

西北干旱区荒漠戈壁陆面过程的数值模拟

曹晓彦 张 强

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州, 730020; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

摘 要

首先利用 中国西北干旱区陆-气相互作用试验 2000 年 5~6 月在甘肃敦煌进行的陆-气相互作用野外试验的观测资料, 确定了西北干旱区荒漠戈壁的陆面过程参数, 并用这些参数改进了已有的陆面过程模式。然后用该陆面过程模式对敦煌陆-气相互作用野外试验荒漠戈壁上的大气感热通量、潜热通量、摩擦速度以及净辐射、地表和土壤温度、土壤水份等重要陆面变量进行了模拟, 结果表明, 模拟值与观测值非常接近, 这说明改进后的模式对干旱区陆面过程有较强的模拟能力。

关键词: 西北干旱区, 荒漠戈壁, 陆面参数, 陆面过程模式。

1 引 言

人类及其赖以生存的生态环境与气候的相互作用是由陆面过程来实现的^[1,2]。陆面过程模拟主要是研究地面和大气之间的能量、水汽及其他模拟物质的交换。通过对陆面过程的数值模拟, 不仅可以为大尺度和中尺度模式提供比较合理的陆面过程方案, 而且还可由它用常规观测资料来计算长期的陆-气相互作用特征, 提供气候意义上陆-气相互作用的认识。

陆地表面特征随空间有很大的差异, 主要表现为植被的变化、土壤结构和性质的差异、地形的不同及人类对自然环境改造的差别等, 它会造成陆面感热、潜热和水汽通量输送的空间不均匀, 这种通量的空间差异不仅可以驱动中尺度环流, 而且也可以影响到大尺度环流^[2]。深入研究发生在地-气交界面上的各种物理、化学和生物过程, 并将这些过程参数化用于数值模拟, 可以在数值模式中更确切地反映真实的陆面和大气之间的相互作用。随着人们对陆面过程重要性认识的提高, 已经陆续建立了许多陆面过程模式^[3~5], 并且已用于与大气模式的耦合实践中。它们能比较好地模拟从中尺度到全球尺度范

围的现象及中长期天气变化。但是 Dickinson^[1]认为陆面过程模式仍是提高大气模式模拟和预报能力的两个主要方面之一。Henderson-Sellers 等^[6]对国际上比较流行的 25 个陆面过程模式的对比试验也表明, 陆面过程模式模拟结果之间的不一致性很大, 而且陆面物理参数不统一是引起陆面模式模拟结果不一致性的主要原因。因此陆面过程模式的完善和改进仍然是大气科学的研究热点。

过去的陆面过程试验是在湿润地区和半干旱区进行的, 干旱区陆面过程的参数化一直是大气数值模式中的薄弱环节, 而且干旱区在全球范围内广泛分布, 它的陆面过程对全球气候和大气环流的变化有较大影响。中国在 20 世纪 90 年代初进行了国际上首次干旱区陆面过程试验——黑河试验^[7,8], 并且得到了许多有意义的结果, 但在陆面过程参数化方面并没有取得显著进展。为了加深对干旱区和青藏高原周边地区陆面过程的认识, 中国目前又开展了我国西北干旱区陆气相互作用野外观测试验^[9], 该试验是国家重点基础研究发展规划项目我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究的两大野外试验之一。该试验于 2000 年 5 月 25 日至 6 月 17 日在甘肃敦煌进行了 20 余天的加

初稿时间: 2001 年 1 月 18 日; 修改稿时间: 2002 年 2 月 8 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(编号 40175004), 国家重点基础研究发展规划项目 我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究(编号 C1998040904-2)。

目前在中国科学院大气物理研究所读博士。

强观测试验(简称敦煌试验)^[10],利用敦煌试验的资料重新改进了赵鸣等^[5]发展的陆面过程模式(SVA, Soil-Vegetation-Atmosphere)修改后的版本^[11],并对这次敦煌试验干旱区荒漠戈壁陆面过程进行了数值模拟,还用该资料进行了验证。

2 模式介绍

模式分土壤、植被冠层和近地层大气3层。土壤分为上下两层,上层土壤厚度为0.1 m,整层厚度为1 m。上下两层土壤的温度 T_{g1} 、 T_{g2} ,上层土壤湿度 S_{sw} 及整层土壤湿度 S_{tw} ,近地层大气的虚位温 v_a 、水汽含量 q_a 用下面的方程得到

$$\frac{T_{g1}}{t} = \frac{c_1 h_s}{(s c_s d_1)} - \frac{c_2 (T_{g1} - T_{g2})}{1} \quad (1)$$

$$\frac{T_{g2}}{t} = \frac{c_3 (T_{g1} - T_{g2})}{1} \quad (2)$$

$$\frac{S_{sw}}{t} = G - R_s + w - E_f \quad (3)$$

$$\frac{S_{tw}}{t} = G - R_s - R_g - E_f \quad (4)$$

其中

$$G = P_r (1 - f) + S_m - E_g + D_w \quad (5)$$

$$\frac{v_a}{t} = \frac{H_g + H_f + 180(E_g + E_f) c_p - H_a}{c_p h} \quad (6)$$

$$\frac{q_a}{t} = \frac{E_g + E_f - E_a}{h} \quad (7)$$

其中, c_1 和 c_2 是和有关的常数, c_3 是下层土壤的松弛率, 1 是加热周期, h_s 是土壤表面从上面得到的热量净收入, d_1 是土壤周期性加热影响到的深度, $s c_s$ 是土壤单位质量比热, c_p 是大气比热, 1 是大气密度, h 是近地层厚度, 1 是植物蒸腾从上层土壤提取的百分比, f 是植被覆盖率。 H_g 、 H_f 和 H_a 分别是地表、植被冠层和近地层大气的感热通量, E_g 、 E_f 和 E_a 分别是地表、植被冠层和近地层的蒸发量, G 是地表得到的净利用水, R_s 是地表径流, R_g 是由于重力而致水渗漏到模式土壤层以下土壤中的水量, P_r 是降水率, S_m 是融雪率, D_w 是叶面滴下水的速率, w 是从土壤柱中其余部分传输到上层的水。

地表和近地面层大气的湍热通量分别由下面的公式计算

$$H_g = c_p [(r_{fh} + r_a)(q_{sat}(g) - q_a) - r_a(q_{sat}(f) - q_a)] / D_h \quad (8)$$

$$H_f = c_p [(r_{gh} + r_a)(q_{sat}(f) - q_a) - r_a(q_{sat}(g) - q_a)] / D_h \quad (9)$$

$$E_g = [(r_{fw} + r_a)(q_{sat}(g) - q_a) - r_a(q_{sat}(f) - q_a)] / D_w \quad (10)$$

$$E_f = [(r_{gw} + r_a)(q_{sat}(f) - q_a) - r_a(q_{sat}(g) - q_a)] / D_w \quad (11)$$

$$H_a = -c_p u^* \quad (12)$$

$$E_a = -u^* q^* \quad (13)$$

其中

$$D_h = r_{gh} r_{fh} + r_{fh} r_a + r_a r_{gh} \quad (14)$$

$$D_w = r_{gw} r_{fw} + r_{fw} r_a + r_a r_{gw} \quad (15)$$

这里所涉及到的植被阻尼 r_{fh} 和 r_{fw} 、土壤阻尼 r_{gh} 和 r_{gw} 、近地层大气阻尼 r_a 以及近地层湍流特征参数 u^* 、 q^* 均在文献[5, 11]中有详细说明,这里不再赘述。模式的时间步长为60 s。

3 物理参数及初值的确定

文中首先利用敦煌试验双墩子戈壁微气象观测中心站的资料分别确定了干旱区荒漠戈壁的土壤热容量 c_s 、土壤热传导率 λ_s 、土壤热扩散率 K_s 、地表粗糙度以及大气透明系数 α_a 等重要陆面参数。

3.1 土壤参数的确定

根据文献[8],可用下列公式来确定 c_s 、 λ_s 和 K_s

$$c_s = \frac{F_1 - F_2}{(T_s / t) z} \quad (16)$$

$$\lambda_s = F \left(\frac{T_s}{z} \right) \quad (17)$$

$$K_s = \lambda_s / c_s \quad (18)$$

其中, T_s 是土壤温度, F 是土壤热流量, F_1 和 F_2 是2.5和7.5 cm深度的土壤热流量, z 是两层土壤间的厚度。

图1是计算出的敦煌试验期间土壤热容量的平滑曲线。可见热容量基本上在 $1.12 \sim 10^6$ J/(m³ K)附近,土壤热传导率和土壤热扩散率也表现了类似的曲线(图略)。我们得到的土壤热容量 c_s 、土壤热传导率 λ_s 和土壤热扩散率 K_s 的平均值分别为 $(1.12 \sim 0.27) \times 10^6$ J/(m³ K), $0.274 \sim 0.017$ W/(m K)和 $(2.52 \sim 0.63) \times 10^{-7}$ m²/s。土壤热容量的平均值要比黑河试验戈壁上的值($1.23 \sim 10^6$ J/(m³ K))小一些,土壤热传导率和热扩散率的平均值比黑河试验的值(分别为 0.5 W/(m K)和 4.1×10^{-7} m²/s)小一半左右^[8],这说明敦煌地区比黑河试验地区更干燥。

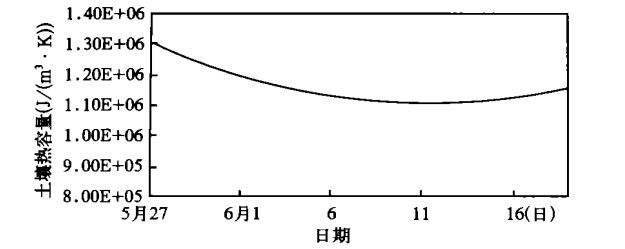


图 1 计算出的 敦煌试验 期间土壤热容量的平滑曲线

3.2 地表粗糙度的确定

地表粗糙度也是陆面过程中的重要参数, 荒漠戈壁的地表粗糙度非常小, 这不仅使它在参与陆面计算中非常敏感, 而且在实际确定时也有相当大的困难。已有研究^[12]为了得到比较可靠的粗糙度参数, 利用 敦煌试验 观测项目比较齐全的优势, 用 3 种方法同时确定了粗糙度。最终确定的荒漠戈壁粗糙度为 0.0019~0.00071 m, 这和一些文献中计算的地表粗糙度也比较接近^[13, 14], 因此在数值模式中使用地表粗糙度为 0.0019 m。

3.3 大气透明系数

在干旱荒漠戈壁地区, 由于沙尘天气较多, 大气中沙尘的含量对大气透明系数的影响严重。另外, 云对大气透明系数的影响也比较大。大气透明系数的变化将会影响到达地表的直接太阳辐射总量, 从而影响到净辐射、感热通量、潜热通量和土壤温度的变化。有的文献^[15]用如下形式来参数化大气透明系数

$$a = (a + b \sin \quad)(1 - c_h)$$
 (19)

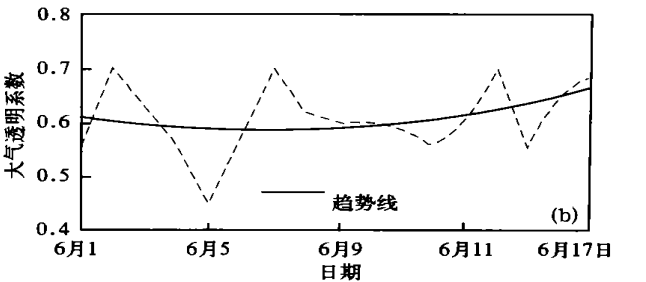
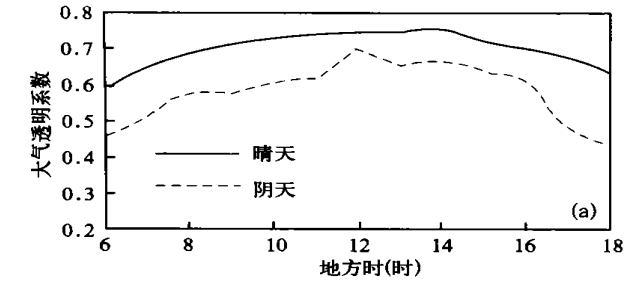


图 2 敦煌试验 期间敦煌荒漠戈壁大气透明系数的日变化(a)和逐日变化(b)曲线

3.4 模式初始参数

土壤湿度是很重要的初值, 将直接影响到能量的分配。这次在 敦煌试验 戈壁上对土壤湿度的测量表明, 这个地区荒漠戈壁上的土壤湿度非常低, 上层土壤含水量为 0.84 %, (约为 12.6 kg/m³), 下层

其中, θ 是太阳高度角, 其详细内容可参考文献^[15], h 是天空总云量, a , b 和 c 是经验常数, 随地区和天气有较大变化。

我们利用 敦煌试验 观测资料可以得出试验期间的大气透明系数, 根据文献^[15]它可用下式计算

$$a = \frac{I_{sc}}{I \sin \quad}$$
 (20)

其中, I 是太阳常数, I_{sc} 是太阳直接辐射。如果是晴天, 式(19)可简化成

$$a = a + b \sin \quad$$
 (21)

为此选晴天的资料就可确定出式(21)中的经验系数 a 和 b 。用线性回归方法确定出的系数分别为 0.583 和 0.182, 这两个经验值都比文献^[15]中 0.6 和 0.2 明显要小, 这说明了沙尘对透明系数的影响。

在此基础上可用阴天时观测的总云量和计算的大气透明系数来确定式(19)中的系数 c 。经资料统计确定出系数 c 的经验值是 0.025。把前面确定的系数 a , b 和 c 代入式(19)就得到了西北干旱区荒漠戈壁的大气透明系数的参数化公式。图 2 是 敦煌试验 期间敦煌荒漠戈壁大气透明系数的日变化(图 2a)和逐日变化(图 2b)曲线, 可见干旱区荒漠戈壁的透明系数基本上比较稳定, 但随天气状况也有一定波动, 6 月 4 日夜里的沙尘暴天气影响特别明显, 大气透明度急剧下降, 其余的波动与天气晴或阴即天空云量有关。其晴天的平均值为 0.69, 有云天的平均值为 0.58, 总体平均值为 0.61, 比一般湿润地区大气透过系数 0.8 小得多^[16], 这说明受沙尘影响相当严重。

土壤含水量为 0.6 % (约为 9.0 kg/m³), 总层土壤含水量为 0.68 % (约为 10.2 kg/m³), 比文献^[11]中沙漠上的土壤湿度小许多。其他量的初值用 14 日 0 时的实测值。

4 敦煌试验 陆面过程的模拟

把上面提供的土壤热容量、土壤热扩散率、大气透明系数参数化公式、地表粗糙度和上层土壤湿度引入陆面过程模式。驱动陆面过程模式的大气变量用该试验双墩子戈壁微气象塔 18 m 的感应头观测

的风、温度、湿度资料,模式中近地层的初始值用戈壁微气象塔 2 m 的感应头 0 时观测的风、温度、湿度资料。以此对 敦煌试验 期间的陆面过程进行了模拟。下面将给出 2000 年 6 月 14~16 日连续 3 d 的模拟结果,其中 14 日为完全的晴天,15 日为多云天气,而 16 日为有少量云的晴天。

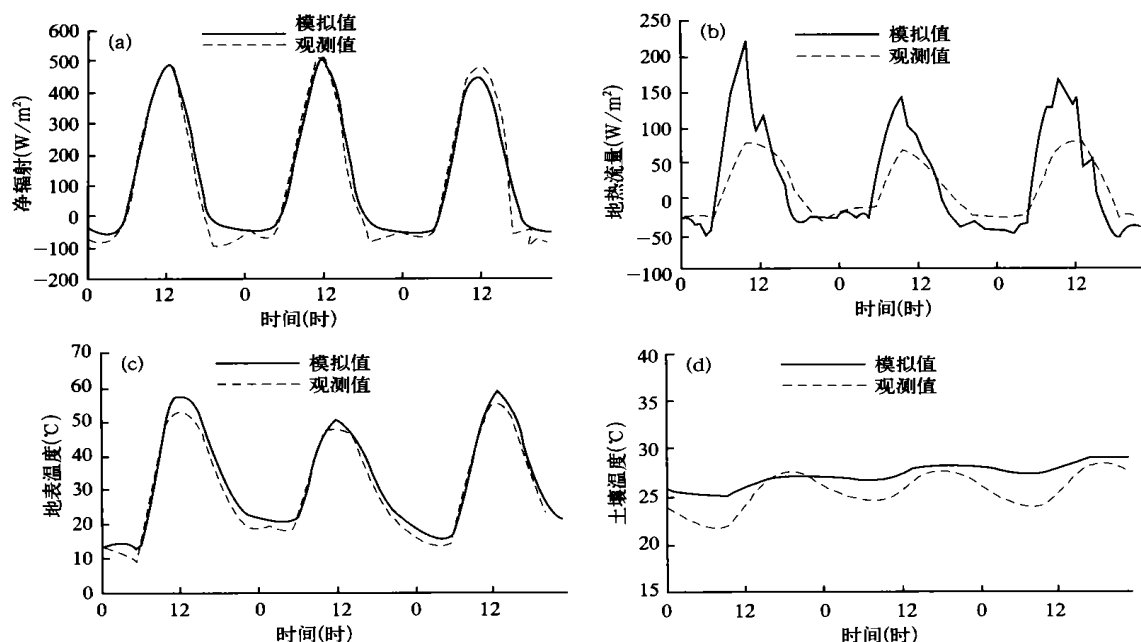


图3 2000年6月14~16日敦煌戈壁净辐射(a)、地热流量(b)和地表(c)及下层土壤温度(d)模拟值和观测值的变化

图3是2000年6月14~16日连续3d敦煌戈壁净辐射(a)、地热流量(b)和地表(c)及下层土壤温度(d)模拟值和观测值的对比。无论模拟值还是观测值,净辐射的峰值基本都接近 500 W/m^2 ,但模拟值比观测值偏小;由于地热流量的观测值是 2.5 cm 深度的值,而模拟的是地表面的值,所以它们的峰值有比较明显的差异,但两者位相基本一致;地表温度的模拟值和观测值不仅位相一致,而且大小也很接近,模拟值和观测值大约最大仅相差 2°C ;模式中土壤仅分为两层,理论上的下层土壤温度的模拟值变化不太大,和 15 cm 深度的观测值还是比较接近。

图4是2000年6月14~16日连续3d敦煌戈壁感热通量(a)、潜热通量(b)和摩擦速度(c)模拟值和观测值的变化特征。模拟结果表明,地表感热通量峰值基本在 400 W/m^2 左右,3d内观测值与模拟值非常接近,相差最大时大约为 50 W/m^2 ;潜热通量非常小,比感热通量小一个量级,模拟一般比较

困难,观测值和模拟值的波动都比较大,但本文的模拟结果还是与观测值表现了较好的一致,甚至连大气负水汽通量也能模拟出来;一般的陆面模式中地表摩擦速度是一个比较难模拟的量,多数情况下模拟的效果不是很好,但本文的结果却与观测值无论从变化趋势还是量值都相差很小,只是在摩擦速度极小时差别大一些。感热通量、潜热通量和摩擦速度的模拟值与观测值的相关系数分别为 0.95, 0.58 和 0.64, 标准差分别为 36.1 W/m^2 , 4.09 W/m^2 和 0.11 m/s , 偏差分别为 0.64 W/m^2 , 0.71 W/m^2 和 0.02 m/s 。可见感热通量、潜热通量和摩擦速度均基本没有系统性偏差。如果以标准差为绝对误差,感热通量、潜热通量和摩擦速度均基本没有系统性偏差。如果以标准差为绝对误差,感热通量、潜热通量和摩擦速度的相对误差分别 28%, 100% 和 45%。由于潜热通量太小,观测值本身误差就很大,所以造成模拟值相对误差较大,感热通量和摩擦

速度都比由空气动力学法直接用梯度资料计算值的

误差^[17]还要小得多。

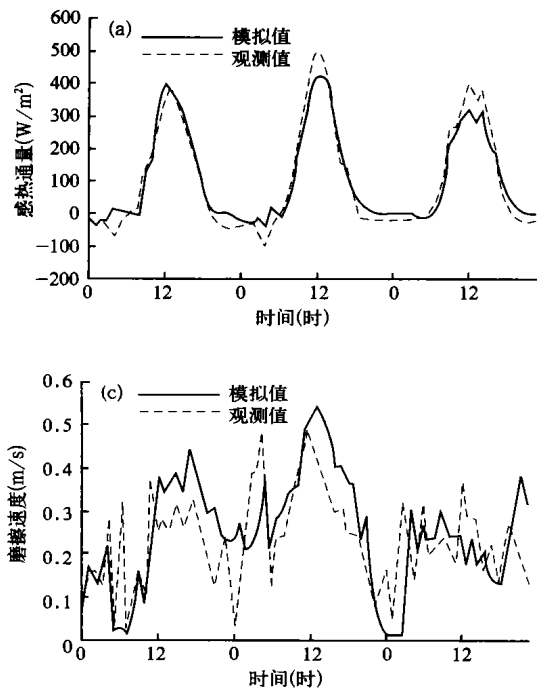


图 5 是 2000 年 6 月 14~ 16 日连续 3 d 敦煌戈壁上层土壤和下层土壤含水量模拟值的变化。可见模拟的敦煌戈壁土壤含水量很小, 上层一直在 0. 64 % 以下, 下层比上层略大一些, 这与地方时 08 时在两个点观测的值很接近^[12]。模拟的上层水份含量具有较明显的日变化, 并且在逐日减小; 下层日变化很小。这一模拟结果没有更充分的观测值比较, 但符合一般的规律。

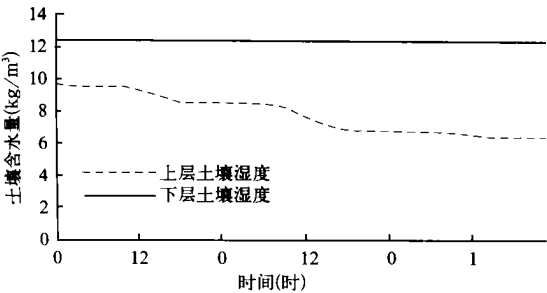


图 5 2000 年 6 月 14~ 16 日敦煌戈壁上层土壤和下层土壤含水量模拟值的变化

增加了近地层并对该层风、温度、湿度的预报是本模式的主要特色之一, 图 6 是 2000 年 6 月 14~ 16 日敦煌戈壁上层近地层 2 m 高处大气的风速(a)、温度(b)和湿度(c)模拟值和观测值的变化特征。可以看出, 近地层风速和温度的模拟值和观测值非常接近,

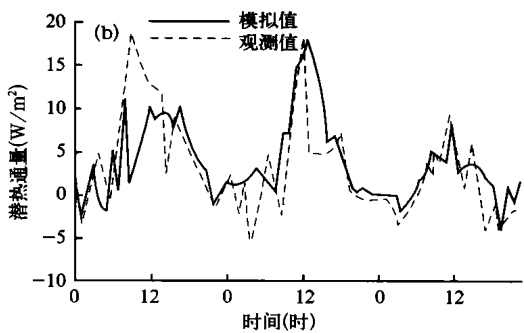


图 4 2000 年 6 月 14~ 16 日敦煌戈壁感热通量(a)、潜热通量(b)和摩擦速度(c)模拟值和观测值的变化特征

只是在峰值和谷值处有些差别; 湿度的模拟效果略差。

对以上众多陆面和大气物理量的模拟结果, 特别是对大气模式影响最大的感热通量、潜热通量和摩擦速度的模拟结果都与同期观测结果基本一致, 而且在理论上也比较合理。

5 结 论

利用资料确定出了西北干旱区敦煌戈壁的土壤热容量 c_s 、土壤热传导率 λ_s 和土壤热扩散率 K_s , 并且它们平均值分别为 $(1.12 \pm 0.27) \times 10^6 \text{ J/(m}^3 \text{ K)}$, $0.274 \pm 0.017 \text{ W/(m K)}$ 和 $(2.52 \pm 0.63) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 均比黑河试验中的值小。并且确定了粗糙度, 给出了干旱区荒漠戈壁比较可信的地表粗糙度为 0.0019 m。同时算出了该地区大气透明系数在晴天时的参数化公式, 并确定了其中的经验参数。而且还用资料确定了大气透明系数与云量的关系, 得到适合于受沙尘影响严重的干旱区荒漠戈壁大气透明系数的参数化公式。计算出的大气透明系数的总体平均值为 0.61, 比湿润地区的值小很多。

从对净辐射、地热流量、地表温度、感热通量、潜热通量和摩擦速度等陆面物理量及近地层风速、温度和湿度连续 3 d 的模拟看, 模拟结果与观测值无论变化趋势还是量值都较为一致。以感热通量的

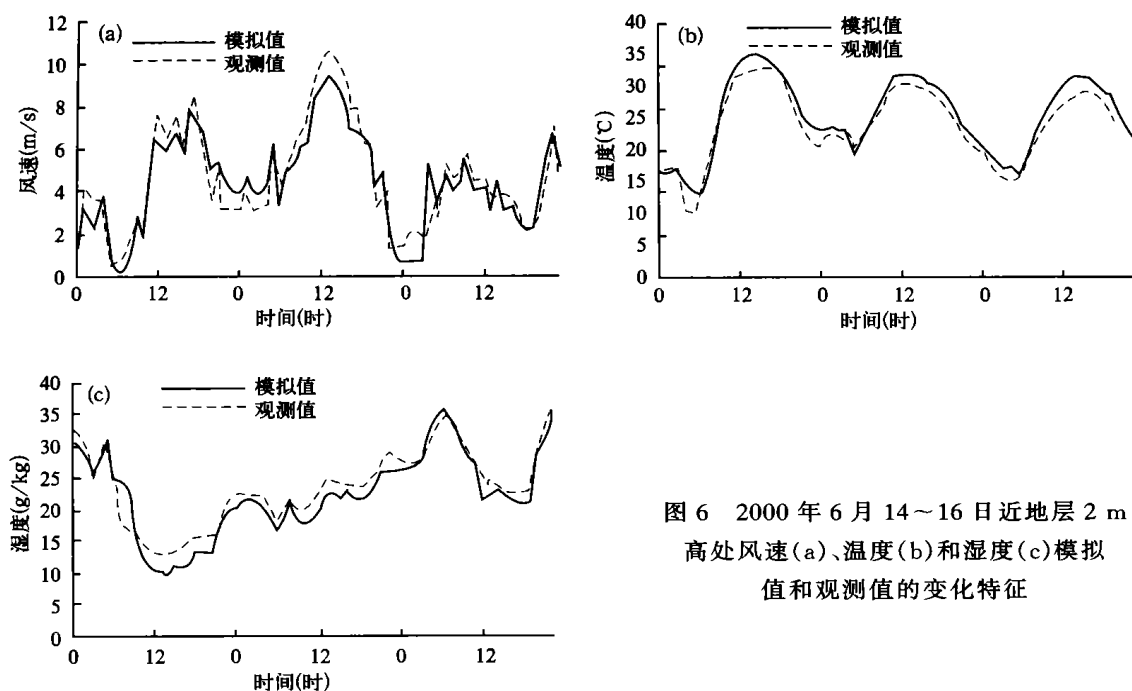


图6 2000年6月14~16日近地层2 m
高处风速(a)、温度(b)和湿度(c)模拟
值和观测值的变化特征

模拟质量最佳,摩擦速度次之,潜热通量相对较差,它们与观测值的相关系数分别为0.95, 0.58和0.64,若以标准差为绝对误差,感热通量、潜热通量和摩擦速度的相对误差分别28%, 100%和45%。这充分说明了该陆面过程模式对于干旱区荒漠戈壁的模拟基本上是成功的,也是有效的。

陆面过程的物理实质非常复杂,譬如,怎样考虑

蒸发不是在地表而是发生在土壤一定深度,以及水汽在沙土中如何输送等问题都还是未能在模式得到很好地解决。这些问题还有赖于更详细的观测资料来对陆面过程进行更系统地研究和更完善地参数化。

致谢: 本文观测资料来源于中国西北干旱区陆-气相互作用野外实验,在此对参加该实验观测和为本文提供帮助的同志一并致谢。

参考文献:

- 1 Dickinson R E. Land-atmosphere interaction. U. S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994, 1995, 917-922
- 2 Shao Y, Anne R D, Henderson-Sellers A. Soil moisture simulation, A report of the RICE and PILPS Workshop, IGPO Publication Series No. 14, Climatic Impacts Center, 1994, 1-100
- 3 Dickinson R E, Kenney P J. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model national center for atmospheric research. Boulder, CO, Tech Note/TN-275+STR, 1986
- 4 Sellers P J, Mintz Y, Sad Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. J Atmos Sci, 1986, 43(6): 505-531
- 5 赵鸣, 江静, 苏炳凯, 等. 一个引入近地层的土壤-植被-大气相互作用模式. 大气科学, 1995, 19(4): 405-414
- 6 Henderson-Sellers A. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes. Bull Amer Meteor Soc, 1993, 74(7): 1335-1348
- 7 胡隐樵, 高由禧. 黑河实验(HEIFE)对干旱地区陆面过程的一些新认识. 气象学报, 1994, 52(3): 285-296
- 8 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
- 9 张强, 卫国安, 黄荣辉. 绿洲对其临近荒漠大气水分循环的影响. 敦煌试验数据分析. 自然科学进展, 2002, 12(2): 195-200
- 10 张强, 卫国安, 黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数. 中国科学(D辑), 2001, 31(9): 783-792
- 11 张强, 赵鸣. 干旱区绿洲与荒漠相互作用下陆面特征的数值模拟. 高原气象, 1998, 17(4): 335-346
- 12 Zhang Qiang, Cao Xiaoyan, Wei Guoan, et al. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(1): 121-135
- 13 陈家宜, 王介民, 光田宁. 一种确定地表粗糙度的独立方法. 大气科学, 1993, 17(1): 21-26
- 14 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数. 高原气象, 1992, 11(4): 371-380

- 15 杨长新 译. 边界层气象学导论. 北京: 气象出版社, 1991. 273~ 274
16 许绍祖. 大气物理学基础. 北京: 气象出版社, 1993. 262~ 264
17 胡隐樵. 论近地面层湍流通量观测. 高原气象, 1990, 9(1): 74~ 87

NUMERICAL SIMULATION OF THE LAND- SURFACE PROCESS OVER DESERT AND GOBI IN ARID REGION OF NORTHWEST CHINA

Cao Xiaoyan Zhang Qiang

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

In this paper, the parameters of the land-surface process over Gobi in arid region of Northwest China are ascertained firstly by utilizing the field observation data of Land-Atmosphere Interaction Experiment over Arid Region of Northwest China in Dunhuang of Gansu Province from May to June of 2000. For example, the soil thermal capacity mean is $(1.12 \pm 0.27) \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$, the soil thermal conductivity mean is $0.274 \pm 0.017 \text{ W}/(\text{m K})$, the soil thermal diffusivity mean is $(2.52 \pm 0.63) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. The results are smaller than those got in HEIFE. The surface roughness length is 0.0019 m. The atmospheric transparent coefficient mean is 0.61 which is smaller than that in the wet region. And the parameterized formula of the atmospheric transparent coefficient is got over the desert and Gobi affected by the sand weather. With these parameters the land-surface process model is advanced. Then, the numerical simulations of the sensible heat, the latent heat, the friction velocity, the net radiation, the surface and soil temperatures and the soil moisture over Gobi in the field experiment are done. The correlation coefficients between the simulation results and the observations for the sensible heat flux, the latent heat flux and the friction velocity are 0.95, 0.58 and 0.64 respectively. The net radiation maximum is close to $500 \text{ W}/\text{m}^2$. The results show that the simulation and the real observation are very close and the advanced model has strong simulative ability for the land-surface process over arid region.

Key words: Arid region of Northwest China, Gobi, Land-surface parameter, Land-surface process model.