

刘树华, 蒋浩宇, 胡非, 等. 利用区域尺度气象模式模拟黑河地区地表能量通量的研究. 大气科学, 2008, **32** (6): 1392~1400

Liu Shuhua, Jiang Haoyu, Hu Fei, et al. A study of surface energy fluxes in Heihe region simulated with a mesoscale atmospheric model.

Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, **32** (6): 1392~1400

利用区域尺度气象模式模拟黑河地区地表 能量通量的研究

刘树华^{1, 2, 3} 蒋浩宇^{1, 2} 胡非³ 张称意² 刘和平¹

梁福明¹ 辛国君¹ 王建华¹

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 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 应用中尺度区域模式 RAMS (the regional atmospheric model system), 在 40 余组不同参数的条件下模拟中国干旱半干旱黑河地区的地表能量通量和土壤温度特征, 并以此探索模式在干旱半干旱地区的适用性。为了证明模拟结果的准确性和模式的稳定性, 模拟连续运行 30 天, 其中包含晴好和阴雨的天气过程。模拟结果表明: 即使使用较为可靠的 NECP 再分析气压层资料和实地探测资料, 进行初始场和参数的输入, RAMS 的默认设置也很难较为合理地反演出地表能量通量, 只有合理地调整好其土壤特征参数, RAMS 才能得到与实测资料符合得较好的结果。土壤特征参数对模拟结果影响较大, 影响因子的重要性依次为: 土壤含水量、土壤层总厚度、土壤温度。

关键词 中尺度区域模式 黑河地区 潜热通量 感热通量 土壤温度

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1392-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

A Study of Surface Energy Fluxes in Heihe Region Simulated with a Mesoscale Atmospheric Model

LIU Shuhua^{1, 2, 3}, JIANG Haoyu^{1, 2}, HU Fei³, ZHANG Chengyi², LIU Heping¹,
LIANG Fuming¹, XIN Guojun¹, and WANG Jianhua¹

1 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 Laboratory of Climate Research, National Climatic Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

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

Abstract Ground surface energy fluxes and the characteristic of soil temperature are simulated by a mesoscale atmospheric model, RAMS (the regional atmospheric model system), with up to 40 different sets of parameters, and the applicability of RAMS to arid and semi-arid regions is explored. The simulation lasted 30 days to prove its accuracy and stability. Both sunny and rainy synoptic processes are included in the simulation period. The result shows

收稿日期 2007-04-12, 2007-07-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421402, 中国气象局气候变化专项经费 CCSF2006-38、CCSF2007-39, 高等学校博士学科点专项科研基金 20050001030, 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室基金, 国家自然科学基金资助项目 40275004

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气候变化研究。E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

that RAMS is impossible to give sound outcome with its default parameters even using valid input data when applied in the Heihe region. Only when the model runners adjust manually soil parameters, can RAMS gain results that are consonant with observational data. Soil moisture content, soil thickness, and soil temperature are the most important in all the initial soil parameters.

Key words mesoscale atmospheric model, Heihe region, latent heat flux, sensible heat flux, soil temperature

1 引言

在气候模式与陆面模式的嵌套中,模拟区域的感热和潜热通量及地表温度多作为嵌套链接参数,故模式对地表热量通量和温度模拟的准确与否直接影响到区域气候模拟预测的准确度。因此,RAMS 模式(the regional atmospheric model system)在复杂地形地区能否准确模拟地表热量通量和温度,是人们关注的问题。

我国西北地区的黑河区域具有典型的地表非均一性特征^[1,2]。本文主要关注的张掖地区正好处于黑河区域地形变化梯度最大区域,地形的起伏变化对中尺度风场有直接的强迫作用,形成因地形而引起的热量和物质(主要是水物质)输送,进而对区域的潜热和感热通量产生局地地形再分配作用。此外,张掖地区也处于黑河区域下垫面植被覆盖率变化梯度最大区域,张掖微气象站处于小满乡的农田之中,四周都是农田植被区;但若从稍大的空间尺度来看(站点周围 40 km),则张掖四周基本都是戈壁沙漠;而从更大一些的空间尺度来看(站点周围 40~100 km),则可以看到站点北偏东约 30°,和南部都是农田植被区,而其东北部则主要为半荒漠和沙漠地区。这种典型的绿洲-荒漠地表导致的局地绿洲-荒漠大气环流和气候因子的影响^[3~6],也同样对潜热和感热通量的分布有重要的影响。

由于以上各因素的影响,张掖地区的地表能量通量有其特殊的复杂之处。1990~1992 年期间,中日科学家在此地区进行了“黑河地区地气相互作用实验”(HEIFE),为系统研究该地区陆面过程提供了丰富的资料,其中也包括了地表能量平衡的一些资料^[7]。

目前,对黑河区域的地表能量通量研究主要集中在两个方面:卫星遥感和模式模拟。马耀明等利用卫星 LANDSAT 遥感数据估算了黑河实验区夏季和深秋的地表反射率和能量通量^[8,9],并且基于卫星遥感和地面观测提出相应的参数化方法^[10]。

卫星遥感的方法虽然比较直接,但是也有不能做预报的缺点。运用成熟的中尺度区域大气模式研究这类问题是另一个有效的途径。阎宇平等^[11]运用 RAMS 模拟黑河流域地区的地表能量通量,姜金华等^[12]也用 RAMS 做了黑河下垫面的大涡模拟及潜热、感热通量的计算。然而,以上运用 RAMS 模式针对黑河地区地表能量通量的数值模拟在以下几个方面并未能达到另人满意的程度,(1)其模拟值的最大误差达到了 30%,甚至更高,(2)其模拟时间较短,都为 24 小时,在此时间内,模式有可能仍处于对初始值的调整之中,所以输出的模拟结果有可能缺乏真实性,(3)两种模拟所选择的都是晴好天气过程时间段,这种情况相对简单,并不能证明 RAMS 在阴雨天气过程中的模拟黑河区域的地表能量通量的能力。

本文在前人工作的基础上主要做了如下改进:(1)对同一时间段、同一地区和相同的输入资料,使用了多达 40 余种不同的参数化方案和土壤特征值的搭配,进行了较系统的数值实验,确保能找出对模拟结果影响最大的因子;(2)运用 RAMS 对黑河区域做了长达 30 天的连续模拟,更能说明模拟结果是长时间稳定的,更能反映出 RAMS 应用于中时间周期研究、预报的潜力;(3)本次模拟的时间段内,既包含晴好的天气,也有多云及降雨的天气过程,更能反映出 RAMS 对全天候的模拟能力。限于篇幅,本文仅给出比较典型的 4 种土壤特征值搭配的模拟结果。

2 模拟设计方案和资料介绍

2.1 模拟区域

本次模拟采用三层网格嵌套,模拟区域中,各层格点都以张掖站(38.93°N, 100.43°E)为中心。在尺度上为了兼顾方便同化 NCEP 再分析资料^[13]和为模拟目标区域(张掖)提供足够的空间分辨率,第一层网格格点距选为 40 km,第二层网格格点距 10 km,第三层网格格点距为 2.5 km。模拟区

域分别为：600 km×600 km、180 km×180 km、45 km×45 km。

2.2 模拟时间

本文的模拟时间为 1991 年 6 月 20 日 12: 00 至 1991 年 7 月 20 日 12: 00 (部分到 24 日), 时间积分步长为 60 s。

2.3 地形、土地利用和植被输入资料

RAMS 地形和植被输入资料由科罗拉多大学 (University of Colorado) 提供的数据初始化, 包括来自 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 的土地利用资料, 其分辨率为 1 km; 来自 USGS (U. S. Geological Survey) 的地形高度资料, 植被类型资料, 其分辨率也为 1 km; 来自 UN FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 的土壤纹理资料, 其精度为 4 km; 科罗拉多大学 (Colorado State University) 提供的全球气候平均的海温资料, 精度约为 100 km。模拟地区的地形高度、植被叶面积指数和植被覆盖率见图 1 所示。

2.4 模式初始化资料

区域大气模式 RAMS 的标准输入包括: 气压层格点数据、地面探空资料、地面观测资料。本文中气压层格点数据采用精度为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料, 地面探空资料采用黑河实验日方的民勤、张掖、酒泉站资料, 地面观测资料采用了日方设在民勤、G9 (站点号)、南戈壁、沙漠、平川、绿洲站的自动气象站资料。

2.5 参数化方案和边界条件

RAMS 计算地表与近地面层大气之间的感热、潜热通量及动量交换时, 使用的是 Louis 方案^[14]。该方案是用解析表达式来近似需要迭代法求解的 Bussinger 通量廓线^[15]。

RAMS 对土壤温度和湿度的处理采用了 Tremback 和 Kessler^[16] 的多层土壤方案, 这个方案舍弃了较耗计算机时的迭代方案^[17,18], 而假设一个有限厚度的土壤-大气交界层, 把地表温度和地表土壤含水量作为诊断变量, 而不是预报变量。RAMS 手册建议采用 7~12 层土壤, 厚度为 0.5 m。

速度分量的侧边界条件使用 Sommerfeld 辐射边界条件^[19], 这种条件具有解耦特性, 化简了计算, 而且近似程度高。标量的边界条件采用外插的流出条件和零梯度的流入条件。这里不采用循环边

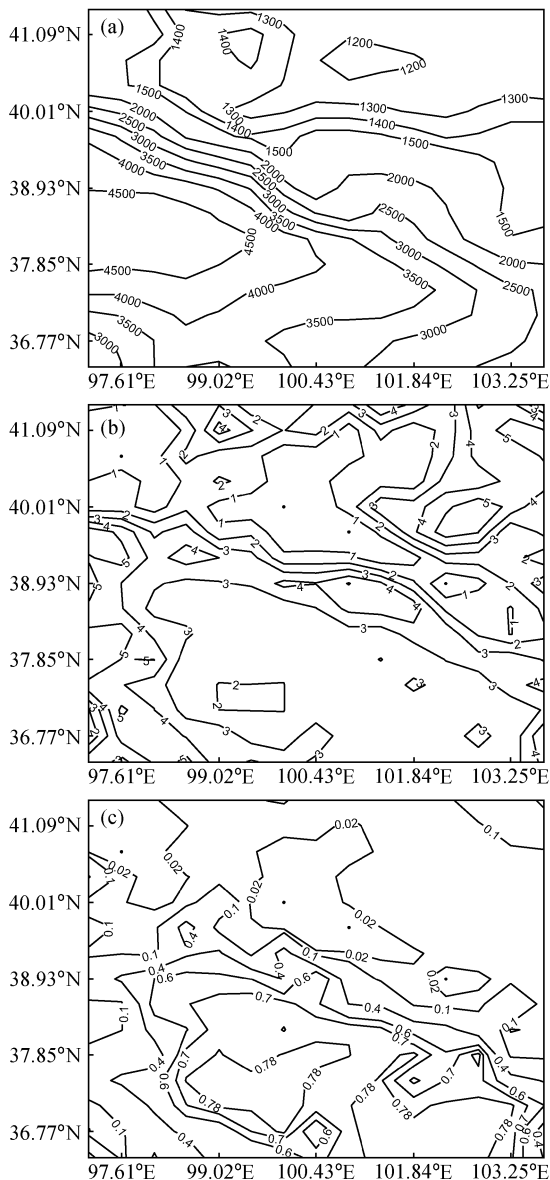


图 1 模拟地区的地形高度 (a, 单位: m)、植被叶面积指数 (b) 和植被覆盖率 (c)

Fig. 1 (a) Terrain height (m), (b) leaf area index, and (c) vegetation fractional coverage in the simulation area

界条件是因为模拟区域东西和南北边界地形高度相差太大, 循环边界条件容易引入虚假的扰动。

2.6 四种模拟方案

在以上的参数化方案和边界条件的框架下, 本文进行了 40 余组不同的初始土壤特征值实验, 限于篇幅, 选取最有代表性的 4 种 (见表 1)。其中实验 1 的情况是大多数模拟者所使用的, 即仅改动参数化方案和边界条件, 只是适当的修改初始土壤温度, 而不修改土壤湿度, 例如参考文献[20]。在实

表 1 4 个实例中分别使用的土壤参数
Table 1 The parameter of soil in each case

	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4
土壤层数	11	11	11	15
土壤初始温度	实测值	实测值	实测值	实测值
土壤初始湿度	RAMS 默认	垂直均匀分布	实测值	实测值
土壤厚度/m	0.98	0.98	0.98	4.0

验 2 中，根据实测资料，垂直均一地初始化了土壤湿度。在实验 3 中，根据实测资料，把实测土壤湿度垂直插值到土壤模式各层。在实验 4 中，加大土壤层数，模拟到 4 m 深处，并采用垂直非均匀的土壤湿度赋值。

3 模拟结果和分析

3.1 地表潜热通量

四种实验条件下，地表潜热通量的模拟值和实测资料比较如图 2 所示。HEIFE 对潜热和感热的观测资料并不丰富，仅是中方资料有 1991 年 6 月和 7 月的部分记录（潜热通量和感热通量的直接测量很少，由于这不是黑河试验的常规观测，而是野外加强观测，所以资料时间很分散），这也是本次模拟实验选取 1991 年 6 月 20 日 12:00 至 1991 年 7 月 20 日 12:00 时间段的原因。从资料中可见，在初夏季节黑河地区绿洲站的地表潜热通量日最大值大约处于 480 W/m² 左右，且这个最大值随着时间稍有增加，到 7 月 10 日左右接近 500 W/m²。这种增加主要是由于日期靠近盛夏，当地农作物春小麦和玉米套种逐渐生长成熟，蒸散稍有增加。对比模拟结果可见，实验 1（图 2a）并没有能力对黑河区域的绿洲区进行很好的反演。这个模拟结果如果仅考虑模拟的第一天，那么与姜金华等 2005 年的结果^[12]极为相似，他们对此解释为 RAMS 的陆面模块（LEAF）地表参数不能较好地反映黑河地区的植被特征，而比较我们的后三个实验则可以发现，造成模拟失败的主要原因是使用 RAMS 默认的土壤初始湿度条件并不适合。RAMS 默认的土壤初始设置是为了让模式运行者运行其检验数据，其中心区域为纽约（40.5°N，74.0°W）。巨型城市下垫面地表特征与黑河区域下垫面地表特征截然不同，故使用默认地表特征初始化模拟黑河绿洲区域得到的结果与实测结果截然不同，有相当的沙漠特

征。实验 2（图 2b）和实验 3（图 2c）较为类似，能得到与实测值比较相符的结果，然而都普遍偏高。其原因可解释为：实验 2（图 2b）中，使用了垂直均匀的土壤含水量初始化，造成土壤表层含水量高于实际值，使得潜热通量大于实测值。图 2b 中，在 7 月 15 日以后，潜热通量明显递减，也是由于模式早期蒸散过渡，而造成在模式运行的后期，模拟得到的土壤含水量要比实际的土壤含水量明显偏低。实验 3 采用了垂直插值的土壤含水量初始化，使得结果误差大大减小，然而最大偏高仍可达 20%，若观察土壤含水量变化，可发现实验 3 也存在较弱的早期过渡蒸散而造成地下水含量降低的现象。实验 4（图 2d）主要参考了许多气候模式的土壤厚度，将其提升为 15 层，总厚度为 4 m，考虑了更详细的土壤过程，使得模拟结果和实测值更为接近，除了 7 月 8 日一天以外（相差约 40 W/m²），潜热通量最大值相差均不过 20 W/m²，误差在 5% 以内。此外，这种情况下模拟的潜热通量与实测资料相比，既有略微高估的，也有略微低估的，总体则趋于平衡。由图 2d 也能看出潜热通量在 7 月后随时间有微弱递增的趋势，这也与实测资料相符。最后，7 月 20 日是一次天气降雨过程，四种情况都能得到这次降雨，而实验 1 与实验 2、实验 3 和实验 4 情况不同，实验 1 在降雨之时和其后短时间内潜热通量突增，这是由于相对绿洲的植被覆盖率，实验 1 给出的土壤含水量偏小，造成土壤长期缺水，降雨之后由于存在强大的植被蒸腾，造成了潜热通量的急剧增加，在雨水蒸散完之后，则又跌回降雨前缺水的情况。这种情况的出现也是由于 RAMS 对植被的处理是一个单向过程，即植被影响区域气候，而区域气候则不影响植被，故在 7 月 20 日前一个月的连续极度缺水，并没有使植被受到丝毫损害，在存在地表水后，植被的蒸腾功能可以完全正常运转。实验 2、实验 3 和实验 4 在降雨时，及其前后都出现了潜热通量的大幅下降，这是由于这三种情况土壤都并不缺水，而空气湿度的增大（接近饱和）极大地抑制了蒸发和蒸腾作用。综上所述，要获得与实测结果较为相符的潜热通量模拟结果，至少需要以实测值为基础的垂直非均匀土壤湿度初始化。虽然土壤温度在地下 0.8 m 左右仅有季节震荡，然而土壤湿度在这个深度却会有较为明显的月变化，在 RAMS 模式推荐的 0.5 m 深度则能看

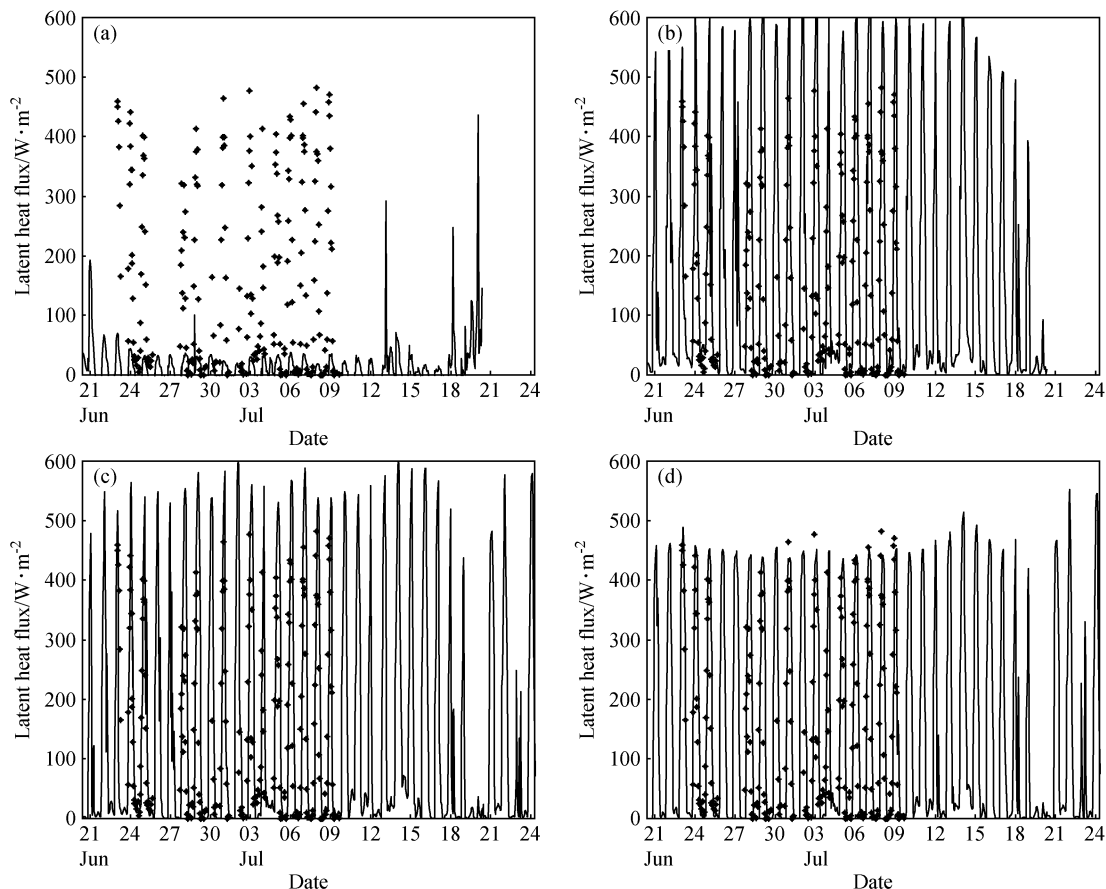


图2 张掖站地表潜热通量的实测资料(星号)和模拟结果(实线): (a) 实验1; (b) 实验2; (c) 实验3; (d) 实验4

Fig. 2 Observed (asterisk) and simulated (solid line) latent heat fluxes at Zhangye station: (a) Case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4

出土壤湿度有较明显的日变化。所以要得到更为精细的潜热通量则需要参见气候模式, 考虑至少 3.2 m 厚的土壤层。

3.2 地表感热通量

图3给出了四种情况下模拟地表感热通量的结果。由实测资料可见, 在初夏季节, 黑河绿洲区域白天感热最大值约在 $50 \sim 75 \text{ W/m}^2$ 之间, 仅有7月5日一天远远超过 100 W/m^2 , 这也有可能是仪器误差造成的。模拟结果中, 实验1完全不能得到与实测资料相近的结果。对比其潜热通量的结果可知, 虽然实验1在地表植被覆盖率、叶面积指数、土地类型和土壤纹理都与实验2、实验3和实验4一样, 但实验1的能量通量, 波恩比都具有明显的荒漠特征, 由此可见, 土壤含水量对于地表能量平衡有着决定性的作用, 这个结论是与 Henderson^[21, 22] 实验结果完全吻合。实验2和实验3的结果比较相近, 都能对白天的感热通量做出较好的模拟, 而对黑河绿洲地区夜间的负感热通量则不能较

好的反演。实测资料中, 夜间负感热通量可达到 -50 W/m^2 , 甚至更高, 而实验2和实验3中的夜间负感热通量都只有 -10 W/m^2 左右。实验4模拟夜间感热通量的能力则有较大改善, 然而也不能比较完美地反演出实测资料的结果。对于白天感热通量的模拟, 实验4在7月3日以前与实测资料吻合很好, 也能反映出7月5日感热通量的突然增大, 然而增加幅度却小于实测值, 在7月6~12日期间则对地表感热通量稍有低估。造成误差的原因有可能是NCEP再分析资料的误差, 或地形、土壤、植被资料进行插值时所造成的。由图2我们可以总结出, 在合理调整土壤湿度之后, 在白天很容易得到可以接受地表感热通量, 即使只是使用平均土壤湿度做垂直均匀的初始化也可以, 然而, 若要改善夜晚负感热通量的模拟, 就需要更精细地考虑土壤深层结构。此外, 白天对感热起决定性作用的太阳辐射, 而夜晚在太阳辐射消失之后, 因地形作用和地表参数空间分布差异而形成的局地环流则对感热通

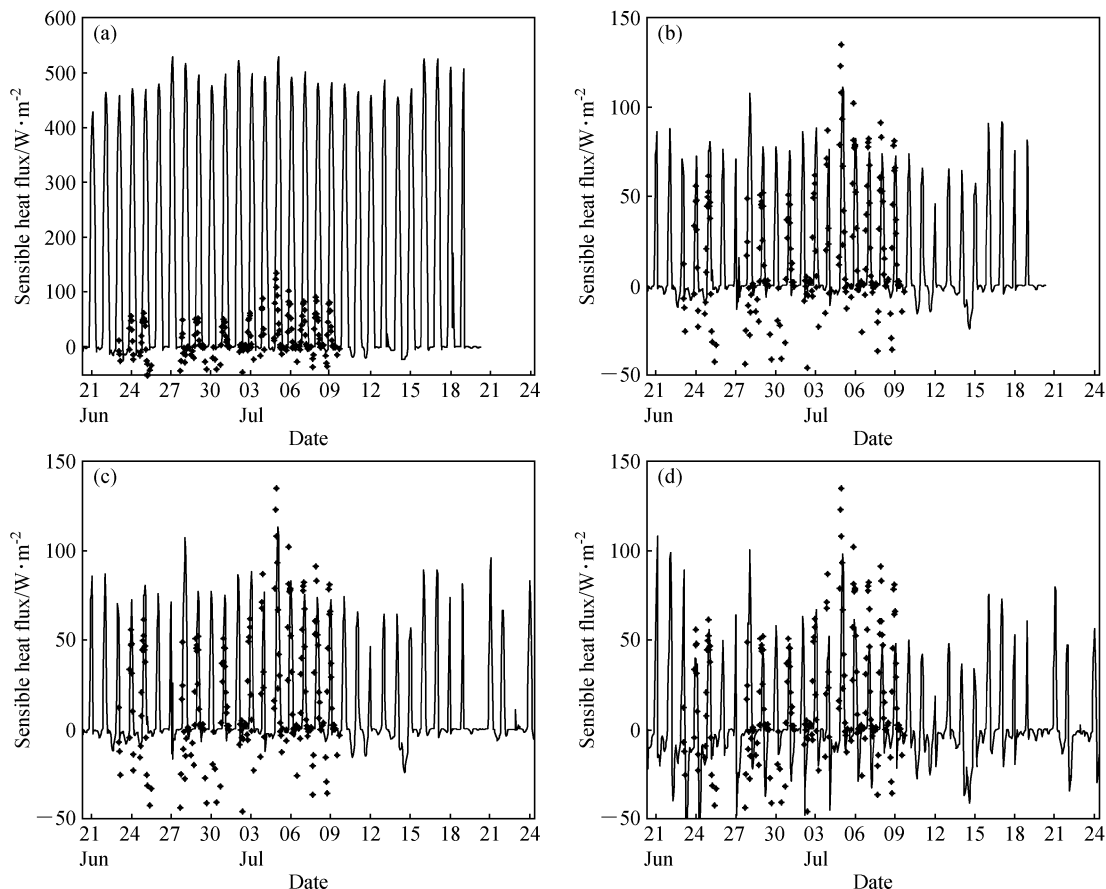


图3 同图2, 但为感热通量

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for sensible heat fluxes

量有重大的影响,要得到更好的夜晚地表感热通量的模拟,还需要有更加可靠的地形资料。

3.3 土壤温度

由日方的张掖自动气象站资料可以得到土壤各层温度变化。由图4中的实测资料可知,0.2 m以上土壤层温度受地表太阳辐射强迫日变化特征非常明显,其温度准正弦变化曲线振幅随深度增加而减小。在0.4 m深度处,我们可以同时观察到土壤温度的日变化和季节变化,其中日变化振幅已经非常微弱,在2℃以下。到0.8 m深度,使用普通仪器已经无法观测到其温度的日变化,只剩下土壤温度的季节微弱变化。也正是因为这样的事实,RAMS才建议模式运行者采用0.5 m厚的土壤层,但这种建议只是在做短期模拟和研究降雨、风场时适用,对研究土壤温度、地表能量通量却并不合适。实验1对土壤各层温度的模拟都严重偏高,由此也可见土壤含水量在增加土壤热容量和潜热方面对土壤温度有决定性的影响,即使初始温度与实测资料非常

匹配,错误的土壤含水量也能让土壤温度迅速地转变到与实测资料不相同的相态。这个结论也是从另一个方面对 PILPS 实验第一阶段所得结果^[21,22]的再现。实验2在模式运行前10天中,0.2 m以上土壤层温度的模拟较好,而10天之后则高于实测值,这是前面所说的高估了蒸散作用(潜热通量)的结果。在0.2 m以下的土壤层温度则从模式开始运行就被高估,这是由于对土壤含水量采用了垂直均匀的初始化,这使得深层土壤含水量的初始值就低于实测值。但是我们可以看到,如果模式运行者并不关心深层土壤温、湿度,而且只是运用 RAMS 做1~3天的模拟研究,这种方法是简单实用的。实验3和实验4都采用了垂直非均匀的土壤湿度初始化,故模式模拟的结果也比较类似。经过比较,我们可以发现,在7月9日之后,实验3对0.2 m以上土壤层温度的模拟结果开始比实测值偏大,这种效应在这个厚度层中随深度增加越发明显。这种结果是与前面地表潜热通量分析中得到的蒸散过度结

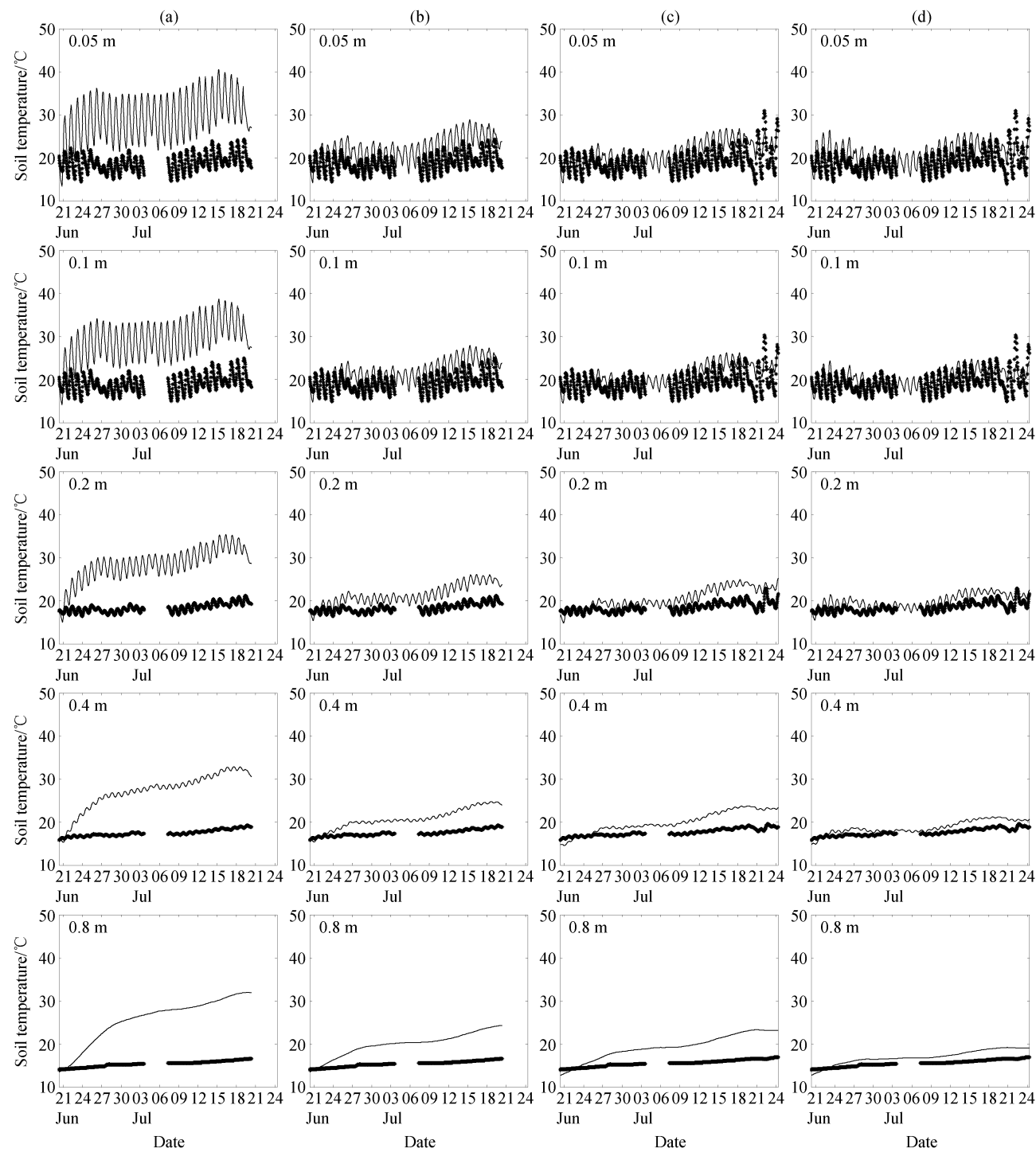


图 4 张掖站 0.05 m, 0.1 m, 0.4 m, 0.8 m 各深度的土壤温度实测资料 (星号) 和模拟结果 (实线) (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 实验 1; (b) 实验 2; (c) 实验 3; (d) 实验 4

Fig. 4 Observed (asterisk) and simulated (solid line) soil temperature at depths 0.05 m, 0.1 m, 0.2 m, 0.4 m, and 0.8 m at Zhangye station; (a) Case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4

论相吻合的, 与实验 2 不同, 实验 3 有较大的深层土壤含水量, 故能在较长时间内还维持着与实测资料的高度吻合。实验 4 由于模拟厚度深达 4 m, 在

整个模拟期间, 其土壤含水量是平衡的, 较大的波动只是出现在 0.2 m 以内, 但是 0.8 m 深的土壤含水量同样有可观测到的月、季变化, 这也是造成实

验 3 在中后期模拟误差的重要原因。在 0.2~0.8 m 深的土壤层中, 实验 3 很明显地高估了土壤温度, 特别是在 0.8 m 深, 这是由于实验 3 考虑的土壤层厚度仅为 0.98 m, 底边界条件对其模拟的影响是非常明显的。相比较, 模拟土壤厚度深达 4 m 的实验 4 的结果则更接近于实测资料, 其轻微的误差主要来自早期模式对初始资料的调整和底边界条件的影响。土壤温度变化是对整个土壤层能量平衡的反应, 通过对土壤温度的模拟, 我们可以得出土壤温度和土壤含水量密切相关, 合理的土壤含水量是得到合理的土壤温度模拟的前提条件。同时, 土壤厚度也是模拟土壤温度的重要影响因子, 模拟结果表明, 为了得到更深层和较长期的合理的土壤温度模拟值, 土壤厚度至少应该大于 3.2 m。

4 结论

本文运用 RAMS, 在多种土壤层初始参数条件下模拟了黑河区域的绿洲地区(张掖)的地表能量通量和土壤温度。

RAMS 的陆面模块(LEAF)地表参数来自科罗拉多大学提供的全球资料库, 但是其中并没有包括土壤初始温度和土壤初始湿度。由以上模拟结果, 我们可以看到在各种地表能量的模拟中, 土壤含水量都有着决定性的影响。土壤含水量的初始赋值是否正确, 模拟过程中的计算是否正确, 就决定了各种地表能量通量和土壤温度的模拟是否成功。对于土壤含水量的初始赋值, 最低要求是使用整层土壤的平均含水量做垂直均一的初始化。在这种赋值条件下, RAMS 在短期(一般 3 天以内)模拟浅层土壤能有较好的表现, 但容易对地表潜热通量造成约 20% 的高估。在时间超过 3 天以后, 这种赋值条件下 RAMS 的模拟质量将迅速下降。采用垂直非均匀的土壤初始含水量赋值则能得到更接近实际的模拟结果, 这种情况下, RAMS 对较深层土壤的模拟能力会大大提升, 对于地表能量通量模拟的时间稳定性也更有保障。

土壤层厚度对模拟地表能量通量和土壤温度也是一个非常重要的因子。RAMS 技术手册建议模式运行者使用 0.5 m 的土壤厚度, 这也是 RAMS 的默认设置。然而这种情况只是适合较为短期的模拟(一般 5 天)。即使增加到 0.98 m 的厚度, 且土壤含水量初始化如实测资料完全相符, 模式也会在

15 天左右开始逐渐偏离实测资料。更为细致和长期的模拟应该考虑使用气候模式推荐的大于 3.2 m 的土壤厚度。RAMS 在这种条件下显示出很好的时间稳定性。

RAMS 设计者的主要考虑是做中短期的区域天气模拟, 因此, 在不修改代码的情况下, RAMS 并没有很好的气候模拟能力, 因为其默认在模拟过程中, 模拟区域的所有水体(海洋、河流、湖泊、沼泽等)的温度是保持不变的。故在有水体存在的区域进行 1 个月以上的模拟, RAMS 有可能会产生一些错误的扰动信号。

在调整好土壤参数和选取合适的时间尺度的情况下, RAMS 对我国西北部复杂地形地表区域的地表能量和土壤温度具有良好的模拟能力。

参考文献 (References)

- [1] 马耀明, 王介民. HEIFE 非均匀陆面上区域能量平衡研究. 气候与环境研究, 1997, **2** (3): 293~301
Ma Yaoming, Wang Jiemin. The study of regional surface heat fluxes over the heterogenous landscape of HEIFE. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1997, **2** (3): 293~301
- [2] 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, Lü Shihua. Numerical simulation of local climatic effect of heterogeneous underlying surface. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20** (4): 354~361
- [3] 刘树华, 胡予, 胡非, 等. 沙漠-绿洲陆-气相互作用和绿洲效应的数值模拟. 地球物理学报, 2005, **48** (5): 1019~1027
Liu Shuhua, Hu Yu, Hu Fei, et al. Numerical simulation of land-atmosphere interaction and oasis effect over oasis-desert. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (5): 1019~1027
- [4] 刘树华, 胡予, 胡非, 等. 绿洲效应的模拟及内外因子的敏感性实验. 大气科学, 2005, **29** (6): 997~1009
Liu Shuhua, Hu Yu, Hu Fei, et al. Numerical simulation of oasis effect and its sensitivity test of inside and outside factors. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 997~1009
- [5] Liu Shuhua, Pan Ying, Deng Yi, et al. Numerical simulation experiment of land surface physical processes and climate effect in forest underlying surface. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **20** (1): 72~85
- [6] Liu Shuhua, Liu Heping, Hu Yu, et al. Numerical simulation of land surface physical processes and land-atmosphere interactions over oasis-desert/Gobi region. *Science in China*

- (Series D: Earth Sciences), 2007, **50** (2): 290~295
- [7] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果. 高原气象, 1994, **13** (3): 225~236
Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. Some achievements in scientific research during HEIFE. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1994, **13** (3): 225~236
- [8] 马耀明, 王介民, Menenti M, 等. 黑河实验区地表净辐射区域分布及季节变化. 大气科学, 1997, **21** (6): 743~749
Ma Yaoming, Wang Jiemin, Menenti M, et al. The distribution and seasonal variation of regional net radiation in FEIFE area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (6): 743~749
- [9] 马耀明, 王介民, Menenti M, 等. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量. 气象学报, 1999, **57** (2): 180~189
Ma Yaoming, Wang Jiemin, Menenti M, et al. Estimation of flux densities over the heterogeneous land surface with the aid of satellite remote sensing and field observation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (2): 180~189
- [10] Ma Yaoming, Wang Jiemin, Huang Ronghui, et al. Remote sensing parameterization of land surface heat fluxes over arid and semi-arid areas. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (4): 530~539
- [11] 阎宇平, 王介民, Menenti M, 等. 黑河实验区非均匀地表能量通量的数值模拟. 高原气象, 2001, **20** (2): 132~139
Yan Yuping, Wang Jiemin, Menenti M, et al. Numerical simulation of surface energy fluxes over heterogeneous land surfaces in HEIFE area. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20** (2): 132~139
- [12] 姜金华, 胡非, 角媛梅. 黑河绿洲区不均匀下垫面大气边界层结构的大涡模拟研究. 高原气象, 2005, **24** (6): 857~864
Jiang Jinhua, Hu Fei, Jiao Yuanmei. Large-eddy simulation of atmosphere boundary layer over heterogeneous land surface in oasis area of Heihe River basin. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (6): 857~864
- [13] Walko R L, Tremback C J. Model Input Namelist Parameters. <http://www.atmet.com/html/docs/rams/ug44-mod-namelist.pdf>, 2001-10-15.
- [14] Louis J F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound. -Layer Meteor.*, 1979, **17**: 187~202
- [15] Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 181~189
- [16] Tremback C J, Kessler R. A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models. Preprints, 7th Conference on Numerical Weather Prediction, Montreal, Canada, AMS, 1985. 17~20
- [17] Mahrer Y, Pielke R A. A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1977, **50**: 98~113
- [18] McCumber M C, Pielke R A. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model I. Soil layer. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 9929~9938
- [19] Klemp J B, Lilly D K. Numerical simulation of hydrostatic mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 78~107
- [20] McEwen B, Jackson P L. Hind-casting of High Resolution Atmospheric Fields over Complex Terrain: Model Initialization Issues (Final Report). British Columbia Water, Land and Air Protection, 2003
- [21] Henderson-Sellers A. Soil moisture: A critical focus for global change studies. *Global and Planetary Change*, 1996, **13**: 3~9
- [22] Henderson-Sellers A. Soil moisture simulation: Achievements of the RICE and PILPS intercomparison workshop and future directions. *Global and Planetary Change*, 1996, **13**: 99~115