

文章编号:1001-8166(2011)03-0300-11

陆面过程模型对下垫面参数动态变化的敏感性分析^{*}

蔡 福^{1,2,3}, 周广胜^{1*}, 李荣平³, 明惠青⁴

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;

3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110016; 4. 辽宁省气象科技服务中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要:利用 2006 年锦州玉米农田生态系统野外观测站动态连续的通量、气象及生物因子观测数据, 分析了 BATS1e 陆面模型对动态的粗糙度(Z_0)、叶面积指数(LAI)、植被覆盖度($FVEG$)及反照率(α)变化的敏感性。结果表明: Z_0 的动态变化对表层土壤温度(SST)和感热(SH)的模拟有一定影响, 主要发生在玉米农田从裸土向有植被覆盖转变这一阶段。 LAI 的动态赋值可以改善 SST 、净入射短波辐射(f_{rs})、 SH 和 SWC 的模拟效果, 对潜热(LE)的模拟也有一定影响。动态 $FVEG$ 对上述各变量的模拟影响最为明显, 当 $FVEG$ 较小时敏感性最大。 α 的动态赋值可影响 SST 、 SH 和 LE 的模拟, 其中 SH 反应最为敏感。各动态参数越接近模型设定值, 模拟结果受影响越小; 各参数间关系密切, 单一参数的改进可提高某些变量的模拟精度, 但不一定改善所有变量的模拟效果。

关 键 词:参数动态变化; 陆面过程; 敏感性

中图分类号:P461; S181

文献标志码:A

1 引 言

陆面过程是发生在土壤层、陆地表面到近地层大气之间的各种物理、化学和生物学过程, 既包括土壤、植被和大气之间的能量传输、物质输运等物理过程以及碳、氮、磷、硫等元素循环和地球化学过程, 也包括植被的生理生态过程等^[1], 各种过程对气候系统产生反馈作用^[2], 其时空尺度的不同影响到局地、甚至全球尺度的大气环流和气候变化^[3], 使气候系统对陆面过程具有很强的敏感性。因此, 深入研究各类下垫面与大气之间相互作用的物理、生化过程, 不断改进和发展陆面过程模型, 有助于更准确地模拟地表温度、湿度和大气边界层等与气候研究密切相关的信息, 也是改进气候模式及开展全球气候变化研究的迫切需要^[4~6]。近 20 年来, 国际地圈生物圈计划 (IGBP)、全球能量和水分循环试验

(GEWEX) 及水循环的生物圈方面 (BAHC) 等计划的启动, 有效地推进了陆面物理过程的机理及模式研究^[7]。陆面过程模型的发展经历了第一代的吊桶模型 (bucket model), 第二代考虑植被生理作用的陆面物理过程模型, 如生物—大气传输模型 (BATS)^[8]、简单生物圈模型 (SIB)^[9] (其物理过程与 BATS 类似)、简化的简单生物圈模型 (SsiB)^[10], 以及考虑碳循环作用及植被生物化学过程的第三代陆面过程模型, 如美国国家大气研究中心的陆面过程模型 (NCAR LSM)、简单生物圈模型第二版 (SiB2)^[11]、通用陆面过程模型 (CLM、CoLM) 等。与第二代相比, 第三代模型增加了生物化学模块, 考虑了植被的生理生化甚至是各类化学元素 (C、N) 的循环过程, 并引入基于遥感信息的参数, 但这些模型所用的植被参数和物理过程参数化方案没有发生很大的变化, 大都还是从 BATS 模型的物理过程基础上

^{*} 收稿日期: 2010-05-25; 修回日期: 2010-09-13.

^{*} 基金项目: 国家杰出青年科学基金项目“大气边界层物理和大气湍流” (编号: 40625015); 国家重点基础研究发展计划项目“中国陆地生态系统对未来气候变化的脆弱性与适应性评估” (编号: 2010CB951303) 资助.

作者简介: 蔡福 (1980-), 男, 辽宁海城人, 助理研究员, 主要从事区域气候变化和陆面过程方面的研究. E-mail: caifu_80@163.com

^{*} 通讯作者: 周广胜 (1965-), 男, 江苏高淳人, 研究员, 主要从事全球变化与陆地生态系统观测与模拟研究.

E-mail: gszhou@cams.cma.gov.cn

发展起来的。目前,经过不断改进,BATS 已经发展成 BATS1e (BATS version 1e),是当前国际上较为流行的陆面过程模型,但其物理过程参数化方案仍与事实存在较大差距,其中地表反照率(α)、粗糙度(Z_0)和植被覆盖度(FVEG)等重要参数^[15~17]在同类下垫面都使用固定值,叶面积指数(LAI)仅与下层土壤温度简单相关,没有考虑随时间的动态变化。这些参数的不准确表达直接影响到地—气间各种通量的准确计算,进而影响各气象要素的模拟,如热量通量影响地表温度的变化、动量通量影响大气中风速的分布、水汽通量影响空气中的水分含量和降水^[18]。因此,利用动态连续的下垫面参数替代静态的下垫面参数可使下垫面参数更符合实际,从而可能有效地改善模拟结果。但受观测资料获取的限制,目前相关研究较少。为获取陆面过程模型下垫面的动态观测资料,国内外已经开展了不同类型下垫面的大量野外观测研究,如第一次国际卫星陆面过程气候实验(FIFE)、亚马孙流域大尺度生物—大气圈试验(LBA)、水文与大气先行性实验(HAPEX)、欧洲沙漠化地区陆面研究计划(EFEDA)、北方生态系统—大气研究(BOREAS)、北半球气候过程陆面试验(NOPEX)等计划^[19]和我国启动的“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”(HEIFE)、“亚洲季风试验—青藏高原、淮河试验”(GAME-Tibet、HUBEX)、“第二次青藏高原科学试验”(TIPEX)、“内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用”(IMGRASS)等陆面过程试验^[20,21],以及当前基于碳通量研究的全球通量观测网络(FLUXNET)和中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)等^[22]。自2003年以来,本研究组已在内蒙古典型草原和荒漠草原、盘锦芦苇与水稻湿地、锦州玉米农田、北方针叶林、沈阳城市建立了7个生态系统通量观测系统,为陆面过程模型下垫面的参数获取、参数化方案研究提供了重要的数据基础^[23,24]。

玉米农田的冠层高度、LAI、FVEG等随生育期变化很大,从而使得 Z_0 和 α 等动力与热力参数在一年中不断改变,导致辐射、水分、热量的分配和传输等一系列物理过程随之变化,进而对局地大气环流和区域气候产生影响。东北地区是我国春玉米最大产区,也是我国气候变暖最为剧烈的地区之一。研究表明,受气候变暖不断加剧^[25,26]的影响,玉米晚熟品种种植面积不断扩大、产量增加^[27],生产布局和结构发生变化^[28,29]。因此,针对东北地区玉米种

植区开展动态下垫面参数研究不仅有助于增进对陆—气相互作用过程的理解,也可为准准确预测未来气候变化提供参考。

本研究试图利用锦州玉米农田生态系统野外观测站的长期观测资料,基于BATS1e模型,研究陆面过程模型对动态下垫面参数的敏感性,旨在为陆面过程模型的改进和完善提供依据。

2 研究地点与资料来源

2.1 研究地点

锦州玉米农田生态系统野外观测站隶属于中国气象局沈阳大气环境研究所,位于东北玉米带,地处辽宁省锦州市太和区英屯村玉米地(41°49'N, 121°12'E,海拔17 m)^[30]。该区属于典型的温带季风型气候,年平均气温9.5℃,最冷月1月平均气温-8.0℃,最热月7月平均气温24.4℃,年无霜期为144~180天,多年平均年降水量565.9 mm。玉米是主要作物,生长季为5~9月,土壤为典型棕壤,pH值为6.3。该站建有3.5 m高的涡度相关观测系统和5 m高的气象梯度观测系统。涡度相关观测系统配有三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Ltd, USA)和快速响应红外CO₂/H₂O分析仪(Li-7500, Li Cor Inc, USA);气象梯度观测塔可进行3.5 m和5 m高度的气温、湿度和风速观测,4.5 m高度的光合有效辐射观测,3.5 m高度净辐射观测,5 m高度风向观测,土壤剖面5、10、15、20、40和80 cm处的土壤温度监测,以及8 cm高度的地表热通量观测。Driver-2000水分观测系统对0~100 cm深度每10 cm一层共10层的土壤水分进行观测。

2.2 资料来源

气温、比湿、降水、风速、太阳总辐射、向下长波辐射、气压等气象要素为BATS1e模型的驱动变量,其中气温、比湿、降水选用气象梯度观测塔5 m高度资料。风速和气压来自涡度相关观测。通量观测系统测得的感热通量、经WPL校正后的潜热通量、净入射短波辐射、Driver-2000水分观测系统测得的表层(10 cm)土壤体积含水量以及表层(5 cm)土壤温度资料用于模拟结果验证。这些资料都是通过质量控制后的30 min平均值。由于天气和系统故障等原因,无法获取连续一整年数据,本研究选取相对连续的2006年6月1日至8月9日玉米出苗至乳熟阶段的观测资料(个别缺测资料,利用前后时次资料进行插补)用于模型输入和验证,其中LAI、 Z_0 、FVEG基本处于最小和最大之间,可以满足研究需

要。同时,2008 年玉米生育期内每 3 天的株高观测资料和 2006 年玉米出苗、三叶、七叶、拔节、抽雄、乳熟 6 个生育期的株高和 LAI 观测资料用于求取研究时段玉米株高和 LAI 的动态连续数据。

3 模型介绍及试验设计

3.1 模型介绍

BATS1e 模型为典型的单层大叶模型,建立了关于植被覆盖表面上空的辐射、水分、热量和动量交换以及土壤中水、热过程的参数化方案,考虑了植被在陆一气之间水热交换过程中的作用,对植被生理过程进行了较细致的描述。该模型已与多个大气环流模式耦合,应用非常广泛^[31~33],有 1 层植被、1 层雪盖和 3 层土壤,其中表层土壤厚度为 10 cm,第二层深 1~2 m 为根层,第三层深 3 m。模型考虑了降水、降雪、蒸发蒸散、径流、渗透、融雪等过程,利用强迫一恢复法^[34,35]计算各层土壤温度。植被冠层温度和湿度通过求解能量平衡和水分平衡方程得到。土壤湿度由求解各土壤层含水量的预报方程得到。根据土壤湿度、植被覆盖和雪盖(包括植被对雪的遮挡)状况计算地表反照率。陆一气间的感热通量、水汽通量和动量通量由相似理论导出的地面拖曳系数公式计算。模型划分地表植被为 20 类,土壤质地为 12 类(沙土 1~粘土 12),土壤颜色为 8 类(淡 1~黑 8)。对玉米农田而言,上述 3 种属性值分别为 1、7 和 5。

3.2 BATS1e 模型的参数设定

在 BATS1e 模型中,玉米农田下垫面全年设 $FVEG$ 为 0.85, Z_0 为 0.06 m。考虑 0.2 m 深土壤温度的变化反映 LAI 季节变化,具体计算如下:

$$F_{SEAS}(T_{g2}) = 1 - 0.0016 \times (298.0 - T_{g2})^2 \quad (1)$$

$$L_{AI} = L_{AI}^{MIN} + F_{SEAS}(T_{g2}) \times (L_{AI}^{MAX} - L_{AI}^{MIN}) \quad (2)$$

式中: $273.16 < T_{g2} < 298$ 为下层(20 cm)土壤温度(K), $F_{SEAS}(T_{g2})$ 为与下层土壤温度有关的季节因子, L_{AI}^{MAX} 和 L_{AI}^{MIN} 为冠层最大和最小 LAI , 分别为 6 和 0.5。

地表反照率综合考虑土壤和植被的共同作用及其覆盖地面的比例,其中土壤反照率考虑土壤湿度和太阳高度角的影响,计算如下:

$$\alpha_{soil} = \alpha_{sat} + 0.11 - 0.4 \times w_s \quad (3)$$

式中, α_{soil} 为裸土反照率; α_{sat} 为饱和土壤反照率,与土壤质地有关; w_s 为表层土壤体积含水量。

植被反照率由查表获得,通过太阳高度角进行订正。玉米农田反照率短波和长波反照率分别为

0.1 和 0.3, 计算如下:

$$\alpha_{corv} = a_{veg} \times CZEN \quad (4)$$

式中, α_{corv} 为订正后植被反照率, a_{veg} 为查表得到的植被反照率, $CZEN = 0.85 + 1(1 + 10 \times \cos(ZEN))$, ZEN 是太阳天顶角。

$$\alpha_{sv} = (1 - F_{veg}) \times \alpha_{soil} + F_{veg} \times \alpha_{corv} \quad (5)$$

式中, α_{sv} 为下垫面综合反照率, F_{veg} 为植被覆盖度。

3.3 试验设计

本研究设计 5 个试验方案:

试验 1: 控制试验 (TEST-CTL), 不改动 BATS1e 模型任何参数设置。

试验 2: 动态 Z_0 试验 (TEST-ROUGH), 利用动态 Z_0 替换原模型 Z_0 。

试验 3: 同时用动态 Z_0 和 LAI 替换原模型值 (TEST-LAI)。

试验 4: 同时用动态 Z_0 、 LAI 及 $FVEG$ 替换原模型值 (TEST-FVEG)。

试验 5: 用动态地表反照率替换原模型值, 其他参数不变 (TEST-ALBEDO)。

利用实测数据作为强迫信息循环驱动模型, 时间步长为 30 min, 进行 10 次起转 (spin-up) 的独立离线 (off-line) 数值试验, 确保各种陆面参量趋于稳定, 取第 11 次模拟的土壤温度、净入射短波辐射、感热通量、潜热通量和表层土壤湿度与实测值比较, 分析陆面过程模型对各下垫面参数动态的敏感性。

3.3.1 动态 Z_0

试验中的动态 Z_0 计算来自植株高度 (H_m) 与 Z_0 的关系: $Z_0 = 0.1H_m$ ^[36], 先求得株高动态数据, 再计算 Z_0 。利用林忠辉等^[37]和王玲等^[38]提出计算 LAI 的相对积温方法, 可衍生出计算株高的模型:

$$RH_j = X_m / (1 + \exp(a_1 + a_2 \times RAT_j + a_3 \times RAT_j^2)) \quad (6)$$

式中, RH_j 为相对株高, RAT_j 为相对积温, X_m 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为参数。其中, $RH_j = H_j/H_{max}$, H_j 为实际株高, H_{max} 为最大株高。 $RAT_j = AT_j/AT_{max}$, AT_j 、 AT_{max} 分别为从出苗到某一时间点的有效积温、从出苗到株高达到最大期间的有效积温。式(6)可变换为:

$$\ln\left(\frac{X_m}{RH_j} - 1\right) = a_1 + a_2 \times RAT_j + a_3 \times RAT_j^2 \quad (7)$$

通过调整 X_m , 将 2008 年的 RH_j 和 RAT_j 数据代入式(7)进行回归拟合。当相关系数达到最大时拟合效果最佳。比较发现, 当 X_m 取值为 2.05 时 R^2 最大, 将相应的 a_1 、 a_2 和 a_3 代入式(6)得:

$$RH_j = 2.05 / (1 + \exp(3.7579 - 5.1427RAT_j))$$

+ 1.5239 RAT_j^2)) (8)

式(8)为锦州地区玉米株高动态模型(2008 年模型)。

为使模拟结果更准确,利用 2006 年出苗、三叶、七叶、拔节、抽雄、乳熟 6 个时期株高实测数据对 2008 年模型模拟值进行订正,即建立实测值和模拟值的线性关系,把模拟值代入线性模型得到订正值。比较发现(图 1),订正值更接近实测值,出苗至三叶期模拟效果明显改善。至此,求得 2006 年玉米株高动态数据,根据与 Z_0 关系得到动态 Z_0 。

3.3.2 动态 LAI

王玲等^[38]利用禹城、沈阳试验测得的不同年份不同密度玉米 LAI 动态资料建立了不同模型,选择沈阳种植密度为 267 株/hm² (式(9))、300 株/hm² (式(10))、沈阳地区综合(式(11))及所有资料综

合(式(12))4 个模型用于锦州 2006 年玉米 LAI 的模拟。同时,利用 2006 年实测资料(三叶、七叶、拔节、抽雄、乳熟)建立模型进行模拟(式(13))。

$RLAI_j = 1.09 / (1 + \exp(4.5424 - 11.494RAT_j + 4.8232RAT_j^2))$ (9)

$RLAI_j = 1.18 / (1 + \exp(5.0766 - 11.685RAT_j + 4.9298RAT_j^2))$ (10)

$RLAI_j = 1.11 / (1 + \exp(4.9273 - 12.221RAT_j + 5.2301RAT_j^2))$ (11)

$RLAI_j = 1.11 / (1 + \exp(5.2476 - 12.399RAT_j + 5.1342RAT_j^2))$ (12)

$RLAI_j = 0.984 / (1 + \exp(10.562 - 28.375RAT_j + 12.889RAT_j^2))$ (13)

各模型(图 2)都可较好地模拟 LAI 的动态变化,其中利用 2006 年观测资料所建模型的模拟值与

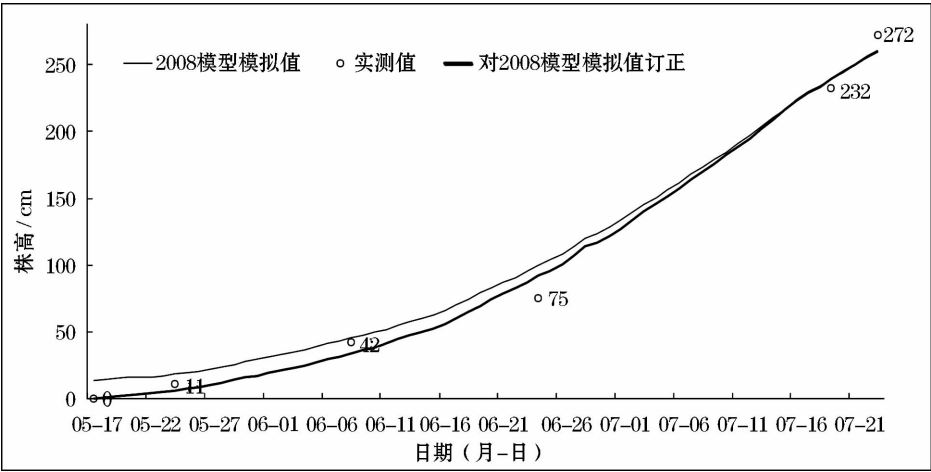


图 1 2006 年玉米株高的模拟
Fig.1 Simulation of maize plant height in 2006

其他模型差异较大,可能是因为建模点少导致模型的代表性差,在此不予考虑。其他模型模拟趋势较一致,但七叶和拔节期差异较大,其中式(10)、式(12)模拟精度较高,乳熟后差异明显,式(12)为综合考虑不同密度不同地区得出的模型,更具普遍性意义,对其模拟结果订正(方法同株高)后得到动态 LAI 数据。

3.3.3 BATS1e 模型的参数设置与动态参数比较

基于获取的 Z_0 、LAI 和 $FVEG$ 动态连续数据,给出它们与 BATS1e 模型设定值的比较(图 3)。玉米农田下垫面 Z_0 、 $FVEG$ 和 LAI 呈明显季节变化, Z_0 为 0.026 ~ 0.258 m, LAI 为 0 ~ 4.06。因没有 $FVEG$ 实测资料,设定 $FVEG$ 为 0 ~ 1 且线性增大,虽然未必符合实际,但对研究陆面过程模拟的敏感性有一定

指示意义。玉米农田下垫面实测和模型模拟反照率(图 4)日变化呈 U 形分布。实测值日际变化较大,早晚呈不对称分布,7 月 10 日以前,白天值明显小于模拟值。模拟值在 8:00 ~ 16:00 时段日际间差异很小,早晚对称分布。可见, α 模拟值和实测值存在较大不同,对陆面过程可能将产生一定影响。

4 结果分析

图 5(a ~ e)分别给出 2006 年 6 月 1 日至 8 月 9 日玉米从幼苗至乳熟阶段试验 1 ~ 4 模拟和实测的表层土壤温度(SST)、净入射短波辐射(f_{rs})、感热(SH)、潜热(LE)和表层土壤体积含水量(SWC)动态。

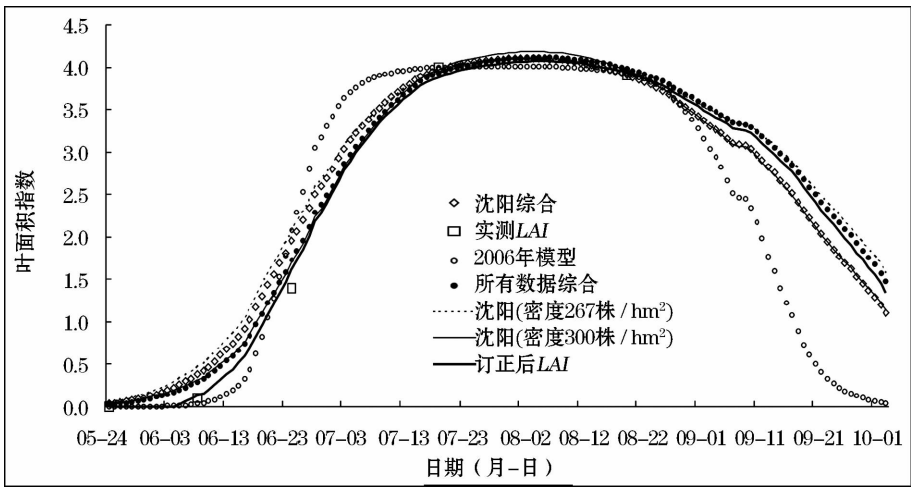


图 2 不同模型模拟的 2006 年 LAI 动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of leaf area index in 2006 simulated by different models

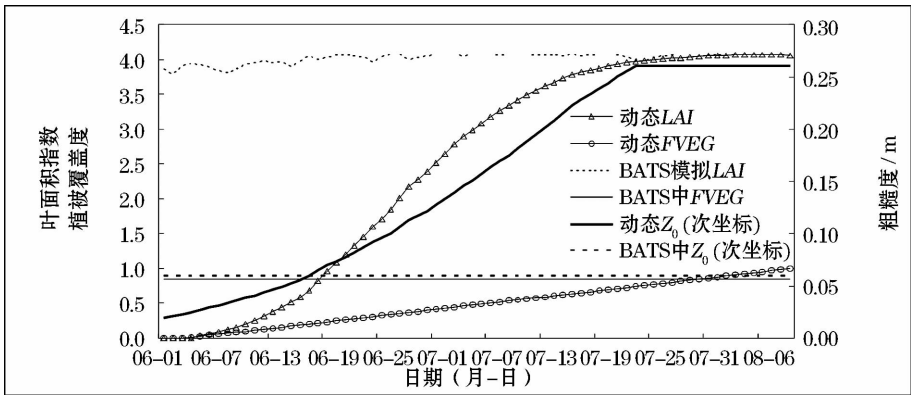


图 3 BATS1e 模型设定与动态连续的 Z_0 、LAI、FVEG

Fig. 3 Dynamic roughness, leaf area index and fractional vegetation coverage designated in BATS1e model

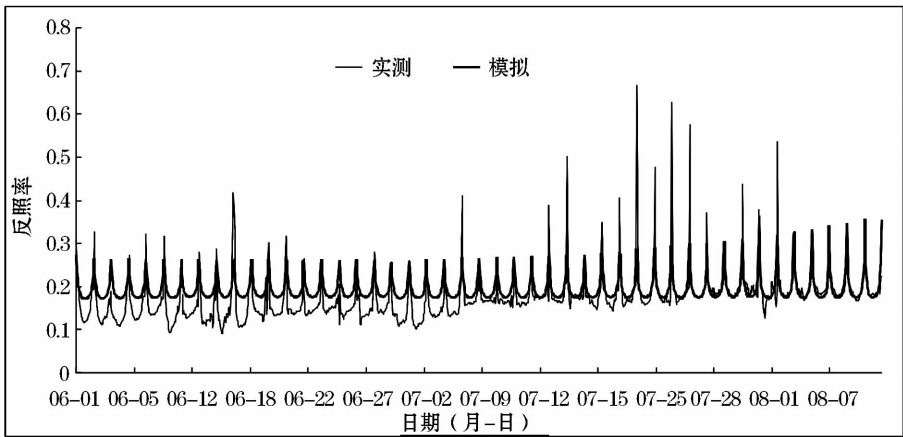


图 4 实测与模拟的地表反照率

Fig. 4 Simulated and observed surface albedos

4.1 表层土壤温度

SST 实测值日变化明显(图 5a), 6 月日较差明显高于 7、8 月, 7 月大于 8 月。试验 1 能模拟出 SST

的日动态, 6 月 20 日之前, 模拟值在白天和夜间都比实测值高估, 7 月初和 8 月初昼夜都低估且夜间低估幅度较大, 其他时段白天高估, 夜晚低估。试验

2 在原模型基础上引入动态 Z_0 , SST 模拟结果与原模型差异较小,其中6月初昼夜都高于原模型值,与5 cm 深 SST 实测值相比,高估幅度增大,其他时段白天模拟值较原模型略偏小且误差略有减小,夜间差异不大。试验3中 SST 模拟值在6月初比试验1、2 偏高且误差略大,其他时段与试验2 差异不大。试验4在7月4日以前 SST 昼夜温差明显大于其他试验模拟值,白天误差明显偏大,夜晚更接近实测值,8月初昼夜都比其他试验模拟值略小,误差略大,其他时段模拟误差较其他试验更接近实测值。另外,从图5a可以看到,6月初试验2、3、4 的 SST 昼夜温差都较原模型模拟值高估,分析原因认为,试验所用 SST 验证资料为5 cm 深度,而模型中的 SST 为0~10 cm 的综合状态,且不随深度变化,意味着它具有表层即0 cm 深度处土壤温度的物理意义,而实际上6月初植被覆盖很小,基本上为裸土,0 cm 比5 cm 处土壤温度日较差更大,说明试验2、3、4 此时段的模拟结果是依次与实际情况接近的,尤其是试验4 昼夜温差最大,说明改进 $FVEG$ 使模型模拟结果更符合实际。随着植被覆盖的增大 SST 昼夜温差逐渐减小,5 cm 深处土壤温度基本可以代表表层土壤温度。而到了8月初,冠层植被覆盖达到最大,5 cm 土壤温度开始大于0 cm,意味着代表 SST 的模拟值会低于5 cm 实测值,这很可能是导致试验2、3、4 此时段的模拟误差较试验1 偏大的原因,说明它们与表层土温实际情况更为相符。可见,动态 Z_0 、 LAI 和 $FVEG$ 对地温模拟有一定改进作用,其中 $FVEG$ 作用更为明显。

4.2 净入射短波辐射

试验1~4 所模拟的 f_{rs} (图5b) 与实测值的日变化及日际变化都比较一致,但都不同程度低估,6月误差大于7、8月。试验1~3 之间差异很小,而试验4 与其他明显不同,充分反映出式(5)中 $FVEG$ 与反照率的直接关系,尤其是6月上旬,由于动态 $FVEG$ 与模型设定值差异很大,更为真实的 $FVEG$ 使模拟结果明显改善。从7月8日开始,随着动态 $FVEG$ 与模型值逐渐接近,各试验结果趋于一致,且误差减小。

4.3 感热

图5c中,模型基本可以模拟出感热的日动态变化,但试验1~4 都表现出在白天高估而在夜晚低估的情况。在6月15日之前,玉米农田从裸土向有植被覆盖转变阶段, Z_0 的动态赋值对感热模拟有一定改进作用,模拟误差较原模型略有减小。7月16日

之前, LAI 的动态变化使感热模拟误差较试验2 进一步减小,但误差减小的幅度逐渐缩小,16日之后与原模型差异不大。分析原因认为,前一时段 LAI 正处于快速增大阶段,与原模型值差异较大,而后一时段 LAI 变化平缓且与原模型值差异较小,随着 LAI 与原模型值逐渐接近,其动态变化对原模型改进作用也逐渐减小。试验4中, Z_0 、 LAI 、 $FVEG$ 的同时动态赋值,使7月底之前模拟误差进一步减小,随着 LAI 和 $FVEG$ 的增大并逐渐接近模型值,误差减小幅度逐渐减小,到8月份与原模型值几乎无差异。

4.4 表层土壤体积含水量和潜热

由图5d和e可见,模型对潜热的模拟直接受 SWC 影响,而后者与降水关系密切。从与10 cm 处 SWC 实测值比较情况看,试验1~4 对 SWC 模拟都较差,当出现降水日时, SWC 模拟值出现峰值,在雨日后快速减小,而10 cm 处实测值的情况是雨日后 SWC 虽有下降但降幅不大。分析原因认为: SWC 模拟值为0~10 cm 这一层综合的状态,这与10 cm 处 SWC 实测值物理意义存在差异。当植被覆盖较少时 SWC 变化较剧烈,进而导致其无降水日快速下降。从模拟结果分时段看,7月4日以前,试验3、4 明显较试验1、2 更接近10 cm 处实测值,之后各试验 SWC 差异较小。分析原因认为,这一阶段试验1、2 中的 LAI 和 $FVEG$ 都很大,使得相同的土壤水分补给在植被冠层作用下水分散失量较多,因而 SWC 较小。试验3和4 相比,由于 $FVEG$ 的动态赋值导致后者更接近实测值。7月4日以后由于试验3和4 中 LAI 和 $FVEG$ 与原模型值不断接近,使得 SWC 模拟值与试验1、2 差异很小。从整个时段看,试验1、2 中 SWC 模拟的差异很小,说明 Z_0 的动态变化对 SWC 模拟影响较小。总之, SWC 的变化并非简单的过程,是多种因素共同作用的结果,模型对土壤含水量的处理不够准确,周文艳等^[39] 把土壤分为10层,使模型有所改进,说明模型中土壤分层需要完善。

由于 SWC 的明显低估,使得潜热也随之显著低估,这便是7月4日之前潜热误差较大的原因。试验1、2 在6月上旬由于降水的作用出现了2个潜热高值时段,这是由于模型中 LAI 和 $FVEG$ 的较大设置导致冠层蒸发较大所产生的虚假真实,此时试验3中 $FVEG$ 与原模型相同,但 LAI 较小,而试验4 $FVEG$ 和 LAI 都很小,导致试验3 模拟值大于试验4。在7月由于降水频繁且植被处于生长旺季, SWC 的模拟值更接近实测值,使得土壤蒸发和冠层蒸腾都较大,进而导致各试验潜热模拟明显大于6月且

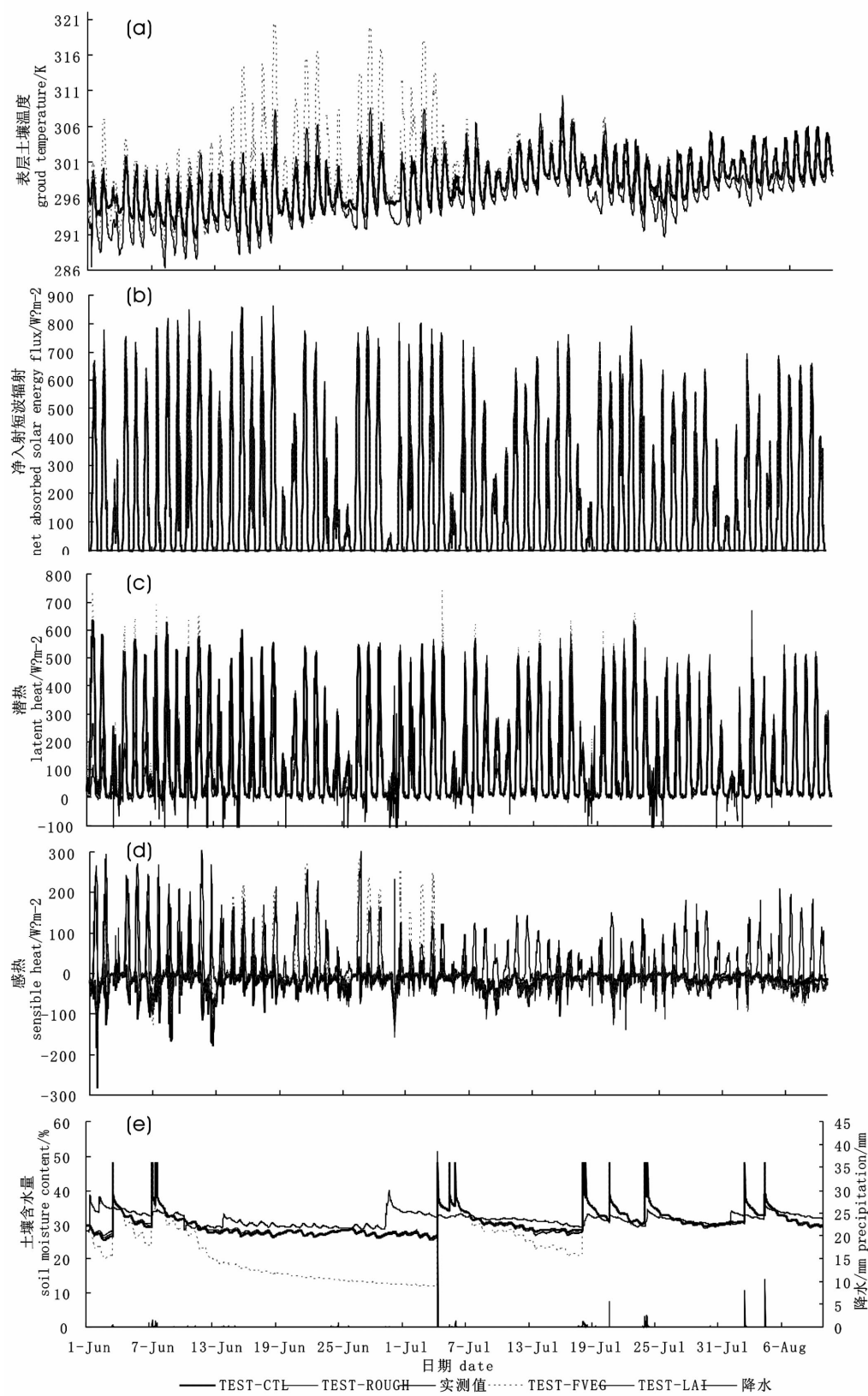


图 5 试验 1~4 模拟和实测的 a. 地温、b. 净吸收入射辐射、c. 潜热、d. 感热和 e. 表层土壤体积含水量

Fig. 5 The observed and simulated values from test 1 to 4 a. ground temperature, b. net absorbed solar energy flux, c. latent heat, d. sensible heat and e. surface soil moisture content

更接近于实测值,随着各试验中 $FVEG$ 和 LAI 逐渐接近原模型值,潜热模拟值趋于一致。

4.5 动态反照率对模拟结果的影响

由于式(5)中玉米农田下垫面综合反照率计算涉及到 $FVEG$,而本研究没有获得其实测资料,为解决这一问题,考虑到净吸收入射辐射(frs)与总辐射($solar$)有 $frs = solar \times \alpha$ 的关系,因此直接把动态 frs 值代入模型起到对反照率动态赋值的作用。当然,由于模型中计算植被吸收太阳辐射也涉及到反照率,如此赋值必然对模拟结果有一定影响,但本研究旨在分析动态反照率对陆面过程模拟的敏感性,认

为此试验设计可以反映出一定问题。就表层土壤温度而言(图 6a),受反照率动态赋值影响较小,7 月 4 日以前的白天模拟值有微弱升高,其他时段无明显变化。感热(图 6b)在 7 月 4 日以前白天值明显增大,以后仅有微弱增大。潜热(图 6c)在非降水日几乎无变化,在降水日白天的大部时段有所增大,但个别正午时段略有减小,可能是由于因实测反照率减小所增多的辐射能以感热形式散失较多所导致。总的来看,反照率的动态真实赋值直接影响与能量平衡相关的各变量,相对而言,感热反应最为敏感。

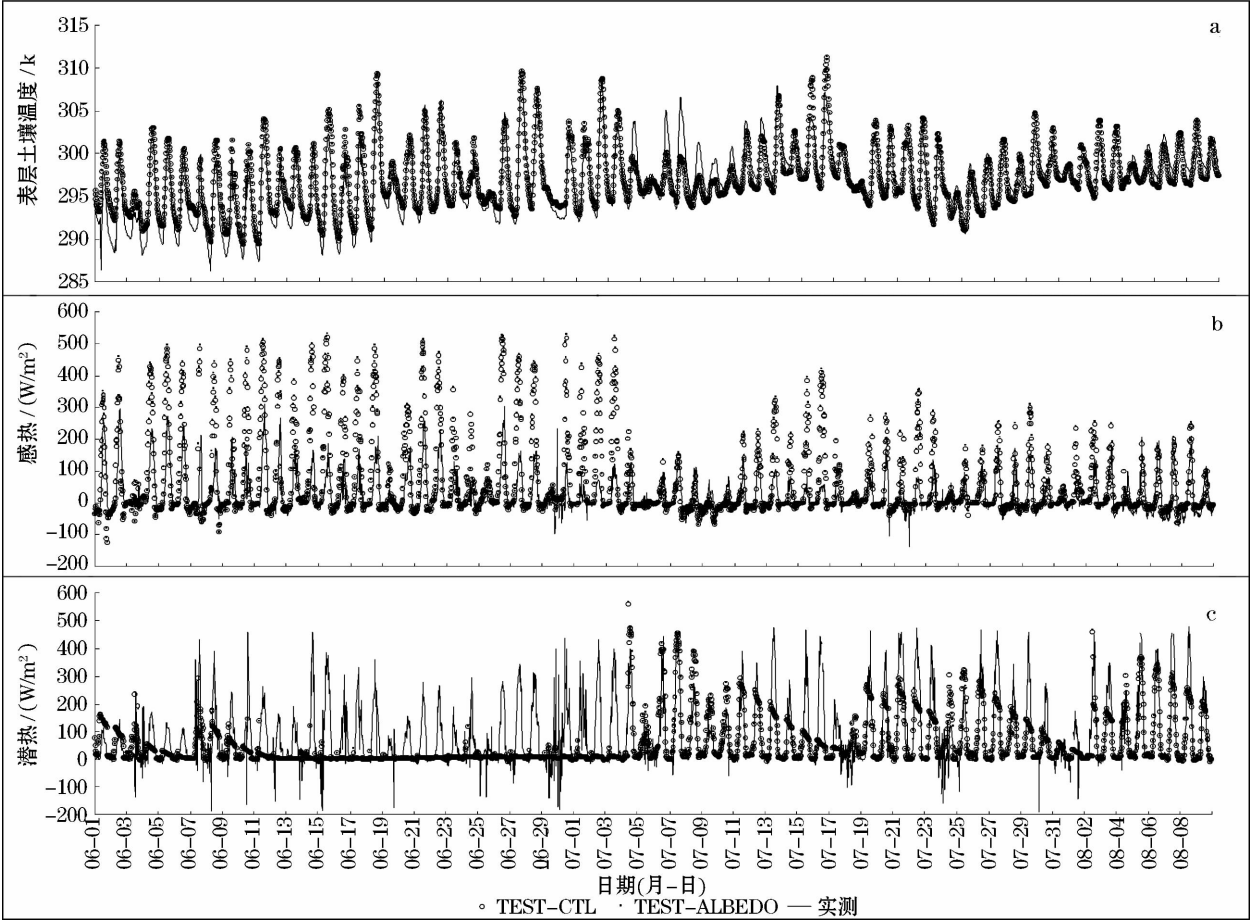


图 6 试验 1 和 5 模拟和实测表层 a. 土壤温度、b. 感热和 c. 潜热动态
Fig. 6 The observed and simulated a. surface soil temperature, b. sensible heat flux and c. latent heat flux by test 1 and 5

5 结论与讨论

5.1 BATS1e 模型

该模型基本可以模拟出 SST 、 frs 、感热及 SWC 的日动态及日际变化,但对潜热尤其是非降水日模拟能力较差。当 LAI 、 $FVEG$ 的实际值较小时,各变

量模拟误差较大,随着模型设定值与实际值逐渐接近,模拟误差不断减小,说明更真实的参数设置对提高模拟精度非常必要。

5.2 Z_0 动态变化的影响

Z_0 的动态变化对 SST 和感热模拟有一定改进作用,其中在白天表现更为明显;影响时段主要发生在

玉米农田从裸土向有植被覆盖转变这一阶段,说明下垫面性质改变的影响要大于 Z_0 在 0.026 ~ 0.258 m 范围变动的影响。玉米农田下垫面被玉米植株覆盖以后, Z_0 的变化幅度仅约为 0.2 m, 此变化对单个站点陆面过程的模拟影响十分有限。

5.3 LAI 动态变化的影响

LAI 的动态变化对改善 SST、感热、潜热和 SWC 的模拟有很大作用,当 LAI 较小时,潜热和感热对 LAI 动态变化有较大的敏感性。

5.4 FVEG 动态变化的影响

FVEG 对各变量模拟都起到重要作用,更为真实的赋值使 SST、 f_{rs} 、感热和 SWC 的模拟明显改善。其中 FVEG 较小时,其动态变化对提高以上各变量模拟精度作用明显,随着 FVEG 与模型值逐渐接近,模拟结果与原模型差异逐渐减小。

5.5 反照率动态变化的影响

反照率的动态赋值可不同程度影响 SST、感热和潜热的模拟,其中感热对其变化敏感性最大。

综上所述,BATS1e 模型对 Z_0 、LAI、FVEG 和反照率等参数的动态赋值都在不同程度上表现出敏感性,尤其在玉米营养生长期 LAI 和 FVEG 变化迅速阶段。随着下垫面性质的稳定,各参数变化幅度减小,对陆面过程模拟的影响逐渐减小。同时,这些参数之间存在较为直接的联系,而原模型对各参数仅独立考虑,并未进行关联处理,导致单个参数的改进虽然在一定程度上可以提高某些变量的模拟精度,但并不一定改善所有变量的模拟,甚至会使一些变量模拟精度下降。因此,建立下垫面参数之间相互联系的动态参数化方案十分必要。目前,数值模式空间尺度较大且实际观测资料相对缺乏,为了不断改进陆面过程模型下垫面参数化方案,使其与实际情况更加接近,一方面要不断加强陆面过程观测,尽可能多收集并筛选有效资料用于建立参数的统计模型方案并加以验证,另一方面要加强陆面过程机理研究,深入研究各参数在陆面过程中起到的作用及敏感程度,了解它们之间的内在联系,进而不断改进参数化方案。

参考文献 (References):

[1] He Yong, Jiang Yundi, Dan Li, *et al.* Research on Carbon Cycle of Climatic and Terrestrial Ecosystem in China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [何勇, 姜允迪, 丹利, 等. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M]. 北京: 气象出版社, 2006.]

[2] Ni Yunqi. Climatic Dynamics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 335-380. [倪允琪. 气候动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 335-380.]

[3] Li Chongyin. Climatic Dynamics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 311-337. [李崇银. 气候动力学[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 311-337.]

[4] Niu Guoyue, Hong Zhongxiang, Sun Shufen. Review and development tendency of study of land surface processes[J]. *Advances in Earth Science*, 1997, 12(1): 20-25. [牛国跃, 洪钟祥, 孙淑芬. 陆面过程研究的现状与发展趋势[J]. 地球科学进展, 1997, 12(1): 20-25.]

[5] Sun Shufen. Physical and Biochemical Mechanism and Parameterized Model of Land Surface Processes[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 307. [孙淑芬. 陆面过程的物理、生化机制和参数化模型[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 307.]

[6] Xue Genyuan, Zhou Suoquan, Sun Zhaobo, *et al.* Advances in research on land surface processes[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, 21(4): 378-386. [薛根元, 周锁铨, 孙照渤, 等. 陆面过程研究的新进展[J]. 科技通报, 2005, 21(4): 378-386.]

[7] Sun Shufen. Advance in land surface process study[J]. *Xinjiang Meteorology*, 2002, (6): 1-6. [孙淑芬. 陆面过程研究的进展[J]. 新疆气象, 2002, (6): 1-6.]

[8] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model [R]. NCAR Technical Note, NCARPTN-387 + STR, 1993.

[9] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, *et al.* A Simple Biosphere model (SiB) for use within general circulation models[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43: 505-531.

[10] Xue Y, Sellers P J, Kinder III J L, *et al.* A simplified biosphere model for global climate studies[J]. *Journal of Climate*, 1991, 4: 345-364.

[11] Sellers P J, Randall D A, Collatz C J, *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 676-705.

[12] Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E. Common Land Model (Technical Documentation and Users Guide)[R]. The Georgia Institute of Technology, 2001.

[13] Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, *et al.* The common land model (CLM)[J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1 013-1 023.

[14] Dai Yongjiu. The Common Land Model (CoLM) Users Guide [R]. School of geography Beijing Normal University, 2005.

[15] Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, *et al.* Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influence on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(5): 473-475. [张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 473-475.]

[16] Guan Dexin, Jin Mingshu, Xu Hao. Albedo characteristics of broad-leaved and Korean-pine in growing season in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1 544-1 546. [关德新, 金明淑, 徐浩. 长白山阔叶红松林生长季反射率特征[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12):

- 1 544-1 546.]
- [17] Liu Shuhua, Wen Pinghui, Zhang Yunyan, *et al.* Sensitivity tests of interaction between land surface physical process and atmospheric boundary layer[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59 (5): 533-548. [刘树华, 文平辉, 张云雁, 等. 陆面过程和大气边界层相互作用敏感性实验[J]. 气象学报, 2001, 59 (5): 533-548.]
- [18] Huang Anning, Zhang Yaocun. Impacts of the BATS1e land surface model on the performance of the p- σ -regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31 (1): 155-166. [黄安宁, 张耀存. BATS1e 陆面模式对 p- σ 九层区域气候模式性能的影响[J]. 大气科学, 2007, 31 (1): 155-166.]
- [19] Wang Jiemin. Study of land surface processes tests and surface exchange processes from HEIFE to IMGRASS and GAME-Tibet/TIPEX[J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18 (3): 280-294. [王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. 高原气象, 1999, 18 (3): 280-294.]
- [20] Lü Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, *et al.* Overview on scientific problems and test program of IMGRASS[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1997, 2 (3): 100-209. [吕达仁, 陈左忠, 王庚辰, 等. 内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用科学问题与实验计划概述[J]. 气候与环境研究, 1997, 2 (3): 100-209.]
- [21] Yang Xingguo, Niu Shengjie, Zheng Youfei. Advance in land surface process experimental study[J]. *Arid Meteorology*, 2003, 21 (3): 83-89. [杨兴国, 牛生杰, 郑有飞. 陆面过程观测试验研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21 (3): 83-89.]
- [22] Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin, *et al.* Advance in observation of terrestrial ecosystem carbon flux in Asia[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34 (suppl. II): 15-29. [于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34 (增刊 II): 15-29.]
- [23] Sun Honglie. Scientific and technological support supported to ecological system assessment by Chinese ecosystem research network[J]. *Resource Sciences*, 2006, 28 (4): 2-3. [孙鸿烈. 中国生态系统研究网络为生态系统评估提供科技支撑[J]. 资源科学, 2006, 28 (4): 2-3.]
- [24] Fu Bojie, Niu Dong, Yu Guirui. The roles of ecosystem observation and research network in Earth system science[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26 (1): 1-16. [傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用[J]. 地理科学进展, 2007, 26 (1): 1-16.]
- [25] Chen Panqin, Cheng Bangbo, Wang Fang, *et al.* Discrimination on several key issues of global climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (1): 69-95. [陈泮勤, 程邦波, 王芳, 等. 全球气候变化的几个关键问题辨析[J]. 地球科学进展, 2010, 25 (1): 69-95.]
- [26] Cai Fu, Zhang Shujie, Yu Guirui, *et al.* Research of spatial-temporal evolution characters of mean air temperature in China in recent 50 years based on spatialization technique[J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25 (6): 168-175. [蔡福, 张淑杰, 于贵瑞, 等. 基于空间化技术对中国近 50 年平均气温时空演变特征的研究[J]. 高原气象, 2006, 25 (6): 168-175.]
- [27] Lin Erda, Xu Yinlong, Jiang Jinhe, *et al.* National assessment report of climate change (II): Climate change impacts and adaptation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2 (2): 51-56. [林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告 II——气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2 (2): 51-56.]
- [28] Zhang Houxuan, Lin Erda. Strategic issues for Chinese agriculture and its response to global climate change[J]. *Agriculture Environmental Protection*, 1997, 16 (1): 35-39. [张厚瑄, 林而达. 中国农业响应全球气候变化的策略问题[J]. 农业环境保护, 1997, 16 (1): 35-39.]
- [29] Xiong Wei, Ju Hui, Xu Yinlong, *et al.* The threshold of temperature increase due to climate change for Chinese agriculture and its uncertainties[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2006, 21 (1): 70-76. [熊伟, 居辉, 许吟隆, 等. 气候变化对中国农业温度阈值影响研究及其不确定性分析[J]. 地球科学进展, 2006, 21 (1): 70-76.]
- [30] Li Yijun, Xu Zhenzhu, Wang Yunlong, *et al.* Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31 (6): 132-144. [李祯君, 许振柱, 王云龙, 等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (6): 132-144.]
- [31] Bonan G B. A Land Surface Model (LSM Version 1.0) for Ecological, Hydrological and Atmospheric Studies; Technical Description and User's Guide [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-417 + STR, Boulder, Colorado, 1996.
- [32] Deardoff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83 (4): 1889-1904.
- [33] Giorgi F, Marinucci M R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: Sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1991, 117: 171-180.
- [34] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiation transfer process[J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121: 794-813.
- [35] Giorgi F, Marinucci M R, Canio G D, *et al.* Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions[J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121: 814-832.
- [36] Liu Shuhua, Li Xinrong, Liu Lichao. Study of land surface processes parameterizations model [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21 (3): 303-311. [刘树华, 李新荣, 刘立超, 等. 陆面过程参数化模式的研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21 (3): 303-311.]
- [37] Lin Zhonghui, Xiang Yueqin, Mo Xingguo, *et al.* Normalized leaf area index model for summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 11 (4): 69-72. [林忠辉, 项月琴, 莫兴

- 国,等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报,2004,11(4):69-72.]
- [38] Wang Ling, Xie Deti, Liu Hailong, *et al.* A universal growth model for maize leaf area index [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2004,26(3):303-311. [王玲,谢德体,刘海隆,等. 玉米叶面积指数的普适增长模型[J]. 西南农业大学学报,2004,26(3):303-311.]
- [39] Zhou Wenyao, Luo Yong, Guo Pinwen. A modified BATS and its offline experiments[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005,28(6):730-738. [周文艳,罗勇,郭品文. 10层陆面过程模式及其 Offline 独立试验[J]. 南京气象学院学报,2005,28(6):730-738.]

Sensitivity of Land Surfaces Model to Dynamic Land Surface Parameters

Cai Fu^{1,2,3}, Zhou Guangsheng¹, Li Rongping³, Ming Huiqing⁴

(1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;*

3. *Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China;*

4. *Liaoning Province Meteorological Science and Technology Service Center, Shenyang 110016, China)*

Abstracts: Using continuous flux data, meteorological data and biological data in 2006 (from June 1 to August 9) from Jinzhou agricultural ecosystem research station, based on BATS1e model, the sensitivity of land surface model to dynamic assignment of roughness (Z_0), leaf area index (LAI) and fractional vegetation coverage ($FVEG$) and albedo (α) were investigated. The results show that dynamic assignment of Z_0 has effect on simulating surface soil temperature (SST) and sensible heat flux (SH) especially on the time when maize field surface covered changes from bare soil to vegetation. Dynamic LAI plays important role in improving the simulation of SST , net absorbed solar energy flux (Frs), SH and surface soil water content (SWC), at the same time affects simulation of latent heat flux (LE). Dynamic $FVEG$ affects obviously simulations of all above-mentioned variables and shows greater sensitivity when they are smaller. Also, dynamical change of α can affect simulations of SST , LE and SH , especially for the latter. Furthermore, the interactions among different dynamic parameters are ignored by the model. The improvement of single land surface parameter might be helpful for simulating one or multivariate but not for all variables. In short, it is necessary to set up a parameterization scheme with the interactions of different land surface parameters.

Key words: Dynamic change of parameters; Land surfaces processing; Sensibility.