陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 II. 模式检验

陈海山 孙照渤

南京信息工程大学大气科学系,南京 210044

摘 要 利用 BOREAS, HEIFE, ARME, GAME-TIPEX 等大量的陆面外场观测资料, 针对不同类型的陆面过程,对所发展 的陆面模式 CLSM 的性能进行检验。模拟结果与观测资料的对比分析表明:一方面, CLSM 能够对积雪变化、干旱/半干 旱地区的水热交换等特殊的陆面过程进行合理的描述;另一方面, CLSM 对热带雨林地区的植被 – 大气相互作用、高原 地气交换过程同样具有很强的模拟能力。CLSM 解决了陆面模式对上述特殊下垫面描述能力有限的实际问题, 保证了 对特殊下垫面进行合理描述的同时, 又保证了对其他不同陆面状况的模拟能力。CLSM 改善了陆面模式对全球范围内 不同下垫面条件下的陆面过程及地 – 气交换过程的模拟能力。

关键词 综合陆面模式 CLSM 模式检验

文章编号 1006 - 9895(2005)02 - 0272 - 11 中图分类号 P435 文献标识码 A

Design of a Comprehensive Land Surface Model and Its Validation Part II. Model Validation

CHEN Hai-Shan , and SUN Zhao-Bo

Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract By using observational datasets collected by BOREAS, HEIFE, ARME, GAME-TIPEX representing different land cover conditions, comprehensive land surface model (CLSM) is validated against the observations to verify the capability to simulate different land processes. Results suggest that the model not only simulates the special land surface processes including seasonal dynamics of snow cover variation, soil heat and water transfer in arid / semi-arid regions, but also describes the interaction of vegetation-atmosphere in tropical rainforest, together with the exchanges between the land surface and atmosphere over the Tibetan Plateau accurately. It is concluded that CLSM can describe different physical processes accurately and exhibit it 's comprehensive capability to represent processes related to various land surfaces. **Key words** CLSM, validation

1 引言

20世纪 80 年代中后期,水文 - 大气试点试验 (HAPEX)全球能量和水循环试验(GEWEX)国际卫 星陆面气候学(ISLSCP)、国际地圈 - 生物圈研究计划 (IGBP)以及"陆面参数化方案比较计划(PILPS)"等一 系列大型陆面外场观测试验和研究计划的实施,把气 候的基础理论研究提高到一个新的层次,即研究地球 各圈层之间的相互作用问题。研究不同圈层的相互作 用已成为地球气候系统科学领域内极富挑战性的研究 项目,也是国际上竞相研究的前沿科学问题。外场观 测实验研究是陆面过程研究的一个重要内容。它是陆 面过程模式发展和完善的基础。20世纪80年代以 来,为了深入认识地表与大气之间能量和水分交换及 其相互作用过程,改善对陆面过程的描述和陆面参数 化方案,先后进行了"亚马孙微气象试验(ARME)"、世 界气候研究计划 WCRP的"水文大气试点试验 (HAPEX)、""国际卫星陆面气候学计划(ISLSCP)"在

收稿日期 2003-07-28 收到 2003-10-29 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405018 和 40331010

作者简介 陈海山, 男, 1973年出生,博士,副教授,目前从事短期气候预测、陆气相互作用和气候数值模拟研究。E-mail:haishan@nuist.edu.cn

No. 2 CHEN Hai-Shan, et al. Design of a Comprehensive Land Surface Model and Its Validation Part II. Model Validation 273

美国中部 Kansas 草原开展的"第一阶段外场试验 (FIFE)"以及"中日合作黑河流域地气相互作用外场观 测试验 HEIFE)"。20世纪 90 年代以来, 一系列重大 综合性合作研究计划相继开展 例如 世界气候研究计 划 WCRP 的"全球能量与水循环试验(GEWEX)"、"国 际地圈生物圈计划(IGBP)"、"地球观测系统研究计划 (Earth Observing Systems , EOS)"等,其中也包括在中国 淮河流域进行的能量和水平衡试验(GAME-HUBEX)。 青藏高原进行的 GAME-Tibet 和内蒙古大草原的"内蒙 古半干旱草原土壤 - 植被 - 大气相互作用研究计划 (IMGRASS)"等。这些观测计划在很大程度上反映了 陆气相互作用研究的发展趋势。陆面过程的外场观测 试验广泛分布于全球不同的气候带,针对不同的气候 区域,分别对陆表水文、能量平衡、地表及土壤水热传 输、地气通量交换、生态系统、云和辐射、边界层等项目 进行了观测 ,为陆面模式的发展和陆面过程的参数化 方案提供了必要条件,推动了陆面过程数值模拟研究 的发展^[1,2]。

文献 3 详细讨论了陆面模式 CLSM 的模式框架、 物理方程、参数化及计算方案。而本文的主要目的是 通过广泛应用 BOREAS, HEIFE, ARME, CAME-Tibet 等 大型的国际陆面观测研究计划和其他有关的陆面观测 资料,综合考察陆面模式 CLSM 对不同下垫面陆面过 程的刻画能力,检验陆面模式 CLSM 的综合模拟能力 和陆面模式方案的可行性、有效性,最终为陆面模式 CLSM 用于气候变化研究提供物理依据。所用的观测 资料代表了多种典型的陆面状况和不同的气候条件, 比较全面地反映了不同气候条件下典型的陆面覆盖状 况,这在一定程度上保证了模式检验的客观性和普遍 性。文章将从积雪变化过程、土壤水热过程、植被 – 大 气交换以及地气各种通量交换过程的模拟等 4 各个方 面分别进行讨论,最后给出对 CLSM 的性能的评价和 结论。

2 积雪变化过程的模拟试验

积雪代表了一类特殊而又十分重要的下垫面,积 雪异常不仅可以产生显著的气候效应,而且对整个地 球陆地表面水循环过程具有重要的影响。积雪过程的 研究不仅是气候研究的需要,也是水文学所关注的问 题。对积雪的变化特征进行详细而准确的描述是积雪 -大气 - 地表水文过程研究所要求的,而这正是 CLSM 的一个主要目标。因此,首先利用 CLSM 对积雪季节 变化过程进行模拟试验,检验 CLSM 对积雪基本变化 过程的模拟能力和积雪计算方案的合理性。

模拟试验所采用的部分观测资料来源于法国阿尔 卑斯山的 Col de Porte 积雪观测站,该资料集包含了反 映积雪变化的积雪深度、水当量、积雪密度、表面温度 等基本物理量以及每1小时的气象观测资料,该资料 被广泛应用于积雪的模拟研究中[4~8]。模拟试验选择 了 1988/1989 年、1993/1994 年积雪个例作为研究对象。 在 1988/1989 年、1993/1994 年积雪个例模拟试验中, 植被类型均取为草地、土壤颜色类型设置为 4,土壤类 型设置为沙粘土(sand 43% clay 18%);而模式的初始 条件由观测资料估计得到,1988/1989(1993/1994)年积 雪个例中初始积雪水当量、土壤温度、土壤湿度分别取 为 69.0 mm, 265.15 K, 0.3 (0.0 mm, 264.0 K, 0.3)。 此外 模拟试验还采用了国际研究计划——北温带大 气 - 生态系统研究计划(Boreal Ecosystem - Atmosphere System Study ,BOREAS)南部研究区域(SSA)的 old Jack pine 观测点(OJP)的外场观测资料。该观测地点位于 (53.92°N,104.69°W),在加拿大温带森林南部,观测区 域为大面积的 Jack 松 old Jack pine)所覆盖 植被覆盖 密度为 76% ,森林冠层平均高度为 16.8 m ;土壤类型 为沙土(Sand)。所用资料主要包括常规的气象、辐射 (来源于冠层之上的通量塔 高度在 20 m 左右) 土壤 温度及积雪深度的观测资料 观测资料的时间间隔为 15分钟^[9~11]。其中,也包含了对积雪有关过程的观 测 所获得的与积雪有关的观测资料在积雪模拟、积雪 - 植被相互作用的研究中得到了广泛的应用[12~14]。 在 BOREAS SSA OIP 1994/1995 积雪个例模拟试验中, 根据观测资料说明将植被类型取为常绿针叶林、土壤 颜色取为中等深度(对应模式参数为4),土壤构成取 沙土(sand)为70%、粘土(clay)为10%;而模式的初始 场由观测资料估计得到,初始积雪水当量、土壤温度、 土壤湿度分别取为 0.0 mm, 280.0 K, 0.4。

以下分别给出 3 个模拟试验的模拟结果和讨论。 2.1 法国 Col de Porte 1988/1989 年积雪个例

首先分析法国 1988/1989 年个例的模拟情况。如 图 1a 所示 模式对积雪深度的模拟结果与观测值非常 接近,准确地模拟出了积雪的累积、融化过程,很好地 反映了积雪过程的变化趋势。模式模拟的雪水当量的 变化趋势基本上与雪深的变化一致,但也存在一些差 异。雪水当量的变化较积雪深度的变化要平缓,尤其 是在两个积雪融化的时期,这种特征最为明显,这种结 果主要是由于融雪阶段积雪密度较大造成的(图 1b)。 模拟的积雪密度在整个模拟过程中表现出显著的变 化,尤其是在积雪深度发生明显变化的时期:有降雪发 生和积雪的融化阶段。有降雪发生时,由于新雪密度 明显小于地面积雪密度 结果引起积雪整体密度减小; 而对于积雪的融化阶段 积雪密度明显增加 这是由于 积雪中液态水含量增加而造成的(图 1c)。从模式对 几个积雪特征量的模拟来看 ,模式对积雪变化的刻画 是比较准确的。

由于积雪的融化是影响积雪深度变化的根本因 素,模式对积雪融化及其所产生的液态水通量的模拟



图 1 法国 Col de Porte 1988/1989 年积雪个例模拟结果和观测的 对比:(a)积雪深度;(b)积雪水当量(c)积雪密度(d)融雪 液态水流通量(e)积雪表面温度

Fig. 1 Simulated results and the observation for the France Col de Porte 1988/1989 snow case : (a) Snow depth ; (b) snow water equivalent (SWE) ; (c) snow bulk density ; (d) liquid water flux ; (e) surface temperature 效果将在很大程度上影响积雪模拟的总体水平。因此 模式对积雪融化产生的液态水的模拟情况也是我 们所关注的。利用观测资料提供的积雪底层每小时的 累计水流量与模式模拟结果进行比较,如图 1d 所示, 模拟的融雪液态水外流率的变化与实测值吻合很好, 但比观测值有所偏小。虽然模式中对积雪液态水的处 理方案较简单,但总体上能对积雪融化的液态水作出 较准确的描述,这是模式对积雪变化模拟效果较好的 原因。上述结果表明,模式采用的对积雪内部液态水 输送的描述方案是有效和可行的。图 1e 给出了积雪 表面温度的模拟结果,可以发现模式对积雪表面温度 的模拟效果是理想的。

2.2 法国 Col de Porte 1993/1994 年积雪个例

下面给出另外一个个例——法国 1993/1994 年积 雪个例的模拟结果。图 2a 给出了积雪深度的模拟结 果,同时给出了自动观测和雪坑观测的雪深,可以发现 模拟的积雪深度与实况比较接近。在积雪较深的一段 时间,模拟结果与自动观测雪深有一些差别,但与雪坑 观测值吻合很好。模拟的积雪变化,除了积雪完全融 化的时间比实况稍偏后外,也取得了较好结果。另外, 模拟的雪水当量与每两周一次的雪坑观测进行了对比 (见图 2b)模拟的积雪水当量也是比较准确的。积雪 密度的变化是积雪内部过程的一个重要反映,为了说 明模式对积雪内部过程变化描述的合理性,图 2c 给出 了观测的积雪总体密度和模拟的积雪密度,模拟的积 雪密度无论从量值上,还是从变化的特征上看,均与实 况较吻合。

积雪的消融过程主要受积雪所获的净能量控制, 积雪表面的能量平衡对积雪的演化是很重要的,而表 面温度是地表能量平衡的一个综合指标,准确模拟表 面温度对于积雪变化的模拟很关键。由于没有实测的 地表辐射及其他表面通量资料,仅给出了模拟的地表 温度与实况的对比(图 2d),模拟的温度变化与观测值 是一致的,但模拟值比观测值有所偏高。

2.3 加拿大 BOREAS SSA OJP 1994/1995 积雪个例

法国积雪个例的模拟中,下垫面为草地,冬季的陆面状况和裸土基本上没有大的差别。然而,当有植被时,考虑植被对积雪变化过程的影响增加了积雪模拟的难度。植被的存在对积雪的变化产生了影响,使得积雪 – 大气的相互作用变得更加复杂。采用 BOREAS SSA OJP 观测点 1994 年 10 月 1 日 ~ 1995 年 6 月 1 日的实测资料作为模式输入场,对温带植被覆盖条件下的积雪变化进行模拟,目的是检验模式对积雪 – 植被相互作用的模拟能力。



图 2 法国 Col de Porte 1993/1994 年积雪个例模拟结果和观测的对比 (a)积雪深度 (b)积雪水当量 (c)积雪密度 (d)积雪表面温度 Fig. 2 Simulated results and the observation for the France Col de Porte 1993/1994 snow case : (a) Snow depth ; (b) SWE ; (c) snow bulk density ; (d) surface temperature

图 3a 给出了积雪深度的模拟结果和实测结果。 可以看出 模式模拟的积雪深度与观测资料的结果是 比较一致的 模拟的积雪积累和融化过程也是比较合 理的。当然 模式的模拟结果与实际情况也存在小的 偏差 模拟的积雪深度比实际情况略微偏少 模拟的积 雪完全融化的时间比实际情况偏慢大致 2~3 天。总 的说来 模式对积雪过程的模拟是比较成功的 这说明 模式对植被覆盖下的积雪变化的复杂过程也有一定描 述能力。图 3b~d 给出了土壤温度的模拟结果。从整 体的情况来看 模式对不同层次的土壤温度的模拟基 本上与实际情况是一致的,模拟的温度变化趋势也反 映出了实际温度变化的主要特点。但模式对不同深度 土壤温度的模拟效果并不相同。模拟的 10 cm 的土壤 温度,除了在积雪开始积累的阶段比观测值有所偏冷 外,与实际情况是比较接近的(图 3b)。而 20 cm 土壤 温度的模拟得到了比较准确的结果,与实际情况完全 吻合(图 3c)相比之下,深层土壤(50 cm)的模拟结果 不太理想,在模拟的前半段时期,模拟结果与观测值之



图 3 BOREAS SSA-OJP 1994/1995 积雪个例模拟结果和观测结果的对比(a)积雪深度(b)10 cm 土壤温度(c)20 cm 土壤温度(d)30 cm 土壤温度

Fig. 3 Simulated results and the observation of BOREAS SSA-OJP 1994/1995 snow case :(a) Snow depth ;(b , c , d) soil temperature : 10 cm(b) , 20 cm(c) , 30cm(d)

间有比较明显的偏差,比实际情况偏低(图 3d)。从结 果来看,深层土壤温度的这种偏差从模式模拟一开始 就出现了。在模式的初始化过程中,并没有严格地给 出土壤温度的垂直分布,而是将土壤温度均采用了相 同的初值,这可能是引起此结果的一个原因。土壤温 度的模拟结果表明模式对土壤温度的模拟基本上是合 理的,至于深层温度的模拟存在的问题,可能与没有考 虑温度的垂直分布、土壤性质的垂直分布的不均匀性 等有关。综合 BOREAS SSA-OJP 1994/1995 的模拟结 果,可以看出模式成功地刻画了植被覆盖条件下积雪 的变化过程,模式对土壤温度的模拟也取得了较好结 果 模式总体上准确地描述了积雪 – 土壤 – 植被系统 变化的基本特征。

综上所述,通过 CLSM 对 France 1988/1989, 1993/ 1994年, BOREAS SSA-OJP 1994/1995年3个积雪个例 的模拟试验,可以发现 CLSM 能够比较准确地模拟不 同积雪变化过程的主要特征。

3 干旱半干旱区的水热传输过程模拟

干旱、半干旱区在全球陆面中占很大比例 尽管不 少研究强调了干旱、半干旱区土壤水热传输的重要性 和特殊性,但目前,这种特殊下垫面及其特殊的物理过 程并没有在气候模式中得到很好反映。CLSM 把改善 干旱/半干旱区的陆面过程及陆气交换过程作为一个 重要的目标,CLSM 全面考虑了水汽输送的多相态的 特征,以及土壤水汽运动对土壤水热传输过程的影响。 20世纪90年代初,在中国黑河流域开展了中日合作 陆气相互作用外场观测试验(HEIFE),该试验的目的 在于研究干旱气候形成和变化的陆面物理过程。 HEIFE 对黑河流域沙漠、戈壁、绿洲不同下垫面的气 象、水文、生物项目进行了长时间的观测,为干旱、半干 旱地区的水分和能量收支的参数化提供了观测依 据^[15,16]。

模拟试验采用了 1991 年 8 月 1~20 日期间沙漠 站的观测资料,包括常规的气象要素、辐射、土壤温度 和湍流通量,除湍流通量的观测外,观测的时间间隔均 为 30 分钟。利用实测的近地面气象要素和辐射资料 作为模式输入场,对沙漠站的情况进行模拟。模式中 土壤类型设置为沙土(sand),土壤颜色取为 2,下垫面 为裸土。模式的初始土壤温度根据观测资料确定为 300 K;由于没有详细的土壤水观测资料,针对沙漠地 区土壤含水量小的特点,模拟试验中土壤含水量的初 值取为 0.05。下面分别从地表能量、表面温度、土壤 温度几个方面对沙漠站的模拟结果进行讨论,通过模 拟结果与实际观测资料的对比分析,检验 CLSM 的模拟能力。

辐射收支是地表能量平衡的主要来源,辐射通量 模拟的准确性是对陆面过程进行准确描述的基本条 件。模拟的净短波辐射(图 4a), 地表向上的长波辐射 (图 4b)和地表总的净辐射 图 4c)均与观测值一致 模 式准确模拟出了地表辐射的实际变化情况。图 4d ,e 为地表感热、潜热通量的模拟结果,从图中可以看到, 感热的模拟结果是比较准确的。模式对感热通量的昼 夜变化也进行了合理的描述 白天感热较强 而夜间感 热通量则很小 甚至出现负值。这种结果和实际情况 是相吻合的。另外,与模拟试验期间8月4日、8月13 日发生的两次降水过程相对应 感热通量明显减小 这 是由于地表温度的降低造成的(图 4d) 这种结果可以 从模式模拟的表面温度的结果中得到证实。模式对潜 热通量的模拟总体上也得到了比较好的结果。在模拟 开始的一段时间内,潜热通量很小 8月4日降水发生 后 潜热通量迅速增加 :8 月 5~12 日这段时间 模拟 和观测的潜热通量都表现出逐渐减小的趋势,但模式 模拟的潜热通量的减少比实际情况有所偏快,这主要 是由于模拟的潜热在降水发生后(8月5~7日)比实 际情况偏大,导致土壤水迅速减少,而8月8~12日期 间模拟的潜热比实际情况偏小。与模拟期中出现在8 月 13 日的降水相对应,潜热通量的变化有再次呈现出 类似的变化过程 模式对潜热通量的模拟是比较准确 的 图 4e)。从上述的模拟结果来看 模式基本上能够 对感热、潜热通量的主要变化特征进行了合理描 述。

图 5a 给出了表面温度的模拟结果,对比可以发 现 模式的模拟值与观测值非常接近。从表面温度变 化趋势来看 模拟结果完全反映了实际的情况 模式刻 画出了表面温度变化的基本特征。模拟期间,有降水 发生的时期 表面温度出现了大幅度的下降,可以看到 这种剧烈的变化在模式的模拟结果中也得到了很好反 映。沙漠站表面温度变化的一个显著特点是幅度很 大 地表温度的昼夜变化非常明显 这在模式的模拟结 果里也得到了很好的反映。当然,模式对表面温度的 模拟也存在不足的地方,模拟的表面温度最大值较观 测值有所偏低 这可能与模式中用土壤表层温度代替 表面温度有一定的关系。图 5b~d 分别给出了不同深 度(10 cm, 20 cm, 40 cm)土壤温度的模拟和观测结果, 模式总体上刻画出了实际土壤温度变化的基本特征, 当然模拟结果与实际的观测也存在一些差别。这与土 壤热力性质在垂直方向上的非均匀性可能有一定的关



图 4 沙漠站地表能量通量模拟结果与观测的对比 (a)净太阳短波辐射 (b)向上长波辐射 (c)总净辐射 (d)感热 (e)潜热

Fig. 4 The simulated and observational surface energy fluxes at the desert site : (a) Net SW radiation ; (b) net LW radiation ; (c) net total radiation ; (d) Sensible Heat (SH) flux ; (e) Latent Heat (LH) flux



图 5 沙漠站土壤表面温度及不同深度土壤温度模拟结果与观测的对比(a)表面温度(b)10 cm 土壤温度(c)20 cm 土壤温度(d)40 cm 土壤温度

Fig. 5 The simulated and observational soil temperature at different depths at the desert site : (a) surface ; (b) 10 cm ; (c) 20 cm ; (d) 40 cm

系,在模拟试验中并没有加以考虑。

通过模拟结果的分析表明,模式对沙漠站地表的 辐射通量、土壤温度、地气之间的湍流通量均作出了合 理而准确的描述,模式对沙漠站的情况给出了比较理 想的模拟结果。这在一定程度上表明:模式能够对干 旱/半干旱地区的陆面过程进行合理的描述,并能够比

较准确地反映出各种地面变量的主要变化特征。

4 热带雨林植被 – 大气相互作用的数 值模拟(ARME83)

277

CLSM 对积雪、干旱/半干旱地区的土壤水热传输 和陆气交换过程的模拟是成功的,这可以从前面的模 拟试验得到证实。然而,CLSM 的目的并不只是局限 于对上述特殊下垫面情况下陆面过程的描述,发展这 样一个综合的陆面过程模式,其最终的目的也正是试 图尽可能真实地反映全球范围内不同下垫面情况下的 陆地 – 大气之间的相互作用和各种交换过程。热带雨 林作为很具代表性的典型的植被类型,历来被看作是 植被 – 大气相互作用研究的一个重点内容^{16~22]}。关 于热带雨林这种稠密植被的陆面过程的研究已经有很 多,这里对此问题进行讨论,目的仅仅是为了检验模式 对此类问题的模拟能力。

模拟试验采用的资料来源于亚马孙区域微气象试验 ARME(Amazonian Region Micrometeorological Experiment) 的外场观测资料。试验观测地点位于南美亚马孙流 域 植被为典型的热带雨林,气象观测资料时间间隔为 1 小时,而通量观测是不连续的,每天观测次数不整。 采用 1983 年 9 月 1 ~ 30 日的实际观测资料驱动陆面 模式,对热带雨林植被 – 大气相互作用进行模拟。模 拟试验中基本参数设置为 土壤类型为粘土(Clay),土颜 色为中等深度(对应模式土壤颜色类型 4),植被类型为 热带雨林(模式中对应 Evergreen Broadleaf Forest),植被 覆盖密度为 80%。模式初值根据实际观测资料来大致 估计,土壤水分初值取为 0.75,土壤温度为 298 K。

首先,来分析 CLSM 对表面温度的模拟结果。图 6a,b分别给出了模式模拟的土壤表面温度和植被叶 面温度,二者均表现出明显的日昼变化;同时,还可以 看到温度的变化幅度相对比较小,平均温度相对比较 高,这是由热带雨林的气候条件所决定的。由于没有 相应的实际观测资料进行对比分析,无法对模拟结果 的准确性进行定量的评估。但从模拟结果来看,模拟 的植被叶面温度的变化明显大于土壤表面温度,这符 合热带雨林地区实际情况,模拟结果是合理的。

热带雨林地区的土壤含水量十分丰富 土壤水的

运动也主要是液态水的输送过程,热带雨林对土壤水 分具有很强的控制作用,这与前面讨论的干旱/半干旱 区的情形有很大不同。图 7a 分别给出了表层(2 cm), 次表层(10 cm)土壤水分(土壤饱和度)的模拟结果,从 图上看,二者具有相似的变化特征,次表层土壤水的变 化略滞后于表层土壤水分的变化。土壤水分在模拟期 间出现了较大的起伏,但是土壤基本上维持在一个较 湿润状态,而较深层土壤水分的变化并不明显,基本保 持近饱和的状态(图略)。由于没有土壤湿度的观测资 料,图7b给出了观测的土壤张力。土壤张力主要与土 壤类型和土壤水分状态有关,给定土壤类型,土壤张力 的变化实质上反映了土壤的水分状态。通过土壤张力 与土壤水分的对比可以看出,模式对土壤含水量的模 拟结果是合理的。当然,土壤水的变化表现为对降水 的明显响应(图7c)。

图 8 给出了模式模拟的能量通量。从图 8a 中可 以看到 模式模拟的净辐射与观测值很接近,基本上准 确地反映了净辐射实际变化的主要特征,模式对净辐 射的模拟效果是理想的,这为模式对热带雨林的陆面 过程的模拟奠定了很好的基础。植被 – 大气之间的交 换过程主要体现在湍流通量上面,要对植被 – 大气的 相互作用进行合理的描述,实质上要求模式必须对地 – 气之间的湍流通量进行准确的模拟。如图 8b,c 所 示 模式模拟的感热、潜热通量也与观测的实际情况吻 合很好。热带雨林的地气交换过程中,潜热通量占据 了绝对重要的地位,这与土壤的水分状态是密切联系 的。上述模拟结果在一定程度上说明,模式对热带雨 林的地表能量平衡和各种湍流通量的描述是合理的。

可见 模式能够较准确地模拟出热带雨林地区土 壤的水热状态,以及地气之间交换过程,CLSM 对热带 雨林地区的植被 – 大气之间的交换过程同样具有较好 的描述能力。



图 6 CLSM 模拟的地表温度(a)和叶面温度(b)

Fig. 6 Surface temperature (a) and leaf temperature (b) simulated by comprehensive land surface model (CLSM)



图 7 (a)模拟的土壤水分(b)观测的土壤张力(c)观测的降水 Fig. 7 (a)Simulated soil water of ARME 83;(b) observational soil tension;(c) observational precipitation

5 青藏高原地气交换过程的模拟试验

青藏高原平均海拔为 4000 m 以上,由于其高大的 地形特征、高原地面吸收的大量的太阳辐射及其特殊 的地理位置 对全球气候 尤其是东亚气候具有深刻的 影响。青藏高原的能量和水分循环对亚洲季风的形成 和演化具有十分重要的作用 高原通过辐射、感热和潜 热形成一个高耸入自由大气中的热源,对气候的形成 和变动具有特殊的热力效应 高原的这种强烈的加热 作用对亚洲季风的爆发具有显著的影响。20世纪90 年代后期,中日合作亚洲季风试验——青藏高原试验 (GAME-Tibet)和中国国家攀登项目"第二次青藏高原 科学试验(TIPEX)"的实施,其科学目标正是为了加强 对青藏高原地气相互作用的研究,包括高原尺度和中 尺度陆面辐射、热量和水分交换的季节变化和空间分 布特征 高原的边界层特征、云和辐射、高原附近地区 的水汽输送和水循环等研究项目。GAME-Tibet和 TIPEX 高原尺度的观测设置了分布范围很广的自动观 测网 同时中尺度观测区域还包括了梯度塔、湍流、探 空等观测项目,为高原地面、边界层过程的研究提供了 风、温、压、湿、辐射、地表温度、土壤温度、土壤水分等 较为完备的观测资料^{24]}。



图 8 模拟和观测的通量 (a)净辐射 (b) 潜热 (c)感热 Fig. 8 Simulated and observational (a) net radiation flux ,(b) latent heat flux , and (c) sensible heat flux

研究中采用了 GAME-Tibet 1998 IOPs 昌都站的观 测资料 对高原的陆气交换过程进行了模拟试验 月的 是为了考察 CLSM 对高原地区土壤水、热过程及地气 之间的能量交换过程的模拟能力。昌都站(32°14'N, 91°37′E)海拔高度大于 4000 m,下垫面以草地为主,其 中夏季草地的覆盖率大致为 70% 而其余 30% 基本上 为裸土,土壤类型大致为沙土,土壤颜色为中等深度。 利用 1998 年 8 月 1~14 日共 14 天的实际观测的地面 气压、地面气温、风速、相对湿度、降水和辐射通量等要 素作为 CLSM 的输入场。同时,根据观测资料确定陆 面的初始状况,在模拟试验中土壤水分初值为0.55, 地表及土壤温度均取为 281 K,对观测期间的陆气相 互作用过程进行了模拟试验。下面通过模拟结果与实 际观测资料的比较和分析 分别从土壤温度、土壤水分 和地表能量平衡等三个方面对模式的模拟结果进行讨 论。

图 9 分别给出了土壤表面温度以及不同深度(5 cm,10 cm,20 cm)土壤温度的模拟值和观测值,由图 可以看出,模式对表面温度和土壤温度的模拟结果均 与实际观测比较一致。为了更定量地估计模式对以上 变量的模拟效果,分别计算了模拟值与实际观测值的 相关系数、绝对偏差、相对偏差等统计量。表面温度的



图 9 昌都土壤表面温度及不同深度土壤温度的模拟结果与观测值的对比(a)表面温度(b)5 cm 土壤温度(c)10 cm 土壤温度(d)20 cm 土壤温度

Fig.9 The simulated and observational soil temperature at different depths at Qamdo :(a) Surface temperature ;(b) 5 cm ;(c) 10 cm ;(d) 20 cm

模拟值和观测值之间的相关系数为 0.969,模拟值与 观测值的绝对偏差为 – 0.70℃,相对偏差为 – 6.7%, 模拟的表面温度比观测值有所偏低,但模拟的效果总 体上是不错的。平均而言,土壤温度的模拟效果优于 表面温度的模拟效果,5 cm,10 cm,20 cm 土壤温度的 模拟值与观测值之间的偏差很小,分别为 0.14℃, 0.10℃,0.28℃,其相对观测值的误差均控制在 3%以 内,深层土壤温度的模拟值比观测值略偏高。这可能 与模式模拟的土壤热通量有关;另外,由于没有非常准 确的有关土壤性质的观测资料,模式在土壤热传导系 数等热力参数的计算上难免会出现一些小的误差,这 可能也是造成模拟的表面温度偏低、而深层土壤温度 偏高的原因之一。

图 10 给出了模拟和观测的表层土壤(20 cm)的土 壤体积含水量,由于土壤水分与降水之间的密切关系, 图中还给出了实测的降水量。由图 10 可以看出,模式 模拟的土壤水分基本反映了实际土壤水分的变化趋 势。模拟期间,模式的模拟结果与观测值比较接近。 观测、模拟的土壤水分的变化均对降水过程有非常明 显的响应,与模拟期内几次明显的降水过程相对应,土 壤湿度在降水发生后明显增加,对应土壤含水量的峰 值;而无降水发生期间,由于土壤表面蒸发,土壤湿度 呈逐步减小的趋势,土壤水分的以上模拟结果是合理 的。但我们注意到,降水发生后一段时期,模式模拟的 结果与实际观测的情况存在偏差,显然出现这种现象 的一个根本原因可能是模式给出的降水入渗偏大。这 一方面可能是由于模式缺乏准确的土壤资料造成的, 但另外一方面也说明模式在表层土壤水的处理方面还 有待改进。

图 11a 给出了地表向上的长波辐射(Rumw)的模 拟和观测值。对比发现,模拟的 Ruppuw 与实际吻合很 好 模式不但对 Rupuw的变化趋势给出了比较准确的描 述,甚至对其一些非常细微的变化特征刻画得非常好, 例如在 8 月 1 日、2 日、8 日和 11 日 ,实际观测的 R_{IPPW} 表现出剧烈的变化,这种变化特征在模式的模拟结果 中也得到很好体现。由于地表长波辐射与地表温度密 切相关 模式对 Ruppy 的模拟效果的好坏 在很大程度上 决定于模式对地表温度模拟的准确性。从这个角度来 看 模式对 Rippy 的模拟结果 实际上是对表面温度模拟 结果合理性的再次验证。图 11b 为模拟的地表净辐射, 从模拟的结果来看 地表吸收的净辐射量值非常大 而 且伴随着非常明显的日变化 正午地表吸收的辐射基本 都在600 W·m⁻²以上 最大的净辐射超过 750 W·m⁻² 而 夜间地表净辐射为负值,量值一般小于100 W·m⁻²,这 是高原地区辐射平衡的一个特点。模式模拟的地表净





Fig. 10 Simulated and observational soil water at Qamdo together with the observational precipitation





辐射的以上变化特征符合高原地区的实际情况。图 11e~d给出了模式模拟的湍流通量。模式模拟的感 热、潜热通量的变化特征和大体的趋势与实际情况是 比较一致的。感热最大值出现在白天,夜间为负值,这 主要决定于地表温度的昼夜变化,感热的这种变化与 温度的日变化特征密切相关。潜热通量的情况则有所 不同,蒸发最强的时候基本上与感热通量的情况则有所 不同,蒸发最强的时候基本上与感热通量的大值相对 应,但夜间的潜热通量则很小,甚至没有。另外,感热 和潜热的量级大致相当,这表明在地表的能量平衡中 具有同等重要的作用。模式模拟结果所表现出来的以 上特征和实际情况非常接近。但模式模拟的湍流通量 也存在一些问题,模拟的感热通量与潜热通量较观测 值均有所偏大,尤其是在白天的偏差则更为明显,这可 能也是造成表面温度结果偏低的主要原因。需要说明 的是,在 CISM 中,我们把土壤最表层的温度近似作为 地表温度,可能也在一定程度上对模式的模拟结果会 产生一些影响,这种处理方法还有待完善。

6 结论和讨论

本文采用大量的外场观测试验的资料,针对不同 下垫面的各种陆面过程和地气交换过程,设计了多组 模拟试验,对陆面模式 CLSM 的性能进行了检验。通 过模式模拟结果与观测资料的对比分析表明:

(1)CLSM 能够比较准确地模拟出不同积雪变化过程的主要特征,对积雪的内部变化及积雪变化有关的物理变量给出了合理的描述。

(2)CLSM 能够对干旱/半干旱地区不同特征的陆 面过程进行合理的描述,并能够比较准确地反映出各 种地面变量的主要变化特征。

(3)CLSM 对热带雨林植被 - 大气相互作用、高原

地气交换过程同样具有很强的模拟能力。

本文的结果表明,CLSM 解决了陆面模式对上述 特殊下垫面描述能力有限的实际问题,保证了对特殊 下垫面进行合理描述的同时,又保证了对其他不同陆 面状况的模拟能力,从而在一定程度上改善了陆面模 式对全球范围内不同下垫面条件下的陆面过程及地气 交换过程的模拟能力。这完全达到了发展 CLSM 的预 期目的,同时也为 CLSM 与气候模式进行耦合试验奠 定了坚实的基础。

参考文献

[1] 陈海山,孙照渤. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展. 南京气象学院学报 2002 25(2):277~288

Chen Haishan , Sun Zhaobo. Review of land-atmosphere interaction and land surface model studies. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese) , 2002 , **25**(2): 277 ~ 288

- [2] 陈海山.陆面模式 CLSM 的设计及其与全球气候模式 NCAR CCM3 的耦合试验. 南京气象学院博士学位论文 ,2002 Chen Haishan. Design of comprehensive land surface model and Its coupling experiment with global climate model NCAR CCM3. Ph. D thesis (in Chinese), Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, 2002
- [3] 陈海山,孙照渤. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 I. 模式设 计. 大气科学 2004 **28**(6): 801~819 Chen Haishan, Sun Zhaobo. Design of a comprehensive land surface

model and its validation, Part I. Model description. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, **28**(6):801~819

- [4] Brun E, David P, Sudul M, et al. A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. J. Glaciol., 1992, 38(128):13~22
- [5] Douville H, Royer J F, Mahfouf J F. A new snow parameterization for the Meteo-France climate model, Part I. Validation in stand-alone experiments. *Climate Dynamics*, 1995, 12 21 ~ 35
- [6] 金继明. 一个用于 GCM 的简单的雪盖-大气-土壤传输模型 (SAST). 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 1999 Jin Jiming. A simple snow-atmosphere-soil(SAST) model used in GCM. Ph.D thesis (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999
- [7] Sun Shufen, Xue Yongkang. Implementing a new snow scheme in simplified simple boisphere model. Adv. Atmos. Sci., 2001, 18(3): 335 ~ 354
- [8] Sun Shufen, Li Jingyang. A sensitivity study on parameterization scheme of snow internal and interfacial processes in snow model. Adv. Atmos. Sci., 2001, 18(5):910~928
- [9] Sellers P J , Hall F G , Margolis H , et al. The Boreal Ecosystem-

Atmosphere Study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year. *Bull. Aemr. Meteor. Sci.*, 1995, **769**: 1549 ~ 1577

- [10] Sellers P J , Hall F G , Kelly R D , et al. BOREAS in 1997 : experiment overview , scientific results and future directions. J. Geophys. Res. , 1997 , 102 (D24), 28731 ~ 28769
- [11] Hall F.G. Introduction to special section: BOREAS in 1999:
 experiments and science overview. J. Geophys. Res., 1999, 104
 (D22): 27627 ~ 27640
- [12] Hardy J P , Davis R E , Jordan R , et al. Snow ablation modeling at the stand scale in a boreal jack pine forest. J. Geophys. Res., 1997, 102: 29397 ~ 29405
- [13] Levine E R, Knox R G. Modeling soil temperature and snow dynamics in northern forests. J. Geophys. Res., 1997, 102 (D24): 29407 ~ 29416
- [14] Link T E, Marks D. Point simulation of seasonal snow cover dynamics beneath boreal forest canopies. J. Geophys. Res., 1999, 104 (D22): 27841 ~ 27858.
- [15] Wang Jiemin, Gao Youxi, Hu Yinqiao, et al. An overview of the HEIFE experiments in the People 's Republic of China. Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales. IAHS Publ., 1993, 212:397 ~ 406
- [16] 胡隐樵,高由禧,王介民,等.黑河试验(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*, 1994, 13(3): 225~236
- [17] Shuttleworth W J, Gash J H C, Lloyd C R, et al. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1984, **110**:1143 ~ 1162
- [18] Shuttleworth W J, Gash J H C, Lloyd C R, et al. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1984, 110:1163~1169
- [19] Dickinson R E, Henderson-Sellers A. Modelling tropical deforestation :A study of GCM land-surface parameterization. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1988, 114(480): 439 ~ 462
- [20] Henderson-Sellers A, Dickinson R E, Walson M F. Tropical deforestation important processes for climate models. *Climatic Change*, 1988, **13**(1):43~69
- [21] Shuttleworth W J, Dickinson R E. Comments on "modelling tropical deforestation :A study of GCM, land-surface parameterizations". *Quart*. J. Roy. Meteor. Soc., 1989, 115(489):1177 ~ 1179
- [22] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al. Modelling the exchanges of energy, water and carbon between the continents and the atmosphere. *Science*, 1997, 275:502~509
- [23] Lean J, Rowntree P R. Understanding the sensitivity of a GCM simulation of Amazonian deforestation to the specification of vegetation and soil characteristics. J. Climate, 1997, 10(6):1216~1235