensitivity Test of Inside and Outside Factors

LIU Shu-Hua^{1, 2}, HU Yu¹, HU Fei², LIANG Fu-Ming¹,
WANG Jian-Hua¹, and LIU He-Ping¹

1 Group of Atmosphere Boundary Layer and Turbulence, Ministry Key Laboratory of Storm and Drought/Flood Damages, Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A developed parameterized scheme of land surface physical process and transfer models are used for simulating the oasis-gobi interaction process and the oasis-gobi regional climate effect in the semi-arid region. The scheme is composed of two main parts: land surface processes and boundary layer processes, and the corresponding models include two versions: two-dimensional and three-dimensional. The sensitivities of the oasis-gobi regional climate effect to inside and outside factors such as precipitation, oasis horizontal spatial scale, vegetation structure etc. are studied. After these studies, many significant results are obtained. Result shows that large-scale wind speed of the background field is an important factor to affect mesoscale atmospheric circulation motion of the oasis-gobi region. Precipitation and irrigation play important roles in maintaining evolution of oasis, and precipitation has much greater influence on the oasis-gobi regional climate effect in the semi-arid region than irrigation. Horizontal spatial scale of oasis is a very important inside factor to influence oasis effect, and the smallest critical scale range of oasis is 5 - 10 km, the largest critical scale range of oasis is 55 - 65 km. Oasis will evolve very well when the horizontal spa-

收稿日期 2004-06-21, 2004-11-22 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40275004、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和北京大学物理学院大气科学系暴雨和旱涝灾害教育部重点实验室共同资助

作者简介 刘树华, 男, 1952 年出生, 教授, 博士生导师, 从事大气边界层物理和大气湍流研究。E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

tial scale is about 20 km. These results reach unanimity with horizontal scales of oasis in the northwest region of China now. Moisture of soil also has some influence on oasis effect, especially on “cold island effect”, and perhaps every oasis also has the critical moisture content of soil to affect the existent stability for itself. It has been proved that roughness length of land surface is a minor factor to the oasis-gobi regional climate effect in the semi-arid region through the special numerical simulation tests. At last, a series of numerical simulation experiments are carried out to research the functions of vegetation structure to the oasis-gobi regional climate effect in the semi-arid region. In this paper, vegetation structure is compartmentalized into three aspects: vegetation cover factor, composing proportion of vegetation and spatial distribution of vegetation. Through the numerical simulation tests of vegetation cover fraction, it is found that when the vegetation cover fraction of oasis is about 0.6, oasis will evolve much better. And the corresponding numerical simulation experiments are carried out with the spatial distribution scheme of vegetation and proportion scheme of vegetation composing, and then the much better spatial distribution mode and composing proportion of vegetation in oasis are found. These results are in agreement with the truth and experience in the semi-arid region of Northwest China, and are also very helpful to the development and evolvement of oasis by manpower in these areas. In addition, inside and outside factors have been graded according to influence levels for climate effect to oasis development and evolvement. These results have important significance for understanding deep the form and maintaining mechanism of oasis climate.

Key words parameterized scheme of land surface physical process, oasis effect, inside and outside factors, test of sensitivity

1 引言

在干旱半干旱地区,绿洲生态系统在对抗干旱气候环境强迫的过程中表现出一系列独特的区域气候特征,这些区域气候特征在绿洲系统自我维持过程中扮演比较重要的角色(称之为“绿洲效应”^[1])。分析认识绿洲区域气候效应的规律,对当代绿洲的开发、利用和保护,对控制与改善生存环境具有重要而深远的意义。

实际上,许多现存的部分绿洲能够稳定存活甚至有所发展,而另一部分绿洲却正在退化消亡。从本质上讲,这取决于绿洲存在、维持和发展的外因和内因:外因包括水文因素、气候因素(降水和尺度背景场);而内因较为复杂,包括绿洲的水平空间尺度、土壤特点、植被结构和粗糙度等。当然,水文因素是前提,没有必要的水文条件绿洲是肯定不会存在的,更谈不上维持和发展。此外,由于绿洲存在于干旱背景上,天然降水是极少的(年降水 200 mm 以下),以致于远不能维持地表植被生存。因此,绿洲存在的基本条件是干旱气候和较充分的地表径流或者人为地下水灌溉相结合,这可以说是绿洲形成和维持的基本条件,而大气背景场,降水和绿洲的空间水平尺度、粗糙度、植被结构等特征因子则在绿洲形成后的演变(维持和发展)过程中起着很重要的作用。

事实上,虽然近来已经有不少研究^[2~4]分别从能量平衡和大气动力学角度分析了绿洲尺度、大尺度大气场等影响因子,但至今的认识并不太清楚在绿洲演变过程中,这些特征因子是怎样起作用的,以及在演变过程中所占的地位。这主要是因为研究这个问题缺乏实际资料,并在实际观测中存在技术上的难度(例如,观测资料的空间和时间尺度问题等很难达到要求)。在本文中,利用一个在研究 SiB (Simple Biosphere Model)^[5,6]、SiB2^[7] 和 SSiB (Surface Simple Biosphere Model)^[8]基础上通过适当的简化和发展而建立的适合研究干旱半干旱地区的陆面过程模式^[9~11],与大气边界层模式相耦合,模拟了绿洲戈壁地区气候效应,并对各个内外因子都作了相应的敏感性实验,进而更为全面准确地分析内外因子对于绿洲戈壁地区气候效应的影响。其中在研究大部分特征因子时,为了简化运算,提高效率 and 速度,在不影响准确度的前提下以及满足敏感性实验需要众多个例的要求下,采用了该模式的二维版本,而对于植被结构等涉及三维分布的因子将采用一个较为简单的三维版本。通过敏感性模拟实验来研究该问题,可以在一定程度上克服缺乏资料的困难。当然,对这种敏感性模拟结果的验证也是一个很大的难题,我们只能根据一些观测资料和现实的统计规律以及实践中人们开发建设绿洲的部

分经验来间接证明部分模拟结果的合理性。当然, 许多模拟结果对于现实开发建设好绿洲也有很好的指导意义。

2 模式

2.1 大气系统基本方程组

大气子系统中的大气边界层二维数值模式方程组有

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + F_u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + F_\theta, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\frac{g}{\theta}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -u \frac{\partial R}{\partial x} - w \frac{\partial R}{\partial z} + F_R. \quad (5)$$

大气边界层采用地形追随坐标 $\bar{z} = H \frac{z - z_g}{H - z_g}$ 的三维数值模式方程组^[12]:

$$\frac{du}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{\bar{z} - H}{h} \frac{\partial z_g}{\partial x} + F_u, \quad (6)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{\bar{z} - H}{h} \frac{\partial z_g}{\partial y} + F_v, \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = F_\theta, \quad (8)$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{d\bar{w}}{d\bar{z}} - \frac{u}{H - z_g} \frac{\partial z_g}{\partial x} - \frac{v}{H - z_g} \frac{\partial z_g}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\bar{w} = w \frac{H}{H - z_g} + \frac{\bar{z} - H}{H - z_g} u \frac{\partial z_g}{\partial x} + \frac{\bar{z} - H}{H - z_g} v \frac{\partial z_g}{\partial y}, \quad (10)$$

$$\frac{d\pi}{dz} = -\frac{H - z_g}{H} \frac{g}{\theta}, \quad (11)$$

$$\frac{dR}{dt} = F_R, \quad (12)$$

式中, θ 为位温 (K), R 为比湿 (kg/kg), π 为 Exner 函数, 且有

$$\pi = c_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.286},$$

p_0 一般取 1000 hPa, c_p 为定压比热, 取 $1005 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, F_u 、 F_v 、 F_R 、 F_θ 为湍流项, 用 φ 分别代替 u 、 v 、 R 、 θ , 则二维和三维数值模式方程组分别有

$$F_\varphi = K_H \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{H}{H - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(K_z \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{z}} \right), \quad (13)$$

$$F_\varphi = K_H \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{H}{H - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(K_z \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{z}} \right), \quad (14)$$

其中, K_H 和 K_z 分别为水平和垂直湍流交换系数。这些湍流交换系数的设定分别参见文献[13]中 Yamada 提出的经验公式和文献[10]中的应用参数化方法。

2.2 陆面物理过程参数化方案

2.2.1 地表能量平衡参数化

以植被冠层上方空气作为参考层, 则能量平衡方程为

$$S_h^\downarrow + R_{Lh}^\downarrow - S_h^\uparrow - R_{Lh}^\uparrow - (S_g^\downarrow + R_{Lg}^\downarrow - S_g^\uparrow - R_{Lg}^\uparrow) = H_{sh} - H_{sg} + L_v(E_h - E_g), \quad (15)$$

式中, S 、 R_L 分别表示相应的短波和长波辐射通量; H 表示感热通量; L_v 为汽化热, E 为水汽蒸发通量; 下标 h 和 g 分别表示植被顶面和地面。上式中热量收支各项的计算式为

短波辐射通量的计算式:

$$S_h^\downarrow = (1 - 0.8\sigma_c)(1 - \alpha)S_0 \sinh, \quad (16a)$$

$$S_h^\uparrow = (1 - \sigma_f)\alpha_g S_h^\downarrow + \sigma_f \alpha_f S_h^\downarrow, \quad (16b)$$

$$S_g^\downarrow = (1 - \sigma_f)S_h^\downarrow, \quad (16c)$$

$$S_g^\uparrow = \alpha_g(1 - \sigma_f)S_h^\downarrow, \quad (16d)$$

长波辐射通量的计算式:

$$R_{Lh}^\downarrow = [\sigma_c + (1 - \sigma_c)0.67(1670q_a)^{0.08}]\sigma T_a^4, \quad (17a)$$

$$R_{Lh}^\uparrow = (1 - \sigma_f)[\epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g)R_{Lh}^\uparrow] + \sigma_f[\epsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \epsilon_f)R_{Lh}^\downarrow], \quad (17b)$$

$$R_{Lg}^\downarrow = (1 - \sigma_f)R_{Lh}^\downarrow + \sigma_f[\epsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \epsilon_f)\epsilon_g \sigma T_g^4]/(\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g), \quad (17c)$$

$$R_{Lg}^\uparrow = (1 - \sigma_f)[\epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g)R_{Lh}^\downarrow] + \sigma_f[\epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g)\epsilon_f \sigma T_f^4]/(\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g), \quad (17d)$$

式中, S_0 为太阳常数, α 表征大气对太阳光谱的吸收, $\sinh$ 为太阳方位角。 σ_c 为总云量, $0 \leq \sigma_c \leq 1$ 。 σ_f 为植被覆盖率, ϵ_g 、 ϵ_f 分别为地面和植被的比辐射率, α_g 、 α_f 分别为地面和植被的反照率。

定义 $H_{sf} = H_{sh} - H_{sg}$, $E_f = E_h - E_g$, 则根据 (16)、(17) 式, 方程 (15) 可变为

$$\sigma_f[(1 - \alpha_f)S_h^\downarrow + \epsilon_f R_{Lh}^\downarrow] + \frac{\epsilon_f \epsilon_g}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g} \sigma T_g^4 - \frac{(\epsilon_f + 2\epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g)}{(\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \epsilon_g)} \epsilon_f \sigma T_f^4 = H_{sf} + L_v E_f. \quad (18)$$

利用 Newton-Raphsen 方法, 通过方程(18)即可求得植被层温度 T_f 。

土壤热通量 G :

$$-G = H_{sg} + L_v E_g - (1 - \alpha_g) S_g^\downarrow + R_{Lg}^\uparrow - R_{Lg}^\downarrow. \quad (19)$$

为了求得 G 和 T_f , 需要求得 H 和 E 。

热量收支中感热和潜热通量项的计算式^[10]为

$$H_{sf} = 1.1 I_{LA} \rho_a c_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}), \quad (20)$$

$$E_f = I_{LA} E_{leaf} = I_{LA} \rho_a C_f u_{af} [q_{sat}(T_f) - q_{af}] r'' = r''(E_f)_{pot}, \quad (21)$$

$$H_{sg} = \rho_a c_p C_{Hg} u_{af} (q_f - q_{af}), \quad (22)$$

$$E_g = \rho_a C_{Hg} u_{af} (q_g - q_{af}). \quad (23)$$

则根据 $H_{sh} = H_{sf} + H_{sg}$, $E_h = E_f + E_g$, 有

$$H_{sh} = 1.1 I_{LA} \rho_a c_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) + \rho_a c_p C_{Hg} u_{af} (q_f - q_{af}), \quad (24)$$

$$E_h = I_{LA} \rho_a C_f u_{af} [q_{sat}(T_f) - q_{af}] r'' + \rho_a C_{Hg} u_{af} (q_g - q_{af}), \quad (25)$$

其中,

$$T_{af} = (1 - \sigma_f) T_a + \sigma_f (0.3 T_a + 0.6 T_f + 0.1 T_g), \quad (26)$$

$$q_{af} = (1 - \sigma_f) q_a + \sigma_f (0.3 q_a + 0.6 q_f + 0.1 q_g), \quad (27)$$

式中, ρ_a 是干空气密度; c_p 是大气定压比热; C_{Hg} 是土壤无量纲热量和水汽输送系数; I_{LA} 是植被叶面积指数; C_f 是植被内无量纲热量和水汽输送系数, $C_f = 0.01(1 + 0.3/|u_{af}|)$; r'' 是植被叶面潜在蒸发率, 其具体参数化将在下文中列出; u_{af} 是在植被冠层中的平均风速, 计算式为 $u_{af}(z) = u(h) \exp[\alpha_1 \cdot (z/h) - 1]$ ($0.1h \leq z \leq h$)^[14], $u(h)$ 是植被顶处的平均风速, h 为植被的平均高度; α_1 为衰减系数, 随植被类型而不同。到此为止, 方程(15)中的所有辐射和热通量的参数化都已实现。

2.2.2 地表水分过程参数化

地表温度参数化方程为

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{c_1 G}{\rho_s C_s d_1} - \frac{c_2 (T_g - T_2)}{\tau}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{G}{\rho_s C_s d_2}, \quad (29)$$

式中, G 为土壤热通量, 由(19)式可得; $c_1 = 2\pi^{1/2}$, $c_2 = 2\pi$; $\rho_s C_s$ 为土壤性质参数, 其参数化参见文献[10]; $d_1 = (k_s \tau)^{1/2}$, $d_2 = (365 k_s \tau)^{1/2}$, 而 $k_s =$

$[0.001 + 0.004(\omega_g)^{1/3}]/(\rho_s C_s)$; τ 为气温变化的周期, 取为 86400 s。

地表水分参数化方程为

$$\frac{\partial \omega_g}{\partial t} = \frac{C_{1sat}}{\rho_w d_1} (M_g - E_g) - \frac{C_{2ref}}{\tau} (\omega_g - \omega_{geq}), \quad 0 \leq \omega_g \leq \omega_{sat}, \quad (30)$$

$$\frac{\partial \omega_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (M_g - E_g - E_{tr}), \quad 0 \leq \omega_2 \leq \omega_{sat}, \quad (31)$$

$$\frac{\partial \omega_{dew}}{\partial t} = \sigma_f M - (E_f - E_{tr}) - R_r, \quad 0 \leq \omega_{dew} \leq \omega_{dmax}, \quad (32)$$

$$\omega_{geq} = \omega_2 - a \left(\frac{\omega_2}{\omega_{sat}} \right)^s \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_{sat}} \right)^{8s} \omega_{sat}, \quad (33)$$

式中, ρ_w 为液态水密度; M 为降水量; C_{1sat} 和 C_{2sat} 为土壤类型参数; M_g 为到达土壤表面的液态水通量; E_g 为土壤蒸发通量; ω_{geq} 为当重力与毛细管张力平衡时, 土壤表面体含水量, 其中 ω_{sat} 为土壤饱和体含水量; R_r 为截留降水径流量; ω_{dmax} 为叶面截留降水量的最大值; E_f 为植被生理蒸腾与叶面蒸发总通量; E_{tr} 为植被叶面生理蒸腾通量。a 和 s 为公式系数, 绿洲上 a 取 0.135, s 取 6, 而戈壁上 a 取 0.387, s 取 4。水分过程详细参数化方案参见文献[10, 11]。

2.3 模式初始条件及数据处理方法

2.3.1 模式初始条件

本模式二维版本模拟的是一个水平尺度 100 km、高度为 4 km 的空间区域, 时间区间为 06:00 至 21:00 (北京时间, 下同)。计算范围在水平方向上分为 100 个格点 (绿洲尺度敏感性实验中, 由于绿洲格点范围变动较大, 整体格点范围相应扩大为 200 个), 格距 1 km, 编号 $I = 31 \sim 70$ 格点范围表示绿洲, $1 \sim 30$ 、 $71 \sim 100$ 表示戈壁, 也就是说尺度 40 km 的绿洲位于中央, 戈壁在两边对称分布。敏感性实验中, 在尺度敏感性实验时, 绿洲、戈壁所占格点都是变动的, 而其他因子敏感性实验时, 绿洲尺度为 30 km ($I = 36 \sim 65$ 格点范围表示绿洲, $1 \sim 35$ 、 $66 \sim 100$ 表示戈壁)。垂直方向 z 上, 取法均一致, 分别取 0, 10, 20, 50, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000 (单位: m)。模式顶高 4000 m。三维版本除假设水平空间尺度是 100 km $\times$ 100 km 的地区外, 其他设定与二维版本敏感性实验相同。下文中数组标号 I 代表水平方向格点, K 代表垂直方向格点。

表 1 土壤特性参数^[18~20]
Table 1 Characteristic parameters of soil^[18~20]

下垫面类型 Land surface	$w_g/\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	$w_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	$C_{1\text{sat}}$	$C_{2\text{ref}}$	α	s
绿洲 Oasis	0.30	0.44	0.213	0.8	0.135	6
戈壁 Gobi	0.08	0.20	0.082	3.9	0.387	4

表 2 下垫面分类及夏季地表植被参数^[20, 21]
Table 2 Land surface classifications and summer parameters of surface vegetation^[20, 21]

下垫面类型 Land surface	I_{LA}	植被覆盖率 Vegetation fraction	粗糙度 Roughness length / m	反照率 Albedo	比辐射率 Emissivity
农田 Farmland	3.0	0.7	0.4	0.14	0.92
树林 Woodland	4.0	0.6	0.5	0.15	0.93
戈壁 Gobi	0.0	0.0	0.03	0.25	0.70

为了更好地反映绿洲区域气候效应中的绿洲戈壁热力环流，除了作大背景场风速敏感性实验外，其余所有敏感性实验中背景场风都定义为 0，即大尺度背景场所有高度风速均为 0。

绿洲、戈壁初始风速、位温和比湿廓线是根据 1991 年 8 月夏季黑河地区 IOP-2 观测中小屯(绿洲)、化音(戈壁)的月平均资料作近似拟合而确定的，基本与实际观测资料规律相吻合，并参考文献[15~17]进行了修正，以符合典型绿洲戈壁地区的区域气候特征。

2.3.2 数据处理方法

(1) 模拟域

二维版本：水平网格(单位：m)取法如下： $X(1)=0$ ； $X(I)=X(I-1)+1000$ ($2\leq I\leq 100$)。考虑到近地面物理量变化剧烈，网格高度(0~4 km)采用上疏下密的方法，划分 17 个点(单位：m)：0, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000。

三维简略版本：水平方向上，100×100 格点，格距 1000 m。垂直方向上虽然模式采用地形追随坐标，但本文并不考虑地形因素，垂直方向分层与二维版本一致。2 个版本模拟区域随下垫面不同，其物理参数也不同(表 1、2)。

(2) 差分格式

时间上采用向前差，空间上除平流项采用 3 阶中央差外，其他均采用 2 阶中央差。

(3) 时间步长

为了保持差分格式的稳定性，本模式的积分时间步长为 $\Delta t=10$ s，在计算时间内结果是稳定的。

(4) 数据稳定性

由于初始湍流动能式为经验假设，在积分过程中，能量会逐渐与风、温场匹配，因此在积分初始阶段的 1 h 内，积分结果是不完全可靠的。另外，由于边界效应，在边界格点上的数据也不可靠。其他时间和格点上的计算结果是稳定的，因而在后面的模拟实验结果讨论中将只取可靠时间和格点上的数据结果。

3 结果与讨论

以下将分别进行内外因子对于绿洲戈壁区域气候效应影响的敏感性实验。选取最大水平风速 u ，最大垂直上升速度 w ，绿洲近地面层(0~200 m)白天(07:00~19:00)平均湿度 R 、平均气温 T (空间、时间上均取平均)，区域白天(07:00~19:00)平均湍流动能 Q (空间、时间上均取平均)等 5 个特征量进行敏感性实验，它们能综合反映绿洲戈壁区域气候效应(因篇幅限制，部分实验结果图略)。此外，在不改变整个区域太阳辐射强度(区域地理纬度)、戈壁下垫面特征参数(例如，降水对戈壁土壤参数有很大影响)的情况下，根据文献[16]的研究结果，以及由于戈壁地区近地面层平均气温和湿度随其他因子变化极不敏感，因而绿洲近地面层白天平均气温和白天平均湿度还能近似反映绿洲“冷岛效应”和“湿岛效应”的相对强弱。

3.1 外部因子：背景场风速

图 1 是背景场风速敏感性实验结果，即大尺度水平风速(高度 $z=30$ m)从 0 m/s 增加到 5 m/s，相应最大水平风速和最大垂直上升速度随背景场风

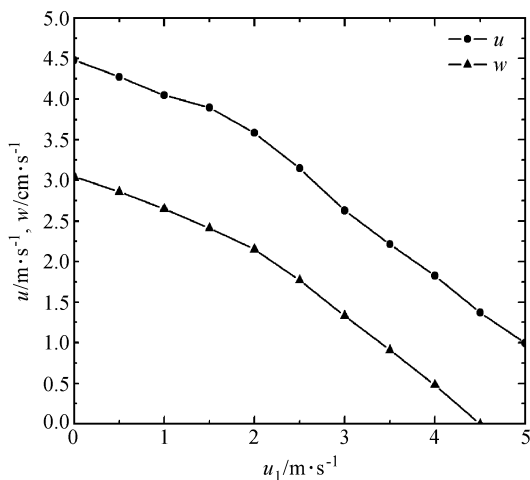


图1 中尺度运动(u 、 w)随大尺度水平风速(u_1)变化

Fig. 1 Change of mesoscale motion (u , w) with large-scale horizontal wind speed (u_1)

速的变化。共进行了 11 个模拟个例实验, 见图 1 中实验数据所示。很显然, 中尺度运动(绿洲戈壁热力环流^[21~23])强度随大尺度水平风速的增大而减弱。并且, 当大尺度水平风速超过 4.5 m/s 以后, 环流的上升运动已经被彻底摧毁, 水平方向也大幅衰减。而且, 还可以看出当背景场水平风速小于 2 m/s 时, 中尺度比相应背景场水平风速大于 2 m/s 后的衰减速率小。由此, 可以得出结论: 在大尺度背景场水平风速小于 2 m/s 时, 绿洲戈壁热力环流能稳定存在, 绿洲效应受影响幅度不大, 但是一旦大尺度背景场风速大于 2 m/s 后, 将对热力环流和绿洲效应产生较大影响, 当大于 5 m/s 后, 热力环流受到彻底破坏, 局地气候效应受到大尺度背景场很严重的影响。这一结论与文献[2]在考虑很简单陆面过程而侧重于大气动力学角度所模拟出的绿洲沙漠地区的结论相近而数值稍有差异。

3.2 外部因子: 降水与灌溉

降水是天然的外因, 而灌溉却是人为的外因, 虽然二者都能增加土壤-植被-大气系统的水分含量, 但是却有很明显的本质差异。降水对整个绿洲戈壁区域有效, 而灌溉却只对绿洲局部有效, 甚至只对农田局部环境有效。在敏感性实验中, 为了简化研究的复杂性, 假设灌溉对整个绿洲土壤植被均有效, 且采用利用水效率高、经济实用的喷灌方式^[24], 因而可以与降水采用同样的计量方式, 以便于对比。为了简化模拟难度, 敏感性实验中均假设

降水发生于模拟实验前夜, 降水量为 0~30 mm。初始土壤地表含水量为 0.3 m³/m³(图略)。从模拟实验结果可以看出, 降水对于绿洲戈壁区域气候效应的影响效果远比灌溉明显。其本质原因在于绿洲戈壁区域气候效应产生的根源在于下垫面的非均匀性, 而降水会大大削弱这种下垫面差异, 相反, 灌溉却只在一定程度上对下垫面的非均匀性有所增强。总之, 虽然从表面看降水会因下垫面差异而削弱“绿洲效应”, 但是, 实际上由于水文因素的重要性以及降水对于改善绿洲戈壁区域气候特征、生态环境所起的作用决定了降水是绿洲存活发展的一个很积极的重要外因。

3.3 内部因子: 绿洲水平空间尺度

对绿洲水平空间尺度作了较为精确的敏感性实验。考察尺度从 2~70 km, 共进行了 18 组模拟。图 2 综合反映了绿洲戈壁区域气候效应随水平尺度的变化, 而图 3 是引自文献[2]的甘肃省河西走廊地区绿洲水平空间尺度的概率分布图。模式下垫面参数, 初始场选取黑河绿洲戈壁地区的典型数值, 而黑河恰好位于甘肃省河西走廊地区, 因而这个统计规律对模拟结果的推论有较好的相关性。从图 2a 中可以看到, 绿洲戈壁热力环流中的水平风速最大值处于绿洲水平尺度 15~20 km 之间, 而上升风速最大值则是出现在绿洲水平尺度 6 km 时。图 2b 反映了绿洲水平尺度在 25~35 km 之间时, “湿岛效应”最强, 而图 2c 和 d 反映的最小值是绿洲水平尺度 50~60 km 之间。综合分析这些规律, 可以看出它们很好地吻合了图 3 所反映的统计规律。绿洲水平尺度在 15~25 km 这个范围内时, 中尺度速度 u 最大, w 也较大, 而且绿洲“湿岛效应”最明显, “冷岛效应”较强, 湍流运动较弱, 因而这个尺度上的绿洲存活性最强, 所以现存绿洲概率分布中对应的概率也最大。在 5~15 km 这个范围内, 虽然中尺度速度 u 较大, w 最大, 但是由于图 2b~d 所反应的规律均是不利于绿洲存活的, 湿度最低, 气温最高, 湍流运动也最强(不利于中尺度环流的稳定发展), 所以, 该尺度的绿洲现存概率较低。综合 4 个因子, 图 2a~d 所反映的规律也与图 3 中的概率分布吻合得较好。这充分说明我们所确定的现存绿洲尺度与所选因子具有很好的相关性。在 35~45 km、45~55 km 范围之间, 虽然中尺度运动较弱, “湿岛效应”较弱, 但是由于“冷岛效应”较强, 湍流

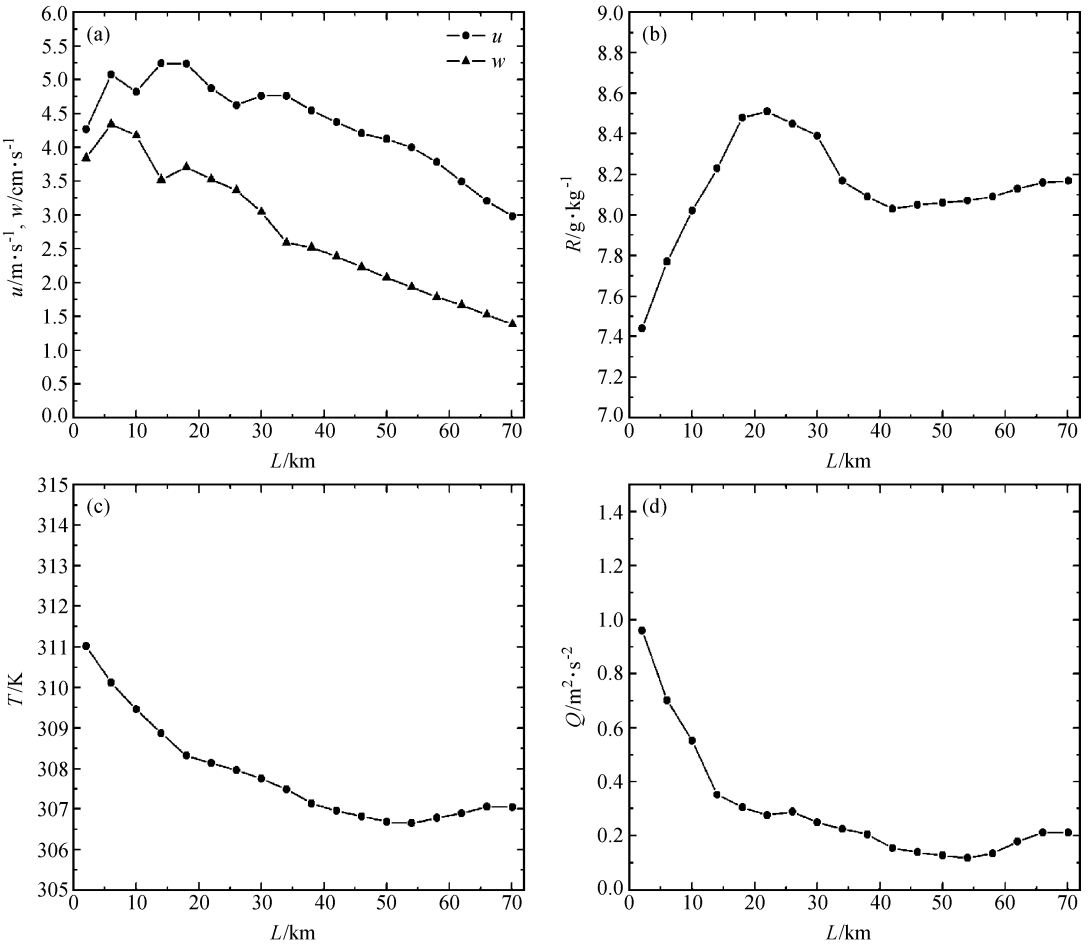


图2 绿洲水平尺度(L)敏感性实验:(a) 中尺度运动(u, w); (b、c) 绿洲近地面层 07:00~19:00 平均比湿 R 、气温 T ; (d) 区域 07:00~19:00 平均湍流动能 Q

Fig. 2 Test of sensitivities to horizontal spatial scale of oasis (L): (a) Mesoscale motion (u, w); (b, c) 0700-1900 BT (Beijing Time) averaged specific humidity (R) and air temperature (T) of the surface layer over oasis; (d) 0700-1900 BT averaged regional turbulent kinetic energy Q

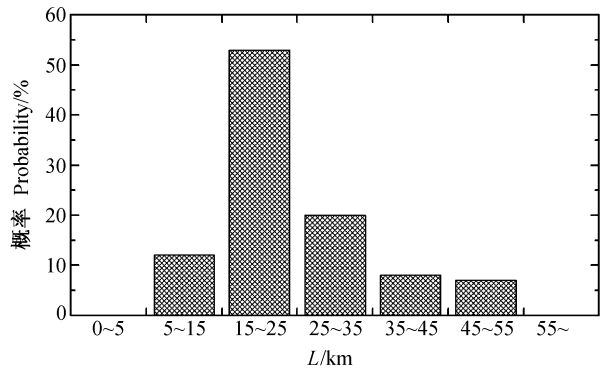


图3 甘肃省河西走廊地区绿洲水平空间尺度的概率分布(引自文献[2])

Fig. 3 The distribution of horizontal scale of oasis in the Hexi Corridor region of Gansu Province (quoted from reference [2])

运动较弱(有利于中尺度环流的稳定发展),也对应了相应大小的绿洲现存的概率分布。当绿洲水平尺度处于 0~5 km 和大于 55 km 这些范围内时,由于各方面所反应的规律都不宜绿洲效应的发展,因而不适宜绿洲存活,相对应的绿洲分布概率也为 0。综合以上分析,甚至还可以得出推论:绿洲的最小临界尺度为 5~10 km 之间,最大临界尺度为 55~65 km 之间,而最适宜绿洲存活的尺度范围为 20 km 左右。这一结论,与文献[3]利用熵平衡方程得出的绿洲最小临界尺度为 6 km,文献[2]只考虑中尺度运动角度模拟得出的绿洲水平尺度 20 km,中尺度运动最强,最佳存活范围为 15~25 km 的结论基本一致。

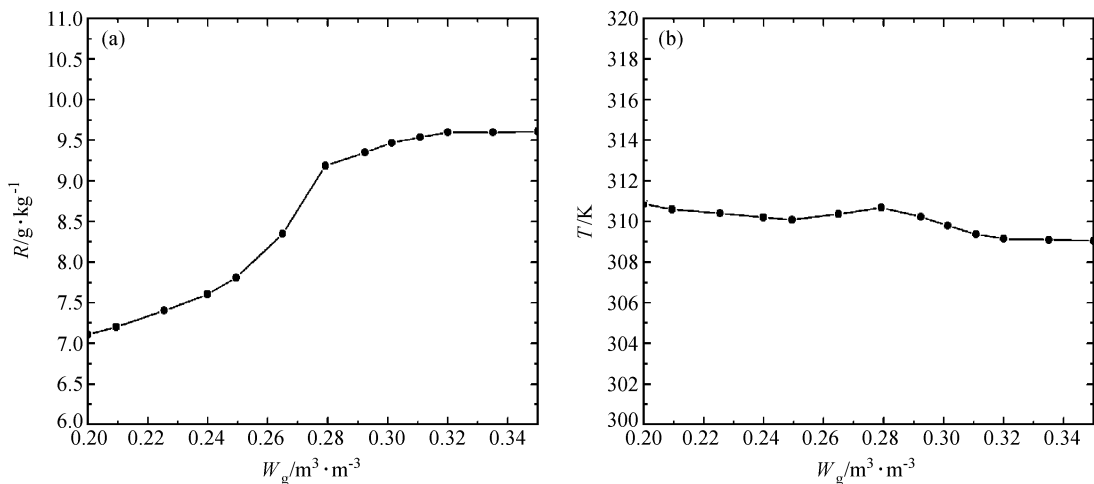


图4 绿洲近地面层 07:00~19:00 平均比湿 (a) 和气温 (b) 对土壤湿度的敏感性实验

Fig. 4 Tests of sensitivities of 0700–1900 BT averaged (a) specific humidity and (b) air temperature of the surface layer over oasis to moisture content of soil (w_g)

3.4 内部因子：土壤湿度

土壤参数众多，在此只研究对绿洲戈壁区域气候效应影响起最主要作用的土壤湿度参数——土壤地表含水量。变化范围从 $0.2 \sim 0.35 m^3/m^3$ ，共进行了 13 组模拟实验，体现了绿洲水文条件从干旱到湿润的变化。

敏感性实验结果表明：土壤湿度对于绿洲“湿岛效应”的影响最大，而对中尺度运动，气温、湍流运动影响较小。图 4a 反映了当土壤地表含水量小于 $0.28 m^3/m^3$ 时，绿洲近地面湿度对土壤湿度极其敏感，而当绿洲较为湿润后，绿洲近地面湿度对土壤湿度敏感性较差。相应的，图 4b 中也存在一个对应的极大值。综合实验结果分析，还可以初步得出一个推论：对于绿洲的存活，在一定的地理和气候条件下以及不考虑其他因子的影响时，土壤含水量也存在一个临界值（此处为 $0.28 m^3/m^3$ 左右），当土壤含水量大于这一临界值时，绿洲存活稳定性较强，一旦低于这个临界值后，绿洲存活稳定性较差，退化可能性增大。因而保持绿洲土壤一定的湿度水平对于绿洲的维持发展具有重要作用。

3.5 内部因子：粗糙度

粗糙度作为下垫面动力特征的一个重要参数，我们也对其进行了敏感性实验。考察范围从 $0.1 \sim 0.6 m$ ，共进行了 11 组实验（图略）。从粗糙度的敏感性实验结果的总体分析来看，粗糙度的变化对绿洲戈壁区域气候效应的影响很小，从数量级上看，

粗糙度对风速、湿度、气温、湍流运动的影响比其他因子的影响均小一个数量级以上。随着粗糙度的增加，中尺度运动和气温基本没有变化，其中中尺度水平风速大小有极微弱的稳定的变小趋势，而湿度和湍流运动也都有一定程度波动，粗糙度处于 $0.35 \sim 0.45 m$ 之间时，湿度最大，湍流运动最强，整体趋势上湿度略有上升，湍流运动略有增强。

3.6 内部因子：植被结构

植被结构包括植被覆盖率、植被的组成比例、植被分布特征等多方面的子因素，由于组成因素太多，所以很复杂。在此，为了简化模拟难度以及更好地找出其中的规律，只对其中一个子因子进行单方面的敏感性实验，而假设其他子因子不变。

3.6.1 植被覆盖率

在对植被覆盖率的敏感性实验中，为了更准确地研究这个子因子，绿洲下垫面植被参数作均一化考虑。植被覆盖率变化范围从 $0.3 \sim 0.8$ ，共 11 组模拟实验，完全包括了植被覆盖疏密的极端情况。

从图 5 可以看出，整体上植被覆盖率对于绿洲戈壁区域气候效应的影响较大。图 5a 反映中尺度运动与植被覆盖率之间的关系，其中，中尺度上升运动基本不受植被覆盖率变动的影响，而水平运动则不同，当植被覆盖率小于 0.6 时，中尺度运动对于植被覆盖率的变化也不敏感，只有当覆盖率大于 0.6 以后，环流的最大水平风速则随覆盖率的上升而减小。因而，植被覆盖率过高对于绿洲戈壁热力

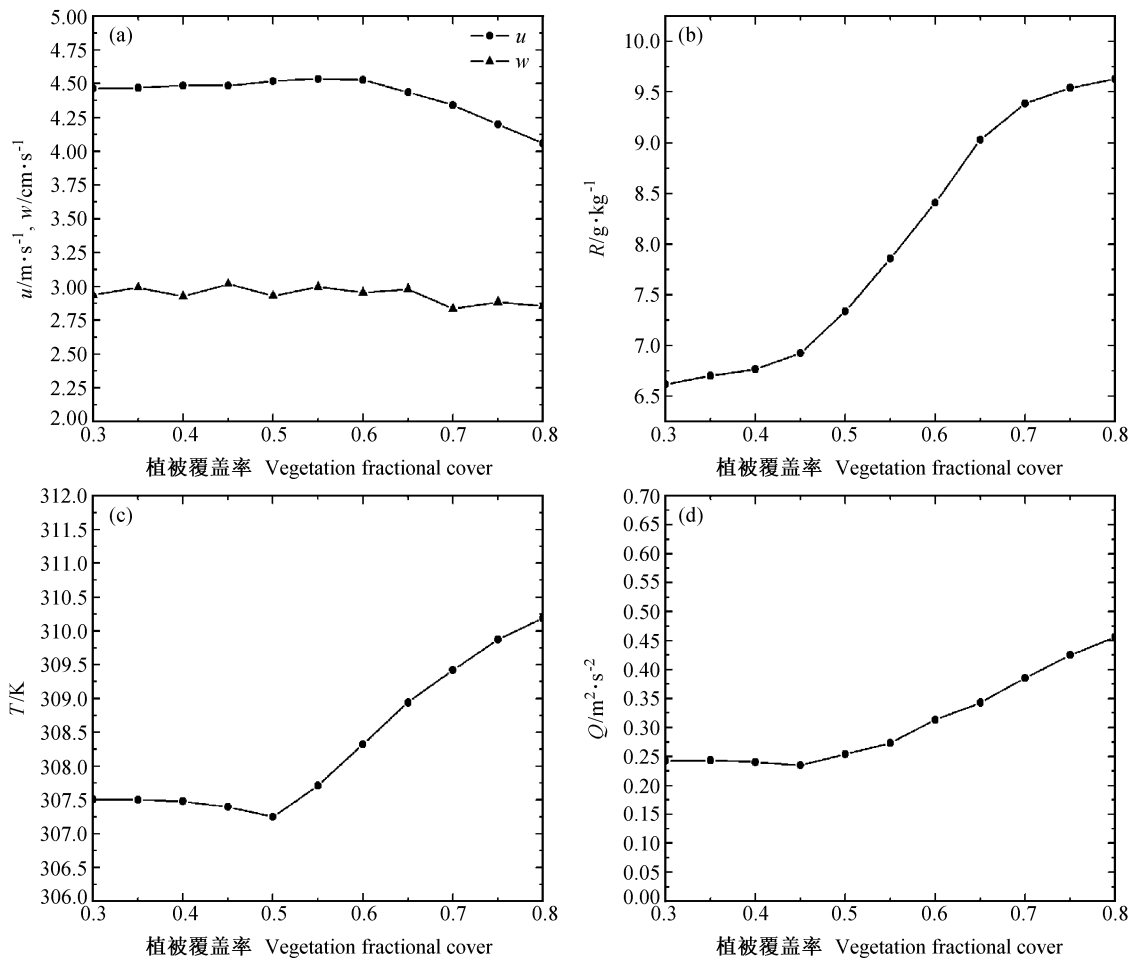


图5 同图2，但为植被覆盖率的敏感性实验
Fig. 5 Same as in Fig. 2, but for tests of sensitivities to vegetation cover factor

环流会起抑制作用。图 5b 反映绿洲近地面层的湿度将随植被覆盖率的上升而上升，其中植被覆盖率在 0.45~0.65 之间时，湿度变化较为敏感。而从图 5c 可以发现，植被覆盖率在 0.5 左右时，绿洲近地面层气温最低，“冷岛效应”最强；当植被覆盖率小于 0.5 时，绿洲近地面层气温随覆盖率的增加略呈下降趋势，当覆盖率大于 0.5 后，则变化趋势呈较大的上升趋势。出现这种现象的原因在于，潜热、感热均受植被覆盖率的影响较大，改变了地表能量收支平衡进而对气温影响的结果。图 5d 反映的规律与图 5c 相类似，只是当植被覆盖率在 0.45 左右时，湍流运动最弱。综合分析图 5，各个因子所反映的“绿洲效应”最显著的植被覆盖率区域并不完全相同，但根据中尺度运动和湿度对于绿洲的存活影响最大(尺度敏感性实验的推论)，可以得出一个近似的判断：植被覆盖率在 0.6 左右时，对绿

洲维持和发展最为有利。

3. 6. 2 植被分布

在研究植被结构时，植被的分布特征和规律也是一个很重要的方面。由于实际分布特征是平面二维的，而非对称分布形式，因而为了简化难度找到有一定价值的规律，将绿洲水平空间上作了圆形近似(如图 6 所示)，只考虑更为典型的圆对称分布形式。为了便于对比找出规律，图 6 的 4 种绿洲分布中，农田和树林分布面积比例均相同，农田面积占 64%，树林面积占 36%。

从表 3 的模拟结果可以看出，植被分布方式对于绿洲戈壁局地气候效应的影响较小。各气象要素均为 0.01~0.1 数量级上的变化，因而在绿洲的优化发展建设中植被的分布可以作为一个相对次要因素来考虑。当然，如果忽略模拟有可能出现的误差效果(除了风速，其余 3 个量由于是平均量，故受

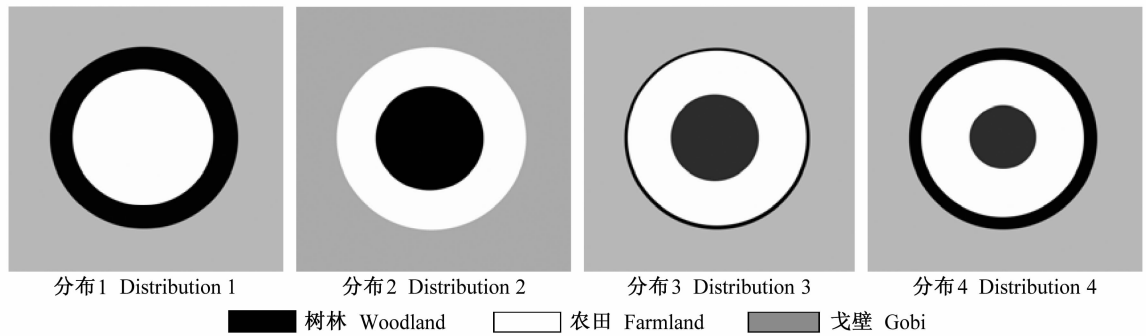


图 6 植被分布特征
Fig. 6 Characteristics of vegetation distribution

模拟误差影响较小)对比分析分布 1~4 相应模拟结果,也可以发现分布 1 湿度最大,最有利于“湿岛效应”的形成;分布 2 风速最大,平均气温最低,最有利于绿洲戈壁热力环流和“冷岛效应”的形成。因此从形成区域气候的影响来说,还是有差别的。另一方面,由于防护林网的空气动力学特征,在增加地表粗糙度、减弱湍流效应和防护风沙侵蚀绿洲方面的重要作用,所以对分布 3 和 4 的模拟研究是很必要的。对比分析分布 3 和 4 的模拟结果发现,分布 3 的各方面结果均优于分布 4,因而外围防护林面积并不需要太大,这与绿洲防护林应以窄林带、小网格为主,所占面积为绿洲总面积 10%的传统经验^[25]相吻合。另一方面也能节约资源和种植成本(由于绿洲外围生态环境条件对树木生长不利,因而单位面积林木所耗资源和种植成本较高)。

表 3 植被空间分布的敏感性实验结果数据
Table 3 The data result of test of sensitivities to spatial distribution of vegetation

分布 Distribution	u $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	w $/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	R $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	T $/\text{K}$	Q $/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
1	4.354	2.877	9.13	309.24	0.370
2	4.445	2.918	8.98	308.73	0.325
3	4.441	2.962	9.05	308.85	0.336
4	4.412	2.870	9.03	308.97	0.344

注: u : 最大中尺度水平速度; w : 最大中尺度上升速度; R : 绿洲近地面层 07:00~19:00 平均湿度; T : 绿洲近地面层 07:00~19:00 平均气温; Q : 区域 07:00~19:00 平均湍流动能

Note: u : the maximum mesoscale horizontal wind speed; w : the maximum mesoscale upward wind speed; R : 0700~1900 BT averaged humidity of the surface layer over oasis; T : 0700~1900 BT averaged temperature of the surface layer over oasis; Q : regional 0700~1900 BT averaged turbulence energy

综合各方面因素,对比分布 1~4 的模拟结果,可以看出分布 3 的方式是理论上较为有利于绿洲自身维持和发展的一种植被分布方式。

3.6.3 植被组成比例

选用分布 3(外围是防护林,不作变动)的方式,对林木、农田面积比作敏感性实验,当调整中央树林面积大小时,可以得出以下模拟结果:从图 7 中可以看出,如果理想的绿洲上只存在树林和农田两种植被,那么树林面积越大、农田面积越小,除了湿度减小、湿岛效应减弱外,其他方面都是有利于绿洲的维持和发展的;如果农田面积较大,虽然湿度也较大,但是农田消耗水资源过多,而绿洲水文条件一般不会很好,因而绿洲上以较大的树林面积为宜。对于一些水文条件比较差的绿洲,可以种植灌木林(下垫面特征与防护林、经济林接近,但是消耗水资源较少)作为主要植被;对于水文条件较好的绿洲,兼顾经济效益与水文条件,植被可以包括适当的农田、经济林、草地(下垫面特征与农田比较接近,而消耗水资源较少)、防护林以及灌木林。综合分析上面的模拟结果,可以认为树林面积保持在绿洲总面积的 60%以上为宜,其中 10%为防护林,其余 50%考虑绿洲水文条件,如果较好,主要以经济林为主,较差则以灌木林为主。剩下接近 40%的绿洲面积考虑土壤和水文条件,可以作为农田或草地。这样的植被组成比例结构既充分考虑了客观条件和经济效益,又较为符合实践经验^[25],理论上对绿洲的维持与发展也更为有利。

3.7 因子的影响对比

表 4 反映了敏感性实验中,在其他因子不变的条件,各内外因子对于绿洲戈壁区域气候效应中各主要气象要素能产生最大影响的数量级。通过数

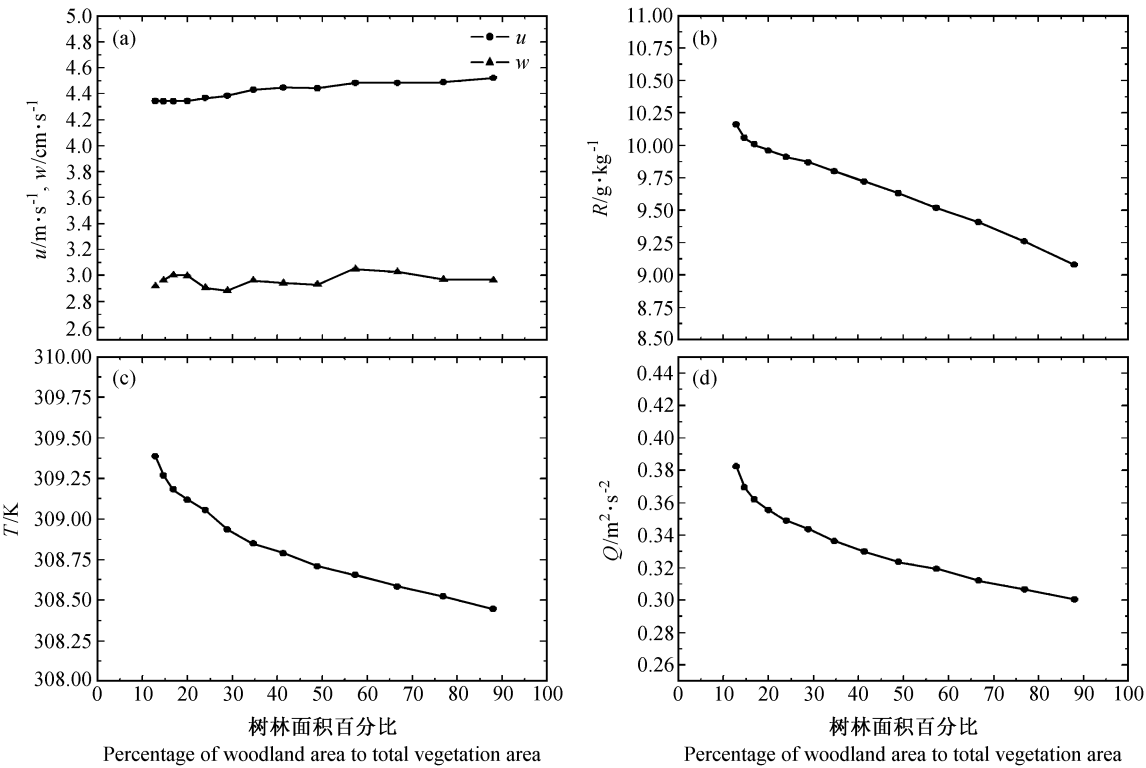


图 7 同图 2，但为植被组成比例的敏感性实验
Fig. 7 Same as in Fig. 2, but for tests of sensitivities to composing proportion of vegetation

表 4 内外因子影响绿洲戈壁区域气候效应各气象要素的量级分析表
Table 4 The comparative list of influence on the oasis-gobi regional climate effect between inside and outside factors

	$\Delta u/m \cdot s^{-1}$	$\Delta w/cm \cdot s^{-1}$	$\Delta R/g \cdot kg^{-1}$	$\Delta T/K$	$\Delta Q/m^2 \cdot s^{-2}$	因子影响 Influence
背景场风速 The wind speed of background field	10^0	10^0	10^0	10^0	10^{-1}	重要(1)Important
降水 Precipitation	10^0	10^0	10^0	10^0	10^{-1}	重要(1)Important
灌溉 Irrigation	10^{-2}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-2}	次要(5)Minor
绿洲尺度 Scale of oasis	10^0	10^0	10^{-1}	10^0	10^{-1}	重要(2)Important
土壤湿度 Soil humidity	10^{-1}	10^{-1}	10^0	10^0	10^{-1}	重要(3)Important
粗糙度 Roughness length	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	次要(6)Minor
植被覆盖率 Vegetation fraction	10^{-1}	10^{-1}	10^0	10^0	10^{-1}	重要(3)Important
植被空间分布 Spatial distribution of vegetation	10^{-2}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}	次要(5)Minor
植被组成比例 Composing proportion of vegetation	10^{-1}	10^{-1}	10^0	10^{-1}	10^{-1}	重要(4)Important

注： Δu ：各因子在通常情况下能引起的中尺度速度(最大水平风速)的最大波动值； Δw ：各因子在通常情况下能引起的中尺度速度(最大上升风速)的最大波动值； ΔR ：各因子在通常情况下能引起的绿洲近地面层 07:00~19:00 平均湿度的最大波动值； ΔT ：各因子在通常情况下能引起的绿洲近地面层 07:00~19:00 平均气温的最大波动值； ΔQ ：各因子在通常情况下能引起的区域 07:00~19:00 平均湍流动能的最大波动值

Note: Δu : the maximal fluctuant value of the maximum mesoscale horizontal wind speed; Δw : the maximal fluctuant value of the maximum mesoscale upward wind speed; ΔR : the maximal fluctuant value of 0700 - 1900 BT averaged humidity of the surface layer over oasis; ΔT : the maximal fluctuant value of 0700 - 1900 BT averaged temperature of the surface layer over oasis; ΔQ : the maximal fluctuant value of regional 0700 - 1900 BT averaged turbulence energy

量级的比较,能近似地比较出各内外因子对于绿洲戈壁区域气候效应的影响大小,区分出主要和次要的影响因子。从表中,甚至能给出这些因子影响力的一个近似排序(参见“因子影响”栏括号内数字),而且还能看出每个因子对区域气候效应中的影响的侧重方面。

4 结论

通过对绿洲戈壁区域气候效应的模拟以及内外因子的敏感性实验,对“绿洲效应”的形成和绿洲的维持机理以及绿洲维持与气象、环境和生态因子之间的关系等有了更清楚的认识和了解。其主要结论如下:

(1) 大尺度背景场风速是影响绿洲戈壁中尺度热力环流的重要因素。

(2) 降水与灌溉对于绿洲戈壁区域气候效应的影响甚大,对于绿洲的维持起着至关重要的作用。

(3) 绿洲空间尺度是影响“绿洲效应”的重要内因,绿洲的最小临界尺度为 5~10 km 之间,最大临界尺度为 55~65 km 之间,而最利于绿洲维持的尺度范围为 20 km 左右。

(4) 土壤湿度对于“绿洲效应”,特别是“冷岛效应”有着较大的影响,每个绿洲可能都存在着一个能影响自身存活稳定性的土壤湿度临界值。

(5) 粗糙度对于绿洲戈壁区域气候效应整体影响较小。

(6) 植被结构对于绿洲戈壁区域气候效应有着较大的影响,其中植被结构 3 个子因子中,植被覆盖率和植被的组成比例影响力较大,而植被的空间分布方式影响力较小。综合分析这 3 个子因子对于绿洲戈壁区域气候效应的影响规律,得出了植被覆盖率为 0.6 时,最有利于绿洲维持的结论等。

最后,通过量级比较和分析,给出了各因子对于绿洲戈壁区域气候效应的影响力排序。这无论对于进一步改进陆面物理过程参数化方案,提高模式的模拟精度,还是对绿洲的开发保护都具有重要的应用意义。

当然,由于模式精度和敏感性实验中初始场实际观测数据来源的局限性,模拟精度有待于提高。尤其在土壤参数、植被结构方面,值得做更进一步的深入研究。此外,地形因素、绿洲季节性演化规律等方面也都值得深入探讨,而这些都依赖于更精

细的陆面物理过程和大气边界层耦合的数值模式和精确的时空分布观测资料。

参考文献 (References)

- [1] 张强, 胡隐樵. 干旱区的绿洲效应. 自然杂志, 2001, **23**(4): 234~236
Zhang Qiang, Hu Yinqiao. Oasis effect in arid regions. *Nature Magazine* (in Chinese), 2001, **23**(4): 234~236
- [2] 张强, 于学泉. 干旱区绿洲诱发的中尺度运动的模拟及其关键因子的敏感性实验. 高原气象, 2000, **20**(4): 58~65
Zhang Qiang, Yu Xuequan. Numerical simulation of oasis-induced mesoscale atmospheric flow and its sensitivity test of key factors. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **20**(4): 58~65
- [3] Xue Jukui, Hu Yinqiao. Numerical simulation of oasis-desert interaction. *Progress in Natural Science*, 2001, **11**(9): 675~681
- [4] Wu Lingyun, Chao Jiping, Fu Congbin, et al. On a simple dynamics model of interaction between oasis and climate. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 775~780
- [5] Sellers P J, Mintz Z, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 505~531
- [6] Liu Shuhua, Liu Heping, Li Sen. A modified SiB model of biosphere-atmosphere transfer scheme. *Journal of Desert Research*, 1998, **18**: 7~16
- [7] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate*, 1996, **9**: 676~705
- [8] Xue Y, Sellers P J, Kinter III J L. A simplified biosphere model for global climate studies. *J. Climate*, 1991, **4**: 345~364
- [9] 刘树华, 李新荣, 刘立超, 等. 陆面过程参数化的研究. 中国沙漠, 2001, **21**(3): 303~311
Liu Shuhua, Li Xinrong, Liu Lichao, et al. Study of land-surface processes parameterizations model. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2001, **21**(3): 303~311
- [10] Liu Shuhua, Yue Xu, Hu Fei, et al. Using a Modified Soil-Plant-Atmosphere Scheme (MSPAS) to simulate the interaction between land surface processes and atmospheric boundary layer in semi-arid regions. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**(2): 245~259
- [11] Liu Shuhua, Yue Xu, Hu Fei, et al. Sensitivity tests of a Modified Soil-Plant-Atmosphere Scheme (MSPAS) to simulate land surface physical processes and regional climate effect in semi-arid region. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**(5): 717~729
- [12] Pielke R A. A three-dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**

- (2): 115~139
- [13] Yamada T. Simulations of nocturnal drainage flows by a q^2 /turbulence closure model. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 91~106
- [14] 刘树华. 植被内部风速分布规律和湍流交换特性. *气象*, 1990, **16**(3): 8~12
Liu Shuhua. Mean wind profiles and turbulent diffusivity profiles within a wheat canopy. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1990, **16**(3): 8~12
- [15] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲小气候特征和冷岛效应. *大气科学*, 1987, **11**: 390~396
Su Congxian, Hu Yinqiao, Zhang Yongfeng, et al. The microclimate character and "cold island effect" over the oasis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1987, **11**: 390~396
- [16] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析. *高原气象*, 1992, **9**(2): 113~119
Hu Yinqiao, Qi Yuejin, Yang Xuanli. Preliminary analyses about characteristics of microclimate and heat energy budget in HEXI gobi (HUAYIN). *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1992, **9**(2): 113~119
- [17] 王俊勤, 陈家宜. HEIFE 区边界层某些结构特征. *高原气象*, 1994, **13**(3): 299~306
Wang Junqin, Chen Jiayi. Some characteristics of structure of planetary boundary layer over HEIFE area. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1994, **13**(3): 299~306
- [18] Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**: 1889~1903
- [19] Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 536~549
- [20] 潘林林, 陈家宜. 绿洲夜间“冷岛效应”的模拟研究. *大气科学*, 1997, **21**(1): 39~48
Pan Linlin, Chen Jiayi. The simulation of "cold island effect" over oasis at night. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21**(1): 39~48
- [21] 阎宇平, 王介民, Menenti M, et al. 黑河地区绿洲-沙漠环流的数值模拟研究. *高原气象*, 2001, **20**(4): 435~440
Yan Yuping, Wang Jiemin, Menenti M, et al. Numerical simulation of oasis-desert circulation in HEIHE area. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20**(4): 435~440
- [22] 苗曼倩, 季劲钧. 荒漠绿洲边界层结构的数值模拟. *大气科学*, 1993, **17**(1): 77~86
Miao Manqian, Ji Jinjun. Numerical simulation of the atmospheric boundary layer structure around oasis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17**(1): 77~86
- [23] 高艳红, 吕世华. 非均匀下垫面局地气候效应的数值模拟. *高原气象*, 2001, **20**(4): 354~361
Gao Yanhong, Lu Shihua. Numerical simulation of local climatic effect of heterogeneous underlying surface. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20**(4): 354~361
- [24] 高艳红, 陈玉春, 吕世华. 灌溉方式对现代绿洲影响的数值模拟. *中国沙漠*, 2003, **23**(1): 90~94
Gao Yanhong, Chen Yuchun, Lu Shihua. Numerical simulation of influence of different irrigation methods on oasis. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2003, **23**(1): 90~94
- [25] 汪久文. 论绿洲、绿洲化过程与绿洲建设. *干旱区资源与环境*, 1995, **9**(3): 1~12
Wang Jiuwen. Oasis, oasis making and oasis construction. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 1995, **9**(3): 1~12